

Научная статья

УДК 631.811:633.11

DOI: 10.25230/2412-608X-2025-1-201-70-82

Новая цифровая оценка действия азота, фосфора и калия на урожай озимой пшеницы в полевых опытах

Владимир Георгиевич Григулецкий

Кубанский государственный аграрный универси-
тет имени И.Т. Трубилина
Россия, 350044, г. Краснодар, ул. Калинина, д. 13
mail@kubsau.ru

Аннотация. Изложена новая цифровая мето-
дика оценки действия удобрений с разным соотно-
шением NPK на урожай озимой пшеницы в полевых
опытах; принята справедливость утверждения: *уро-
жайность и прибавка урожая от удобрений возраст-
ают при увеличении дозы NPK и пропорциональны
количеству урожая, не достигшего до максималь-
ного (предельного) значения, а также пропорцио-
нальны возможному значению урожая, выше неко-
торого минимального (начального) значения уро-
жая*, поэтому изменение прироста урожая опреде-
ляется дифференциальным уравнением первого по-
рядка в обыкновенных производных. Для оценки
действия разных удобрений (факторов роста) на
урожай растений предложено использовать значе-
ние относительного коэффициента действия фак-
тора роста, для которого получена простая расчет-
ная формула. Для конкретных полевых многолет-
них опытных данных с сортом озимой пшеницы
Мироновская-808 на полях Смоленской опытной
станции ВНИИУА проведены расчеты для трех эле-
ментов питания и установлена их эффективность, а
также урожайность культуры в зависимости от со-
отношения и доз основных элементов питания, по-
казывающие хорошее соответствие опытных и рас-
четных (прогнозных) значений урожая.

Ключевые слова: урожайность, удобрения, ко-
эффициент действия, дифференциальное уравне-
ние, начальные условия, частное решение, относи-
тельное изменение урожайности, азотное удобре-
ние, фосфорное удобрение, калийное удобрение,
«полное» удобрение, соотношение доз, прибавка
урожая

Благодарности. Автор работы благодарен рецен-
зентам за полезное обсуждение существа работы.

Для цитирования: Григулецкий В.Г. Новая циф-
ровая оценка действия азота, фосфора и калия на
урожай озимой пшеницы в полевых опытах // Мас-
личные культуры. 2025. Вып. 1 (201). С. 70–82.

New digital assessment of the effect of nitrogen, phosphorus, potassium on winter wheat yield in field experiments

Griguletsky V.G., head of the department of higher mathe-
matics, professor, doctor of technical sciences

I.T. Trubilin Kuban State Agrarian University
13 Kalinina street, Krasnodar, 350044, Russia
mail@kubsau.ru

Abstract. A new digital method for assessing the
effect of fertilizers with different NPK ratios on winter
wheat yield in field experiments is presented; the va-
lidity of the statement is presented: *yield and yield in-
crease from fertilizers increase with increasing NPK
dose and are proportional to the amount of yield that
has not reached the maximum (limit) value, and also
proportional to the possible value of yield above some
minimum (initial) value of yield, so the change in yield
increase is determined by the first-order differential
equation in ordinary derivatives*. In order to estimate
the effect of various fertilizers (growth factors) on the
crop yield, it is suggested to use the value of the rela-
tive coefficient of action of a growth factor, for which
a simple calculation formula is obtained. For specific
field long-term experimental data with the variety of
winter wheat Mironovskaya-808 on the fields of Smo-
lensk experimental station VNIUA there were con-
ducted calculations for three elements of nutrition and
established their effectiveness, as well as crop yield de-
pending on the ratio and doses of the main elements of
nutrition, showing good correspondence between ex-
perimental and calculated (predicted) values of yield.

Key words: yield, fertilizers, action coefficient,
differential equation, initial conditions, particular solu-
tion, relative change in yield, nitrogen fertilizer, phos-
phorus fertilizer, potassium fertilizer, «complete» fer-
tilizer, dose ratio, yield increase

Acknowledgements. The author is grateful to the
reviewers for helpful discussions on the content of the
article.

Введение. Изучению действия разных
удобрений на урожай и качество зерна
озимой пшеницы в разных почвенно-кли-
матических условиях посвящено большое
количество работ [1–16]. Можно, в частно-
сти, отметить статью Р.Т. Вильдфлуша,
М.Н. Тверезовской [2], где подробно опи-
сано влияние разных удобрений на урожай
и качество зерна озимой пшеницы в усло-
виях Белоруссии; статьи Л.П. Воллейдта,

С.С. Кузнецовой [3–5], в которых изучен азотно-фосфорный обмен в озимой пшенице на разных почвах Нечерноземной зоны Российской Федерации; работу Н.С. Авдониной, Н.М. Яскиной [7] по влиянию свойств дерново-подзолистой почвы и удобрений на урожай и качество озимой пшеницы; работы В.Д. Панникова, В.Г. Минеева [9–11], в которых подробно изложены результаты полевых опытов в разных районах СССР и агрохимические основы увеличения урожайности и повышения качества зерна озимой пшеницы и т.д.

Большие и важные статьи по изучению урожая и качества зерна озимой пшеницы при действии разных удобрений опубликованы работниками Всероссийского научно-исследовательского института удобрений и агропочвоведения имени Д.Н. Прянишникова (ВИУА). В.П. Золотарев, Г.И. Ваулина [16], Т.И. Иванова, Р.Н. Кожемякова [17–19]; В.Г. Сычев, О.В. Рухович, В.А. Романенков и другие описали опыт создания единой базы данных полевых опытов Агрохимслужбы и Геосети [20], а в работах [21–25] подробно описаны результаты опытов изменения запасов органического углерода пахотных земель европейской территории Российской Федерации [21] и вопросы прогнозирования урожая и характеристик урожая в зависимости от условий агроландшафта [22–25]. Современная система организации работы Геосети подробно описана в работе В.Г. Сычева с соавторами [26], где, в частности, отмечается необходимость расширения направлений фундаментальных и поисковых исследований в Географической сети за счет увеличения системных исследований почвенного плодородия и его изменений при различных технологиях производства выращиваемых полевых культур, а также актуализации реестра опытов Географической сети, предусмотрев классификацию опытов по основным факторам воздействия и т.д.

В работах [1–16] изложены важные результаты вегетационных и полевых опытов по исследованию влияния разных факторов на урожай и качество зерна

озимой пшеницы, а в монографии [17] и статьях [18, 19] впервые использованы материалы многофакторных полевых опытов для построения математических моделей закономерностей действия удобрений на урожай, качество зерна и плодородия почвы с целью прогнозирования их эффективности; работы [17–19] выполнены под руководством В.Н. Перегудова с применением метода наименьших квадратов [27].

Материалы и методы. Результаты полевых опытов по действию азотных, фосфорных и калийных удобрений на урожай озимой пшеницы. Чтобы исключить неточности и разночтения, изложим результаты статьи [18] более детально.

Полевые опыты с сортом озимой пшеницы Мироновская-808 проведены в 1969 г. на Смоленской опытной станции ВНИИУА. Почва дерново-подзолистая, среднесуглинистая, $pH_{\text{сол.}}$ 4,3–4,5, гидролитическая кислотность 1,8 мг-экв/100 г почвы, сумма поглощенных оснований 5,5–6,0 мг-экв/100 г почвы, содержание обменного калия (по Масловой) 8–10 мг/100 г почвы, подвижного фосфора (по Кирсанову) 2,5–4,5 мг/100 г почвы, степень подвижности фосфора (в 0,03 н. K_2SO_4) 0,03–0,04 мг/л.

Озимая пшеница высевалась третьей культурой в звене севооборота: ячмень с подсевом клевера, клевер одного года пользования, озимая пшеница, яровые зерновые, картофель.

В опыте принято ежегодное внесение удобрений по схеме, исключение составлял клевер, под который не вносился азот.

Таким образом, изучали действие внесенных под озимую пшеницу удобрений и остаточное действие неиспользованных питательных веществ, внесенных под предшествующие культуры в 1967 и 1968 гг. Под озимую пшеницу половину азотных (N_{aa}), фосфорные (P_{cr}) и калийные (K_x) удобрения вносили под основную обработку, вторую половину азотных – весной в подкормку. Площадь опытной деланки 115 м², учетной – 75 м². Повторность опыта двукратная.

Схема опыта включала 81 вариант и представляла собой выборку из полной факториальной схемы $9 \times 9 \times 9$. В связи с тем, что полная факториальная схема с тремя факторами (N, P и K) и девятью градациями (включая нулевую) каждого фактора содержала бы 729 вариантов, при планировании этого опыта был введен четвертый условный фактор. Этим фактором S был взят фон NPK в дозах 0; 1 и 2.

Основные факторы N, P, K были взяты в дозах 0; 3 и 6. Благодаря введению нового фактора и определенной выборке доз основных факторов получена схема опыта, соответствующая формуле $3 \times 3 \times 3 \times 3$ (три дозы каждого из трех видов удобрений и три фона NPK) (табл. 1).

Таблица 1

Схема опыта (условные единицы доз)

P ₂ O ₅	K ₂ O	S = 0			S = 1			S = 2	
		N			N			N	
		0	3	6	0	3	6	0	3
0	0	000	300	600	111	411	711	222	522
	3	003	303	603	114	414	714	225	525
	6	006	306	606	117	417	717	228	528
3	0	030	330	630	141	441	741	252	552
	3	033	333	633	144	444	744	255	555
	6	036	336	636	147	447	747	258	558
6	0	060	360	660	171	471	771	282	582
	3	063	363	663	174	474	774	285	585
	6	066	366	666	177	477	777	288	588

В опытах за единицу дозы действующего вещества азота и калия принято 20 кг/га, а доза фосфора составляла 30 кг/га, поэтому вариант 744 в обычных единицах (кг/га) имел следующий вид N₁₄₀P₁₂₀K₈₀ и т. д.

Схема размещения вариантов в повторениях по блокам определялась в таблице 2.

Из таблицы 2 видно, что повторения опытов разделены на девять блоков, каждый из которых содержал девять вариантов, таким образом, блоки трех категорий (столбцы, строки, квадраты) состояли из равнозначных по количеству внесенных удобрений и их сочетаний.

Таблица 2

Размещение вариантов в повторениях по блокам

I повторение							
525	717	000	144	852	336	471	288
441	633	258	060	777	585	306	114
366	882	174	228	603	411	555	030
600	225	417	552	036	744	888	363
858	141	333	477	285	660	714	522
774	066	582	303	111	828	630	447
033	558	741	885	360	177	222	606
282	474	666	711	528	003	147	855
117	300	825	636	444	252	063	771
II повторение							
285	777	360	528	603	111	852	444
006	822	414	330	747	255	663	588
141	633	558	474	882	066	717	300
714	306	222	147	555	630	471	063
660	585	177	003	411	828	336	252
858	441	033	282	366	774	525	117
333	258	741	666	174	582	000	825
477	060	885	711	228	303	144	636
522	114	606	855	030	447	288	771

В таблице 3 приведены фактические средние значения урожая озимой пшеницы и соответствующие дозы удобрений.

Таблица 3

Фактические значения среднего урожая озимой пшеницы (ц/га) по вариантам опытов

Вариант	Урожай, ц/га	Вариант	Урожай, ц/га	Вариант	Урожай, ц/га
000	16,9	111	28,0	222	35,6
003	16,7	114	31,7	225	36,4
006	19,6	117	30,5	228	34,0
030	29,2	141	36,2	252	37,7
033	33,6	144	33,6	255	40,7
036	37,2	147	34,8	258	43,9
060	32,2	171	36,2	282	41,7
063	35,6	174	41,6	285	44,1
066	37,1	177	40,4	288	44,1
300	19,4	411	21,4	522	33,1
303	15,0	414	33,3	525	38,6
306	18,9	417	32,5	528	37,8
330	37,9	441	35,3	552	40,3
333	38,3	444	42,9	555	42,5
336	35,6	447	38,8	558	45,6
360	40,2	471	42,4	582	41,3

Окончание таблицы 3

363	41,6	474	43,4	585	41,2
366	42,0	477	45,3	588	44,0
600	16,4	711	26,8	822	36,2
603	23,2	714	29,0	825	34,5
606	16,4	717	32,6	828	32,1
630	30,9	741	34,7	852	44,2
633	38,3	744	35,6	855	37,3
636	34,0	747	42,9	858	36,8
660	33,8	771	39,8	882	38,5
663	44,4	774	35,8	885	39,6
666	40,3	777	44,1	888	45,9

Выделенные значения вариантов определяют дозы «полных» удобрений (NPK) для озимой пшеницы и соответствующего урожая; по этим данным построена кривая роста урожая в опытах (рис. 1).

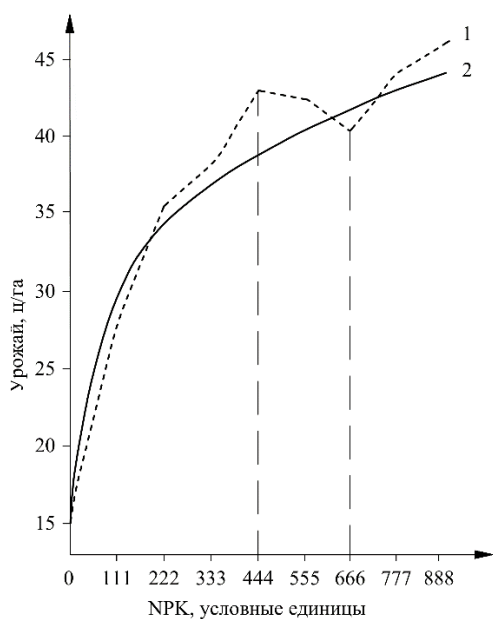


Рисунок 1 – Рост урожая в опыте в зависимости от доз удобрений: 1 – фактический урожай; 2 – вычисленный урожай; единичная доза $N_{20}P_{30}K_{20}$

Расчетная кривая (2) построена на основе следующего уравнения:

$$y = 17,00 + 3,260N^{0,5} + 11,331P^{0,5} - 1,237N - 2,085P + 0,650(NP)^{0,5} + 0,864(PK)^{0,5}, \quad (1)$$

Это уравнение получено методом наименьших квадратов из условия минимума остаточного стандартного отклонения [27].

На рисунке 2 показаны опытные кривые прибавки урожая озимой пшеницы в зависимости от доз азота на разных фонах фосфора.

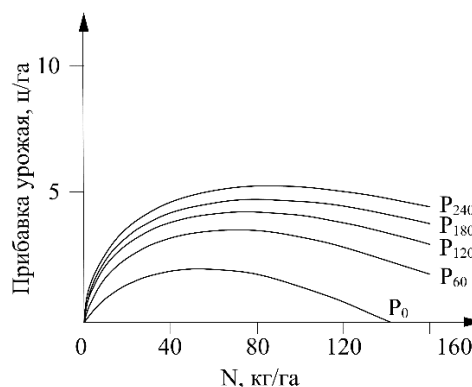


Рисунок 2 – Эффективность применения на озимой пшенице азота на разных фонах фосфора

Из кривых на рисунке 2 видно, что при дозах азота более N_{60} на разных фонах фосфора происходит уменьшение прибавки урожая озимой пшеницы, поэтому в опытах нецелесообразно использовать дозы азота N_{80} , N_{120} и N_{160} .

На рисунке 3 приведены опытные кривые прибавки урожая озимой пшеницы в зависимости от доз калия на разных фонах фосфора.

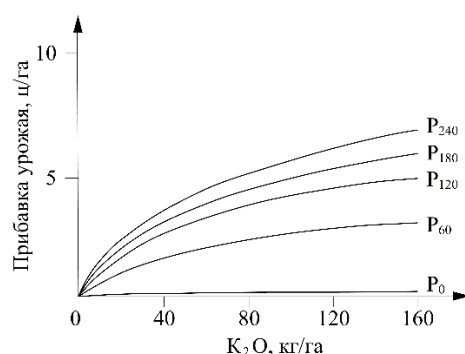


Рисунок 3 – Эффективность применения на озимой пшенице калия на разных фонах фосфора

Из кривых на рисунке 3 видно, в опытах целесообразно было использовать дозы калия больше, чем K_{160} , потому что при меньших дозах при разных фонах фосфора нет максимального значения прибавки урожая озимой пшеницы.

На рисунке 4 приведены опытные кривые прибавки урожая озимой пшеницы в зависимости от доз фосфора на разных фонах азота и калия.

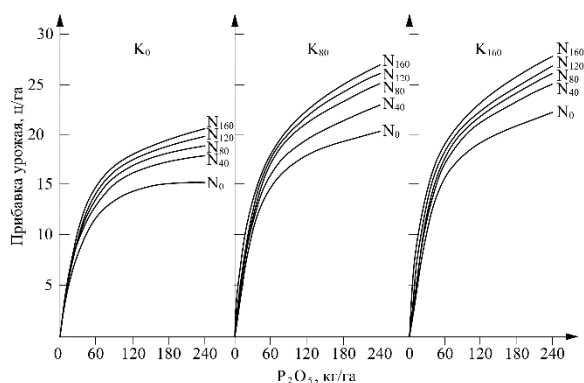


Рисунок 4 – Эффективность применения на озимой пшенице фосфора на разных фонах азота и калия

В статье [18] специально отмечается, что эффективность фосфорных удобрений заметно возросла при совместном внесении их с азотом и калием; при раздельном внесении фосфора в дозах P_{60} , P_{120} , P_{180} и P_{240} прибавки урожая составили соответственно 11,9; 14,3; 15,3 и 15,4 ц/га, а на фоне $N_{160}K_{160}$ — соответственно 17,9; 22,9; 25,7; 27,5 ц/га.

При сравнении эффективности парных сочетаний видно, что калий оказывал несколько большее влияние на действие фосфора, чем азот.

В целом по опыту проявилось исключительно сильное действие фосфорных удобрений, несмотря на то, что в течение трех лет происходило наложение схемы, включающей высокие дозы удобрений.

Определение содержания фосфора на делянках, получивших в предшествующие годы различные дозы фосфорных удобрений, показало, что за эти годы содержание подвижного фосфора увеличилось от 5 до 15 мг/100 г почвы. Такой уровень

обеспеченности почвы фосфатами не снижал эффективности внесенных удобрений.

Азотные удобрения действовали слабо. Эффективность их несколько повышалась при совместном внесении с фосфором. Низкую эффективность азота в опыте можно объяснить посевом озимой пшеницы по клеверу.

Калийные удобрения действовали только при совместном внесении с фосфорными. Эффективность калия возрастала с увеличением доз фосфорных удобрений при их совместном внесении и т.д.

Можно отметить, что разная эффективность сочетаний доз удобрений на урожайность и прибавку урожая может определяться неодинаковым отношением элементов питания.

На рисунке 5 показаны расчетные кривые (по уравнению (1) прибавки урожая озимой пшеницы при разных отношениях питательных веществ (N, P, K).

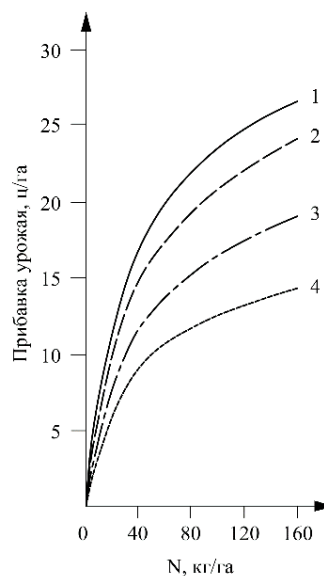


Рисунок 5 – Прибавка урожая озимой пшеницы при разных отношениях N : P : K: 1 кривая – N : P : K равно 1 : 1,5 : 1; 2 кривая – N : P : K равно 1 : 1 : 1; 3 кривая – N : P : K равно 1 : 0,5 : 1; 4 кривая – N : P : K равно 1 : 0,25 : 1

Из кривых на рисунке 5 видно, что прибавки урожая озимой пшеницы увеличивались при всех опытных значениях соотношения NPK, однако наиболее

значительное влияние на урожай оказывала доза фосфора.

Новая цифровая методика оценки действия факторов роста и урожайности сельскохозяйственных культур. Принимаем справедливость следующего утверждения: *урожайность (y) и прибавка урожая возрастают при увеличении количества фактора роста (x) и пропорциональны количеству урожая ($A - y$), не достигшего до максимального предельного значения (A), и возможному значению урожая ($B + y$), выше некоторого минимального (начального) значения (B) урожая [28]. Таким образом, можно записать следующее дифференциальное уравнение первого порядка в обыкновенных производных:*

$$\frac{dy}{dx} = c(A - y)(B + y), \quad (2)$$

где c – коэффициент пропорциональности, называемый «*относительным коэффициентом действия фактора роста*»;

A – постоянный параметр, определяемый по экспериментальным (опытным) данным и равный «*максимальному возможному урожаю*»;

B – постоянный параметр, определяемый по экспериментальным (опытным) данным и равный «*начальному*» значению урожая определенной культуры для конкретной почвы, гидрометеороусловий района и ландшафта.

Для дифференциального уравнения (2) назовем «начальные» условия:

$$y(x_0) = y_0 = B, \quad (3)$$

где x_0, y_0 – постоянные параметры, определяющие соответственно «начальное» значение фактора роста (x_0) и «начальное» значение урожая (y_0).

Решение дифференциального уравнения (2), удовлетворяющее начальным условиям (3), можно записать в виде:

$$\ln(A - y_0) - \ln(B + y_0) = \ln(A - y) - \ln(B + y) + c(A + B)(x - x_0), \quad (4)$$

или в виде:

$$y(x) = \frac{A(B + y_0)\exp[c(A + B)(x - x_0)] - B(A - y_0)}{(B + y_0)\exp[c(A + B)(x - x_0)] + (A - y_0)}, \quad (5)$$

Относительное изменение урожайности сельскохозяйственных культур можно определять отношением $y = z \cdot A$, или находить по формуле:

$$z(x) = \frac{A(B + y_0)\exp[c(A + B)(x - x_0)] - B(A - y_0)}{A(B + y_0)\exp[c(A + B)(x - x_0)] + A(A - y_0)}, \quad (6)$$

Если принять $A = 100$, то для основных элементов питательных веществ можно определить «таблицы урожайности», в которых «коэффициент действия» (c) будет выражен в % от максимального значения, что весьма удобно для практических расчетов.

Значение коэффициента A можно найти по формуле:

$$A + B = \frac{2(y_1 + B)(y_2 + B)(y_3 + B) - (y_2 + B)^2(y_1 + y_3 + 2B)}{(y_1 + B)(y_3 + B) - (y_2 + B)^2}, \quad (7)$$

где y_1, y_2, y_3 – экспериментальные значения урожая, установленные через равные интервалы изменения фактора роста (x), т. е. $x_3 - x_2 = x_2 - x_1$ и соответственно $y(x_1) = y_1, y(x_2) = y_2, y(x_3) = y_3$; позволяет найти значение *максимально возможного урожая конкретного растения для определенных условий, состава почв и гидрометеорологических данных.*

Эффективность конкретного удобрения, мелиоранта и компоста, в частности, можно оценивать по значению «*относительного коэффициента действия фактора роста*», который можно находить по формуле:

$$c = \frac{\ln[(A - y_0)(B + y)] - \ln[(B + y_0)(A - y)]}{(A + B)(x - x_0)}, \quad (8)$$

Если с неудобренной почвы получен некоторый урожай ($y_{\text{ну}}$), соответствующий некоторому запасу питательных веществ в почве ($x = x_{\text{ну}} = b$), то из последней формулы можно получить соотношение:

$$x_{\text{ны}} = b = \frac{\ln(A) - \ln(A - y_{\text{ны}}) + \ln(B + y_{\text{ны}}) - \ln(B)}{c(A + B)}, \quad (9)$$

или:

$$x_{\text{ны}} = b = \frac{1}{c(A + B)} \left[\ln\left(\frac{A}{A - y_{\text{ны}}}\right) + \ln\left(\frac{B + y_{\text{ны}}}{B}\right) \right]. \quad (10)$$

Формулы (9) и (10) определяют запас питательных веществ в почве до применения удобрений. Предложенная математическая модель физиологического закона действия факторов роста на урожайность (продуктивность) сельскохозяйственных культур является обобщением известного закона Э.А. Митчерлиха [29–32].

Примеры расчетов.

Пример 1. Рассмотрим фактические значения среднего урожая озимой пшеницы (ц/га) при использовании «полных» удобрений (НРК) в опытах Т.И. Ивановой, Р.Н. Кожемяковой [18], представленные в таблице 3 и на рисунке 1. Воспользуемся формулой (7) и определим максимально возможный урожай озимой пшеницы (A) по опытным данным:

$$y_0(0) = 16,9; B = 16,9; y_1(70) = 28,0; y_2(280) = 43,5; y_3(490) = 45,9,$$

$$A + 16,9 = \frac{2(16,9 + 28,0)(16,9 + 43,5)(16,9 + 45,9) - (60,4)^2(107,7)}{(44,9)(62,8) - (60,4)^2},$$

или:

$$A + 16,9 = 63,112, \quad A = 46,212.$$

Воспользуемся формулой (8), определим значение относительного коэффициента действия фактора роста (c_1) на интервале от значения $x_0 = 0$, где $y_0(0) = 16,9$ ц/га до значения $x_1 = 70,0$, где $y_1(70) = 28,0$ ц/га:

$$c = \frac{\ln[(46,212 - 16,9)(16,9 + 28,0)] - \ln[(16,9 + 16,9)(46,212 - 28,0)]}{(46,212 + 16,9)(70 - 0)},$$

или:

$$c_1 = 0,0001720.$$

Зависимость среднего урожая озимой пшеницы на интервале изменения доз элементов питания от $x_0 = 0$ до $x_1 = 70$ кг/га определяется по формуле (5) в виде:

$$y(x) = \frac{46,212 \cdot 33,8 \exp(0,000172 \cdot 63,112 \cdot x) - 495,3728}{33,8 \exp(0,000172 \cdot 63,112 \cdot x) + 29,312}.$$

По этой формуле можно найти значения:

$$y_0(0) = \frac{1066,5928}{63,112} = 16,900 \text{ ц/га},$$

$$y_1(70) = \frac{2844,101863}{101,576231} = 27,999 \text{ ц/га},$$

и расчетное (прогнозное) значение урожая озимой пшеницы при $x_2 = 140,0$ кг/га:

$$y_2(140) = \frac{6644,407375}{183,812566} = 36,148 \text{ ц/га}.$$

Фактическое значение среднего урожая озимой пшеницы при дозе полного удобрения $x_2 = 140$ кг/га равно $y_{\text{ф}}(140) = 38,3$ ц/га, т. е. отличается от расчетного значения $y_2(140) = 36,148$ ц/га менее, чем на 6 %.

По аналогичной методике расчета получены данные таблицы 4.

Таблицы 4

Фактические и расчетные (прогнозные) значения урожая озимой пшеницы в зависимости от доз «полных» удобрений

№№ п. п.	Доза удобрений x_i , кг/га	Урожай		Коэффициент действия $10^3 \cdot c_i$
		опыт y_i , ц/га	расчет y , ц/га	
1	0,0	16,9	16,90	—
2	70,0	28,0	28,00	0,172
3	140,0	38,3	36,15	0,236
4	210,0	42,9	43,17	0,215
5	280,0	43,5	44,89	0,047
6	350,0	40,3	43,99	–0,189
7	420,0	44,1	34,08	0,248
8	490,0	45,9	45,49	0,439

Из данных таблицы 4 следует, что при дозе «полных» удобрений $x_5 = 280$ кг/га произошло значительное уменьшение «коэффициента действия» фактора роста, а при $x_6 = 350$ кг/га значение коэффициента действия стало отрицательным, и уменьшилась средняя урожайность озимой пшеницы, т. е. от недостатка минеральных удобрений (от $x_5 = 280$ кг/га до $x_6 = 350$ кг/га) озимая пшеница находилась в стрессовых условиях [33; 34].

Стресс у растений определяется как процесс и результат взаимодействия биологического объекта с возмущающим фактором, доза действия которого превышает порог чувствительности объекта (растения) [33]; в результате растение входит в стрессовое состояние.

Стрессовые факторы имеют естественный или антропогенный характер: освещенность, водный дефицит, минеральный дефицит, высокая и низкая температура, гербициды, нитраты, загрязнение воды и воздуха, кислотные дожди и др., в растениях имеется организованная система защиты от воздействия неблагоприятных факторов внешней среды [33].

В данном положении *растение находится в состоянии стресса* (клетки растения сохраняются в особом состоянии повышенной резистентности, которое является «первой фазой фенотипического приспособительного процесса; из-за стресса в фенотипе клетки проявляются признаки, заложенные в генотипе и экспрессируются «спящие гены» ([34], стр. 135). В стрессе клетки растений могут пребывать несколько часов и несколько дней. Длительность стрессового состояния определяется природой действующего фактора и для возобновления нормальной жизнедеятельности клетки необходимо выйти из стресса ([34], стр. 114). В монографии [34] особенно подробно изложены основные вопросы стресса корневой системы проростков от мощности действующих факторов ([34], стр. 26, рис. 1) (рис. 6).

В монографии Т.В. Веселовой с соавторами [34] отмечается, что «ступенчатые кривые роста» имеют области, где ответ клетки медленно нарастает с увеличением дозы факторы роста (плато), и перегибы (пороги), при которых происходит резкое изменение эффекта. Изменение мощности воздействия и сроков контроля ростового процесса может трансформировать кривые с «плато» в S-образные или экспоненциальные. Кривые с «плато» указывают на две причины торможения роста: при малых дозах фактора стресс имеет «генетическую» природу (задержка процесса деления клеток), а при больших дозах – стресс определяется гибелью клеток растений из-за массовых деструктивных процессов. Результаты определения коэффициента действия фактора роста подтверждают основные положения механизма стресса растений.

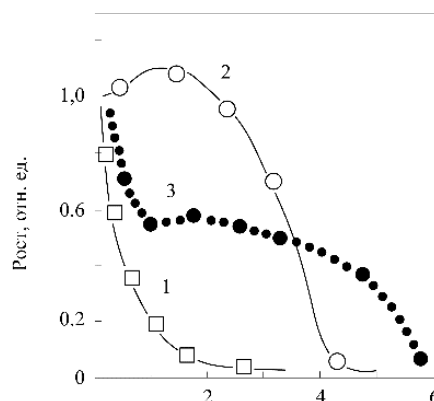


Рисунок 6 – Зависимость роста корневой системы проростков от «дозы» фактора роста: кривая 1 – мощность действующего фактора небольшая; кривая 2 – мощность действующего фактора средняя и стресс регистрируется с некоторой задержкой; кривая 3 – мощность действующего фактора средняя, но стресс регистрируется в ранние сроки

Пример 2. Рассмотрим фактические значения прибавки урожая зерна озимой пшеницы при внесении калия на разных фонах фосфора (P_{60}) и азота (N_{40}) (рис. 3, табл. 5).

Таблица 5
Фактические и расчетные (прогнозные) значения прибавки урожая озимой пшеницы в зависимости от доз калийных удобрений

№№ п. п.	Доза калия x_i	Прибавка урожая		Коэффициент действия $10^3 \cdot c_i$
		опыт y_i , ц/га	расчет u , ц/га	
1	K_0	13,1	13,10	–
2	K_{40}	14,9	14,90	0,053
3	K_{80}	15,6	16,71	0,021
4	K_{120}	16,1	16,30	0,015
5	K_{160}	16,6	16,60	0,015

По формуле (7) находим максимально возможную прибавку урожая озимой пшеницы (A) по следующим опытным данным:

$$B = 13,1; y_1(80) = 15,6; y_2(120) = 16,1; y_3(160) = 16,6,$$

$$A + 13,1 = \frac{2(13,1 + 15,6)(13,1 + 16,1)(13,1 + 16,6) - (29,2)^2(58,4)}{(28,7)(29,7) - (29,2)^2},$$

или:

$$A + 13,1 = 58,4, \quad A = 45,3.$$

По формуле (8) находим значение относительного коэффициента действия фактора роста

(c_1) на интервале от $x_0 = 0,0$, где $y_0(0) = 13,1$ ц/га, до значения $x_1 = 40,0$, где $y_1(40) = 14,9$ ц/га:

$$c = \frac{\ln[(45,3 - 13,1)(13,1 + 14,9)] - \ln[(13,1 + 13,1)(45,3 - 14,9)]}{(45,3 + 13,1)(40 - 0)},$$

или:

$$c_1 = 0,000053.$$

Зависимость прибавки урожая озимой пшеницы на интервале изменения калийных удобрений от $x_0 = 0,0$ до $x_1 = 40$ кг/га определяется по формуле (5) в виде:

$$y(x) = \frac{45,3 \cdot 26,2 \exp(0,000053 \cdot 58,4 \cdot x) - 421,82}{26,2 \exp(0,000053 \cdot 58,4 \cdot x) + 32,2}.$$

По этой формуле можно найти значения:

$$y_0(0) = \frac{765,04}{58,4} = 13,10 \text{ ц/га},$$

$$y_1(40) = \frac{921,466}{61,853} = 14,899 \text{ ц/га},$$

и расчетное (прогнозное) значение прибавки урожая озимой пшеницы при $x_2 = 80,0$ кг/га:

$$y_2(80) = \frac{1098,509616}{65,761} = 16,71 \text{ ц/га}.$$

По аналогичной методике расчета получены данные таблицы 5.

Пример 3. Рассмотрим фактические значения прибавки урожая зерна озимой пшеницы при внесении доз калия на разных фонах фосфора (P_{60}) и азота (N_{80}) (рис. 3, табл. 6).

Таблица 6

Фактические и расчетные (прогнозные) значения прибавки урожая озимой пшеницы в зависимости от доз калийных удобрений

№№ п. п.	Доза калия x_i	Прибавка урожая		Коэффициент действия $10^3 \cdot c_i$
		опыт y_i , ц/га	расчет y , ц/га	
1	K_0	13,7	13,70	—
2	K_{40}	15,4	15,40	0,311
3	K_{80}	16,1	16,65	0,162
4	K_{120}	16,7	16,69	0,165
5	K_{160}	17,2	17,20	0,165

По формуле (7) находим максимально возможную прибавку урожая озимой пшеницы (A) по следующим опытными данным:

$$B = 13,7; y_1(80) = 16,1; y_2(120) = 16,7; y_3(160) = 17,2,$$

$$A + 13,7 = \frac{2(13,7 + 16,1)(13,7 + 16,7)(13,7 + 17,2) - (30,4)^2(60,7)}{(29,8)(30,9) - (30,4)^2},$$

или:

$$A + 13,7 = 33,131, A = 19,431 \text{ и т. д.}$$

Расчетные (прогнозные) значения прибавки урожая озимой пшеницы в зависимости от доз калийных удобрений приведены в таблице 6.

По аналогичной методике изложим следующие примеры расчетов.

Пример 4. Рассмотрим фактические данные прибавки урожая озимой пшеницы при разных уровнях питания и внесении разных доз калия (табл. 7).

Таблица 7

Фактические и расчетные (прогнозные) значения прибавки урожая озимой пшеницы при внесении калийного удобрения

№№ п. п.	Доза калия x_i	Прибавка урожая		Коэффициент действия $10^3 \cdot c_i$
		опыт y_i , ц/га	расчет y , ц/га	
Фон N_0P_{60}				
1	K_0	11,9	11,90	—
2	K_{40}	13,6	13,60	0,755
3	K_{80}	14,3	14,43	0,591
4	K_{120}	14,8	14,69	0,872
5	K_{160}	15,0	14,999	0,873
Фон N_0P_{120}				
6	K_0	14,3	14,30	—
7	K_{40}	16,8	16,80	0,403
8	K_{80}	17,8	18,42	0,225
9	K_{120}	18,6	18,57	0,235
10	K_{160}	19,2	19,200	0,235
Фон N_0P_{180}				
11	K_0	15,3	15,30	—
12	K_{40}	18,2	18,20	0,236
13	K_{80}	19,5	20,49	0,126
14	K_{120}	20,4	20,63	0,099
15	K_{160}	21,2	21,200	0,099
Фон N_0P_{240}				
16	K_0	15,4	15,40	—
17	K_{40}	18,8	18,80	0,305
18	K_{80}	20,3	20,24	0,173
19	K_{120}	21,4	21,52	0,155
20	K_{160}	22,3	22,299	0,155

Из данных таблицы 7 следует, что увеличение дозы фосфорных удобрений от P_{60} до P_{180} приводит к уменьшению относительного коэффициента действия фактора роста калийных удобрений, но при значении P_{240} происходит увеличение значения коэффициента действия калийных удобрений, что объясняется физиологическими причинами действия калия на растение озимой пшеницы [35–37].

Пример 5. Рассмотрим фактические данные прибавки урожая озимой пшеницы при разных уровнях питания и внесении разных доз фосфора (табл. 8).

Таблица 8

Фактические и расчетные (прогнозные) значения прибавки урожая озимой пшеницы при внесении фосфорных удобрений

№№ п. п.	Доза фос- фора x_i	Прибавка урожая		Коэффици- ент действия $10^3 \cdot c_i$
		опыт y_i , /га	расчет y , ц/га	
Фон N_0K_0				
1	P_{60}	11,9	11,90	—
2	P_{120}	14,3	14,30	0,761
3	P_{180}	15,3	15,08	1,429
4	P_{240}	15,4	15,400	1,413
Фон $N_{40}K_{40}$				
5	P_{60}	14,9	14,90	—
6	P_{120}	18,6	18,60	0,375
7	P_{180}	20,5	20,51	0,373
8	P_{240}	21,4	21,399	0,373
Фон $N_{80}K_{80}$				
9	P_{60}	16,1	16,10	—
10	P_{120}	20,4	20,40	0,316
11	P_{180}	22,7	22,78	0,301
12	P_{240}	23,9	23,900	0,301
Фон $N_{120}K_{120}$				
13	P_{60}	17,1	17,10	—
14	P_{120}	21,7	21,70	0,263
15	P_{180}	24,3	24,46	0,243
16	P_{240}	25,8	25,800	0,243
Фон $N_{160}K_{160}$				
17	P_{60}	17,9	17,90	—
18	P_{120}	22,9	22,90	0,226
19	P_{180}	25,7	26,10	0,190

Из данных таблицы 8 следует, что при увеличении дозы фосфорных удобрений значение относительного коэффициента действия фактора роста уменьшается при

всех разных фоновых количествах азота и калия.

Пример 6. Рассмотрим фактические данные прибавки урожая озимой пшеницы при разных уровнях питания доз азота (табл. 9).

Таблица 9

Фактические и расчетные (прогнозные) значения прибавки урожая озимой пшеницы при внесении азотных удобрений

№№ п. п.	Доза азота x_i	Прибавка урожаея		Коэффици- ент дей- ствия $10^3 \cdot c_i$
		опыт y_i , ц/га	расчет y , ц/га	
Фон $P_{60}K_0$				
1	N_0	11,9	11,90	—
2	N_{40}	13,1	13,10	0,454
3	N_{80}	13,7	13,89	0,324
4	N_{120}	14,1	14,14	0,290
5	N_{160}	14,4	14,399	0,290
Фон $P_{120}K_0$				
6	N_0	14,3	14,30	—
7	N_{40}	16,2	16,20	0,326
8	N_{80}	16,9	17,35	0,154
9	N_{120}	17,5	17,49	0,157
10	N_{160}	18,0	17,999	0,157
Фон $P_{180}K_0$				
11	N_0	15,3	15,30	—
12	N_{40}	17,5	17,50	0,271
13	N_{80}	18,4	19,14	0,139
14	N_{120}	19,1	19,16	0,126
15	N_{160}	19,7	19,700	0,126
Фон $P_{240}K_0$				
16	N_0	15,4	15,40	—
17	N_{40}	18,0	18,00	0,337
18	N_{80}	19,0	19,77	0,173
19	N_{120}	19,9	19,81	0,194
20	N_{160}	20,6	20,600	0,194

Из данных таблицы 9 следует, что при увеличении дозы азота значение относительного коэффициента действия фактора роста уменьшается при фоновых количествах фосфора и калия, однако при фоне $P_{240}K_0$ значение коэффициента действия азота повышается, что объясняется физиологическими причинами действия азота на растение озимой пшеницы [35–37].

Пример 7. Рассмотрим фактические данные прибавки урожая озимой пшеницы при разных уровнях доз азота (табл. 10).

Таблица 10

Фактические и расчетные (прогнозные) значения прибавки урожая озимой пшеницы при внесении азотных удобрений

Таблица при исследовании азотных удобрений				
№№ п. п.	Доза азота x_i	Прибавка урожая		Коэффици- ент действия $10^3 \cdot c_i$
		опыт y_i , ц/га	расчет y , ц/га	
Фон $P_{60}K_{80}$				
1	N_0	14,3	14,30	—
2	N_{40}	15,6	15,60	0,034
3	N_{80}	16,1	16,90	0,013
4	N_{120}	16,5	16,60	0,011
5	N_{160}	16,9	16,900	0,011
Фон $P_{120}K_{80}$				
6	N_0	17,8	17,80	—
7	N_{40}	19,6	19,60	0,030
8	N_{80}	20,4	21,41	0,013
9	N_{120}	20,9	21,20	0,008
10	N_{160}	21,4	21,400	0,008
Фон $P_{240}K_{80}$				
11	N_0	20,3	20,30	—
12	N_{40}	22,7	22,70	0,030
13	N_{80}	23,9	25,11	0,015
14	N_{120}	24,7	25,10	0,009
15	N_{160}	25,5	25,500	0,009

Из данных таблицы 10 следует, что при увеличении дозы азотных удобрений значение относительного коэффициента действия фактора роста уменьшается при фоновых количествах фосфора и калия от $P_{60}K_{80}$ до $P_{240}K_{80}$.

Пример 8. Рассмотрим фактические данные прибавки урожая озимой пшеницы при разных уровнях питания и постоянных отношениях азота, фосфора и калия (табл. 11).

Таблица 11

Прибавки урожая озимой пшеницы при разных уровнях питания и постоянных отношениях азота, фосфора и калия ($N : P : K$)

Соотношение $N : P : K$	Доза азота			
	N_{40}	N_{80}	N_{120}	N_{160}
1 : 1,5 : 1	17,0	21,9	24,8	26,7
1 : 1 : 1	14,9	19,4	22,2	24,2
1 : 0,5 : 1	11,7	15,3	17,6	19,2
1 : 0,25 : 1	9,2	11,9	13,4	14,5

Из данных таблицы 11 следует, что при всех отношениях азота, фосфора и калия, значение прибавки урожая озимой тем выше, чем больше доза фосфорных удобрений.

В таблице 12 представлены фактические и расчетные (прогнозные) значения прибавки урожая озимой пшеницы при разных отношениях азота, фосфора и калия, а также соответствующие значения «относительного коэффициента» действия фактора роста в зависимости от доз азотного удобрения.

Таблица 12

Фактические и расчетные (прогнозные) значения прибавки урожая озимой пшеницы при внесении азотного удобрения

№№ п. п.	Доза азота x_i	Прибавка урожа́я		Коэффици- ент действия $10^3 \cdot c_i$
		опыт y_i , ц/га	расчет y , ц/га	
(N : P : K) 1 : 1,5 : 1				
1	N ₄₀	17,0	17,00	—
2	N ₈₀	21,9	21,90	0,334
3	N ₁₂₀	24,8	25,16	0,289
4	N ₁₆₀	26,7	26,699	0,289
(N : P : K) 1 : 1 : 1				
5	N ₄₀	14,9	14,9	—
6	N ₈₀	19,4	19,4	0,325
7	N ₁₂₀	22,2	22,65	0,272
8	N ₁₆₀	24,2	24,200	0,272
(N : P : K) 1 : 0,5 : 1				
9	N ₄₀	11,7	11,7	—
10	N ₈₀	15,3	15,3	0,422
11	N ₁₂₀	17,6	17,87	0,369
12	N ₁₆₀	19,2	19,199	0,369
(N : P : K) 1 : 0,25 : 1				
13	N ₄₀	9,2	9,2	—
14	N ₈₀	11,9	11,9	0,546
15	N ₁₂₀	13,4	13,81	0,409
16	N ₁₆₀	14,5	14,499	0,409

Из данных таблицы 12 следует, что увеличение дозы фосфорных удобрений приводит к уменьшению относительного коэффициента действия фактора роста при отношениях дозы фосфора от 0,25 до 1,0 и увеличивается от значения 1,0 до 1,5. Такой характер действия фосфорных удобрений объясняется физиологическими причинами действия фосфора на растение озимой пшеницы [35–37].

Закключение. В качестве основных выводов по работе можно отметить следующие положения.

1. Предложена новая цифровая методика оценки действия удобрений с разным соотношением NPK на урожай озимой пшеницы.
2. Для количественной оценки действия

элементов питания на урожай растений предложено использовать значение относительного коэффициента действия фактора роста, для которого получена простая расчетная формула.

3. Приведены примеры расчетов для трех основных элементов питания для конкретных многолетних полевых опытов, показывающие хорошее соответствие опытных и расчетных (прогнозных) значений урожая озимой пшеницы.

Список литературы

1. Созинов А.А., Козлов В.Г. Повышение качества зерна озимых пшениц. – М.: Колос, 1970. – 135 с.
2. Вильдфлуш Р.Т., Тверезовская М.Н. Влияние удобрений на урожай и качество зерна озимой пшеницы // Сборник научных трудов Белорусской СХА. – 1970. – Т. 72. – С. 96–101.
3. Воллейдт Л.П., Кузнецова С.С. Поступление и использование фосфора в обмене веществ растений озимой пшеницы в зависимости от уровня азотно-фосфорного питания // Агрохимия. – 1971. – № 9. – С. 28–33.
4. Кузнецова С.С., Воллейдт Л.П. Влияние сроков внесения азотных удобрений на урожай и качество зерна озимой пшеницы ППГ-186 // Химия в сельском хозяйстве. – 1971. – № 2. – С. 10–12.
5. Воллейдт Л.П., Кузнецова С.С. Азотный и фосфорный обмен в озимой пшенице и связь его с урожаем и качеством зерна в зависимости от условий питания // Сб. статей «Повышение качества зерна пшеницы». – М.: Колос, 1972. – С. 181–190.
6. Попова Р.Н., Мочалова А.Д. Влияние доз и форм калийных удобрений на качество урожая озимой пшеницы // Бюллетень ВИАУ. – 1971. – Т. 12. – С. 3–6.
7. Авдонин Н.С., Яскина Н.М. Влияние свойств дерново-подзолистой почвы и удобрений на урожай и качество озимой пшеницы // Вестник сельскохозяйственной науки. – 1972. – № 4. – С. 1–11.
8. Зенюк И.А. Влияние предшественников и азотных удобрений на урожай и качество зерна озимой пшеницы в Западных районах Белоруссии // Сборник научных трудов Белорусской СХА. – 1972. – Т. 98. – С. 19–21.
9. Минеев В.Г. Удобрение озимой пшеницы. – М.: Колос, 1973. – 207 с.
10. Панников В.Д., Минеев В.Г. Эффективность удобрений в длительных опытах // Химия в сельском хозяйстве. – 1976. – № 6. – С. 27–30.
11. Минеев В.Г., Павлов А.Н. Агрохимические основы повышения качества зерна пшеницы. – М.: Колос, 1981. – 288 с.
12. Мосолова Л.В., Мосолов И.В. Действие условий азотного питания на урожай и качество зерна озимой пшеницы // Труды ВИАУ. – 1974. – Вып. 54. – С. 57–62.
13. Паниткин В.А., Государева З.И. Влияние длительного применения различных форм калийных удобрений на агрохимические свойства дерново-подзолистой супесчаной почвы // Агрохимия. – 1976. – № 7. – С. 59–64.
14. Ненайденко Г.Н. Основные вопросы рационального использования удобрений под озимую пшеницу // Научные труды Ленинградского СХИ. – 1976. – Т. 313. – С. 82–97.
15. Беляков И.И., Саранин К.И. Технология возделывания озимой пшеницы в Нечерноземной зоне. – М.: Колос, 1983. – 86 с.
16. Золотарев В.П., Ваулина Г.И. Действие азотных удобрений на дерново-подзолистой почве на урожай и

качество зерна озимой пшеницы при поливе // Бюллетень ВИАУ. – 1984. – № 68. – С. 19–23.

17. Иванова Т.И. Прогнозирование эффективности удобрений с использованием математических моделей. – М.: «Агропромиздат», 1989. – 240 с.

18. Иванова Т.И., Кожмякова Р.Н. Закономерности действия азотных, фосфорных и калийных удобрений в многофакторном полевом опыте с широкой амплитудой доз // Агрохимия. – 1970. – № 11. – С. 53–64.

19. Иванова Т.И., Кожмякова Р.Н. Отзывчивость озимой пшеницы на возрастающие дозы минеральных удобрений // Труды ВИАУ. – 1977. – Вып. 56. – С. 52–67.

20. Сычев В.Г., Рухович О.В., Романенков В.А. [и др.]. Опыт создания единой систематизированной базы данных полевых опытов Агрохим-службы и Геосети «Агрогеос» // Проблемы агрохимии и экологии. – 2008. – № 3. – С. 35–38.

21. Романенков В.А., Сиротенко О.Д., Рухович О.В. [и др.]. Прогноз динамики запасов органического углерода пахотных земель европейской территории России. – М.: ВНИИА, 2009. – 96 с.

22. Рухович О.В., Шарая Л.С., Шарый П.А. [и др.]. Опыт прогнозирования характеристик урожая озимой пшеницы на агроландшафтах Окского бассейна с помощью методов геоморфометрии // Плодородие. – 2009. – № 5. – С. 22–24.

23. Шарый П.А., Рухович О.В., Шарая Л.С. Методология анализа пространственной изменчивости характеристик урожайности пшеницы в зависимости от условий агроландшафта // Агрохимия. – 2011. – № 2. – С. 57–81.

24. Рухович О.В., Шарый П.А., Шарая Л.С. Оценка урожайности сельскохозяйственных культур в зависимости от условий агроландшафта // Плодородие. – 2013. – № 2. – С. 45–46.

25. Рухович О.В., Романенков В.А., Ермаков А.А. Урожайность сельскохозяйственных культур в зависимости от условий агроландшафта // Плодородие. – 2014. – № 2. – С. 39–41.

26. Сычев В.Г., Романенков В.А., Беличенко М.В. [и др.]. Итоги и перспективные программы исследований в длительных агрохимических полевых опытах Геосети // Бюллетень Географической сети опытов с удобрениями. – 2016. – Вып. 23. – 59 с.

27. Пересудов В.Н. Метод наименьших квадратов и его применение в исследованиях. – М.: Статистика, 1965. – 340 с.

28. Григулецкий В.Г. Цифровые технологии в АПК. Цифровые модели роста и продуктивности сельскохозяйственных растений. – СПб.: Лань, 2024. – 316 с.

29. Митчерлих Э.А. Потребность почвы в удобрении. Практическое применение в земледелии закона действия факторов роста. – М.-Л.: Госиздат, 1928. – 70 с.

30. Митчерлих Э.А. Определение потребности почвы в удобрении. – М.: Госиздат, 1931. – 104 с.

31. Митчерлих Э.А. Почвоведение. – М.: ИЛ, 1957. – 416 с.

32. Григулецкий В.Г. Обобщение закона действия фактора роста и продуктивности растений Э.А. Митчерлиха // Масличные культуры. – 2022. – Вып. 2 (190). – С. 18–29.

33. Кабашикова Л.Ф. Фотосинтетический аппарат и стресс у растений. – Минск: Белорусская наука, 2014. – 267 с.

34. Веселова Т.В., Веселовский В.А., Чернавский А.С. Стресс у растений (биофизический подход). – М.: МГУ, 1993. – 144 с.

35. Тимирязев К.А. Земледелие и физиология растений. Сборник общедоступных лекций. – М.: ОГИЗ, 1948. – 424 с.

36. Костычев С.П. Физиология растений. Ч. 1. – Л.: Госиздат, 1924. – 468 с.

37. Кузнецов В.В., Дмитриева Г.А. Физиология растений. – М.: ВШ, 2005. – 736 с.

References

1. Sozinov A.A., Kozlov V.G. Povyshenie kachestva zerna ozimyykh pshenits. – M.: Kolos, 1970. – 135 s.

2. Vil'dflush R.T., Tverezovskaya M.N. Vliyanie udobreniy na urozhay i kachestvo zema ozimoy pshenitsy // Sbornik nauchnykh trudov Belorusskoy SKhA. – 1970. – T. 72. – S. 96–101.
3. Volleydt L.P., Kuznetsova S.S. Postuplenie i ispol'zovanie fosfora v obmene veshchestv rasteniy ozimoy pshenitsy v zavisimosti ot urovnya azotno-fosfomogo pitaniya // Agrokhimiya. – 1971. – № 9. – S. 28–33.
4. Kuznetsova S.S., Volleydt L.P. Vliyanie srokov vneseniya azotnykh udobreniy na urozhay i kachestvo zema ozimoy pshenitsy PPG-186 // Khimiya v sel'skom khozyaystve. – 1971. – № 2. – S. 10–12.
5. Volleydt L.P., Kuznetsova S.S. Azotnyy i fosfomyy obmen v ozimoy pshenitse i svyaz' ego s urozhayem i kachestvom zema v zavisimosti ot usloviy pitaniya // Sb. statey «Povyshenie kachestva zema pshenitsy». – M.: Kolos, 1972. – S. 181–190.
6. Popova R.N., Mochalova A.D. Vliyanie doz i form kaliynykh udobreniy na kachestvo urozhaya ozimoy pshenitsy // Byulleten' VIUA. – 1971. – T. 12. – S. 3–6.
7. Avdonin N.S., Yaskina N.M. Vliyanie svoystv demovo-podzolistoy pochvy i udobreniy na urozhay i kachestvo ozimoy pshenitsy // Vestnik sel'skokhozyaystvennoy nauki. – 1972. – № 4. – S. 1–11.
8. Zenyuk I.A. Vliyanie predshestvennikov i azotnykh udobreniy na urozhay i kachestvo zema ozimoy pshenitsy v Zapadnykh rayonakh Belorussii // Sbornik nauchnykh trudov Belorusskoy SKhA. – 1972. – T. 98. – S. 19–21.
9. Mineev V.G. Udobrenie ozimoy pshenitsy. – M.: Kolos, 1973. – 207 s.
10. Pannikov V.D., Mineev V.G. Effektivnost' udobreniy v dlitel'nykh opytakh // Khimiya v sel'skom khozyaystve. – 1976. – № 6. – S. 27–30.
11. Mineev V.G., Pavlov A.N. Agrokhimicheskie osnovy povysheniya kachestva zema pshenitsy. – M.: Kolos, 1981. – 288 s.
12. Mosolova L.V., Mosolov I.V. Deystvie usloviy azotnogo pitaniya na urozhay i kachestvo zema ozimoy pshenitsy // Trudy VIUA. – 1974. – Vyp. 54. – S. 57–62.
13. Panitkin V.A., Gosudareva Z.I. Vliyanie dlitel'nogo primeneniya razlichnykh form kaliynykh udobreniy na agrokhimicheskie svoystva demovo-podzolistoy supeschanoy pochvy // Agrokhimiya. – 1976. – № 7. – S. 59–64.
14. Nenaydenko G.N. Osnovnye voprosy ratsional'nogo ispol'zovaniya udobreniy pod ozimuyu pshenitsu // Nauchnye trudy Leningradskogo SKhL. – 1976. – T. 313. – S. 82–97.
15. Belyakov I.I., Saranin K.I. Tekhnologiya vozdeystviya ozimoy pshenitsy v Nechemozemnoy zone. – M.: Kolos, 1983. – 86 s.
16. Zolotarev V.P., Vaulina G.I. Deystvie azotnykh udobreniy na demovo-podzolistoy pochve na urozhay i kachestvo zema ozimoy pshenitsy pri polive // Byulleten' VIUA. – 1984. – № 68. – S. 19–23.
17. Ivanova T.I. Prognozirovaniye effektivnosti udobreniy s ispol'zovaniem matematicheskikh modeley. – M.: «Agropromizdat», 1989. – 240 s.
18. Ivanova T.I., Kozhemyakova R.N. Zakonomernosti deystviya azotnykh, fosfornykh i kaliynykh udobreniy v mnogofaktornom polevom opyte s shirokoy amplitudoy doz // Agrokhimiya. – 1970. – № 11. – S. 53–64.
19. Ivanova T.I., Kozhemyakova R.N. Otsyuchivost' ozimoy pshenitsy na vozzrastayushchie dozy mineral'nykh udobreniy // Trudy VIUA. – 1977. – Vyp. 56. – S. 52–67.
20. Sychev V.G., Rukhovich O.V., Romanenkov V.A. [i dr.]. Opyt sozdaniya edinoi sistematizirovannoy bazy dannykh polevykh opytov Agrokhim-sluzhby i Geoseti «Agrogeos» // Problemy agrokhimii i ekologii. – 2008. – № 3. – S. 35–38.
21. Romanenkov V.A., Sirotenko O.D., Rukhovich O.V. [i dr.]. Prognoz dinamiki zapasov organicheskogo ugleroda pakhotnykh zemel' evropeyskoy territorii Rossii. – M.: VNIIA, 2009. – 96 s.
22. Rukhovich O.V., Sharaya L.S., Sharyy P.A. [i dr.]. Opyt prognozirovaniya kharakteristik urozhaya ozimoy pshenitsy na agrolandshaftakh Okskogo basseyna s pomoshch'yu metodov

geomorfometrii // Plodorodie. – 2009. – № 5. – S. 22–24.

23. Sharyy P.A., Rukhovich O.V., Sharaya L.S. Metodologiya analiza prostranstvennoy izmenchivosti kharakteristik urozhaynosti pshenitsy v zavisimosti ot usloviy agrolandshafta // Agrokhimiya. – 2011. – № 2. – S. 57–81.

24. Rukhovich O.V., Sharyy P.A., Sharaya L.S. Otsenka urozhaynosti sel'skokhozyaystvennykh kul'tur v zavisimosti ot usloviy agrolandshafta // Plodorodie. – 2013. – № 2. – S. 45–46.

25. Rukhovich O.V., Romanenkov V.A., Ermakov A.A. Urozhaynost' sel'skokhozyaystvennykh kul'tur v zavisimosti ot usloviy agrolandshafta // Plodorodie. – 2014. – № 2. – S. 39–41.

26. Sychev V.G., Romanenkov V.A., Belichenko M.V. [i dr.]. Itogi i perspektivnye programmy issledovaniy v dlitel'nykh agrokhimicheskikh polevykh opytakh Geoseti // Byulleten' Geograficheskoy seti opytov s udobreniyami. – 2016. – Vyp. 23. – 59 s.

27. Peregudov V.N. Metod naimen'shikh kvadratov i ego primeneniye v issledovaniyakh. – M.: Statistika, 1965. – 340 s.

28. Griguletskiy V.G. Tsifrovyye tekhnologii v APK. Tsifrovyye modeli rosta i produktivnosti sel'skokhozyaystvennykh rasteniy. – SPb.: Lan', 2024. – 316 s.

29. Mitcherlikh E.A. Potrebnost' pochvy v udobrenii. Prakticheskoe primeneniye v zemledelii zakona deystviya faktorov rosta. – M.-L.: Gosizdat, 1928. – 70 s.

30. Mitcherlikh E.A. Opredeleniye potrebnosti pochvy v udobrenii. – M.: Gosizdat, 1931. – 104 s.

31. Mitcherlikh E.A. Pochvovovedeniye. – M.: IL, 1957. – 416 s.

32. Griguletskiy V.G. Obobshcheniye zakona deystviya faktora rosta i produktivnosti rasteniy E.A. Mitcherlikha // Maslichnye kul'tury. – 2022. – Vyp. 2 (190). – S. 18–29.

33. Kabashnikova L.F. Fotosinteticheskii apparat i stress u rasteniy. – Minsk: Belorusskaya nauka, 2014. – 267 s.

34. Veselova T.V., Veselovskiy V.A., Chemavskiy A.S. Stress u rasteniy (biofizicheskii podkhod). – M.: MGU, 1993. – 144 s.

35. Timiryazev K.A. Zemledeliye i fiziologiya rasteniy. Sbornik obshchedostupnykh lektsiy. – M.: OGIz, 1948. – 424 s.

36. Kostychev S.P. Fiziologiya rasteniy. Ch. 1. – L.: Gosizdat, 1924. – 468 s.

37. Kuznetsov V.V., Dmitrieva G.A. Fiziologiya rasteniy. – M.: VSh, 2005. – 736 s.

Сведения об авторах

В.Г. Григулецкий, зав. кафедрой, д-р техн. наук, профессор

Получено/Received

20.01.2025

Получено после рецензии/Manuscript peer-reviewed

27.01.2025

Получено после доработки/Manuscript revised

27.02.2025

Принято/Accepted

31.03.2025

Manuscript on-line

25.05.2025