









DOI: 10.22363/2312-797X-2026-21-1-25-40
EDN DWETFK
УДК 57.087:631.526.32:633.11


Научная статья / Research article

Моделирование продуктивности агроценоза озимой пшеницы по принципу многофакторности

А.В. Зеленеv^{1,2}  , В.Н. Капранов¹ , Д.С. Тегесов¹ ,
Р.З. Мамедов¹ , Е.Ф. Киселеv¹ 

¹Федеральный исследовательский центр «Немчиновка», г. Москва, Российская Федерация

²Российский университет дружбы народов, г. Москва, Российская Федерация

 zelenev-av@rudn.ru

Аннотация. Для объяснения взаимосвязи продуктивности зерновых культур с элементами, непосредственно влияющими на ее величину, широко используются аналитические и математические алгоритмы анализа, с помощью которых фиксируется зависимость урожайности от параметров активной жизнедеятельности. Задействование таких статистических и математических методов способствует основательному обеспечению потенциальной эффективности агрокультур. На основании множественного корреляционно-регрессионного анализа установлены прогнозируемые модели формирования потенциальной урожайности сортов озимой пшеницы селекции ФИЦ «Немчиновка» Московская 40 и Немчиновская 85, возделываемых по технологиям с разным уровнем интенсификации. Анализ метеоданных показал однородность изменчивости за годы исследований суммы положительной температуры и выпавших осадков. Обнаружена линейная множественная регрессия. Доминирующими источниками, оказывающими непосредственное влияние на формирование урожайности сельскохозяйственных культур, являются густота продуктивных стеблей и прирост листовой поверхности растений, выражаемые величиной фотосинтетического потенциала, а также влагообеспеченность, т.е. суммарное количество осадков за период с температурой выше +10 °С. Биологическая урожайность по базовой технологии была определена как 5 т/га, интенсивной — 8 т/га и высокоинтенсивной — 10 т/га. При возделывании сорта Московская 40 минимальное количество продуктивных стеблей при решении уравнения множественной регрессии по базовой технологии составляла 310...315 шт./м², по интенсивной — 615...620 шт./м², по высокоинтенсивной технологии — 890...900 шт./м². Для сорта Немчиновская 85 густота стояния равнялась соответственно 330...340, 590...600 и 790...800 шт./м². С увеличением интенсивности технологии фотосинтетический потенциал для сорта Московская 40 равнялся 2,8; 4,2 и 5,3 млн м²/га в сутки, сорта Немчиновская 85 — 3,6; 4,7 и 6,2 млн м²/га в сутки. В результате адекватность уравнений множественной регрессии и такие факторы влияния как фотосинтетический потенциал и густота стояния растений озимой пшеницы подтверждают величину биологической урожайности, и, в конечном итоге, модели множественной регрессии обеспечили надежный и интерпретируемый результат прогноза с учетом специфики сорта и технологии.

© Зеленеv А.В., Капранов В.Н., Тегесов Д.С., Мамедов Р.З., Киселеv Е.Ф., 2026



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Ключевые слова: сорт, множественная регрессия, фотосинтетический потенциал, густота стояния растений, прогноз урожайности

Вклад авторов: В.Н. Капранов — концепция, написание первой версии; Р.З. Мамедов — методология, визуализация результатов; Е.Ф. Киселев — методология, валидация; А.В. Зеленев — работа с данными, ревизия и редактирование текста; Д.С. Тегесов — работа с данными, написание первой версии. Все авторы одобрили окончательную версию статьи.







Финансирование. Исследование выполнено при поддержке Минсельхоза России в рамках Государственного задания ФГБНУ «ФИЦ «Немчиновка» (тема № FGGE 2022–0005).

Заявление о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

История статьи: поступила в редакцию 24 сентября 2025 г., принята к публикации 7 ноября 2025.


Для цитирования: Зеленев А.В., Капранов В.Н., Тегесов Д.С., Мамедов Р.З., Киселев Е.Ф. Моделирование продуктивности агроценоза озимой пшеницы по принципу многофакторности // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Агрономия и животноводство. 2025. Т. 21. № 1. С. 25–40. doi: 10.22363/2312-797X-2026-21-1-25-40 EDN: DWETFK

Modeling winter wheat agroecosystem productivity based on multifactorial principle

Alexander V. Zelenev^{1,2}  , Vladimir N. Kapranov¹ , Dolgan S. Tegesov¹ ,
Ramin Z. Mamedov¹ , Eugene F. Kiselev¹ 

¹Federal Research Center “Nemchinovka”, Moscow, Russian Federation

²RUDN University, Moscow, Russian Federation

 zelenev-av@rudn.ru

Abstract. Analytical and mathematical algorithms are widely used to explain the relationship between grain crop productivity and the elements directly influencing it, capturing the dependence of yield on parameters of active life activity. The application of such statistical and mathematical methods contributes to a thorough assessment of the potential efficiency of agricultural crops. Based on multiple correlation-regression analysis, predictive models for the formation of potential yield were established for the winter wheat cultivars Moskovskaya 40 and Nemchinovskaya 85, bred by the Federal Research Center “Nemchinovka” and cultivated using technologies with different levels of intensification. Analysis of meteorological data revealed uniform variability in the sum of positive temperatures and precipitation over the research years. A linear multiple regression was identified. The dominant sources that have a direct impact on formation of crop yields are the density of productive stems and the increase in leaf surface area, expressed as the value of the photosynthetic potential, as well as water availability, i.e., the total amount of precipitation during the period with temperatures above +10 °C. The biological yield under the basic technology was determined as 5 t/ha, under intensive technology — 8 t/ha, and under high-intensity technology — 10 t/ha. When cultivating Moskovskaya 40 cultivar, the minimum number of productive stems according to the multiple regression equation solution was 310...315 stems/m² for the basic technology, 615...620 stems/m² for the intensive technology, and 890...900 stems/m² for the high-intensity technology. For the Nemchinovskaya 85 cultivar, the plant density was 330...340, 590...600, and 790...800 stems/m², respectively. With increasing technology intensity, the photosynthetic potential for the Moskovskaya 40 cultivar was 2.8, 4.2, and 5.3 million m²/ha per day, and for the Nemchinovskaya 85 cultivar — 3.6, 4.7, and 6.2 million m²/ha per

day. As a result, the adequacy of the multiple regression equations and such influencing factors as photosynthetic potential and plant density of winter wheat confirm the magnitude of biological yield. Ultimately, the multiple regression models provided a reliable and interpretable forecast result, taking into account the specifics of the cultivar and technology.

Keywords: variety, multiple regression, photosynthetic potential, plant density, yield forecast

Authors' contribution: concept — Kapranov V.N.; methodology — Mamedov R.Z., Kiselev E.F.; validation — Kiselev E.F.; data processing — Zelenev A.V., Tegesov D.S.; writing the first version — Kapranov V.N., Tegesov D.S.; revision and editing of the text — Zelenev A.V.; visualization of results — Mamedov R.Z. All authors reviewed the final version of the manuscript and approved it.

Acknowledgments. The study was supported by the Ministry of Agriculture of Russia within the framework of the State Assignment of the “Nemchinovka” Federal Research Center (No. FGGE 2022–0005).

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Article history: received 24 September 2025; accepted 7 November 2025.

For citation: Zelenev AV, Kapranov VN, Tegesov DS, Mamedov RZ, Kiselev EF. Modeling winter wheat agrocenosis productivity based on multifactorial principle. *RUDN Journal of Agronomy and Animal Industries*. 2026;21(1):25–40. (In Russ.). doi: 10.22363/2312-797X-2026-21-1-25-40 EDN: DWETFK

Введение

Сельскохозяйственное производство относится к наиболее нестабильным видам хозяйственной деятельности, что обусловлено высокой зависимостью от абиотических, агрометеорологических и техногенных факторов. Эффективность производства продуктов питания в большинстве случаев определяется факторами среды обитания выращиваемых культур [1–4]. В результате на данном этапе развития современных технологий возделывания сельскохозяйственных культур на первый план выходит получение достоверной информации о степени влияния абиотических, главным образом агрометеорологических (случайных), а также техногенных (фиксированных) факторов, таких как применение средств защиты растений (СЗР) и минеральных удобрений (МУ), на продуктивность агрокультур в интересах наиболее результативной координации продукционного цикла в агроэкосистемах [5–7].

Взаимосвязь продуктивности зерновых культур с элементами, непосредственно влияющими на ее величину, объясняется с использованием аналитических и математических алгоритмов анализа, с их помощью фиксируется зависимость урожайности от параметров активной жизнедеятельности. Актуальность исследования определяется, прежде всего, применением различных средств моделирования, позволяющих в полной мере реализовать продуктивный потенциал агрокультур. Наряду с этим, величина координации совокупных показателей, оказывающих влияние на развитие агрокультур, считается предметом многочисленных дискуссий. С практического и научного умозрения данный вопрос до конца не решен и остается крайне привлекательным [8–11].

Цель исследования — оценить влияние случайных и фиксированных факторов на формирование биологической урожайности с использованием линейной множественной регрессии, а также верификация гипотезы о линейной зависимости

между переменными. Научная новизна работы заключается в комбинированном анализе факторов, традиционно рассматриваемых изолированно, и разработке модели, оптимизированной для прогнозирования в условиях мультиколлинеарности.

Материалы и методы исследования

Исследования выполнены за период с 2016 по 2024 г. на полях ФИЦ «Немчиновка» в стационарных опытах, размещаемых в четырехпольном севообороте (занятый пар — озимые зерновые — яровые зерновые — зернобобовые), в которых изучали реакцию сортов озимой пшеницы на применяемые технологии — базовую, интенсивную и высокоинтенсивную, отличающиеся уровнем применения минеральных удобрений и средств защиты растений.

Почва в стационарном опыте — дерново-подзолистая среднесуглинистая, имеющая следующие агрохимические показатели: pH_{KCl} — 5,3...5,8; гумус — 1,7...1,9 %; N_g — 1,18...1,33 ммоль/100 г; содержание подвижного фосфора 267...324 и калия 108...125 мг/кг почвы (по Кирсанову). Мощность пахотного горизонта — 22 см. Плотность сложения почвы в равновесном состоянии — 1,22...1,35 г/см³. Система обработки почвы — комбинированная.

В качестве объекта изучения и проведения корреляционно-регрессионного анализа и построения модели прогнозирования урожайности использованы сорта озимой пшеницы селекции ФИЦ «Немчиновка»: Московская 40 (9 лет изучения) и Немчиновская 85 (8 лет изучения).

Насыщение модели избыточными факторами может привести к статистической незначимости параметров регрессии. Поэтому отбор факторов осуществлялся в два этапа: 1) на основе теоретического анализа выбирались факторы, которые могут влиять на урожайность; 2) посредством матрицы корреляции оценивалась степень взаимосвязи между факторами и зависимой (результативной) переменной.

При анализе начальной гипотезы предполагалось, что зависимость между изучаемыми параметрами будет линейной при уровне значимости $\alpha = 0,05$, что соответствует вероятности ошибки первого рода в 5 %. Для определения наличия взаимосвязи между разными факторами использовали парные коэффициенты корреляции. При этом парная корреляция между результативным параметром урожайности и фиксированными признаками (переменными) должна быть тесной ($r \geq 0,7$) с коэффициентом детерминации D , показывающим высокую долю зависимости переменной, а связь между независимыми переменными для построения множественной регрессии — слабая ($r < 0,7$).

Качество модели оценивали с помощью множественного коэффициента корреляции R , который должен быть близок к единице, что указывает на сильную связь между переменными, объясняемой моделью, величин значимости отдельных F -значений для независимых признаков, которая должна быть менее 0,05, а также коэффициента Фишера F для модели (регрессии) в целом.

Если предполагаемая гипотеза верна при соблюдении оценивающих критериев, то линейная модель должна иметь следующий вид:

$$Y = a + \sum_{i=1} b_i X_i + \varepsilon,$$

где Y — зависимая переменная (биологическая урожайность); X_i — независимые переменные (факторы); a , b_i — коэффициенты регрессии; ε — случайная компонента.

Густоту стояния растений определяли по Методике Государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур¹, фотосинтетический потенциал — по А.А. Ничипоровичу и др.² Необходимые расчеты выполняли посредством статистических методов [12, 13], а также с использованием пакета программ MS Excel³ [14, 15].

Результаты исследования и обсуждение

Построение уравнений множественной регрессии предопределяет специфику модели, которая включает два вопроса: отбор факторов и выбор вида уравнения регрессии. В качестве нулевой гипотезы выбрана линейная множественная регрессия. Результативным параметром являлась биологическая урожайность сортов озимой пшеницы (Y , г/м²). В рассмотрение случайных факторов включены: количество осадков, выпавших за вегетационный период (X_1 , мм) и сумма положительных температур воздуха выше +10 °С за данный период (X_2 , °С), а также фиксированные факторы, являющиеся пролонгацией влияния применения удобрений и средств защиты растений — фотосинтетический потенциал (ФП) как один из показателей нарастания биохимических процессов (X_3 , млн м²/га · дней), густота стояния растений (X_4 , шт./м²), среднее содержание азота в вегетативной массе за период от кущения до колошения (X_5 , %).

Погодные условия вегетационных периодов озимой пшеницы в годы исследований играли важную роль в формировании урожайности. Общеизвестно, что из пяти главных факторов, формирующих урожайность зерновых культур (свет, тепло, влага, углекислый газ, питательные вещества), на первом месте находится влагообеспеченность, которую предопределяет количество выпадающих за сезон осадков. Она может быть как недостаточная, так и избыточная. За годы наблюдений дефицит влаги от выпавших за вегетационный период осадков отмечали в 2019 и 2024 гг., где ГТК равнялся 1,0. Переувлажненными характеризовались 2017 и 2020 гг. с ГТК соответственно 2,74 и 2,26. При этом анализ метеоданных показал однородность изменчивости по годам количества осадков и суммы положительных температур воздуха. Коэффициенты вариации не превышали 33 % (табл. 1).

¹ Методика государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур. Вып. 2: Зерновые, крупяные, зернобобовые, кукуруза и кормовые культуры / подгот. М.А. Федин и др. М.: Гос. комис. по сортоиспытанию с.-х. культур при М-ве сел. хоз-ва СССР, 1989. 194 с.

² Ничипорович А.А., Строгонова Л.Е., Чмора С.Н., Власова М.П. Фотосинтетическая деятельность растений в посевах: методы и задачи учета в связи с формированием урожая. М.: Изд-во Академии наук СССР, 1961. 135 с. EDN: GWSUZW

³ Лебедько Е.Я., Хохлов А.М., Барановский Д.И., Гетманец О.М. Биометрия в MS EXCEL : учеб. пособие. СПб.: Лань, 2022. 172 с. EDN: VZK1T1; Чаргеишвили С.В., Сударев Н.П., Абрампальская О.В. Использование методов биометрии в MS Excel : учеб. пособие. Тверь: Тверская государственная сельскохозяйственная академия, 2023. 98 с. EDN: HSCJAB

Таблица 1

Вариабельность метеорологических показателей вегетационного периода озимой пшеницы (среднее за 2016–2024 гг.)

Случайные признаки	Разброс данных		
	min	max	Cv, %
Количество осадков X_1 , мм	202	442	28
Сумма температур воздуха выше +10 °C X_2 , °C	1507	2265	14

Источник: составил Д.С. Тегесов.

Table 1

Variability of meteorological parameters for the winter wheat growing season (average for 2016–2024)

Random variables	Data scatter		
	min	max	Cv, %
Precipitation X_1 , mm	202	442	28
Sum of air temperatures above +10 °C X_2 , °C	1507	2265	14

Source: compiled by D.S. Tegesov.

Влагообеспеченность и применяемые технологии определяли величины фиксированных признаков X_3 , X_4 и X_5 . Из табл. 2 следует, что при недостаточном увлажнении (202...213 мм осадков) значения фотосинтетического потенциала (X_3) Московской 40 изменялись с ростом интенсивности возделывания от 2,21 до 3,84 млн м²/га × дней, Немчиновской 85 — от 2,26 до 5,42 млн м²/га × дней.

Таблица 2

Вариабельность C_v , %, значений фиксированных признаков X и биологической урожайности Y, г/м², озимой пшеницы

Технология	X_3			X_4			X_5			y		
	min	max	C_v , %	min	max	C_v , %	min	max	C_v , %	min	max	C_v , %
Сорт Московская 40 (2016–2024 гг., 9 лет изучения)												
I	2,21	5,30	27	313	745	25	2,37	3,36	13	465	990	26
II	3,16	6,84	31	315	915	30	2,56	3,60	12	496	1091	24
III	3,84	8,19	28	302	963	26	2,75	3,97	10	578	1277	24
Сорт Немчиновская 85 (2017–2024 гг., 8 лет изучения)												
I	2,26	5,92	30	331	751	25	2,36	3,37	13	475	998	27
II	3,22	6,34	31	312	1105	26	2,47	3,67	12	546	1405	31
III	5,42	9,15	23	354	1051	29	2,73	3,82	12	641	1432	24

Примечание. I – базовая; II – интенсивная; III – высокоинтенсивная технология.

Источник: составил Д.С. Тегесов.

Variability C_v , % of the values of fixed traits X and biological yield Y , g/m², of winter wheat

Technology	X_3			X_4			X_5			Y		
	min	max	C_v , %	min	max	C_v , %	min	max	C_v , %	min	max	C_v , %
cv. Moskovskaya 40 (2016–2024, 9 years of study)												
I	2.21	5.30	27	313	745	25	2.37	3.36	13	465	990	26
II	3.16	6.84	31	315	915	30	2.56	3.60	12	496	1091	24
III	3.84	8.19	28	302	963	26	2.75	3.97	10	578	1277	24
cv. Nemchinovskaya 85 (2017–2024, 8 years of study)												
I	2.26	5.92	30	331	751	25	2.36	3.37	13	475	998	27
II	3.22	6.34	31	312	1105	26	2.47	3.67	12	546	1405	31
III	5.42	9.15	23	354	1051	29	2.73	3.82	12	641	1432	24

Note. I – basic; II – intensive; III – high-intensity technology.

Source: compiled by D.S. Tegesov.

С выпадением за вегетацию 387...442 мм осадков фотопотенциал увеличился от базовой к высокоинтенсивной технологии у сорта Московская 40 с 5,30 до 8,07 млн м²/га × дней, у сорта Немчиновская 85 — с 5,92 до 9,15 млн м²/га × дней. Сходная закономерность отмечалась и по фиксированному признаку густота стояния растений. В основном с увеличением интенсивности возделывания сортов пшеницы количество продуктивных стеблей повышалось. При достаточном увлажнении пахотного слоя почвы (ГТК 2 и более) густота стояния растений у изучаемых сортов возрастала в 2,8...2,9 раза. По содержанию общего азота в вегетативной массе растений по фазам развития можно лишь определенно утверждать, что с ростом интенсивности технологии его количество увеличивается. Однако четкой закономерности влияния влагообеспеченности на этот фактор не отмечается.

Исходя из фиксированных признаков X_1 , X_3 и X_4 , а также применяемой технологии, в основном и осуществлялся размах значений по годам биологической урожайности Y сортов озимой пшеницы. У сорта Московская 40 по базовой технологии продуктивность изменялась от 465 до 990, Немчиновской 85 — с 475 до 998 г/м², по интенсивной технологи в соответствии по сортам в пределах 496...1091 и 546...1405 г/м², по высокоинтенсивной технологии — 578...1277 и 641...1432 г/м². По всем выборкам признаков изменчивость величин имела также однородный характер, не превышая согласно коэффициенту вариации 33 %.

Множественная регрессия — метод построения модели с несколькими факторами. При этом необходимо заранее определить влияние на моделируемый показатель каждого из этих факторов в отдельности, а также совокупное их воз-

действие. Парная взаимосвязь между биологической урожайностью и отдельным фиксированным признаком дает обнадеживающий результат при составлении уравнения множественной регрессии, если она значима, т. е. коэффициент парной корреляции характеризует существенную тесноту связи.

В результате корреляционного анализа данных установлена высокая зависимость результативного параметра биологической урожайности в соответствие с уровнем интенсивности технологии или продуктивности по следующим фиксированным признакам: от количества осадков за вегетацию (r_{yx_1}) — 0,86...0,88 у сорта Московская 40 и 0,82...0,92 у сорта Немчиновская 85; сформированного фотопотенциала (r_{yx_2}) соответственно по сортам с коэффициентами парной корреляции 0,8...0,87 и 0,82...0,85 и густотой стояния растений (r_{yx_3}) — 0,83...0,86 и 0,81...0,83 (табл. 3). Такие показатели выборки влияния как сумма положительных температур за вегетацию (r_{yx_4}) и среднее потребление азота растениями по фазам роста от кущения до колошения (r_{yx_5}) оказывали слабое воздействие на формирование урожая.

Таблица 3

Корреляция биологической урожайности сортов озимой пшеницы с фиксированными факторами

Взаимосвязь	Технология	Сорт Московская 40		Сорт Немчиновская 85	
		r	D	r	D
yx_1	I	0,86	0,74	0,82	0,67
	II	0,88	0,77	0,92	0,85
	III	0,88	0,77	0,90	0,81
yx_2	I	0,11	0,01	0,32	0,08
	II	0,32	0,10	0,26	0,07
	III	0,22	0,05	0,15	0,02
yx_3	I	0,87	0,76	0,84	0,71
	II	0,83	0,69	0,85	0,72
	III	0,84	0,71	0,82	0,67
yx_4	I	0,86	0,74	0,82	0,67
	II	0,83	0,69	0,81	0,66
	III	0,86	0,74	0,83	0,69
yx_5	I	0,34	0,12	0,32	0,10
	II	0,36	0,13	0,24	0,06
	III	0,33	0,11	0,23	0,05

Примечание. I — базовая; II — интенсивная; III — высокоинтенсивная технология.

Источник: составил Д.С. Тегесов.

Table 3

Correlation of biological yield of winter wheat cultivars with fixed factors

Correlation	Technology	cv. Moskovskaya 40		cv. Nemchinovskaya 85	
		<i>r</i>	<i>D</i>	<i>r</i>	<i>D</i>
YX_1	I	0.86	0.74	0.82	0.67
	II	0.88	0.77	0.92	0.85
	III	0.88	0.77	0.90	0.81
YX_2	I	0.11	0.01	0.32	0.08
	II	0.32	0.10	0.26	0.07
	III	0.22	0.05	0.15	0.02
YX_3	I	0.87	0.76	0.84	0.71
	II	0.83	0.69	0.85	0.72
	III	0.84	0.71	0.82	0.67
YX_4	I	0.86	0.74	0.82	0.67
	II	0.83	0.69	0.81	0.66
	III	0.86	0.74	0.83	0.69
YX_5	I	0.34	0.12	0.32	0.10
	II	0.36	0.13	0.24	0.06
	III	0.33	0.11	0.23	0.05

Note. I – basic; II – intensive; III – high-intensity technology.

Source: compiled by D.S. Tegesov.

Таким образом, на втором этапе корреляционного анализа для установления взаимосвязи между фиксированными признаками последние два можно не рассматривать.

При рассмотрении парной корреляции между фиксированными признаками следует учитывать наличие мультиколлинеарности. Если она присутствует, то имеет место совокупное их воздействие друг на друга. В результате фиксированные факторы перестают быть полностью независимыми и нельзя оценить воздействие каждого из них в отдельности.

При расчете коэффициентов корреляции между признаками, воздействующими на урожайность обоих сортов пшеницы, выяснилось, что линейная связь количества осадков X_1 с сформированным в технологиях фотопотенциала X_3 высокая: $r_{X_1X_3} = 0,90...0,91$ для сорта Московская 40 и $r_{X_1X_3} = 0,78...0,88$ — сорта Немчиновская 85. Следовательно, включение в модель этих совокупных признаков не целесообразно, так как может повлечь неустойчивость и ненадежность оценки коэффициента множественной регрессии и значимость уравнения регрессии в целом окажется не интерпретируемой (табл. 4).

Таблица 4

Корреляция между фиксированными факторами

Взаимосвязь	Технология	Сорт Московская 40		Сорт Немчиновская 85	
		<i>r</i>	<i>D</i>	<i>r</i>	<i>D</i>
X_1X_3	I	0,90	0,81	0,78	0,61
	II	0,91	0,83	0,78	0,61
	III	0,90	0,81	0,88	0,77
X_1X_4	I	0,58	0,34	0,56	0,31
	II	0,64	0,41	0,62	0,38
	III	0,56	0,31	0,56	0,31
X_3X_4	I	0,54	0,29	0,56	0,31
	II	0,60	0,36	0,55	0,30
	III	0,49	0,24	0,41	0,17

Примечание. I – базовая; II – интенсивная; III – высокоинтенсивная технология.

Источник: составил Д.С. Тегесов.

Table 4

Correlation between fixed factors

Correlation	Technology	cv. Moskovskaya 40		cv. Nemchinovskaya 85	
		<i>r</i>	<i>D</i>	<i>r</i>	<i>D</i>
X_1X_3	I	0.90	0.81	0.78	0.61
	II	0.91	0.83	0.78	0.61
	III	0.90	0.81	0.88	0.77
X_1X_4	I	0.58	0.34	0.56	0.31
	II	0.64	0.41	0.62	0.38
	III	0.56	0.31	0.56	0.31
X_3X_4	I	0.54	0.29	0.56	0.31
	II	0.60	0.36	0.55	0.30
	III	0.49	0.24	0.41	0.17

Note. I – basic; II – intensive; III – high-intensity technology.

Source: compiled by D.S. Tegesov.

В результате предпочтения следует отдать взаимозависимостям, имеющим наименьшую тесноту связи. В нашем случае между фиксированными признаками X_1X_4 и X_3X_4 , где коэффициенты парной корреляции определены на уровне менее 0,7. Поэтому для множественной регрессии целесообразно принять во внимание взаимосвязь результативного признака (биологической урожайности) как с количеством осадков за вегетацию и густотой стояния растений, а также фотопотенциала с продуктивным стеблестоем.

Дисперсионный анализ показал, что расчетные значения F-критерия по технологиям значительно превышали табличные. Следовательно, уравнения линейной множественной регрессии в целом статистически значимы.

Согласно выполненному регрессионному анализу значения коэффициентов a_0 и b_i в моделях прогнозирования по всем технологиям достоверны по P-значениям, которые меньше уровня значимости ($\alpha \leq 0,05$). Кроме того, они отражают силу влияния независимых (фиксированных) признаков на результативный, в нашем случае биологическую урожайность. Они также указывают на высокую значимость отдельных признаков для стабильности модели на 95 % и нулевая гипотеза линейности множественной регрессии по выбранным признакам по трем технологиям корректна (табл. 5). Подтверждение тому дает решение системы уравнений 1 и 2 отдельно по сортам и технологиям, принимая за первичные (эталонные) признаки количество осадков (X_1) и планируемую для каждой технологии урожайность (Y). Количество осадков за период с температурой выше +10 °C принято по многолетним значениям для Центрального экономического района (ЦЭР) и равняется 289 мм.

Биологическая урожайность по базовой технологии определена как 5 т/га (500 г/м²), интенсивной — 8 т/га (800 г/м²) и высокоинтенсивной — 10 т/га (1000 г/м²). Тогда при возделывании сорта Московская 40 минимальное количество продуктивных стеблей (X_4) при решении первого уравнения множественной регрессии по базовой технологии может составлять 310...315, по интенсивной — 615...620, по высокоинтенсивной технологии — 890...900 шт./м². Для сорта Немчиновская 85 густота стояния равняется соответственно 330...340, 590...600 и 790...800 шт./м². Продуктивный стеблестой определяет нарастание ассимиляционной листовой поверхности растений (фотопотенциал). В соответствии с густотой стояния решением системы первого и второго уравнения регрессии определяется фотосинтетический потенциал (X_3). С увеличением интенсивности технологии его значения для сорта Московская 40 равняются — 2,8; 4,2; 5,3 млн м²/га в сутки, сорта Немчиновская 85 — 3,6; 4,7; 6,2 млн м²/га в сутки.

Таблица 5

Множественная регрессия (модели) формирования биологической урожайности сортов озимой пшеницы

Технология	Взаимосвязь	Дисперсия		P-значение	Модель множественной регрессии	R
		$F_{\text{факт}}$	$F_{0,05}$			
Сорт Московская 40						
I	UX_1X_4	45,9	4,15	X_1 0,005	$\hat{Y} = -131,53 + 1,27X_1 + 0,85X_4$ (1)	0,97
				X_4 0,004		
	UX_3X_4	51,3		X_3 0,002	$\hat{Y} = -68,70 + 123,34X_3 + 0,70X_4$ (2)	0,97
				X_4 0,004		
II	UX_1X_4	27,5		X_1 0,011	$\hat{Y} = 63,99 + 1,57X_1 + 0,46X_4$ (1)	0,95
				X_4 0,036		
	UX_3X_4	18,3		X_3 0,035	$\hat{Y} = 152,26 + 77,60X_3 + 0,52X_4$ (2)	0,93
				X_4 0,037		
III	UX_1X_4	73,9	X_1 0,001	$\hat{Y} = -43,46 + 1,74X_1 + 0,61X_4$ (1)	0,98	
			X_4 0,002			
	UX_3X_4	97,8	X_3 0,0004	$\hat{Y} = -8,40 + 76,45X_3 + 0,68X_4$ (2)	0,98	
			X_4 0,0003			

Окончание табл. 5

Технология	Взаимосвязь	Дисперсия		P-значение	Модель множественной регрессии	R	
		F _{факт}	F _{0,05}				
Сорт Немчиновская 85							
I	y _{X₁X₄}	15,3	4,88	X ₁	0,050	$\hat{Y} = -83,75 + 1,26X_1 + 0,66X_4 (1)$	0,93
				X ₄	0,048		
	y _{X₃X₄}	18,7		X ₃	0,031	$\hat{Y} = -31,19 + 87,29X_3 + 0,64X_4 (2)$	0,94
				X ₄	0,039		
II	y _{X₁X₄}	41,6		X ₁	0,004	$\hat{Y} = -269,26 + 2,42X_1 + 0,63X_4 (1)$	0,97
				X ₄	0,035		
	y _{X₃X₄}	21,4		X ₃	0,021	$\hat{Y} = -146,34 + 100,99X_3 + 0,80X_4 (2)$	0,95
				X ₄	0,034		
III	y _{X₁X₄}	66,7	X ₁	0,002	$\hat{Y} = 4,93 + 1,99X_1 + 0,53X_4 (1)$	0,98	
			X ₄	0,006			
	y _{X₃X₄}	60,9	X ₃	0,002	$\hat{Y} = -96,24 + 92,35X_3 + 0,66X_4 (2)$	0,98	
			X ₄	0,002			

Примечание. I – базовая; II – интенсивная; III – высокоинтенсивная технология.

Источник: составил Д.С. Тегесов.

Table 5

Multiple regression (models) of formation of biological yield of winter wheat cultivars

Technology	Correlation	Variance		P-Value	Multiple regression model	R	
		F _{actual}	F _{0.05}				
cv. Moskovskaya 40							
I	y _{X₁X₄}	45.9	4.15	X ₁	0.005	$\hat{Y} = -131.53 + 1.27X_1 + 0.85X_4 (1)$	0.97
				X ₄	0.004		
	y _{X₃X₄}	51.3		X ₃	0.002	$\hat{Y} = -68.70 + 123.34X_3 + 0.70X_4 (2)$	0.97
				X ₄	0.004		
II	y _{X₁X₄}	27.5		X ₁	0.011	$\hat{Y} = 63.99 + 1.57X_1 + 0.46X_4 (1)$	0.95
				X ₄	0.036		
	y _{X₃X₄}	18.3		X ₃	0.035	$\hat{Y} = 152.26 + 77.60X_3 + 0.52X_4 (2)$	0.93
				X ₄	0.037		
III	y _{X₁X₄}	73.9	X ₁	0.001	$\hat{Y} = -43.46 + 1.74X_1 + 0.61X_4 (1)$	0.98	
			X ₄	0.002			
	y _{X₃X₄}	97.8	X ₃	0.0004	$\hat{Y} = -8.40 + 76.45X_3 + 0.68X_4 (2)$	0.98	
			X ₄	0.0003			
cv. Nemchinovskaya							
I	y _{X₁X₄}	15.3	4.88	X ₁	0.050	$\hat{Y} = -83.75 + 1.26X_1 + 0.66X_4 (1)$	0.93
				X ₄	0.048		
	y _{X₃X₄}	18.7		X ₃	0.031	$\hat{Y} = -31.19 + 87.29X_3 + 0.64X_4 (2)$	0.94
				X ₄	0.039		
II	y _{X₁X₄}	41.6		X ₁	0.004	$\hat{Y} = -269.26 + 2.42X_1 + 0.63X_4 (1)$	0.97
				X ₄	0.035		
	y _{X₃X₄}	21.4		X ₃	0.021	$\hat{Y} = -146.34 + 100.99X_3 + 0.80X_4 (2)$	0.95
				X ₄	0.034		
III	y _{X₁X₄}	66.7	X ₁	0.002	$\hat{Y} = 4.93 + 1.99X_1 + 0.53X_4 (1)$	0.98	
			X ₄	0.006			
	y _{X₃X₄}	60.9	X ₃	0.002	$\hat{Y} = -96.24 + 92.35X_3 + 0.66X_4 (2)$	0.98	
			X ₄	0.002			

Note. I – basic; II – intensive; III – high-intensity technology.

Source: compiled by D.S. Tegesov.

В результате адекватность уравнений множественной регрессии и факторы влияния X_3 и X_4 подтверждают величину биологической урожайности.

Заключение

Получены адекватные модели прогнозирования потенциальной урожайности озимой пшеницы сортов Московская 40 и Немчиновская 85 для Центрального экономического района с высокими коэффициентами множественной регрессии. Другими словами, полученные модели обладают прогностической способностью. При изменчивости влагообеспечения и установления традиционного результата продуктивного стеблестоя можно прогнозировать фотосинтетическую деятельность растений и потенциальный будущий урожай зерна. Однако, при построении уравнений множественной линейной регрессии следует учитывать особенности сорта и применяемой технологии, которые значимо оказывают влияние на результирующий показатель биологической (потенциальной) урожайности. Поэтому применение единой модели к самой культуре не приемлемо и может исказить прогноз. Выбор метода определил структуру данных и цель исследований, учел специфику сорта и технологии, обеспечил надежные и интерпретируемые результаты.

Список литературы

1. Воронов С.И., Калабашкина Е.В., Музраев В.Н., Цымбалова В.А., Диаките С. Влияние агротехнологий разного уровня интенсивности на продуктивность сортов яровой пшеницы и экономическую эффективность в условиях Центральной Нечерноземной зоны // *Аграрная Россия*. 2025. № 3. С. 3–7. doi: 10.30906/1999-5636-2025-3-3-7 EDN: WOVVJO
2. Воронов С.И., Капранов В.Н., Зеленеv А.В., Киселев Е.Ф., Тегесов Д.С., Салтыков М.А., Похорский В.В. Агрэкономическая эффективность технологий возделывания озимой пшеницы при различных уровнях интенсификации // *Селекция и семеноводство: новые вызовы и возможности, устойчивое развитие и продовольственная безопасность* : материалы V Междунар. науч. конф., Москва, 27–28 марта 2025 г. М. : ФИЦ «Немчиновка», 2025. С. 200–207. EDN: IJJDWF
3. Капранов В.Н., Зеленеv А.В., Киселев Е.Ф., Тегесов Д.С., Плескачев Н.Ю. Роль технологий разного уровня интенсивности в формировании урожайности и качества зерна новых сортов озимой пшеницы // *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование*. 2025. № 1 (79). С. 32–43. doi: 10.32786/2071-9485-2025-01-03 EDN: PURAZT
4. Симаков Л.О. Разработка эргономичного агроценоза для производства продуктов питания в регионах неблагоприятных для сельского хозяйства // *Пищевая индустрия: инновационные процессы, продукты и технологии* : сб. материалов II Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 160-летию Тимирязевской академии, Москва, 22–23 мая 2025 г. М. : Российский государственный аграрный университет, 2025. С. 822–826. EDN: FYZZOU
5. Анфиногентова А.А., Блинова Т.В., Решетникова Е.Г. и др. Продовольственная безопасность России: вызовы, риски, угрозы. Саратов : Институт аграрных проблем РАН, 2011. 270 с. EDN: WERGDR
6. Ярошенко Г.В., Цымбал В.А., Богодистов А.А. Современные вызовы и угрозы продовольственной безопасности Российской Федерации // *Государственное и муниципальное управление. Ученые записки СКАГС*. 2017. № 2. С. 109–113. doi: 10.22394/2079-1690-2017-1-2-109-113 EDN: YSRZBJ
7. Филипповская О.В. Продовольственная безопасность России в свете происходящих геополитических изменений // *Национальные интересы: приоритеты и безопасность*. 2016. Т. 12. № 2 (335). С. 94–105. EDN: VMCZVN

8. Адамень Ф.Ф., Коковихин С.В., Сташкина А.Ф. Математическое моделирование продуктивности орошаемой озимой пшеницы в зависимости от влияния метеорологических факторов в условиях Северного Причерноморья // Известия сельскохозяйственной науки Тавриды. 2023. № 33 (196). С. 6–16. EDN: PJCJCX
9. Давыдовский А.Г., Лихачевский А.Г. Моделирование продуктивности агрофитоценозов в условиях погодно-климатических флуктуаций как проблема Big Data // Big Data and Advanced Analytics. 2019. № 5. С. 280–294. EDN: ACUXSZ
10. Изотов А.М., Тарасенко Б.А., Дударев Д.П. Эффективность метода блоков в многофакторных полевых опытах с озимой пшеницей в условиях Крыма // Известия сельскохозяйственной науки Тавриды. 2017. № 11 (174). С. 12–19. EDN: YOPBGL
11. Изотов А.М., Тарасенко Б.А., Дударев Д.П. Эффективность неполных факториальных схем в многофакторных полевых опытах с озимой пшеницей // Известия сельскохозяйственной науки Тавриды. 2019. № 17 (180). С. 14–31. EDN: AUFEOX
12. Базаров С.М., Бельный Ю.И., Базарова М.В. Обобщение регрессионного анализа // Научная жизнь. 2017. № 12. С. 35–42. EDN: YRZQWK
13. Прошкин В.А. Интерпретация результатов агрохимических исследований с использованием статистических моделей // Плодородие. 2014. № 5 (80). С. 21–22. EDN: SXJPBD
14. Лапченко Е.А. Программный комплекс «САТ» для решения производственных задач в растениеводстве // Достижения науки и техники АПК. 2013. № 10. С. 59–61. EDN: RFMFPPZ
15. Лукомец А.В. Теоретико-методологическое обоснование ресурсного обеспечения растениеводства : дис. ... д-ра эконом. наук. Мытищи, 2024. 398 с. EDN: OXNZUN

References

1. Voronov SI, Kalabashkina EV, Muzraev VN, Tsymbalova VA, Diakite S. Impact of different intensity levels of agricultural technologies on the productivity of spring wheat varieties and economic efficiency in the conditions of the Central Non-Chernozem Zone. *Agrarnaya Rossiya*. 2025;(3):3–7. (In Russ.). doi: 10.30906/1999-5636-2025-3-3-7 EDN: WOVVJO
2. Voronov SI, Kapranov VN, Zelenev AV, Kiselev EF, Tegesov DS, Saltykov MA, et al. Agro-economic efficiency of winter wheat cultivation technologies at different levels of intensification. In: *Breeding and seed production: new challenges and opportunities, sustainable development and food security: conference proceedings*. Moscow: 2025. p.200–207. (In Russ.). EDN: IJJDWF
3. Kapranov VN, Zelenev AV, Kiselev EF, Tegesov DS, Pleskachev NY. The role of technologies of different intensity levels in the formation of yield and grain quality of winter wheat new varieties. *Proceedings of Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Education*. 2025;(1):32–43. (In Russ.). doi: 10.32786/2071-9485-2025-01-03 EDN: PURAZT
4. Simakov LO. Development of an ergonomic agrocenosis for food production in regions unfavorable for agriculture. *Food industry: innovative processes, products and technologies: conference proceedings*. Moscow; 2025. p.822–826. (In Russ.). EDN: FYZZOU
5. Anfinogentova AA, Blinova TV, Reshetnikova EG, Yakovenko NA, Andryushchenko SA, Ermolova OV, et al. *Prodovol'stvennaya bezopasnost' Rossii: vyzovy, riski, ugrozy* [Food security of Russia: challenges, risks, threats]. Saratov; 2011. (In Russ.). EDN: WERGDR
6. Yaroshenko GV, Tsymbal VA, Bogodistov AA. Modern challenges and threats of food security of the Russian Federation. *Gosudarstvennoe i municipal'noe upravlenie. Uchenye zapiski*. 2017;(2):109–113. (In Russ.). doi: 10.22394/2079-1690-2017-1-2-109-113 EDN: YSRZBJ
7. Filippovskaya OV. Current geopolitical changes and the food security of Russia. *National Interests: Priorities and Security*. 2016;12(2):94–105. (In Russ.). EDN: VMCZVN
8. Adamen FF, Kokovikhin SV, Stashkina AF. Mathematical modeling of the productivity of irrigated winter wheat depending on the influence of meteorological factors under the conditions of the Northern Black Sea region. *Transactions of Taurida Agricultural Science*. 2023;(33):6–16. (In Russ.). EDN: PJCJCX

9. Davydovsky AG, Likhachevsky AG. Modeling the productivity of agrophytocenoses in the conditions of climatic fluctuations as a Big Data problem. *Big Data and Advanced Analytics*. 2019;(5):280–294. (In Russ.). EDN: ACUXSZ
10. Izotov AM, Tarasenko BA, Dudarev DP. Efficiency of the method of blocks in multifactory field experiments with winter wheat in Crimea conditions. *Transactions of Taurida Agricultural Science*. 2017;(11):12–19. (In Russ.). EDN: YOPBGL
11. Izotov AM, Tarasenko BA, Dudarev DP. The efficiency of the incomplete factorial schemes in multifactor field experiments with winter wheat. *Transactions of Taurida Agricultural Science*. 2019;(17):14–31. (In Russ.). EDN: AUFE0X
12. Bazarov SM, Belenkiy YI, Bazarova MV. Generalization of regression analysis. *Scientific Life*. 2017;(12):35–42. (In Russ.). EDN: YRZQWK
13. Proshkin VA. Interpretation of the results of agrochemical studies using statistical models. *Plodородie*. 2014;(5):21–22. (In Russ.). EDN: SXJPBD
14. Lapchenko EA. The program complex “CAT” for decision production tasks in agriculture. *Achievements of Science and Technology in Agro-industrial Complex*. 2013;(10):59–61. (In Russ.). EDN: RFMFPZ
15. Lukomets AV. *Teoretiko-metodologicheskoe obosnovanie resursnogo obespecheniya rasteniyevodstva* [Theoretical and methodological substantiation of resource provision for crop production]. Mytishchi; 2024. (In Russ.). EDN: OXNZUN

Об авторах:

Зеленев Александр Васильевич — доктор сельскохозяйственных наук, главный научный сотрудник лаборатории сортовых технологий озимых зерновых культур и систем применения удобрений, Федеральный исследовательский центр «Немчиновка», Российская Федерация, 121205, г. Москва, территория Инновационного центра Сколково, бульвар Большой, д. 30, стр. 1, офис 304; профессор департамента агробиотехнологий аграрно-технологического института, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; e-mail: zelenev-av@rudn.ru
ORCID: 0000-0002-9351-9922 SPIN-код: 4057-2663

Капранов Владимир Николаевич — доктор сельскохозяйственных наук, главный научный сотрудник лаборатории сортовых технологий озимых зерновых культур и систем применения удобрений, Федеральный исследовательский центр «Немчиновка», Российская Федерация, 121205, г. Москва, территория Инновационного центра Сколково, бульвар Большой, д. 30, стр. 1, офис 304; e-mail: kapr4nov.v@yandex.ru
ORCID: 0009-0009-9950-3663 SPIN-код: 6381-8239

Тегесов Дольган Сергеевич — кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией сортовых технологий озимых зерновых культур и систем применения удобрений, Федеральный исследовательский центр «Немчиновка», Российская Федерация, 121205, г. Москва, территория Инновационного центра Сколково, бульвар Большой, д. 30, стр. 1, офис 304; e-mail: dolgan08@mail.ru
ORCID: 0009-0007-3978-2520 SPIN-код: 4933-3335

Мамедов Рамин Закирович — кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник лаборатории селекции и первичного семеноводства озимой пшеницы, Федеральный исследовательский центр «Немчиновка», Российская Федерация, 121205, г. Москва, территория Инновационного центра Сколково, бульвар Большой, д. 30, стр. 1, офис 304; e-mail: mam-ramin@yandex.ru
ORCID: 0000-0003-2473-4538 SPIN-код: 6881-8565

Киселев Евгений Федорович — кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник лаборатории сортовых технологий озимых зерновых культур и систем применения удобрений, Федеральный исследовательский центр «Немчиновка», Российская Федерация, 121205, г. Москва, территория Инновационного центра Сколково, бульвар Большой, д. 30, стр. 1, офис 304; e-mail: para-john-k@yandex.ru
ORCID: 0009-0000-5764-4868 SPIN-код: 4810-9680

About authors:

Zelenev Aleksandr Vasilyevich — Doctor of Agricultural Sciences, Chief Researcher, Laboratory of Varietal Technologies of Winter Grain Crops and Fertilizer Application Systems, Federal Research Center “Nemchinovka”, 30 Bolshoy Boulevard, bldg. 1, Skolkovo Innovation Center, Moscow, 121205, Russian Federation; Professor, Department of Agrobiotechnology, Agrarian and Technological Institute, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya st., Moscow, 117198, Russian Federation; e-mail: zelenev-av@rudn.ru

ORCID: 0000-0002-9351-9922 SPIN-code: 4057-2663

Kapranov Vladimir Nikolaevich — Doctor of Agricultural Sciences, Chief Researcher, Laboratory of Varietal Technologies of Winter Grain Crops and Fertilizer Application Systems, Federal Research Center “Nemchinovka”, 30 Bolshoy Boulevard, bldg. 1, Skolkovo Innovation Center, Moscow, 121205, Russian Federation; e-mail: kapr4nov.v@yandex.ru

ORCID: 0009-0009-9950-3663 SPIN-code: 6381-8239

Tegesov Dolgan Sergeevich — Candidate of Agricultural Sciences, Leading Researcher, Head of the Laboratory of Varietal Technologies of Winter Grain Crops and Fertilizer Application Systems, Federal Research Center “Nemchinovka”, 30 Bolshoy Boulevard, bldg. 1, Skolkovo Innovation Center, Moscow, 121205, Russian Federation; e-mail: dolgan08@mail.ru

ORCID: 0009-0007-3978-2520 SPIN-code: 4933-3335

Mamedov Ramin Zakirovich — Candidate of Agricultural Sciences, Leading Researcher, Laboratory of Breeding and Primary Seed Production of Winter Wheat, Federal Research Center “Nemchinovka”, 30 Bolshoy Boulevard, bldg. 1, Skolkovo Innovation Center, Moscow, 121205, Russian Federation; e-mail: mam-ramin@yandex.ru

ORCID: 0000-0003-2473-4538 SPIN-code: 6881-8565

Kiselev Evgeny Fedorovich — Candidate of Agricultural Sciences, Leading Researcher, Laboratory of Varietal Technologies of Winter Grain Crops and Fertilizer Application Systems, Federal Research Center “Nemchinovka”, 30 Bolshoy Boulevard, bldg. 1, Skolkovo Innovation Center, Moscow, 121205, Russian Federation; e-mail: papa-john-k@yandex.ru

ORCID: 0009-0000-5764-4868 SPIN-code: 4810-9680