



Научная статья

УДК 551.583

<https://doi.org/10.37493/2308-4758.2025.4.2>

ВЛИЯНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА УСЛОВИЯ ПРОИЗВОДСТВА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПРОДУКЦИИ В КБР

Борис Азреталиевич Ашабоков^{1,2},
Алла Амарбиевна Ташилова^{3*},
Лара Асировна Кешева⁴,
Наталья Вячеславовна Теунова⁵

^{1,3,4,5} Высокотемпературный геофизический институт (д. 2, пр. Ленина, 360001, Нальчик, Российская Федерация)

² Институт информатики и проблем регионального управления КБНЦ РАН (д. 37А, ул. И. Арманд, 360000, Нальчик, Российская Федерация)

^{1,2} ashabokov.boris@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2889-0864>

³ tashilovaa@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2368-6047>

⁴ kesheva.lara@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5132-1563>

⁵ nata0770@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1135-3587>

* Автор, ответственный за переписку

Аннотация.

Объектом исследования являются изменения регионального климата, его влияние на производство с/х культур и создание модели урожайности озимой пшеницы в условиях степной зоны Кабардино-Балкарской Республики (КБР). Исследование построено на анализе климатических изменений на степной метеостанции Прохладная (КБР). В период 1961–2024 г. увеличение среднегодовых температур составило 0,37 °C/10 лет ($D = 46\%$) с наибольшей скоростью роста в летний сезон (0,48 °C/10 лет, $D = 50\%$). В исследуемый период имела место незначительная положительная тенденция годовых и сезонных сумм осадков, за исключением летнего сезона (уменьшение на 5,2 мм/10 лет) и весеннего сезона с 1976 года (уменьшение на 0,18 мм/10 лет), когда необходима достаточная влагообеспеченность почвы. В результате исследования получено, что климатические изменения в степной зоне Кабардино-Балкарии проявляются в возрастании продолжительности и интенсивности жаркой погоды. Происходит небольшое уменьшение осадков летом при одновременном увеличении интенсивности ливневых осадков, возрастает засушливость в летний период. Поскольку урожайность с/х культур зависит от взаимодействия различных факторов окружающей среды и специфических характеристик каждого вида растения, то в данной работе предложен новый подход к улучшению информационного обеспечения задачи снижения рисков в сельском хозяйстве, связанных с нехваткой влаги в почве на примере степной зоны КБР. Этот подход заключается в исполь-

зовании значений коэффициентов влагообеспеченности почвы, рассчитанных по данным среднемесячных сумм осадков в марте, апреле, мае и в летнем сезоне, и среднемесячной температуры в эти же периоды за 1961–2024 гг. на м/станции Прохладная. Используя метод наименьших квадратов получены параметры фактического уравнения для расчета урожайности озимой пшеницы. Результаты корреляционного анализа между фактическими и расчетными значениями урожайности на 1%-ном уровне значимости ($r = 0,54$, $\text{Sig.} = 0,001 < p = 0,01$) показали хорошее соответствие между фактическими значениями урожайности и модельными, рассчитанными по формуле модели. Новая мультипликативная модель урожайности озимых культур может быть использована для оценки изменений урожайности озимых культур в зависимости от изменения температуры, осадков, увлажнения почвы в летний и весенний сезоны на период упреждения.

Ключевые слова: сезонные и годовые температуры, суммы осадков, Кабардино-Балкарская республика, степная зона, агроклиматические ресурсы, озимые культуры, мультипликативная модель

Для цитирования: Ашабоков Б.А., Ташилова А.А., Кешева Л.А., Теунова Н.В. Влияние климатических факторов на условия производства сельскохозяйственной продукции в КБР // Наука. Инновации. Технологии. 2025. №4. С. 47–68. <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2025.4.2>

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 23.07.2025;
одобрена после рецензирования 31.11.2025;
принята к публикации 15.12.2025.

1.6.18. Atmospheric and Climate Sciences (Physical and Mathematical Sciences) Research article

The influence of climatic factors on the conditions of agricultural production in the Kabardino-Balkarian Republic

**Boris A. Ashabokov^{1,2},
Alla A. Tashilova^{3*},
Lara A. Kesheva⁴,
Nataliya V. Teunova⁵**

^{1,3,4,5} High-Mountain Geophysical Institute (2, Lenin av, 360030, Nalchik, Russian Federation)

² Institute of Informatics and Regional Management Problems of the KBSC RAS (37A, I. Armand St., 360000, Nalchik, Russian Federation)
^{1,2} ashabokovboris@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2889-0864>

³ tashilovaa@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2368-6047>

⁴ kesheva.lara@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5132-1563>

⁵ nata0770@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1135-3587>

* Corresponding author

Abstract.

The object of the study is the changes in the regional climate, its impact on the production of agricultural crops and the creation of a model of winter wheat yield in the steppe zone of the Kabardino-Balkarian Republic (KBR). The study is based on the analysis of climate changes at the steppe meteorological station Prokhladnaya (KBR). In the period 1961–2024 the increase in average annual temperatures was 0.37 °C/10 years ($D = 46\%$) with the highest growth rate in the summer season (0.48 °C/10 years, $D = 50\%$). During the study period, there was a slight positive trend in annual and seasonal precipitation amounts, with the exception of the summer season (a decrease of 5.2 mm/10 years) and the spring season since 1976 (a decrease of 0.18 mm/10 years), when sufficient soil moisture is needed. It was found that climatic changes in the steppe zone of Kabardino-Balkaria are manifested in an increase in the duration and intensity of hot weather. There is a slight decrease in precipitation in summer with a simultaneous increase in the intensity of heavy rainfall, and aridity increases in summer. Since the yield of agricultural crops depends on the interaction of various environmental factors and the specific characteristics of each plant species, this paper proposes a new approach to improving the information support for the task of reducing risks in agriculture, associated with a lack of moisture in the soil using the steppe zone of the KBR as an example. This approach involved using the values of the soil moisture supply coefficients calculated based on average monthly precipitation in March, April, May and in the summer season, and average monthly temperature in the same periods for 1961–2024 at the Prokhladnaya station. Using the least squares method, the parameters of the actual equation for calculating the yield of winter wheat were obtained. The results of the correlation analysis between the actual and estimated yield values at a 1% significance level ($r = 0.54$, $\text{Sig.} = 0.001 < p = 0.01$) showed good agreement between the actual yield values and the model ones calculated using the model formula. The new multiplicative model of winter crop yield can be used to assess changes in the yield of winter crops depending on changes in temperature, precipitation, and soil moisture in the summer and spring seasons for the lead period.

Keywords:

seasonal and annual temperatures, precipitation amounts, Kabardino-Balkarian Republic, steppe zone, agroclimatic resources, winter crops, multiplicative model

For citation:

Ashabakov BA, Tashilova AA, Kesheva LA, Teunova NV. The influence of climatic factors on the conditions of agricultural production in the Kabardino-Balkarian Republic. *Science. Innovations. Technologies.* 2025;(4):47-68. (In Russ.). <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2025.4.2>

Conflict of interest: the authors declare no conflicts of interests.

The article was submitted 23.07.2025;
approved after reviewing 31.11.2025;
accepted for publication 15.12.2025.

Введение

Современная тенденция к потеплению, особенно в сельскохозяйственных регионах, усиливает интерес к исследованиям, связанным с изменением климата, агроклиматическими ресурсами и их составляющей – продуктивности сельскохозяйственных культур.

Во многих работах вопросы современного устойчивого развития регионов приобрели особую актуальность в последние десятилетия, когда климатические характеристики и агроклиматические ресурсы начали испытывать значительные изменения [1, 2, 3]. Зависимость от погодных условий делает производство сельскохозяйственной продукции неустойчивым. Решение проблемы анализа изменения климата, исследования возможных последствий этих изменений с целью адаптации к ним, в первую очередь сельского хозяйства, связано с разработкой эффективных методов детальной оценки и использования агроклиматических ресурсов.

Изучение влияния изменения регионального климата на производство с/х культур проводится многими исследователями с использованием разнообразных подходов [4, 5, 6], но лишь немногие рассматривали реализацию стратегии адаптации [7, 8].

По данным из Доклада Росгидромета [9] на территории России продолжается потепление, темпы которого намного превышают среднеглобальные. В период с 1976 по 2024 г. скорость роста осредненной по России среднегодовой температуры (линейный тренд) составила $+0,50^{\circ}\text{C}/10$ лет (вклад в общую изменчивость 60%), что более чем в два с половиной раза больше скорости роста глобальной температуры за тот же период.

Потепление наблюдается на всей территории России во все сезоны. Максимум летнего потепления отмечается на юге европейской части России (ЕЧР): $0,73^{\circ}\text{C}/10$ лет для ЮФО и $0,62^{\circ}\text{C}/10$ лет для СКФО. При этом за последние десять лет количество летних осадков снизилось на 4,8%, что наряду с ростом температуры увеличивает риск наступления засухи, приводящей к негативным последствиям для аграрного сектора.

Из работ авторов, посвященных исследованию изменений этих факторов на Северном Кавказе, можно отметить [7, 10, 11].

В работах [10, 11] приведены результаты анализа изменений режима атмосферных осадков и температурного режима воздуха, определены экстремальные значения, сделан прогноз и рассмотрены проблемы адаптации аграрно-промышленного комплекса к изменению климата на юге европейской территории России. Кроме этого, определялись значения гидротермического коэффициента увлажнения почвы [12] на отрезке времени 1961–2022 гг. По результатам исследований, на территории данного региона, который играет заметную роль в обеспечении продовольственной безопасности РФ, наблюдается ухудшение условий производства сельскохозяйственной продукции, связанное с уменьшением влагосодержания. Если тенденции в динамике данного показателя сохранятся, то регион окажется в зоне средней и сильной засухи. Влияние изменения климата на функционирование данной отрасли также может осуществляться посредством экстремальных погодных явлений, частота и мощность которых увеличиваются вследствие изменения климата. В условиях Северного Кавказа наиболее важными из них являются засухи и градобития, высокие температуры.

Имеются различные подходы исследователей в создании моделей урожайности в условиях изменения климата [13–17]. В работах [13, 14], используя имитационную модель Климат – Почва – Урожай, приводятся оценки изменений климатически обусловленной урожайности яровой пшеницы в земледельческой зоне России. В работе [15] предлагается метод прогнозирования урожайности пшеницы, картофеля и овощей по многоспектральным космическим изображениям с использованием реальных статистических данных по урожайности для различных сельскохозяйственных культур и разных областей страны. Недостатком модели является то, что осуществляемый прогноз урожайности является краткосрочным (на срок в среднем около месяца). В работе [16] рассматривается влияние комплекса метеорологических факторов (весенние и летние осадки и количество дней апреля с температурой ниже 0 °С) на формирование урожайности зерновых культур средней полосы России на примере озимой пшеницы и ярового ячменя. Прогнозирования урожайности озимой пшеницы и ярового ячменя осуществляется с помощью линейной регрессии. В работе [17] приводится

количественная оценка откликов урожайности некоторых с/х культур на возможные климатические изменения до конца XXI века при реализации климатического сценария RCP 4.5 (сценарий умеренных изменений климата; он предполагает стабилизацию концентрации парниковых газов к середине XXI века за счёт внедрения энергоэффективных технологий и частичного перехода на возобновляемые источники энергии). Установлено, что около 60% межрегиональной изменчивости урожайности зерновых и зернобобовых культур в целом по России объясняется основными климатическими факторами: температурой воздуха и осадками.

Основным условием для посевов озимых зерновых культур является благоприятные условия перезимовки. Потепление климата привело к значительному уменьшению числа зим с опасной для озимых культур минимальной температурой почвы ниже -10°C . Из описания климатических условий степной зоны КБР, приведенной ниже, следует, что наряду с благоприятными условиями зимовки возникают другие риски, связанные с потеплением, а именно – засухи, снижение увлажненности почвы.

Материалы и методы исследований

Климатические условия степной зоны Кабардино-Балкарии характеризуется ярко выраженной изменчивостью погодных условий в течение года. На степной метеостанции Прохладная (Кабардино-Балкарская Республика) среднегодовая температура за 1961–2024 гг. составила $10,7^{\circ}\text{C}$. В период 1961–2024 гг. происходил рост среднегодовых температур со скоростью $0,37^{\circ}\text{C}/10$ лет и высоким вкладом тренда в объясненную дисперсию $D = 46\%$ как результат роста всех сезонных средних температур: в летний сезон на $0,48^{\circ}\text{C}/10$ лет ($D = 50\%$), в зимний сезон на $0,44^{\circ}\text{C}/10$ лет ($D = 17\%$) и в весенний сезон на $0,31^{\circ}\text{C}/10$ лет ($D = 23\%$). Наиболее высокая скорость роста имела место у летних ($0,51^{\circ}\text{C}/10$ лет, $D = 22\%$) и осенних ($0,53^{\circ}\text{C}/10$ лет, $D = 15\%$) абсолютных максимумов температур. Скорость роста годовых абсолютных минимумов температур составила $0,95^{\circ}\text{C}/10$ лет ($D = 13\%$), зимних, весенних, летних и осенних температур, соответственно, $0,95^{\circ}\text{C}/10$ лет, $1,0^{\circ}\text{C}/10$ лет, $0,46^{\circ}\text{C}/10$ лет и $0,21^{\circ}\text{C}/10$ лет. Как видно, наибольший рост на-

блюдается для весенних минимумов температур ($1,0^{\circ}\text{C}/10$ лет [$D = 17\%$]), последствием чего явилось уменьшение весенних заморозков. Годовая сумма осадков на метеостанции Прохладная составила 483,2 мм, в период с 1961 по 2024 г. имела место незначительная положительная тенденция годовых и сезонных сумм осадков, за исключением летнего сезона (уменьшение на 5,2 мм/10 лет) и весеннего сезона с 1976 года (уменьшение на 0,18 мм/10 лет). При этом росли суточные максимумы летних осадков на 2,5 мм/10 лет на статистически значимом уровне ($D = 9\%$), что характеризует увеличение длительности периодов без дождя и усиление ливневых осадков.

Весна – это период, когда растения снова начинают расти после зимнего сезона, и время начала вегетации, которое зависит в основном от температурных условий и влагосодержания почвы (агроклиматические факторы). В начале вегетационного периода агроклиматические условия играют ключевую роль в развитии растений. Необходима достаточная влагообеспеченность почвы для каждого весеннего месяца и затем в летний сезон. Также высокую урожайность обеспечивают благоприятные температурные условия в летний сезон и их соотношение с эффективной температурой (наиболее благоприятная температура для созревания культур).

Выбор модели урожайности зависит от взаимодействия различных факторов окружающей среды и специфических характеристик каждого вида растения и всегда есть возможность учесть другие важные факторы, влияющих на урожайность.

В работе [18] была предложена 1-я мультипликативная модель, в которой предполагалось, что зависимость урожайности озимых сельскохозяйственных культур от агрометеорологических факторов (всесезонные осадки p_i и температуры T_i , эффективная температура T_e) описывается выражением вида:

$$y = Y_0 T_B^{a_1} T_L^{a_2} e^{-\frac{T_L}{T_3}} T_0^{a_3} T_3^{a_4} (p_0 + p_3)^{b_1} (p_3 + p_B)^{b_2} (p_B + p_L)^{b_3}. \quad (1)$$

В данной работе предложен новый подход к улучшению информационного обеспечения задачи снижения рисков в сельском хозяйстве, связанных с нехваткой влаги в почве в земледельческой зоне КБР. Он заключается в использовании значений коэффи-

циентов влагообеспеченности почвы [12], рассчитанных по данным среднемесячных сумм осадков и среднемесячной температуры за 1961–2024 гг. на м/станции Прохладная:

$$K = \Sigma R / 0,1 * \Sigma t \quad (2)$$

где ΣR – сумма осадков в марте, апреле, мае и в летнем сезоне, мм;

Σt – сумма температур в эти же периоды, °С.

При $K < 1,0$ для почвы определяется дефицит увлажнения с различной степенью интенсивности.

Результаты исследований и их обсуждение

По результатам анализа долговременного изменения коэффициента увлажнения почвы K получено, что за последние 60 лет степная зона КБР по состоянию влагообеспеченности остается слабозасушливым районом ($K = 0,90$). За исследованный период имело место уменьшение коэффициента K (степной район, метеостанция Прохладная), что демонстрирует уменьшение влагообеспеченности, близкое к статистически значимому на 5 %-ном уровне. Такие быстрые темпы уменьшения K на м/станции Прохладная позволяет сделать вывод, что степная зона региона скоро полностью окажется в зоне средней и сильной засухи.

Таким образом, климатические изменения в степной зоне Кабардино-Балкарии проявляются в возрастании продолжительности и интенсивности жаркой погоды. Происходит небольшое уменьшение осадков летом при одновременном увеличении интенсивности ливневых осадков, возрастает засушливость в летний период.

С учетом современных климатических изменений в степной зоне КБР, была предложена новая мультипликативная модель озимых культур:

$$Y_{оз} = Y_0 e^{-a_1 \frac{|T_{л}-T_{э}|}{T_{э}}} T_{л}^{a_2} P_{MT}^{b_1} P_{АП}^{b_2} P_{М}^{b_3} P_{Л}^{b_4}, \quad (3)$$

где Y_0 – параметр, имеющий размерность урожайности;
 $T_{\text{л}}$ – средние температуры воздуха в летние сезоны;
 T_3 – оптимальная (эффективная) для культуры летняя температура,
 $T_3 = 25^\circ\text{C}$; $P_{\text{мт}}$, $P_{\text{ап}}$, $P_{\text{м}}$ и $P_{\text{л}}$ – коэффициенты влагообеспеченности почвы в марте, апреле, мае и в летние сезоны.

Прологарифмировав выражение (3), получим:

$$\ln Y_{\text{оз}} = \ln Y_0 - a_1 \frac{|T_{\text{л}}^i - T_3|}{T_3} + a_2 \ln T_{\text{л}} + b_1 \ln P_{\text{мт}} + b_2 \ln P_{\text{ап}} + b_3 \ln P_{\text{м}} + b_4 \ln P_{\text{л}}. \quad (4)$$

Для использования метода наименьших квадратов (МНК), т. е. для построения модели по формуле (4), длина временных рядов значений фактической урожайности $Y_{\text{оз}}$ должна совпадать по длине со всеми остальными параметрами.

Значения $Y_{\text{оз}}^i$ известны в m точках ($Y_{\text{оз}}^i = Y_{\text{оз}}^1, Y_{\text{оз}}^2, \dots, Y_{\text{оз}}^m$ – фактические урожайности в 1991–2024 гг., $i = \overline{1, m} - 34$). Значения остальных параметров также известны в n -точках с 1991 по 2024 г. ($P_{\text{л}}^j, P_{\text{л}}^j, P_{\text{мт}}^j, P_{\text{ап}}^j, P_{\text{м}}^j; j = \overline{1, n} - 34$). Имеем, что длина ряда $Y_{\text{оз}}^i$ совпадает с длиной рядов $P_{\text{л}}^j; P_{\text{л}}^j, P_{\text{мт}}^j, P_{\text{ап}}^j, P_{\text{м}}^j$ ($i = j = m = n = 34$).

Получим фактическое уравнение расчета урожайности озимой пшеницы:

$$\ln Y_{\text{оз}}^i = \ln Y_0^i - a_1 \frac{|T_{\text{л}}^i - T_3|}{T_3} + a_2 \ln T_{\text{л}}^i + b_1 \ln P_{\text{мт}}^i + b_2 \ln P_{\text{ап}}^i + b_3 \ln P_{\text{м}}^i + b_4 \ln P_{\text{л}}^i \quad (5)$$

Определим ошибку Δ как разницу между моделью (правая часть выражения (5)) и фактическими значениями $Y_{\text{оз}}^i$ (левая часть), тогда квадрат ошибки равен:

$$\Delta^2 = [\text{модель} - \ln Y_{\text{оз}}^i]^2 \quad (6)$$

Обозначив $\ln Y_0 = a_0$, получим:

$$\Delta^2 = \sum_{i=1}^n \left[a_0 - a_1 \frac{|T_{л}^i - T_3|}{T_3} + a_2 \ln T_{л}^i + b_1 \ln P_{MT}^i + b_2 \ln P_{ан}^i + b_3 \ln P_{M}^i + b_4 \ln P_{л}^i - \ln Y_{03}^i \right], \quad (7)$$

где $a_0, a_1, a_2, b_1, b_2, b_3, b_4$, – коэффициенты уравнения, подлежащие оцениванию с помощью метода наименьших квадратов, а именно минимизации суммы квадратов ошибки ($\Delta^2 \rightarrow \min$).

Минимум квадрата ошибки Δ^2 достигается, когда частные производные по коэффициентам $a_{0,1,2}$ и $b_{1,2,3,4}$ равны нулю.

Продифференцируем уравнение (7) по параметрам $a_{0,1,2}$ и $b_{1,2,3,4}$ и приравняем к нулю производные:

$$\frac{1}{2} \frac{\partial(\Delta^2)}{\partial a_0} = \sum_{i=1}^n \left[a_0 - a_1 \frac{|T_{л}^i - T_3|}{T_3} + a_2 \ln T_{л}^i - \frac{|T_{л}^i - T_3|}{T_3} + b_1 \ln P_{MT}^i + b_2 \ln P_{ан}^i + b_3 \ln P_{M}^i + b_4 \ln P_{л}^i - \ln Y_{03}^i \right] = 0 \quad (8a)$$

$$\frac{1}{2} \frac{\partial(\Delta^2)}{\partial a_1} = \sum_{i=1}^n \left[a_0 - a_1 \frac{|T_{л}^i - T_3|}{T_3} + a_2 \ln T_{л}^i - \frac{|T_{л}^i - T_3|}{T_3} + b_1 \ln P_{MT}^i + b_2 \ln P_{ан}^i + b_3 \ln P_{M}^i + b_4 \ln P_{л}^i - \ln Y_{03}^i \right] \cdot \ln \left(-\frac{|T_{л}^i - T_3|}{T_3} \right) = 0 \quad (8б)$$

$$\frac{1}{2} \frac{\partial \Delta^2}{\partial a_2} = \sum_{i=1}^n \left[a_0 - a_1 \frac{|T_{л}^i - T_3|}{T_3} + a_2 \ln T_{л}^i + b_1 \ln P_{MT}^i + b_2 \ln P_{ан}^i + b_3 \ln P_{M}^i + b_4 \ln P_{л}^i - \ln Y_{03}^i \right] \cdot \ln T_{л}^i = 0 \quad (8в)$$

$$\frac{1}{2} \frac{\partial \Delta^2}{\partial b_1} = \sum_{i=1}^n \left[a_0 - a_1 \frac{|T_{л}^i - T_3|}{T_3} + a_2 \ln T_{л}^i + b_1 \ln P_{MT}^i + b_2 \ln P_{ан}^i + b_3 \ln P_{M}^i + b_4 \ln P_{л}^i - \ln Y_{03}^i \right] \cdot \ln P_{MT}^i = 0 \quad (8г)$$

$$\frac{1}{2} \frac{\partial \Delta^2}{\partial b_2} = \sum_{i=1}^n \left[a_0 - a_1 \frac{|T_{л}^i - T_3|}{T_3} + a_2 \ln T_{л}^i + b_1 \ln P_{MT}^i + b_2 \ln P_{ан}^i + b_3 \ln P_{M}^i + b_4 \ln P_{л}^i - \ln Y_{03}^i \right] \cdot \ln P_{ан}^i = 0 \quad (8д)$$

$$\frac{1}{2} \frac{\partial \Delta^2}{\partial b_3} = \sum_{i=1}^n \left[a_0 - a_1 \frac{|T_{л}^i - T_3|}{T_3} + a_2 \ln T_{л}^i + b_1 \ln P_{MT}^i + b_2 \ln P_{ан}^i + b_3 \ln P_{M}^i + b_4 \ln P_{л}^i - \ln Y_{03}^i \right] \cdot \ln P_{M}^i = 0 \quad (8е)$$

$$\frac{1}{2} \frac{\partial \Delta^2}{\partial b_4} = \sum_{i=1}^n \left[a_0 - a_1 \frac{|T_{\text{л}}^i - T_3|}{T_3} + a_2 \ln T_{\text{л}}^i + b_1 \ln P_{\text{МТ}}^i + b_2 \ln P_{\text{ап}}^i + \right. \\ \left. + b_3 \ln P_{\text{М}}^i + b_4 \ln P_{\text{л}}^i - \ln Y_{03}^i \right] \cdot \ln P_{\text{л}}^i = 0 \quad (8\text{ж})$$

Введем обозначения $a_0 = x_1$, $a_1 = x_2$, $a_2 = x_3$ и $b_1 = x_4$, $b_2 = x_5$, $b_3 = x_6$, $b_4 = x_7$ и запишем уравнения относительно $x_1 - x_7$:

$$x_1 \sum_{i=1}^n 1 + x_2 \sum_{i=1}^n \left(-\frac{|T_{\text{л}}^i - T_3|}{T_3} \right) + x_3 \sum_{i=1}^n \ln T_{\text{л}}^i + x_4 \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{МТ}}^i + \\ + x_5 \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{ап}}^i + x_6 \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{М}}^i + x_7 \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{л}}^i = \sum_{i=1}^n \ln Y_{03}^i \quad (9\text{а})$$

($n = 34$, все значения переменных T , P , Y с 1991 по 2024 гг.)

Также для остальных уравнений:

$$x_1 \sum_{i=1}^n \left(-\frac{|T_{\text{л}}^i - T_3|}{T_3} \right) + x_2 \sum_{i=1}^n \left(-\frac{|T_{\text{л}}^i - T_3|}{T_3} \right) \left(-\frac{|T_{\text{л}}^i - T_3|}{T_3} \right) + \\ + x_3 \sum_{i=1}^n \ln T_{\text{л}}^i \left(-\frac{|T_{\text{л}}^i - T_3|}{T_3} \right) + x_4 \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{МТ}}^i \left(-\frac{|T_{\text{л}}^i - T_3|}{T_3} \right) + \\ + x_5 \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{ап}}^i \left(-\frac{|T_{\text{л}}^i - T_3|}{T_3} \right) + x_6 \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{М}}^i \left(-\frac{|T_{\text{л}}^i - T_3|}{T_3} \right) + \\ + x_7 \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{л}}^i \left(-\frac{|T_{\text{л}}^i - T_3|}{T_3} \right) = \sum_{i=1}^n \ln Y_{03}^i \left(-\frac{|T_{\text{л}}^i - T_3|}{T_3} \right) \quad (9\text{б})$$

$$x_1 \sum_{i=1}^n \ln T_{\text{л}}^i + x_2 \sum_{i=1}^n \left(-\frac{|T_{\text{л}}^i - T_3|}{T_3} \right) \ln T_{\text{л}}^i + x_3 \sum_{i=1}^n \ln T_{\text{л}}^i \ln T_{\text{л}}^i + \\ + x_4 \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{МТ}}^i \ln T_{\text{л}}^i + x_5 \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{ап}}^i \ln T_{\text{л}}^i + x_6 \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{М}}^i \ln T_{\text{л}}^i + \\ + x_7 \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{л}}^i \ln T_{\text{л}}^i = \sum_{i=1}^n \ln Y_{03}^i \ln T_{\text{л}}^i \quad (9\text{в})$$

$$x_1 \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{МТ}}^i + x_2 \sum_{i=1}^n \left(-\frac{|T_{\text{л}}^i - T_3|}{T_3} \right) \ln P_{\text{МТ}}^i + \\ + x_3 \sum_{i=1}^n \ln T_{\text{л}}^i \ln P_{\text{МТ}}^i + x_4 \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{МТ}}^i \ln P_{\text{МТ}}^i + x_5 \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{ап}}^i \ln P_{\text{МТ}}^i + \\ + x_6 \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{М}}^i \ln P_{\text{МТ}}^i + x_7 \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{л}}^i \ln P_{\text{МТ}}^i = \sum_{i=1}^n \ln Y_{03}^i \ln P_{\text{МТ}}^i \quad (9\text{г})$$

$$\begin{aligned}
& x_1 \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{ап}}^i + x_2 \sum_{i=1}^n \left(-\frac{|T_{\text{л}}^i - T_3|}{T_3}\right) \ln P_{\text{ап}}^i + x_3 \sum_{i=1}^n \ln T_{\text{л}}^i \ln P_{\text{ап}}^i + \\
& + x_4 \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{мт}}^i \ln P_{\text{ап}}^i + x_5 \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{ап}}^i \ln P_{\text{ап}}^i + x_6 \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{м}}^i \ln P_{\text{ап}}^i + \quad (9\text{д}) \\
& + x_7 \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{л}}^i \ln P_{\text{ап}}^i = \sum_{i=1}^n \ln Y_{03}^i \ln P_{\text{ап}}^i
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& x_1 \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{м}}^i + x_2 \sum_{i=1}^n \left(-\frac{|T_{\text{л}}^i - T_3|}{T_3}\right) \ln P_{\text{м}}^i + x_3 \sum_{i=1}^n \ln T_{\text{л}}^i \ln P_{\text{м}}^i + \\
& + x_4 \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{мт}}^i \ln P_{\text{м}}^i + x_5 \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{ап}}^i \ln P_{\text{м}}^i + x_6 \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{м}}^i \ln P_{\text{м}}^i + \quad (9\text{е}) \\
& + x_7 \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{л}}^i \ln P_{\text{м}}^i = \sum_{i=1}^n \ln Y_{03}^i \ln P_{\text{м}}^i
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& x_1 \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{л}}^i + x_2 \sum_{i=1}^n \left(-\frac{|T_{\text{л}}^i - T_3|}{T_3}\right) \ln P_{\text{л}}^i + x_3 \sum_{i=1}^n \ln T_{\text{л}}^i \ln P_{\text{л}}^i + \\
& + x_4 \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{мт}}^i \ln P_{\text{л}}^i + x_5 \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{ап}}^i \ln P_{\text{л}}^i + x_6 \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{м}}^i \ln P_{\text{л}}^i + \quad (9\text{ж}) \\
& + x_7 \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{л}}^i \ln P_{\text{л}}^i = \sum_{i=1}^n \ln Y_{03}^i \ln P_{\text{л}}^i
\end{aligned}$$

С учетом общего вида системы уравнений:

$$\begin{aligned}
A_{11}x_1 + A_{12}x_2 + A_{13}x_3 + A_{14}x_4 + A_{15}x_5 + A_{16}x_6 + A_{17}x_7 &= B_1 \\
A_{21}x_1 + A_{22}x_2 + A_{23}x_3 + A_{24}x_4 + A_{25}x_5 + A_{26}x_6 + A_{27}x_7 &= B_2 \\
A_{31}x_1 + A_{32}x_2 + A_{33}x_3 + A_{34}x_4 + A_{35}x_5 + A_{36}x_6 + A_{37}x_7 &= B_3 \\
A_{41}x_1 + A_{42}x_2 + A_{43}x_3 + A_{44}x_4 + A_{45}x_5 + A_{46}x_6 + A_{47}x_7 &= B_4 \\
A_{51}x_1 + A_{52}x_2 + A_{53}x_3 + A_{54}x_4 + A_{55}x_5 + A_{56}x_6 + A_{57}x_7 &= B_5 \\
A_{61}x_1 + A_{62}x_2 + A_{63}x_3 + A_{64}x_4 + A_{65}x_5 + A_{66}x_6 + A_{67}x_7 &= B_6 \\
A_{71}x_1 + A_{72}x_2 + A_{73}x_3 + A_{74}x_4 + A_{75}x_5 + A_{76}x_6 + A_{77}x_7 &= B_7
\end{aligned}$$

Получим выражения для коэффициентов $A_{11}-A_{77}$ при x , а также B_1-B_7 :

$$\begin{aligned}
1. \quad A_{11} &= \sum_{i=1}^n 1 = n = 34; & A_{12} &= \sum_{i=1}^n \left(-\frac{|T_{\text{л}}^i - T_3|}{T_3}\right); \\
A_{13} &= \sum_{i=1}^n \ln T_{\text{л}}^i; & A_{14} &= \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{мт}}^i; & A_{15} &= \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{ап}}^i \\
A_{16} &= \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{м}}^i; & A_{17} &= \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{л}}^i; & B_1 &= \sum_{i=1}^n \ln Y_{03}^i
\end{aligned}$$

2. $A_{21} = \sum_{i=1}^n \left(-\frac{|T_{\text{л}}^i - T_{\text{э}}|}{T_{\text{э}}}\right)$; $A_{22} = \sum_{i=1}^n \left(-\frac{|T_{\text{л}}^i - T_{\text{э}}|}{T_{\text{э}}}\right) \left(-\frac{|T_{\text{л}}^i - T_{\text{э}}|}{T_{\text{э}}}\right)$;
 $A_{23} = \sum_{i=1}^n \ln T_{\text{л}}^i \left(-\frac{|T_{\text{л}}^i - T_{\text{э}}|}{T_{\text{э}}}\right)$; $A_{24} = \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{MT}}^i \left(-\frac{|T_{\text{л}}^i - T_{\text{э}}|}{T_{\text{э}}}\right)$;
 $A_{25} = \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{ап}}^i \left(-\frac{|T_{\text{л}}^i - T_{\text{э}}|}{T_{\text{э}}}\right)$; $A_{26} = \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{М}}^i \left(-\frac{|T_{\text{л}}^i - T_{\text{э}}|}{T_{\text{э}}}\right)$;
 $A_{27} = \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{л}}^i \left(-\frac{|T_{\text{л}}^i - T_{\text{э}}|}{T_{\text{э}}}\right)$; $B_2 = \sum_{i=1}^n \ln Y_{03}^i \left(-\frac{|T_{\text{л}}^i - T_{\text{э}}|}{T_{\text{э}}}\right)$
3. $A_{31} = \sum_{i=1}^n \ln T_{\text{л}}^i$; $A_{32} = \sum_{i=1}^n \left(-\frac{|T_{\text{л}}^i - T_{\text{э}}|}{T_{\text{э}}}\right) \ln T_{\text{л}}^i$;
 $A_{33} = \sum_{i=1}^n \ln T_{\text{л}}^i \ln T_{\text{л}}^i$; $A_{34} = \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{MT}}^i \ln T_{\text{л}}^i$; $A_{35} = \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{ап}}^i \ln T_{\text{л}}^i$;
 $A_{36} = \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{М}}^i \ln T_{\text{л}}^i$; $A_{37} = \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{л}}^i \ln T_{\text{л}}^i$; $B_3 = \sum_{i=1}^n \ln Y_{03}^i \ln T_{\text{л}}^i$
4. $A_{41} = \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{MT}}^i$; $A_{42} = \sum_{i=1}^n \left(-\frac{|T_{\text{л}}^i - T_{\text{э}}|}{T_{\text{э}}}\right) \ln P_{\text{MT}}^i$; $A_{43} = \sum_{i=1}^n \ln T_{\text{л}}^i \ln P_{\text{MT}}^i$;
 $A_{44} = \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{MT}}^i \ln P_{\text{MT}}^i$; $A_{45} = \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{ап}}^i \ln P_{\text{MT}}^i$; $A_{46} = \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{М}}^i \ln P_{\text{MT}}^i$;
 $A_{47} = \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{л}}^i \ln P_{\text{MT}}^i$; $B_4 = \sum_{i=1}^n \ln Y_{03}^i \ln P_{\text{MT}}^i$
5. $A_{51} = \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{ап}}^i$; $A_{52} = \sum_{i=1}^n \left(-\frac{|T_{\text{л}}^i - T_{\text{э}}|}{T_{\text{э}}}\right) \ln P_{\text{ап}}^i$; $A_{53} = \sum_{i=1}^n \ln T_{\text{л}}^i \ln P_{\text{ап}}^i$;
 $A_{54} = \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{MT}}^i \ln P_{\text{ап}}^i$; $A_{55} = \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{ап}}^i \ln P_{\text{ап}}^i$; $A_{56} = \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{М}}^i \ln P_{\text{ап}}^i$;
 $A_{57} = \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{л}}^i \ln P_{\text{ап}}^i$; $B_5 = \sum_{i=1}^n \ln Y_{03}^i \ln P_{\text{ап}}^i$
6. $A_{61} = \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{М}}^i$; $A_{62} = \sum_{i=1}^n \left(-\frac{|T_{\text{л}}^i - T_{\text{э}}|}{T_{\text{э}}}\right) \ln P_{\text{М}}^i$; $A_{63} = \sum_{i=1}^n \ln T_{\text{л}}^i \ln P_{\text{М}}^i$;
 $A_{64} = \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{MT}}^i \ln P_{\text{М}}^i$; $A_{65} = \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{ап}}^i \ln P_{\text{М}}^i$; $A_{66} = \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{М}}^i \ln P_{\text{М}}^i$;
 $A_{67} = \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{л}}^i \ln P_{\text{М}}^i$; $B_6 = \sum_{i=1}^n \ln Y_{03}^i \ln P_{\text{М}}^i$
7. $A_{71} = \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{л}}^i$; $A_{72} = \sum_{i=1}^n \left(-\frac{|T_{\text{л}}^i - T_{\text{э}}|}{T_{\text{э}}}\right) \ln P_{\text{л}}^i$; $A_{73} = \sum_{i=1}^n \ln T_{\text{л}}^i \ln P_{\text{л}}^i$;
 $A_{74} = \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{MT}}^i \ln P_{\text{л}}^i$; $A_{75} = \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{ап}}^i \ln P_{\text{л}}^i$; $A_{76} = \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{М}}^i \ln P_{\text{л}}^i$;
 $A_{77} = \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{л}}^i \ln P_{\text{л}}^i$; $B_7 = \sum_{i=1}^n \ln Y_{03}^i \ln P_{\text{л}}^i$

Для определения коэффициентов $A_{11}-A_{77}$ и B_1-B_7 используем данные рядов летних температур $T_{\text{л}}^i$ с 1961 по 2024 г. Также используем результаты расчетов коэффициентов увлажнения P^i в летний период и месяцы март, апрель и май.

При решении задачи нахождения параметров x_1-x_7 в электронной таблице Excel удобнее применить матричный подход. Последовательность действий представлена на рисунке 1: формируется матрица A с элементами из коэффициентов ($A_{11}:A_{77}$) и вектор ($B_1:B_7$) из свободных членов, определяется транспонированная матрица A^T , находятся произведения $A^T B$ и $A^T A$, вычисляется обратная матрица $(A^T A)^{-1}$. Для вычисления итогового результата-решения системы уравнений перемножаются матрицы $(A^T A)^{-1} A^T A$. В ячейках $B46$ и $B52$ имеем результат решения системы – параметры $x_1 - x_7$.

Подставив полученные результаты решения системы x_1-x_7 (соответствующие параметрам a_0-a_2 и b_1-b_4) в формулу (3), получим рабочую формулу модели урожайности озимой пшеницы:

$$Y_{оз} = 35,16e^{-11,11 \frac{|T_{л}-T_{э}|}{T_{э}}} T_{л}^{0,05} P_{MT}^{-0,12} P_{ап}^{-0,06} P_{M}^{-0,21} P_{л}^{0,004}, \quad (10)$$

Подставляя в (10) значения летних температур $T_{л}$, коэффициентов увлажнения за март, апрель, май и летний сезон (P_{MT} , $P_{ап}$, P_{M} и $P_{л}$), получим расчетные значения урожайности озимой пшеницы с 1991 по 2024 г.

На рисунке 2 показано соответствие между фактическими и расчетными значениями урожайности озимой пшеницы с учетом климатических условий степной зоны КБР.

Результаты корреляционного анализа между фактическими и расчетными значениями урожайности представлены в таблице 1. Из таблицы видно, что коэффициент корреляции на 1%-ном уровне значимости ($r = 0,54$, $Sig. = 0,001 < p = 0,01$) демонстрирует хоро-

Таблица 1. КОРРЕЛЯЦИЯ ПИРСОНА МЕЖДУ ФАКТИЧЕСКИМИ И МОДЕЛЬНЫМИ УРОЖАЙНОСТЯМИ
Table 1. Pearson correlation between actual and model yields

Корреляция Пирсона, r	$Y_{факт}$	$Y_{модель}$
$Y_{факт}$	1	0,540
$Y_{модель}$	0,540	1
Sig. знч. (2-сторон)	0,001	
N	34	

Источник: составлено авторами. Source: compiled by the authors.

18 матрица A (A11:A77)								Вектор B (B1:B7)	
19	34	-0,215	193,550	27,340	4,960	0,540		-12,430	115,7
20	-0,215	0,002	-1,22	-0,18	-0,049	0,008		0,057	-0,725
21	193,55	-1,220	1101,750	155,610	28,200	3,080		-109,350	658,52
22	27,34	-0,180	155,610	39,190	3,420	-4,200		-9,950	81,84
23	4,96	-0,049	28,202	3,420	13,521	-0,810		0,969	16,13
24	0,54	0,010	163,090	-4,300	-0,810	8,680		1,950	1,564
25	-12,43	0,060	-70,770	-9,950	0,970	-1,660		11,170	-42,35
27 1.Матрица трансп. A _t									
28	34	-0,215	193,55	27,34	4,96	0,54		-12,43	
29	-0,215	0,002	-1,220	-0,180	-0,049	0,010		0,060	
30	193,550	-1,220	1101,750	155,610	28,202	163,090		-70,770	
31	27,340	-0,180	155,610	39,190	3,420	-4,300		-9,950	
32	4,960	-0,049	28,200	3,420	13,521	-0,810		0,970	
33	0,540	0,008	3,080	-4,200	-0,810	8,680		-1,660	
34	-12,430	0,057	-109,350	-9,950	0,969	1,950		11,170	
2.Произведения (A _t на B)		3. Произведение (A _t на A)							
36	134508,667	37	39544,522	-249,346	225186,674	32257,689	5774,833	520,968	-21992,342
	-648,118	38	-249,346	1,573	-1417,758	-203,584	-36,699	-3,091	138,513
	765917,332	39	225186,674	-1417,758	1307932,719	182932,875	32742,173	4354,591	-124875,726
	109704,697	40	32257,689	-203,584	182932,875	26627,025	4697,920	305,866	-17861,953
	19634,012	41	5774,833	-36,699	32742,173	4697,920	1015,955	55,577	-3156,997
	1775,797	42	520,968	-3,091	4354,591	305,866	55,577	106,172	-304,121
	-74815,532	43	-21992,342	138,513	-124875,726	-17861,953	-3156,997	-304,121	12340,444
4. Обратная matr. (A _t на A) ⁻¹									
	133,1	22189,0	10,3	-59,3	9,7	-255,4	2,3		
	22189,0	3699444,5	1709,8	-9889,1	1623,5	-42598,6	373,3		
	10,3	1709,8	0,8	-4,6	0,7	-19,7	0,2		
	-59,3	-9889,1	-4,6	26,5	-4,3	114,1	-1,0		
	9,7	1623,5	0,7	-4,3	0,7	-18,6	0,2		
	-255,4	-42598,6	-19,7	114,1	-18,6	491,4	-4,2		
	2,3	373,3	0,2	-1,0	0,2	-4,2	0,1		
5.Результат(4.(A _t на A) ⁻¹ умнож. на 2.(A _t на B)									
45									
46	x ₁	3,56	a ₁	Y _{Excel} (3,56)=35,163	35,163				
47	x ₂	11,11	a ₂		11,113				
48	x ₃	0,00	a ₃		0,005				
49	x ₄	-0,12	b ₁		-0,124				
50	x ₅	-0,06	b ₂		-0,064				
51	x ₆	-0,21	b ₃		-0,213				
52	x*	0,00	b ₄		0,004				

Рис. 1.

Скрин-шоты последовательности операций для расчетов параметров $x_1 - x_7$ в Excel.

Fig. 1. Screenshots of the sequence of operations for calculating parameters $x_1 - x_7$ in Excel.

Источник: составлено авторами.

Source: compiled by the authors.

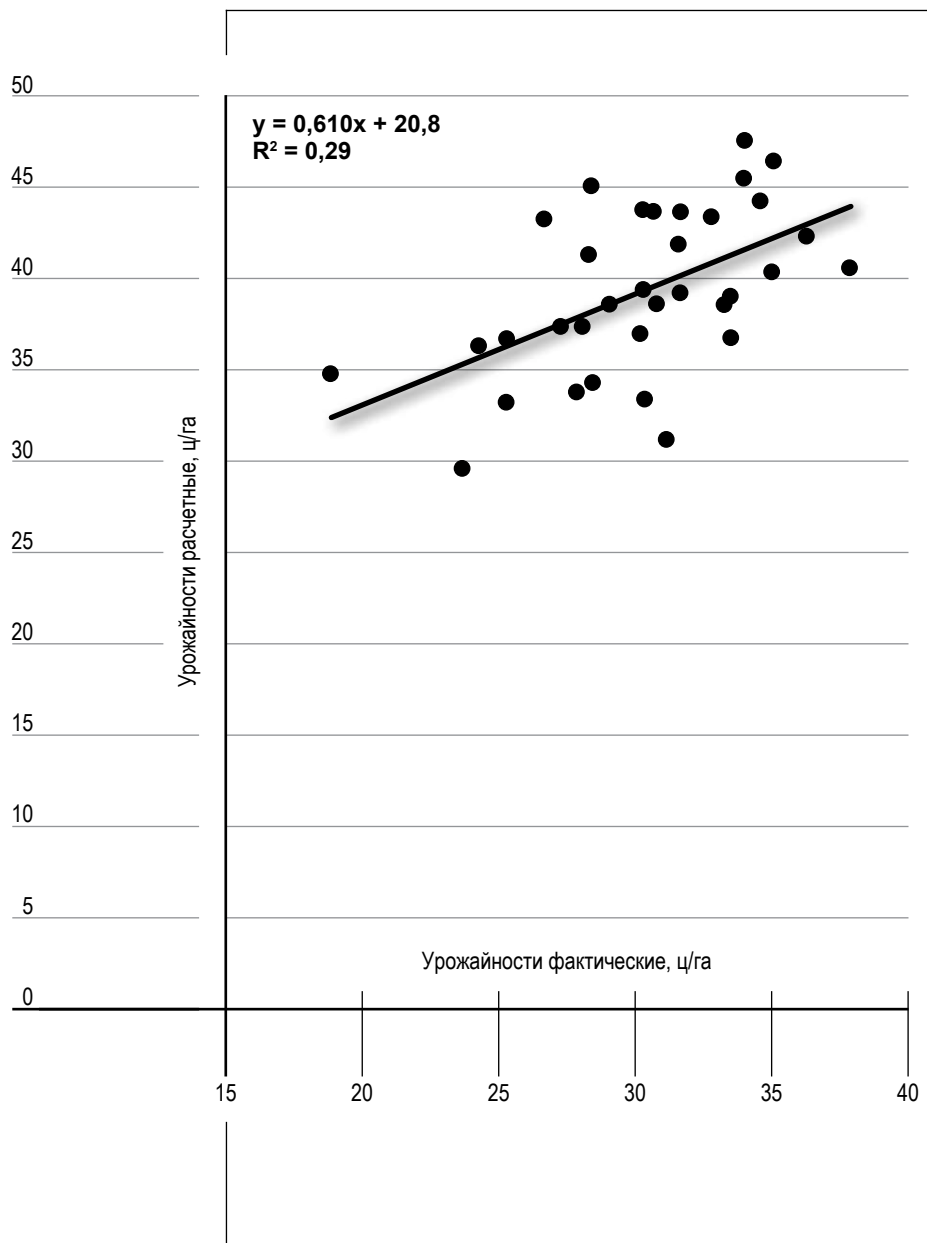


Рис. 2.

Связь между фактическими и расчетными значениями урожайности озимой пшеницы в степной зоне КБР с линейным трендом (парная корреляция $r = 0,54$).

Fig. 2. Correlation between actual and estimated values of winter wheat yield in the steppe zone of the KBR with a linear trend (pair correlation $r = 0.54$).

Источник: составлено авторами.

Source: compiled by the authors.

шее соответствие между фактическими значениями урожайности и модельными, рассчитанными по формуле (10).

Предложенная модель урожайности может быть использована для оценки изменений урожайности озимых культур в зависимости от изменения температуры, осадков, увлажнения почвы в летний и весенний сезоны на период упреждения.

Заключение

Анализ климатических условий в степной зоне КБР за последние 60 лет показал рост термических ресурсов во все сезоны и значимые тенденции к иссушению в летние сезоны. Уменьшение гидротермического коэффициента K в степном районе демонстрирует уменьшение влагообеспеченности, близкое к статистически значимому на 5 %-ном уровне.

Такие тенденции имеют как положительные, так и отрицательные последствия. Так, увеличение продолжительности безморозного периода является положительным фактором, но сокращение периода налива зерна и более раннее созревание при повышении температуры часто ведёт к снижению урожая. Рост температуры воздуха в летние сезоны в сочетании со снижением количества летних осадков либо с незначительным изменением осадков в будущем ведет к повышению аридизации территорий и может иметь отрицательные последствия для сельского хозяйства региона, особенно для степной зоны КБР.

Результат исследования, полученный в виде мультипликативной модели урожайности озимой пшеницы в зависимости от климатообразующих факторов, предоставляет новые возможности для прогнозирования продуктивности климатозависимой сельскохозяйственной культуры от будущих изменений климатических параметров и принятия мер по адаптации для минимизации рисков на фоне потепления климата и аридизации территорий на юге европейской части России.

Список источников

1. Переведенцев Ю. П., Шарипова Р. Б., Важнова Н. А. Агроклиматические ресурсы Ульяновской области и их влияние на урожайность зерновых культур // Вестник УдГУ. Сер. Биология. Науки о Земле. 2012. №2. С. 120–126.

2. Золотокрылин А. Н., Черенокова Е. А., Титкова Т. Б., Михайлов А. Ю., Бардин М. Ю., Ширяева А. В., Виноградова В. В. Изменения урожайности зерновых культур Европейской России, вызванные квазидвухлетней цикличностью атмосферных процессов // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2016. №2. С. 90–99. <https://doi.org/10.15356/0373-2444-2016-2-90-99>
3. Morgounov A., Sonder K., Abugalieva A., Bhadauria V., Cuthbert R.D., Shamanin V. et al. Effect of climate change on spring wheat yields in North America and Eurasia in 1981–2015 and implications for breeding // PLoS ONE. 2018. №13(10): e0204932. [Electronic resource]. URL: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0204932> (accessed: 18.08.2025).
4. Израэль Ю. А., Сиротенко О. Д. Моделирование влияния изменений климата на продуктивность сельского хозяйства России // Метеорология и гидрология. 2003. №6. С. 5–17.
5. Павлова В. Н., Карачёноква А. А. Изменение агроклиматических ресурсов зернопроизводящих регионов России и продуктивности зерновых культур в новом климатическом периоде 1991–2020 гг. // Метеорология и гидрология. 2023. №9. С. 29–42.
6. Вышкваркова Е. В., Воскресенская Е. Н. Агроклиматическая оценка территории Крыма и Донбасса (на примере Севастополя и Артемовска) для рационального размещения виноградников в условиях изменений климата // Метеорология и гидрология. 2023. №10. С. 66–76.
7. Ашабоков Б. А., Федченко Л. М., Ташилова А. А., Кешева Л. А., Теунова Н. В. Формирование плана адаптации регионального аграрного сектора к изменению климата: задачи и методы решения // Метеорология и гидрология. 2023. №10. С. 57–65.
8. Насонов Д. В. Климатические риски и адаптация земледелия // Сельскохозяйственные вести. 2011. №1. С. 36–37.
9. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2024 год. Москва, 2025. 135 с.
10. Ашабоков Б. А. и др. Пространственно-временное изменение климата юга европейской территории России, оценка его последствий, методы и модели адаптации АПК. Нальчик: Фрегат, 2020. 476 с.
11. Ашабоков Б. А., Федченко Л. М., Куповых Г. В., Ташилова А. А., Кешева Л. А., Теунова Н. В., Ашабокова М. Б. Ме-

- тод снижения рисков в сельском хозяйстве, связанных с засухами, с учетом вероятности их появления // Известия ВУЗов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2023. №3. С. 45–56. [https://doi: 10.18522/1026-2237-2023-3-45-56](https://doi.org/10.18522/1026-2237-2023-3-45-56)
12. Селянинов Г. Т. Агроклиматическая карта мира. Л.: Гидрометеоиздат, 1966. 12 с.
 13. Сиротенко О. Д. Имитационная система Климат–Урожай СССР // Метеорология и гидрология. 1991. №4. С. 67–73.
 14. Павлова В. Н., Карачёнова А. А. Изменение агроклиматических ресурсов зернопроизводящих регионов России и продуктивности зерновых культур в новом климатическом периоде 1991–2020 гг. // Метеорология и гидрология. 2023. №9. С. 29–42.
 15. Мурынин А. Б., Бондур В. Г., Игнатъев В. Ю., Гороховский К. Ю. Прогнозирование урожайности на основе многолетних космических наблюдений за динамикой развития вегетации // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. №4. С. 245–256.
 16. Маренич Н. Н., Шкурко В. С. Влияние метеорологических факторов на урожайность зерновых культур и возможности прогнозирования урожаев // Вестник Курганской ГСХА. №1. 2014. С. 18–20.
 17. Сиптиц С. О., Романенко И. А., Евдокимова Н. Е. Модельные оценки влияния климата на урожайность зерновых и зернобобовых культур в регионах России // Проблемы прогнозирования. 2021. №2(185). С. 75–86. [https://doi: 10.47711/0868-6351-185-75-86](https://doi.org/10.47711/0868-6351-185-75-86)
 18. Ашабоков Б. А., Федченко Л. М., Ташилова А. А., Кешева Л. А. Об одной модели адаптации АПК к изменению климата. Инновационные методы и средства исследований в области физики атмосферы, гидрометеорологии, экологии и изменения климата. Материалы Международной научной конференции (Ставрополь, 23-26 сентября 2013 года). Ставрополь, 2013. С. 196–199.

References

1. Perevedentsev YuP, Sharipova RB, Vazhnova NA. Agroclimatic resources of the Ulyanovsk region and their influence on the yield of grain crops. Bulletin of Udmurt State University. Series: Biology. Earth Sciences. 2012;(2):120-126. (In Russ.).

2. Zolotokrylin AN, Cherenokova EA, Titkova TB, Mikhailov AYu, Bardin M Yu, Shiryaeva AV, Vinogradova VV. Changes in the yield of grain crops in European Russia caused by the quasi-biennial cyclicity of atmospheric processes. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Geographical Series.* 2016;(2):90-99. (In Russ.). <https://doi.org/10.15356/0373-2444-2016-2-90-99>
3. Morgounov A, Sonder K, Abugalieva A, Bhadauria V, Cuthbert RD, Shamanin V. et al. Effect of climate change on spring wheat yields in North America and Eurasia in 1981–2015 and implications for breeding. *PLoS ONE.* 2018;13(10): e0204932. [Electronic resource]. URL: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0204932> (Accessed: 18 August 2025).
4. Izrael YuA, Sirotenko OD. Modeling the Impact of Climate Change on Agricultural Productivity in Russia. *Meteorology and Hydrology.* 2003;(6):5-17. (In Russ.).
5. Pavlova VN, Karachenkova AA. Changes in Agroclimatic Resources of Grain-Producing Regions of Russia and Grain Crop Productivity in the New Climatic Period 1991–2020. *Meteorology and Hydrology.* 2023;(9):29-42. (In Russ.).
6. Vyshkvarkova EV, Voskresenskaya EN. Agroclimatic Assessment of the Territory of Crimea and Donbass (using Sevastopol and Artemovsk as an Example) for Rational Vineyard Placement in the Context of Climate Change. *Meteorology and Hydrology.* 2023;(10):66-76. (In Russ.).
7. Ashabokov BA, Fedchenko LM, Tashilova AA, Kesheva LA, Teunova NV. Formation of a plan for adaptation of the regional agricultural sector to climate change: tasks and methods of solution. *Meteorology and Hydrology.* 2023;(10):57-65. (In Russ.).
8. Nasonov DV. Climate risks and adaptation of agriculture. *Sel'skokhozyaistvennyye Vesti.* 2011;(1):36-37. (In Russ.).
9. Report on the features of the climate in the territory of the Russian Federation for 2024. Moscow, 2025. 135 p. (In Russ.).
10. Ashabokov BA et al. Spatiotemporal climate change in the south of European Russia, assessment of its consequences, methods and models of adaptation of the agro-industrial complex. *Nalchik: OOO Fregat; 2020.* 476 p. (In Russ.).
11. Ashabokov BA, Fedchenko LM, Kupovykh GV, Tashilova AA, Kesheva LA, Teunova NV, Ashabokova MB. Method for Reducing Drought-Associated Risks in Agriculture, Taking into Account the Probability of Their Occurrence. *News of Higher Education Institutions. North Caucasus Region. Natural Sci-*

- ences. 2023;(3):45-56. (In Russ.). [https://doi: 10.18522/1026-2237-2023-3-45-56](https://doi.org/10.18522/1026-2237-2023-3-45-56)
12. Selyaninov GT. Agroclimatic map of the world. L.: Gidrometeoizdat. 1966. 12 p. (In Russ.).
 13. Sirotenko OD. The Climate-Harvest Simulation System for the USSR. *Meteorology and Hydrology*. 1991;(4):67-73. (In Russ.).
 14. Pavlova VN, Karachenkova AA. Changes in Agroclimatic Resources of Grain-Producing Regions of Russia and Grain Crop Productivity in the New Climatic Period 1991–2020. *Meteorology and Hydrology*. 2023;(9):29-42. (In Russ.).
 15. Murynin AB, Bondur VG, Ignatiev VYu, Gorokhovskiy KYu. Forecasting Crop Yields Based on Long-Term Space Observations of Vegetation Dynamics. *Modern Problems of Remote Sensing of the Earth from Space*. 2013;10(4):245-256. (In Russ.).
 16. Marenich NN, Shkurko VS. The influence of meteorological factors on the yield of grain crops and the possibilities of forecasting yields. *Bulletin of the Kurgan State Agricultural Academy*. 2014;(1):18-20. (In Russ.).
 17. Siptits SO, Romanenko IA, Evdokimova NE. Model estimates of the influence of climate on the yield of grain and leguminous crops in the regions of Russia. *Problems of Forecasting*. 2021;2(185):75-86. (In Russ.). [https://doi: 10.47711/0868-6351-185-75-86](https://doi.org/10.47711/0868-6351-185-75-86)
 18. Ashabokov BA, Fedchenko LM, Tashilova AA, Kesheva LA. On one model of adaptation of the agro-industrial complex to climate change. *Innovative research methods and tools in atmospheric physics, hydrometeorology, ecology, and climate change. Proceedings of the International Scientific Conference, Stavropol, September 23–26, 2013*. Stavropol: Stavropol, 2013. P. 196–199. (In Russ.).

Информация об авторах

Борис Азреталиевич Ашабоков – доктор физико-математических наук, профессор, 1) заведующий отделом физики облаков Федерального государственного бюджетного учреждения «Высокогорный геофизический институт», 2) заведующий отделом Института информатики и проблем регионального управления КБНЦ РАН. Scopus ID: 6505916110, Researcher ID: K-4299-2015

Алла Амарбиевна Ташилова – доктор физико-математических наук, доцент, ВНС лаборатории микрофизики облаков Федерального государственного бюджетного учреждения «Высокогорный геофизический институт», Scopus ID: 57191577384, Researcher ID: K-4321-2015

Лара Асировна Кешева – кандидат физико-математических наук, СИС лаборатории атмосферных конвективных явлений Федерального государственного бюджетного учреждения «Высокогорный геофизический институт», Scopus ID: 57191577471, Researcher ID: K-4261-2015

Наталья Вячеславовна Теунова – кандидат физико-математических наук, СИС лаборатории микрофизики облаков Федерального государственного бюджетного учреждения «Высокогорный геофизический институт», Scopus ID: 57191571952, Researcher ID: K-4312-2015

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации статьи.

Information about the authors

Boris A. Ashabokov – Dr. Sci. (Physical and Mathematical), professor, 1. Head of the Department of Cloud Physics, Federal State Budgetary Institution “High Mountain Geophysical Institute”, 2. Head of Department at the Institute of Informatics and Regional Management Problems, KBSC RAS Scopus ID: 6505916110, Researcher ID: K-4299-2015

Alla A. Tashilova – Dr. Sci. (Physical and Mathematical), associate professor, Leading Researcher at the Laboratory of Cloud Microphysics of Federal state budgetary institution “High-Mountain Geophysical Institute”, Scopus ID: 57191577384, Researcher ID: K-4321-2015

Lara A. Kesheva – Cand. Sci. (Physical and Mathematical), Senior Researcher at the Laboratory of Atmospheric Convective Phenomena of the Federal State Budgetary Institution “High Mountain Geophysical Institute”, Scopus ID: 57191577471, Researcher ID: K-4261-2015

Nataliya V. Teunova – Cand. Sci. (Physical and Mathematical), Senior Researcher at the Laboratory of Cloud Microphysics of the Federal State Budgetary Institution “High Mountain Geophysical Institute”, Scopus ID: 57191571952, Researcher ID: K-4312-2015

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.