

Научная статья
УДК 519.24: 631.559
EDN NLBZGC
DOI 10.17150/2713-1734.2026.8(2).167-180



М.Н. Полковская

*Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского,
п. Молодежный, Иркутский район, Российская Федерация*

П.Г. Асалханов

*Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского,
п. Молодежный, Иркутский район, Российская Федерация*

Параметрическое моделирование производства аграрной продукции с учетом изменчивости урожайности

Аннотация. В статье приведены результаты применения параметрического программирования для моделирования и оптимизации структуры посевных площадей зерновых культур в условиях неопределенности, характерной для современного аграрного производства. Актуальность работы обусловлена высокой волатильностью цен на ресурсы и продукцию, изменчивостью климатических условий и необходимостью формирования адаптивных управленческих решений. В отличие от статических оптимизационных моделей, параметрическое программирование позволяет учитывать зависимость коэффициентов целевой функции и ограничений от изменяющихся параметров, что обеспечивает анализ устойчивости оптимального плана при колебаниях урожайности и других факторов. Эмпирической базой исследования послужили данные по четырем муниципальным районам Иркутской области за 1996–2024 гг., а также показатели температуры и осадков за вегетационный период 2015–2024 гг. На первом этапе построены трендовые модели урожайности пшеницы, ячменя и овса. Выявлены экспоненциальные, степенные, логарифмические и логистические зависимости, отражающие как общую динамику рядов, так и многоуровневые тренды (по локальным минимумам и максимумам). Для ряда моделей коэффициенты детерминации достигают 0,78–0,83, а в отдельных случаях — 0,92–0,98, что свидетельствует о высокой объясняющей способности. На втором этапе разработаны факторные модели, учитывающие влияние средних температур и осадков на урожайность. Установлено, что в ряде районов до 88–98 % вариации урожайности объясняется включенными метеорологическими факторами. Полученные прогнозные значения использованы при формировании параметрической оптимизационной модели размещения посевов, реализованной симплекс-методом. Параметрами модели выступают время и уровни тренда. Расчеты для Иркутского района и сельскохозяйственного предприятия показали, что при неблагоприятных условиях снижение дохода может составлять 20–26 % относительно среднего уровня, тогда как при благоприятных — прирост достигает 9–12 %. Результаты подтверждают целесообразность применения параметрического программирования для стратегического планирования и управления рисками в аграрном секторе.

Ключевые слова. Прогнозирование, факторы, урожайность, параметрическое программирование.

Информация о статье. Дата поступления: 24 февраля 2026 г.; дата принятия к публикации: 15 мая 2026 г.; дата онлайн-размещения: 29 июня 2026 г.

M.N. Polkovskaya*Irkutsk State Agricultural University named after A.A. Ezhevsky,
Molodezhny, Irkutsk District, Russian Federation***P.G. Asalkhanov***Irkutsk State Agricultural University named after A.A. Ezhevsky,
Molodezhny, Irkutsk District, Russian Federation*

Parametric Modeling of Agricultural Production Taking into Account Yield Variability

Abstract. This article presents the results of applying parametric programming to modeling and optimizing the structure of grain crop acreage under the uncertainty inherent in modern agricultural production. The relevance of this work stems from the high volatility of resource and product prices, variable climatic conditions, and the need to formulate adaptive management decisions. Unlike static optimization models, parametric programming allows for the dependence of objective function coefficients and constraints on changing parameters, enabling analysis of the stability of the optimal plan under fluctuations in yield and other factors. The empirical basis of the study was data from four municipal districts of the Irkutsk region for 1996–2024, as well as temperature and precipitation indicators for the 2015–2024 growing season. In the first stage, trend models of wheat, barley, and oat yields were constructed. Exponential, power, logarithmic, and logistic dependencies were identified, reflecting both the overall dynamics of the series and multi-level trends (based on local minima and maxima). For a number of models, the determination coefficients reach 0.78–0.83, and in some cases, 0.92–0.98, indicating high explanatory power. In the second stage, factorial correlation and regression models were developed, taking into account the influence of average temperatures and precipitation on yields. It was found that in some districts, up to 88–98% of yield variation is explained by included meteorological factors. The obtained forecast values were used to develop a parametric optimization model for crop placement, implemented using the simplex method. The model parameters are time and trend levels. Calculations for the Irkutsk district and an agricultural enterprise showed that under unfavorable conditions, income declines can be 20–26% relative to the average level, while under favorable conditions, income increases reach 9–12%. The results confirm the feasibility of using parametric programming for strategic planning and risk management in the agricultural sector.

Keywords. Forecasting, factors, yield, parametric programming.

Article info. Received 24 February, 2026; Accepted 15 May, 2026; Available online 29 June, 2026.

Введение

В условиях современного аграрного производства, характеризующегося высокой волатильностью цен на ресурсы и готовую продукцию, изменчивостью климатических условий и нестабильностью государственного регулирования, использование методов параметрического программирования приобретает особую актуальность. В отличие от статических моделей, дающих единственное, «жесткое» решение, параметрическое программирование позволяет анализировать устойчивость оптимального плана и находить закономерности его изменения в зависимости от колебаний ключевых

внешних и внутренних факторов (например, урожайности культур, стоимости удобрений или закупочных цен). Это дает возможность сельскохозяйственным предприятиям не просто рассчитать наилучшую структуру посевных площадей или распределение кормов на один сезон, а создать адаптивную систему ведения хозяйства, способную заблаговременно перестраиваться под меняющиеся условия, минимизировать риски убытков и принимать стратегически взвешенные решения в условиях неопределенности [1].

При этом большое значение имеет прогнозирование показателей, характеризующих разные отрасли экономики, на уровне предприятий, муниципальных районов, регионов и страны. Вопросы прогнозирования урожайности с учетом влияния климатических изменений и оценки их параметров освещены в работах [2–5]. Для анализа рыночной конъюнктуры в агропромышленном комплексе применяются аддитивные и мультипликативные тренд-сезонные модели [6]. В последние годы особый интерес исследователей направлен на использование искусственного интеллекта в прогнозировании различных экономических показателей, что особенно актуально для отраслей, функционирующих в условиях множества внешних факторов и специфики открытого грунта [7–10]. Ключевой особенностью производства сельскохозяйственной продукции является необходимость учета широкого спектра рисков, среди которых доминирующую роль играют экономические и метеорологические условия [6].

Для анализа динамики производственно-экономических показателей, а именно выявления закономерностей их повышения или снижения, широко используются трендовые модели. Вычисление трендовых составляющих на различных уровнях обобщения данных и в зависимости от специфики функционирования аграрных предприятий служит основой для формирования долгосрочных стратегий и программ развития [11].

Обобщая вышеизложенное, целью работы является применение задачи параметрического программирования для моделирования структуры посевов сельскохозяйственных культур с учетом изменчивости урожайности.

Материалы и методы

Прогнозирование временных рядов урожайности произведено для четырех муниципальных районов Иркутской области (Иркутский, Тайшетский, Тулунский, Черемховский), поскольку в них развито производство зерновых культур. Для анализа урожайности пшеницы, ячменя и овса использованы данные Иркутскстата за 1996–2024 гг., ряды средних суточных температур и осадков за вегетационный период за 2015–2024 гг. и данные бухгалтерской отчетности ЗАО «Иркутские семена».

Для расчета параметров моделей применялись методы корреляционно-регрессионного анализа. Определение оптимальных планов осуществлялось с помощью симплекс-метода.

Результаты исследования и их обсуждение

В ходе выделения трендов в рядах урожайности зерновых культур зависимости получены лишь для двух районов (табл. 1). В Тайшетском районе урожайность пшеницы и ячменя имеет тенденцию к увеличению, о чем свидетельствуют уравнения экспоненциальной формы с положительным показателем степени. Модель для пшеницы обладает хорошей объясняющей способностью (коэффициент детерминации равен 0,6), в то время как для ячменя этот показатель несколько ниже и составляет 0,5. Статистическая значимость обеих моделей подтверждается высокими значениями F -критерия Фишера (43,8 и 36,6 соответственно), а также тем, что расчетные значения t -статистики Стьюдента превышают критические.

Для Черемховского района построены следующие модели роста: степенные для пшеницы и овса, и логарифмическая — для ячменя. Наибольшую точность среди всех моделей таблицы демонстрирует уравнение для ячменя, имеющее коэффициент детерминации 0,59. Все три модели статистически значимы, так как рассчитанные значения F -критерия (от 37,3 до 43,2) и t -статистики значительно превышают пороговые уровни. Анализ прогнозов показывает, что в Черемховском районе ожидается плавный рост урожайности по всем культурам. Например, прогнозируемая урожайность пшеницы к 2028 году достигнет 26,51 ц/га, а ячменя — 27,76 ц/га, что является наивысшим показателем среди всех представленных культур.

Таблица 1

Трендовые модели рядов урожайности сельскохозяйственных культур

Культура	Уравнение	R ²	F-кри- терий Фишера	t-стати- стика Стьюден- та	Прогноз, ц/га		
					2026	2027	2028
Тайшетский район							
Пшеница	$y_t = 10,2e^{0,018t}$	0,6	43,8	−6,62	17,99	18,32	18,66
Ячмень	$y_t = 8,71e^{0,029t}$	0,5	36,6	−5,84	21,08	21,69	22,31
Черемховский район							
Пшеница	$y_t = 13,21 t^{0,20}$	0,51	37,3	−5,96	26,19	26,35	26,51
Ячмень	$y_t = 5,06\ln(t) + 10,07$	0,59	43,2	−6,89	27,44	27,60	27,76
Овес	$y_t = 10,90t^{0,25}$	0,54	39,5	−6,30	26,10	26,31	26,52

Наибольший интерес представляют многоуровневые тренды, которые строятся по значениям верхних (локальные максимумы) и нижних (локальные минимумы) уровней, выделенным из многолетнего временного ряда производственно-экономических характеристик. При этом в качестве функций, характеризующих динамику исследуемых показателей, могут применяться линейные и нелинейные (асимптотические, логистические, степенные, линейные, экспоненциальные) выражения. Одной из характеристик, обладающей динамико-стохастическими свойствами, является урожайность сельскохозяйственных культур.

В табл. 2 приведены тренды для усредненных значений рядов урожайности, их локальных минимумов и максимумов, статистические критерии и прогнозы для разных уровней ряда.

Таблица 2

**Характеристики трендов всего ряда, локальных минимумов
и максимумов урожайности зерновых культур
в муниципальных районах Иркутской области за 1996-2024 гг.
и прогностические значения**

Уровень	Уравнение	R ²	F-критерий	t-статистика	Прогноз		
					2026	2027	2028
Иркутский район							
Весь ряд	$y_t = 24,6 / 1 + e^{-0,058t}$	0,54	31,6	−5,6	21,1	21,3	21,4
Нижний	$y_t = 17,6 / 1 + e^{-0,14t}$	0,67	16,5	−4,1	17,3	17,4	17,4
Верхний	$y_t = 24,6 / 1 + e^{-0,11t}$	0,60	10,7	−3,3	23,7	23,8	23,9
Тайшетский район							
Весь ряд	$y_t = 17,9 / 1 + e^{-0,11t}$	0,78	96,4	−9,8	17,3	17,3	17,4
Нижний	$y_t = 14,8 / 1 + e^{-0,18t}$	0,83	28,3	−5,3	14,7	14,7	14,8
Верхний	$y_t = 17,9 / 1 + e^{-0,17t}$	0,83	30,1	−5,5	17,8	17,8	17,8
Тулунский район							
Весь ряд	$y_t = 24,4 / 1 + e^{-0,068t}$	0,50	28,2	−5,3	17,3	17,3	17,4
Нижний	$y_t = 18,6 / 1 + e^{-0,15t}$	0,78	25,0	−5,0	14,7	14,7	14,8
Верхний	$y_t = 24,4 / 1 + e^{-0,11t}$	0,50	6,5	−2,3	17,8	17,8	17,8
Черемховский район							
Весь ряд	$y_t = 31,1 / 1 + e^{-0,074t}$	0,54	31,6	−5,6	28,2	28,4	28,6
Нижний	$y_t = 23,5 / 1 + e^{-0,16t}$	0,83	28,9	−5,4	23,4	23,4	23,4
Верхний	$y_t = 31,1 / 1 + e^{-0,11t}$	0,53	6,7	−2,6	30,1	30,2	30,3

Для анализа динамики урожайности во всех четырех районах использовались логистические кривые (S-образные функции). По данным об урожайности пшеницы в Тайшетском районе получены модели с наилучшим качеством. Модель для всего ряда в Тайшетском районе имеет самый высокий F-критерий (96,4), что говорит

о ее исключительной статистической значимости и надежности для прогнозирования.

В Черемховском и Тулунском районах наилучшие показатели точности зафиксированы для нижних уровней (R^2 достигает 0,78–0,83). Данный факт может свидетельствовать о том, что ряды с низкой урожайностью подчиняются четкой закономерности. Модели для верхних значений рядов урожайности пшеницы в Черемховском ($R^2 = 0,53$) и Тулунском ($R^2 = 0,50$) районах имеют более низкое качество, что требует осторожности при интерпретации.

Модели, полученные по данным Иркутского района, обладают удовлетворительным качеством (R^2 от 0,54 до 0,67) и являются статистически значимыми, о чем свидетельствуют значения F-критерия. Модель для нижнего уровня в этом районе имеет наибольшую точность ($R^2 = 0,67$).

Помимо расчета параметров трендовых моделей для прогнозирования урожайности построены факторные модели. При исследовании влияния факторов на урожайность зерновых культур использованы ряды средних месячных температур (x_1) и осадков (x_2) за вегетационный период. С помощью метода последовательного включения данных в хронологический ряд получены результаты, приведенные в табл. 3.

Наибольшая точность модели для пшеницы получена в Черемховском районе, где коэффициент детерминации составляет 0,88. Это говорит о том, что 88% изменений урожайности здесь объясняются включенными в модель факторами. Высокое качество также демонстрирует модель для Тайшетского района ($R^2 = 0,67$). Наименьшая объясняющая способность модели наблюдается в Тулунском районе ($R^2 = 0,54$), что может указывать на влияние неучтенных факторов, например, погодных условий.

Для ячменя самый высокий показатель качества моделей зафиксирован в Тулунском районе ($R^2 = 0,92$), что свидетельствует о практически функциональной зависимости урожайности ячменя от рассматриваемых факторов. Также отличные результаты показывают модели в Тайшетском ($R^2 = 0,83$) и Черемховском ($R^2 = 0,81$) районах. Наименее точной, хотя и удовлетворительной, является модель для Иркутского района ($R^2 = 0,53$).

Вариация урожайности овса в Черемховском районе почти полностью определяется вариацией включенных в модель факторов ($R^2 = 0,98$). В Тайшетском и Тулунском районах качество моделей для овса заметно ниже ($R^2 = 0,59$ и 0,56 соответственно) и находится на том же уровне, что и для пшеницы в этих территориях.

Поскольку метеорологические факторы являются случайными величинами и подчиняются законам распределения вероятностей, можно решать прямые и обратные задачи. В частности, полученные уравнения позволяют определять значения факторов

Таблица 3

Факторные модели для прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур в Иркутском, Зиминском и Тайшетском районах

Муниципальный район	Уравнение	Период	Значение факторов	R ²
<i>Пшеница</i>				
Иркутский	$y = 12,8x_1 + 0,028x_2 - 0,091x_1^2 - 0,0003x_2^2 - 435,0$	2015-2024	68,1–79 263,7–498,2	0,61
Тайшетский	$y = 23,4x_1 + 0,09x_2 - 0,17x_1^2 - 0,00016x_2^2 - 825,4$	2015-2024	67,9–77,3 154,3–427,9	0,67
Тулунский	$y = -5,37x_1 + 0,057x_2 + 0,038x_1^2 - 0,0008x_2^2 + 202,2$	2015-2024	65,5–74,2 226,6–601,2	0,54
Черемховский	$y = 0,64x_1 + 0,03x_2 - 0,01x_1^2 - 0,00022x_2^2 + 20,9$	2018-2024	64,2–72 258,5–718,3	0,88
<i>Ячмень</i>				
Иркутский	$y = 17,3x_1 + 0,12x_2 - 0,12x_1^2 - 0,00013x_2^2 - 623,0$	2015-2024	68,1–79 263,7–498,2	0,53
Тайшетский	$y = -64,9x_1 - 0,047x_2 + 0,45x_1^2 + 0,00014x_2^2 + 2369,0$	2015-2024	67,9–77,3 154,3–427,9	0,83
Тулунский	$y = -12,2x_1 + 0,12x_2 + 0,084x_1^2 - 0,00015x_2^2 + 440,0$	2015-2024	65,5–74,2 226,6–601,2	0,92
Черемховский	$y = -8,97x_1 + 0,019x_2 + 0,058x_1^2 - 0,0007x_2^2 + 365,0$	2018-2024	64,2–72 258,5–718,3	0,81
<i>Овес</i>				
Тайшетский	$y = 6,0x_1 + 0,13x_2 - 0,045x_1^2 - 0,00024x_2^2 - 201,0$	2015-2024	67,9–77,3 154,3–427,9	0,59
Тулунский	$y = -11,3x_1 + 0,056x_2 + 0,081x_1^2 + 0,0008x_2^2 + 405,0$	2015-2024	65,5–74,2 226,6–601,2	0,56
Черемховский	$y = 16,3x_1 - 0,03x_2 - 0,126x_1^2 + 0,00053x_2^2 + 498,0$	2018-2024	64,2–72 258,5–718,3	0,98

для оценки высокой и низкой урожайности. В этом случае используется метод Монте-Карло.

Наиболее эффективным инструментом для планирования аграрного производства являются оптимизационные модели. В ситуациях, когда в рядах различных показателей, входящих в модель, имеют место зависимости от различных параметров (времени или метеорологических характеристик), для получения оптимальных планов можно использовать задачу параметрического программирования. Суть данного подхода заключается в том, что коэффициенты целевой функции, а также правой и левой частей ограничений представлены не константами, а функциями, зависящими от определенных параметров.

Полученные тренды и факторные зависимости можно использовать для построения задач параметрического программирования. В первом случае в качестве параметра использовано время, во втором параметры тепла и увлажнения. В продолжение исследований по приложению задач параметрического программирования для сельскохозяйственного производства [12; 13] предлагается построить и реализовать модели с учетом многоуровневых трендовых зависимостей.

Сформулирована параметрическая оптимизационная модель размещения посевов, параметром которой является время (t). Целевая функция модели направлена на максимизацию дохода

$$\sum_{i \in I} \sum_{s \in S} d_{is}^k y(t)_{is}^k x_{is}^k \rightarrow \max (i \in I, s \in S, k \in K); \quad (1)$$

при условиях:

– ограниченности производственных ресурсов

$$\sum_{s \in S} v(t)_{lis}^k x_{is}^k \leq V_{li} \quad (l \in L); \quad (2)$$

– ограниченности размера растениеводческой отрасли

$$\underline{n} \leq \sum_{i \in I} \sum_{s \in S} (1 + \eta_s^k) x_{is}^k \leq \bar{n}; \quad (3)$$

– производства конечной продукции не ниже заданного объема

$$\sum_{i \in I} y(t)_{is}^k x_{is}^k \geq Y_s; \quad (4)$$

– ограниченности вносимых удобрений и средств защиты растений

$$\sum_{s \in S} w_{mis}^k x_{is}^k \leq W_{mi}; \quad (5)$$

– неотрицательности переменных

$$x_{is}^k \geq 0. \quad (6)$$

Здесь d_{is}^k — цена реализации s -культуры i -поля (руб./ц); $y(t)_{is}^k$ — выход продукции с единицы площади s -культуры i -поля (ц/га), зависящий от параметра t , изменяющегося от α до β ; x_{is}^k — искомая площадь возделывания s -культуры на i -поле (га); $v(t)_{lis}^k$ — расход l -ресурса на единицу площади s -культуры i -поля (чел.-ч/га, руб./га), связанный с параметром t ; V_{li} — наличие ресурса l -вида для i -поля; Y_s — гарантированный (минимальный) объем производства продукции s -культуры (ц); $\bar{n}$, $\underline{n}$ — максимально и минимально возможная площадь возделывания культур (га); η_s^k — коэффициент, учитывающий площадь посевов семян s -культуры; w_{mis}^k — расход m -удобрения (средства защиты растений) на единицу площади i -поля s -культуры (ц/га); W_{mi} — наличие удобрения m -вида i -поля (ц), I — количество полей, S — число видов культур, k — уровень тренда, K — число уровней, равное трем.

Помимо оптимизации площадей посевов при решении задачи (1)–(6) рассчитываются объемы произведенной продукции:

$$z_{is}^k = y(t)_{is}^k \cdot x_{is}^k. \quad (7)$$

Задача параметрического программирования (1)–(7) реализована для оптимизации структуры посевов зерновых культур в Иркутском районе. Параметры при этом учитываются в левой части ограничений. Для прогнозирования урожайности пшеницы, ячменя и овса использованы многоуровневые тренды.

В табл. 4 приведены результаты решения параметрической задачи с учетом прогноза урожайности зерновых культур на 2026–2028 гг. Полученные результаты характеризуют объем продукции, который можно произвести при различных условиях, и возможную прибыль согласно прогнозам значений верхнего уровня исходного ряда, характеризующего благоприятные ситуации, и нижнего уровня ряда, описывающего неблагоприятные условия производства.

При этом потеря дохода при неблагоприятных условиях относительно усредненных условий составляет около 26 %. Увеличение этой характеристики при благоприятных условиях — более 9 % относительно среднего уровня.

Согласно результатам решения параметрической задачи с учетом многоуровневых прогнозов урожайности зерновых культур для ЗАО «Иркутские семена», приведенным в таблице 5, потеря дохода при низкой урожайности составит около 20 % относительно средних значений. При благоприятных условиях увеличение дохода по сравнению с усредненными условиями в разные годы составит около 9–12 %.

Таблица 4

**Результаты решения параметрической задачи
с учетом многоуровневых прогнозов урожайности
сельскохозяйственных культур
для Иркутского района**

Год	Объемы произведенной продукции, т			
	Пшеница, z_1 [т]	Ячмень, z_2 [т]	Овес, z_3 [т]	Целевая функция, тыс. руб.
<i>Прогноз урожайности по всем значениям многолетнего ряда</i>				
2026	3289,5	3775,2	1412,2	44261,6
2027	3320,7	3788,6	1421,7	44553,9
2028	3336,3	3801,3	1430,5	44746,2
<i>Прогноз урожайности по всем значениям последовательности локальных максимумов</i>				
2026	3694,8	3964,1	1498,0	47981,5
2027	3710,4	3980,3	1572,9	48455,5
2028	3726,0	3996,5	1647,8	48929,6
<i>Прогноз урожайности по всем значениям последовательности локальных минимумов</i>				
2026	2697,1	2750,6	1280,8	35058,6
2027	2712,7	2766,8	1288,3	35263,0
2028	2720,5	2783,0	1295,8	35420,6

Таблица 5

**Результаты решения параметрической задачи
с учетом многоуровневых прогнозов урожайности
зерновых культур для ЗАО «Иркутские семена»**

Год	Объемы произведенной продукции, т			
	Пшеница, z_1 [т]	Ячмень, z_2 [т]	Овес, z_3 [т]	Целевая функция, тыс. руб.
<i>Прогноз урожайности по всем значениям многолетнего ряда</i>				
2026	1266,0	700,0	1640,3	17657,0
2027	1278,0	702,5	1651,4	17785,8
2028	1284,0	704,8	1661,6	17874,4
<i>Прогноз урожайности по всем значениям последовательности локальных максимумов</i>				
2026	1422,0	735,0	1740,0	19167,0
2027	1428,0	738,0	1827,0	19566,0
2028	1434,0	741,0	1914,0	19965,0
<i>Прогноз урожайности по всем значениям последовательности локальных минимумов</i>				
2026	1038,0	510,0	1487,7	14728,8
2027	1044,0	513,0	1496,4	14814,6
2028	1047,0	516,0	1505,1	14882,4

Заключение

Проведенное исследование подтвердило целесообразность использования методов параметрического программирования при формировании структуры посевов зерновых культур в условиях неопределенности и вариативности внешней среды. Комплексное применение трендового анализа, многоуровневых логистических моделей и факторных зависимостей позволило получить статистически значимые прогнозы урожайности для муниципальных районов Иркутской области и учесть влияние ключевых метеорологических факторов.

Построенные модели продемонстрировали удовлетворительное и высокое качество аппроксимации, что подтверждается значениями коэффициентов детерминации и критериев статистической значимости. Установлено, что для отдельных культур и районов до 90 % и более вариации урожайности объясняется включенными факторами, что создает надежную основу для последующей оптимизации. Использование многоуровневых трендов (по всему ряду, локальным максимумам и минимумам) позволило учесть возможные сценарии развития — от неблагоприятных до благоприятных условий производства.

Реализация параметрической оптимизационной модели размещения посевов показала чувствительность экономических результатов к изменению урожайности. Расчеты свидетельствуют, что при неблагоприятных условиях снижение дохода может достигать 20–26 % относительно средних значений, тогда как при благоприятных — прирост прибыли составляет до 9–12 %. Это подтверждает необходимость учета сценарных параметров при стратегическом планировании.

Таким образом, параметрическое программирование выступает эффективным инструментом адаптивного управления аграрным производством, обеспечивая возможность оценки рисков, выбора устойчивых производственных решений и повышения экономической эффективности сельскохозяйственных предприятий в долгосрочной перспективе.

Список использованной литературы

1. Астафьева М.Н. Оценка изменчивости многолетних временных рядов биопродуктивности культур в задачах оптимизации размещения посевов / М.Н. Астафьева, Я.М. Иванько. — EDN PWMEMJ // Вестник Иркутского государственного технического университета. — 2013. — № 2 (73). — С. 16–21.
2. Асалханов П.Г. Оценка и прогноз агротехнологических параметров для моделирования производства продукции растениеводства в регионе / П.Г. Асалханов, Я.М. Иванько, М.Н. Полковская. — EDN RGSYXV // Вестник ИргСХА. — 2013. — № 57-3. — С. 116–125.
3. Арутюнян Ю.И. Корреляционно-регрессионный анализ выпуска продукции сельского хозяйства Краснодарского края / Ю.И. Арутюнян, А.А. Мамбетова, А.А. Чечулин. — DOI 10.34925/EIP.2024.172.11.212. — EDN AKUBND // Экономика и предпринимательство. — 2024. — № 11 (172). — С. 1203–1208.

4. Гуляева Т.И. Статистические методы изучения взаимосвязи устойчивости динамики и колеблемости урожайности озимой пшеницы с солнечной активностью / Т.И. Гуляева, О.В. Сидоренко, Т.А. Волобуева. — DOI 10.24891/fa.17.4.370. — EDN JKSNJK // Финансовая аналитика: проблемы и решения. — 2024. — Т. 17, № 4 (370). — С. 370–387.

5. Евдокимова Н.Е. Прогнозирование параметров агропродовольственных систем в условиях изменения климата / Н.Е. Евдокимова. — DOI 10.37313/2782-6562-2023-2-1-17-23. — EDN UPONU1 // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Сельскохозяйственные науки. — 2023. — Т. 2, № 1 (5). — С. 17–23.

6. Зоркальцев В.И. Мультипликативная модель выделения составляющих временных рядов / В.И. Зоркальцев, М.Н. Полковская. — DOI 10.15372/SJNM20220202. — EDN JHUWXG // Сибирский журнал вычислительной математики. — 2022. — Т. 25, № 2. — С. 111–127.

7. Использование искусственного интеллекта для прогнозирования урожайности / С.О. Чиркин, Н.В. Картечина, Н.П. Брозгунова, М.Е. Филиппик. — EDN GJSXLL // Наука и Образование. — 2024. — Т. 7, № 4. — Р. 268.

8. Солдатенко С.А. Искусственный интеллект и его применение в задачах численного прогноза погоды / С.А. Солдатенко. — DOI 10.52002/0130-2906-2024-4-5-27. — EDN GPBTKA // Метеорология и гидрология. — 2024. — № 4. — С. 5–27.

9. Съедугина А.С. Потенциал использования искусственного интеллекта для прогнозирования продаж специализированных пищевых продуктов на российском потребительском рынке / А.С. Съедугина. — DOI 10.33920/igt-01-2509-09. — EDN NUQJJS // Товаровед продовольственных товаров. — 2025. — № 9 (254). — С. 590–593.

10. Caceres L. A Computational Intelligence Approach to Predict Energy Demand Using Random Forest in a Cloudera Cluster / L. Caceres, J.I. Merino, N. Díaz-Díaz // Applied Sciences. — 2021. — Vol 11, no. 18. — P. 8635–8635.

11. Многоуровневое моделирование производства растениеводческой продукции на разных ступенях агрегирования / Я.М. Иванько, С.А. Петрова, М.Н. Полковская, И.А. Собиров. — DOI 10.51215/1999-3765-2024-125-25-36. — EDN VSNDR // Вестник ИрГЦХА. — 2024. — № 125. — С. 25–36.

12. Асалханов П.Г. Модели оптимизации производства сельскохозяйственной продукции с экспертными оценками своевременности посева / П.Г. Асалханов, Я.М. Иванько, М.Н. Полковская. — DOI 10.12737/2219-0767-2019-12-3-5-10. — EDN RDZFLD // Моделирование систем и процессов. — 2019. — Т. 12, № 3. — С. 5–10.

13. Асалханов П.Г. Модели прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур в задачах параметрического программирования / П.Г. Асалханов, Я.М. Иванько, М.Н. Полковская. — DOI 10.21285/1814-3520-2017-2-57-66. — EDN YFMJWH // Вестник Иркутского государственного технического университета. — 2017. — Т. 21, № 2 (121). — С. 57–66.

References

1. Astafyeva M.N., Ivanyo Ya.M. Variation Evaluation of Long-Term Crop Bioproductivity Time Series in Optimization Problems of Crops Placement. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*, 2013, no. 2, pp. 16–21. (In Russian). EDN: PWMEMJ.

2. Asalkhanov P. G., Ivan'o Ya. M., Polkovskaya M. N. Evaluating and Predicting Agrotechnical Parameters for Modeling the Regional Crop Production. *Vestnik Irkutskoi gosudarstvennoi sel'skokhozyaistvennoi akademii = Vestnik of Irkutsk State Academy of Agriculture*, 2013, vol. 3, no. 57, pp. 116–125. (In Russian). EDN: RGSYXV.

3. Arutyunyan Y.I., Mambetova A.A., Chechulin A.A. Correlation and Regression Analysis of Agricultural Output in Krasnodar Region. *Ekonomika i predprinimatel'stvo = Journal of Economy and Entrepreneurship*, 2024, no. 11, pp. 1203–1208. (In Russian). EDN: AKUBND. DOI: 10.34925/EIP.2024.172.11.212.
4. Gulyaeva T.I., Sidorenko O.V., Volobueva T.A. Statistical Methods to Study the Relationship of Stability of Dynamics and Fluctuations in Winter Wheat Yields with Solar Activity. *Finansovaya analitika: problemy i resheniya = Financial Analytics: Science and Experience*, 2024, vol. 17, no. 4, pp. 370–387. (In Russian). EDN: JKSNJK. DOI: 10.24891/fa.17.4.370.
5. Evdokimova N.E. Forecasting of Parameters of Agrifood Systems under Climate Change. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk. Sel'skokhozyaistvennyye nauki = Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. Agricultural Sciences*, 2023, vol. 2, no. 1, pp. 17–23. (In Russian). EDN: UPONUI. DOI: 10.37313/2782-6562-2023-2-1-17-23.
6. Zorkaltsev V.I., Polkovskaya M.N. A Multiplicative Model for the Identification of Time Series Components. *Sibirskij zhurnal vychislitel'noj matematiki = Siberian Journal of Numerical Mathematics*, 2022, vol. 25, no. 2, pp. 111–127. (In Russian). EDN: JHUWGX. DOI: 10.15372/SJNM20220202.
7. Chirkin S.O., Kartechina N.V., Brozgunova N.P., Filipchik M.E. Using Artificial Intelligence to Forecast Crops. *Nauka i obrazovanie = Science and Education*, 2024, vol. 7, no. 4, pp. 268. (In Russian). EDN: GJSXLL.
8. Soldatenko S.A. Artificial Intelligence and its Application in Numerical Weather Prediction. *Meteorologiya i gidrologiya = Russian Meteorology and Hydrology*, 2024, no. 4, pp. 5–27. (In Russian). EDN: GPBTKA. DOI: 10.52002/0130-2906-2024-4-5-27.
9. Syedugina A.S. Potential of Using Artificial Intelligence to Forecast Sales of Specialized Food Products in the Russian Consumer Market. *Tovaroved prodovol'stvennykh tovarov = Food Products Commodity Expert*, 2025, no. 9, pp. 590–593. (In Russian). EDN: NUQJJS. DOI: 10.33920/igt-01-2509-09.
10. Caceres L., Merino J.I., Diaz–Diaz N. A Computational Intelligence Approach to Predict Energy Demand Using Random Forest in a Cloudera Cluster. *Applied Sciences*, 2021, vol. 11, no. 18, pp. 8635–8635.
11. Ivanyo Ya.M., Petrova S.A., Polkovskaya M.N., Sobirov I.A. Multilevel Modeling of Crop Production at Different Stages of Aggregation. *Vestnik IrGSKhA = Vestnik IRGSHA*, 2024, no. 125, pp. 25–36. (In Russian). EDN: VSNDTR. DOI: 10.51215/1999-3765-2024-125-25-36.
12. Asalhanov P.G., Ivano Ya.M., Polkovskaya M.N. Models of Agricultural Production Optimization with Expert Estimates of Sowing Timeliness. *Modelirovanie sistem i protsessov = Modeling of Systems and Processes*, 2019, vol. 12, no. 3, pp. 5–10. (In Russian). EDN: RDZFLD. DOI: 10.12737/2219-0767-2019-12-3-5-10.
13. Asalkhanov P.G., Ivanyo Ya.M., Polkovskaya M.N. Crop Yield Predictive Models in Parametric Programming Problems. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*, 2017, vol. 21, no. 2, pp. 57–66. (In Russian). EDN: YFMJWH. DOI: 10.21285/1814-3520-2017-2-57-66.

Информация об авторах

Полковская Марина Николаевна — кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой информатики и математического моделирования, Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского, 664038, Российская Федерация, Иркутский район, п. Молодежный, 1/1, e-mail: polk_mn@mail.ru.

Асалханов Петр Георгиевич — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры информатики и математического моделирования, Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского, 664038, Российская Федерация, Иркутский район, п. Молодежный, 1/1, e-mail: asalkhanov@mail.ru.

Information about the Authors

Marina N. Polkovskaya — PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Computer Science and Mathematical Modeling, Irkutsk State Agricultural University named after A.A. Ezhevsky, 1/1 Molodezhny, Irkutsk District, 664038, Russian Federation, e-mail: polk_mn@mail.ru.

Peter G. Asalkhanov — PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Computer Science and Mathematical Modeling, Irkutsk State Agricultural University named after A.A. Ezhevsky, 1/1 Molodezhny, Irkutsk District, 664038, Russian Federation, e-mail: asalkhanov@mail.ru.

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the Authors

The authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Для цитирования

Полковская М.Н. Параметрическое моделирование производства аграрной продукции с учетом изменчивости урожайности / М.Н. Полковская, П.Г. Асалханов. — DOI 10.17150/2713-1734.2026.8(2).167-180. — EDN NLBZGC // System Analysis & Mathematical Modeling. — 2026. — Т. 8, № 2. — С. 167–180.

For Citation

Polkovskaya M.N., Asalkhanov P.G. Parametric Modeling of Agricultural Production Taking into Account Yield Variability. *System Analysis & Mathematical Modeling*, 2026, vol. 8, no. 2, pp. 167–180. (In Russian). EDN: NLBZGC. DOI: 10.17150/2713-1734.2026.8(2).167-180.