

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПРОДОВОЛЬСТВЕННОЙ ПРОДУКЦИИ С УЧЕТОМ ОСОБЕННОСТЕЙ ХАРАКТЕРИСТИК ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ

М.Н. Барсукова[✉], Я.М. Иваньо, И.А. Ковадло, В.В. Цыренжапова

ФГБОУ ВО «Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского», Россия, 664038, Иркутская обл., муниципальный район Иркутский, сельское поселение Молодежное, пос. Молодежный, здание 1/1

margarita1982@bk.ru

Рассмотрено моделирование характеристик временных рядов, связанных с получением продовольственной продукции, на основе статистических методов. Проанализированы характеристики временных рядов, разделенные на три группы по динамико-стохастическим свойствам: 1) характеристики временных рядов, описываемые значимыми многоуровневыми трендами со значимыми коэффициентами регрессионных выражений; 2) характеристики временных рядов, обладающие более высоким рассеянием чем характеристики первой группы; 3) характеристики временных рядов, являющиеся случайными, или обладающие значимыми низкими коэффициентами автокорреляции, например, климатические и экологические. Приведены выявленные статистические закономерности рассмотренных характеристик. Предложен алгоритм стохастической оптимизации параметрической задачи производства продукции в условиях перехода значений характеристик временных рядов модели в события.

Ключевые слова: моделирование временных рядов, вероятность, задача параметрического программирования, продовольственная продукция

Ссылка для цитирования: Барсукова М.Н., Иваньо Я.М., Ковадло И.А., Цыренжапова В.В. Параметрическая оптимизация получения продовольственной продукции с учетом особенностей характеристик временных рядов // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2025. Т. 29. № 3. С. 181–193. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-3-181-193

Учитывая изменчивость климата [1], влияние множества факторов на аграрное производство и заготовку дикоросов, а также условия развития новых технологий, актуальность приобрело решение задач управления деятельностью сельскохозяйственных товаропроизводителей и заготовителей с помощью моделирования временных рядов [2–6] и использования закономерностей их изменчивости для оптимизации производства сельскохозяйственной продукции и заготовки дикоросов.

В работах [7–11] приведены прикладные модели математического программирования с детерминированными, неопределенными параметрами и экспертными оценками для решения задач планирования деятельности сельскохозяйственных организаций и заготовителей пищевой дикорастущей продукции в Иркутской области, которыми воспользуемся в данном исследовании.

При анализе динамики производственно-экономических, экологических и климатических характеристик, входящих в состав моделей

математического программирования, в отдельную группу с учетом иерархической структуры временных рядов можно выделить характеристики, обладающие динамико-стохастическими свойствами. Выделение последовательностей локальных минимумов и максимумов во временных рядах отражено в работе [12]. В развитие этой идеи в статье [4] предложено в случае наличия значимых трендов всего ряда и последовательностей локальных минимумов и максимумов осуществлять многоуровневый прогноз на многолетнюю перспективу и оценивать события — уровни ряда, располагающиеся выше тренда локальных максимумов и ниже тренда локальных минимумов, с помощью вероятностных распределений.

Анализируя таким способом разные характеристики, можно определить свойства их изменчивости для использования при моделировании производства продовольственной продукции с помощью экстремальных задач. В зависимости от особенностей характеристик временных рядов, входящих в состав моделей, используются соответствующие оптимизационные модели: параметрические, стохастические и смешанные.

Материалы и методы

В параметрической оптимизации большое значение имеют теоретические работы, в которых выделены разные составляющие временных рядов [4, 12, 13], дана оценка их стационарности [14] и иерархической структуре [15], представлены интеллектуальный анализ [16], прогнозирование характеристик в условиях повышенной неопределенности [17], оптимизация различных сторон экономической деятельности при принятии компромиссных решений [18–20] и неполной информации [21].

При построении оптимизационных математических моделей получения продовольственной продукции необходим комплекс данных о производственно-экономических [22, 23], природно-климатических [24–26], экологических, пищевых дикорастущих ресурсах [10, 11], промысловых диких животных и др. Большое значение имеет учет вероятных рисков, связанных с разнообразием направлений производственной деятельности [27–29]. Помимо моделирования неблагоприятных ситуаций имеет смысл моделировать производство аграрной продукции в благоприятных условиях для оценки потенциала товаропроизводителя [30].

Цель работы

Цель работы — выделение групп характеристик временных рядов в соответствии со стохастическими свойствами для их использования в оптимизационных моделях производства аграрной продукции для планирования в зависимости от разных условий осуществления деятельности товаропроизводителей.

Результаты и обсуждение

При моделировании, построении законов распределения вероятностей, моделей математического программирования нами использованы методы математического моделирования, приведенные в работах [20, 31–35].

К производственным характеристикам развития растениеводства относятся валовый сбор продукции и урожайность сельскохозяйственных культур, а животноводства — численность поголовья скота и птицы, продуктивность сельскохозяйственных животных и валовое производство продукции [7]. Экономические характеристики отображают конечный результат финансовой деятельности сельскохозяйственных предприятий, эффективность производства: объем и стоимость валовой и товарной продукции; производительность труда; средне-

годовой заработок одного работника; себестоимость продукции растениеводства и животноводства; величина фондоотдачи; уровень рентабельности; прибыль [5, 6, 9].

На деятельность производителей и заготовителей продовольственной продукции оказывают влияние природно-климатические условия: географическое положение предприятия, особенности изменчивости факторов тепла и влагообеспеченности сельскохозяйственных растений, высота местности, экспозиция склона. Объем производимой и заготавливаемой продукции зависит от таких гидрометеорологических факторов, как температура воздуха и почвы, осадки, испарение, расходы воды рек, а также от экстремальных событий, с которыми связан возможный значительный ущерб, наносимый сельскохозяйственным товаропроизводителям [1, 12].

Экологические характеристики отражают уровень негативного влияния на окружающую среду как природных, так и антропогенных факторов. К ним относятся следующие показатели: концентрация вредных примесей в воздушной, водной и почвенной среде; объем выбросов вредных частиц и газов; уровень излучения; падеж животных вследствие эпидемий, пандемий и болезней, потери урожая от повреждения вредителями и по причине болезней сельскохозяйственных растений и др. Эрозия почвы, абразионные явления размыва берегов, затопления и подтопления территорий также оказывают негативное влияние на деятельность товаропроизводителей.

Причины многих экологических процессов связаны с гидрометеорологическими факторами. В частности, эрозионные процессы в большой степени обусловлены ураганами и ливнями.

Модели, разработанные с помощью математического программирования, отражают производственную деятельность товаропроизводителей в сельском хозяйстве и заготовку пищевой дикорастущей продукции, характеризуясь большим числом неопределенных коэффициентов при неизвестных целевой функции и ограничений [10, 11]. Для снятия неопределенности характеристик следует выявить их свойства, для того чтобы получить математические модели для описания трендов, авторегрессионных, факторных, циклических и смешанных зависимостей в соответствии с критериями точности и адекватности.

Поскольку при управлении производством продовольственной продукции следует учитывать динамику различных сторон деятельности товаропроизводителей и заготовителей,

то опыт статистической обработки большого числа характеристик временных рядов [4, 7, 22, 27, 29] дает возможность разделения их по динамико-стохастическим свойствам на несколько групп.

Первая группа объединяет характеристики, временные ряды которых описываются значимыми многоуровневыми трендами со значимыми коэффициентами регрессионных выражений. Другими словами, весь временной ряд и последовательности нижних и верхних уровней, выделенные в нем по локальным экстремумам [4], характеризуются значимыми регрессионными выражениями в соответствии со статистическими критериями. К таким характеристикам можно отнести урожайность сельскохозяйственных культур, трудозатраты на производство единицы продукции, количество сельскохозяйственных животных, их продуктивность и др.

Для оптимизации производства аграрной продукции применяют задачу параметрического программирования в виде:

$$f^l = \sum_{j \in J} c_j^l(t) x_j \rightarrow \max(\min), \quad (1)$$

$$\sum_{j \in J} a_{ij}^l(t) x_j \leq (\geq) b_i^l(t), (i \in I), (l \in L), \quad (2)$$

$$x_j \geq 0, \quad (3)$$

где f^l — целевая функция;

$c_j^l(t)$ — прибыль или затраты на единицу произведенной продукции вида j на уровне l , зависящие от времени t , изменяющегося в пределах значений $[\alpha, \beta]$;

$a_{ij}^l(t)$ — коэффициенты при неизвестных x_j , описывающие удельные ресурсы;

$b_i^l(t)$ — вид ресурса предприятия;

I — количество видов ресурсов;

L — число уровней ряда, характеризующее усредненные, благоприятные и неблагоприятные условия деятельности.

Для описания прибыли (или затрат) на единицу произведенной продукции $c_j^l(t)$, коэффициентов $a_{ij}^l(t)$ и вида ресурса $b_i^l(t)$ применяются линейные и нелинейные выражения, что связано с внешними условиями производства, иными технологиями, продолжительностью деятельности предприятия и другими факторами.

Задача (1)–(3) позволяет определять оптимальные планы объема производства аграрной продукции исходя из прогностических значений, полученных с помощью регрессионных выражений.

Так, на основе многоуровневых трендовых моделей, решена задача оптимизации объема

производства растениеводческой продукции в Эхирит-Булагатском районе Иркутской области. В частности, определено, что доход как критерий оптимальности для некоторых усредненных условий при использовании логистической и асимптотической функций за период 2023–2025 гг. может варьировать от 252,5 до 280,6 млн руб. Наблюдается тенденция увеличения посевных площадей ежегодно на 2 % в рассмотренном районе, что приведет к повышению значения целевой функции в 2025 г. относительно уровня 2022 г. на 11,1 %, а объем производимой продукции растениеводства возрастет на 10,3 %. Для благоприятных условий критерий оптимальности за рассматриваемый период увеличится — от 283,8 до 309,4 млн руб. Тенденция возрастания объема производства растениеводческой продукции в случае неблагоприятных условий несколько иная — рост дохода и объема производства в 2025 г. относительно 2022 г. соответствует 8,2 %. При неблагоприятных условиях значение критерия оптимальности за 2023–2025 гг. будет изменяться в пределах 204,2–223,8 млн руб. Потери дохода относительно усредненных значений могут составить 19,1–20,3 %, а объем производства может сократиться на 19,6–20,7 %.

Предложенная экстремальная задача (1)–(3) имеет ограниченное использование, поскольку модели, связанные с управлением производством аграрной продукции в рамках агрохолдингов, муниципальных образований, агроландшафтных районов, включают в себя некоторые неопределенные характеристики. Тем не менее, решение этой задачи частично снимает неопределенность, что дает возможность лучше описывать ситуации деятельности отдельных товаропроизводителей в разных условиях.

Вторая группа характеристик временных рядов обладает более высоким рассеянием по отношению к первой группе. Здесь не все последовательности характеристик временных рядов, рассматриваемых в виде иерархических структур, описываются значимыми трендами (табл. 1).

Согласно полученным результатам тренд всего ряда не обладает удовлетворительной точностью, поскольку коэффициент детерминации R^2 ниже 0,50 (см. табл. 1). Вместе с тем последовательности верхних и нижних уровней ряда характеризуются значимыми регрессионными выражениями в соответствии с расчетными значениями коэффициентов R^2 , F -критерия Фишера и t -критерий Стьюдента. Уровень значимости расчетных значений F -критерия Фишера для уравнений нижнего и верхнего уровня соответствует 0,022 и 0,045. Несколько

Т а б л и ц а 1

Статистическая оценка многоуровневых трендов урожайности картофеля в Заларинском районе и заготовки дикорастущих ягод в Иркутской области

Statistical assessment of multi-level trends in potato yields in the Zalarinsky district and procurement of wild berries in the Irkutsk region

Последовательность	Уравнение	Коэффициент детерминации R^2	F -критерий Фишера	t -критерий Стьюдента
Урожайность картофеля в Заларинском районе (ц/га), по данным 1996–2021 гг.				
Весь ряд	$v = \frac{178,8}{1 + e^{-0,105t}}$	0,49	24,3	–4,92
Нижние уровни	$v_{н.у} = \frac{155,1}{1 + e^{-0,173t}}$	0,77	20,2	–4,49
Верхние уровни	$v_{в.у} = \frac{178,8}{1 + e^{-0,197t}}$	0,54	7,1	–2,66
Заготовка дикорастущих ягод (т) в Иркутской области, по данным 1961–1991 гг.				
Весь ряд	$v = 543,3 - 466,1e^{-0,0668t}$	0,40	20,1	–4,48
Верхние уровни	$v_{в.у} = 543,3 - 269,2e^{-0,113t}$	0,61	17,0	–4,12
Нижние уровни	$v_{н.у} = 364,5 - 287,3e^{-0,0793t}$	0,34	5,2	–2,28

меньше эти показатели для t -критерия Стьюдента — 0,017 и 0,038.

В такую группу характеристик могут входить наряду с урожайностью сельскохозяйственных культур и трудозатратами на производство единицы продукции заготовка некоторых видов дикоросов (см. табл. 1), некоторые биологические характеристики, например, динамика популяции грызунов, вредителей сельскохозяйственных культур. Уровни значимости расчетных значений F -критерия Фишера и t -критерия Стьюдента для уравнения регрессии верхнего уровня соответствуют 0,0021 и 0,0017.

Приведенные многоуровневые модели можно использовать при моделировании производства аграрной продукции и заготовки дикорастущей продукции с неопределенными характеристиками.

Характеристики с динамико-стохастическими свойствами позволяют использовать задачи параметрического программирования с вероятностными величинами для оптимизации производства продовольственной продукции:

$$f^p = \sum_{j \in J} c(t)_j^p x_j \rightarrow \max(\min), \quad (4)$$

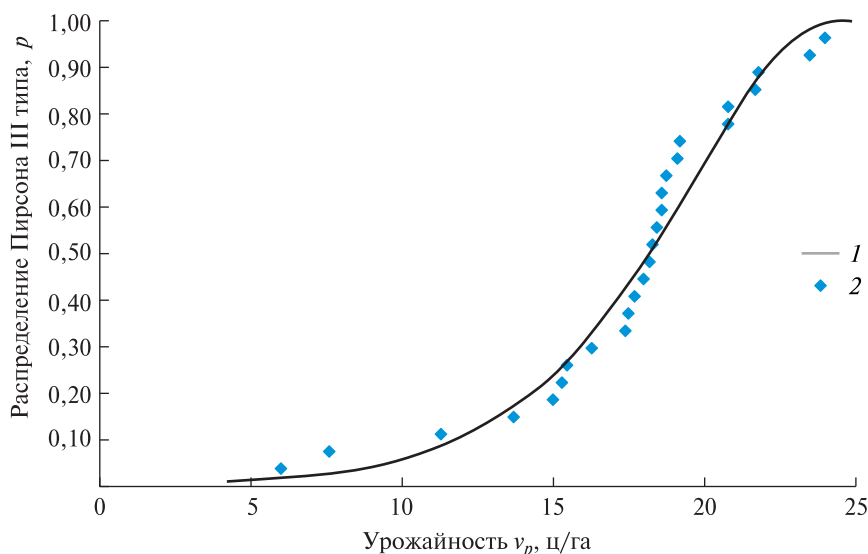
$$\sum_{j \in J} a(t)_{ij}^p x_j \leq (\geq) b(t)_i^p, (i \in I), (l \in L), \quad (5)$$

$$x_j \geq 0. \quad (6)$$

В задаче (4)–(6) коэффициенты $c(t)_j^p$, $a(t)_{ij}^p$ и правая часть $b(t)_i^p$ представляют собой динамико-стохастические характеристики, связанные с параметром t , изменяющимся в пределах значений $[\alpha, \beta]$, и вероятностью p . Решением задачи будут оптимальные значения целевой функции f^p , связанные с параметром t и вероятностью p , которым соответствуют оптимальные планы.

Таким образом, если одну часть характеристик модели можно описать трендами, а другую — законами распределения вероятностей с учетом динамики, то в этом случае может быть использована динамико-стохастическая модель [12]. Поскольку значения последовательности отклонений фактических значений от значений тренда могут быть положительными и отрицательными, а выборка обладает разной асимметрией, для ее адекватного описания применимо распределение Пирсона III типа, подробно описанное в работах [32, 33].

Рассмотрим применение задачи (4)–(6) для оптимизации зерновых культур, картофеля и овощей в Зиминском районе Иркутской области. Используя многоуровневые трендовые модели, найдем прогностические значения урожайности сельскохозяйственных культур для рассматриваемого района, за исключением биопродуктивности овса, которая представляет собой случайную выборку, описываемую распределением Пирсона III типа в соответствии с критерием согласия Колмогорова и свойствами функции для уровня значимости 0,05. При оптимиза-



Распределение Пирсона III типа для урожайности овса (1) по данным Зиминского района Иркутской области (2) за 1996–2021 гг.
Pearson type III distribution for oat yield (1) according to data from the Ziminsky district of the Irkutsk region (2) for 1996–2021

Т а б л и ц а 2

Статистические параметры вероятностного распределения Пирсона III типа для событий урожайности пшеницы и картофеля, по данным Заларинского района Иркутской области за 1996–2021 гг.

Statistical parameters of the Pearson type III probability distribution for wheat and potato yield events according to data from the Zalarinsky district of the Irkutsk region for 1996–2021

Культура	Модель	Среднее значение, ц/га	Среднее квадратическое отклонение, ц/га	Усредненные потери, ц/га	Год редкого события	Вероятность p	Потери
Пшеница	Динамико-стохастическая	0,94	3,15	2,9	2005	0,047	4,85
Картофель	Распределение Пирсона III типа	139	19,6	—	1997	0,0086	78,3
	Динамико-стохастическая	6,18	24,0	17,3	2008	0,0093	36,1

ции объемов производства овса урожайность на каждом уровне иерархии ряда принята в виде среднего значения. Для всех уровней ряда (усредненные условия) среднее значение равно 17,4 ц/га, что соответствует вероятности 0,423. Что касается последовательностей нижних (неблагоприятные условия) и верхних (благоприятные условия) уровней, то их средние значения составляют 13,3 и 21,0 ц/га, что соответствует вероятностям 0,161 и 0,20 (рисунок).

На основе решения задачи (4)–(6) доходы от деятельности сельскохозяйственных товаропроизводителей в растениеводстве Зиминского района в 2024 и 2025 гг. могут достигнуть в усредненных условиях 441,1 и 451,5 млн руб. Для неблагоприятных условий значения це-

левой функции в эти годы будут значительно ниже — 372,8 и 380,9 млн руб. (15,1...15,6 % по доходам и 17,3...17,8 % по объемам производства продукции). В благоприятных условиях смоделированные доходы в 2024 и 2025 гг. равняются 463,5 и 473,4 млн руб., а объем производства относительно 2022 г. может увеличиться на 4,4 и 6,6 %.

Перейдем к третьей группе, в которую входят климатические и некоторые экологические характеристики, временные ряды которых являются случайными или обладают значимыми низкими коэффициентами автокорреляции (табл. 2).

Расчет по динамико-стохастической модели (см. табл. 2) отражает распределение разностей исходных значений и значений трендов

последовательностей нижних уровней. В этих случаях редкие события, влекущие за собой значительные потери урожайности, наблюдались в 2005 и 2008 гг. Потери биопродуктивности пшеницы относительно усредненных неблагоприятных условий составили 4,85, а картофеля — 36,1 ц/га. Вероятности этих событий p соответствуют 0,047 и 0,0093.

В случае непредсказуемости изменения характеристик, входящих в модель оптимизации получения продовольственной продукции, для моделирования можно использовать экстремальную задачу (4)–(6), исключив из нее символ l , характеризующий три последовательности исходных рядов:

$$f^p = \sum_{j \in J} c_j^p x_j \rightarrow \max(\min), \quad (7)$$

$$\sum_{j \in J} a_{ij}^p x_j \leq (\geq) b_i^p, (i \in I), (l \in L), \quad (8)$$

$$x_j \geq 0. \quad (9)$$

На основе задачи (7)–(9) можно получить распределение критерия оптимальности и соответствующие его значениям оптимальные планы. Так, при оптимизации производства аграрной продукции необходимо учитывать риски, связанные с климатическими и техногенными процессами [30]. Экстремальные явления наносят значительный ущерб товаропроизводителям. Как следствие этого фиксируется сильная пространственно-временная вариация урожайности сельскохозяйственных культур, поэтому предприятиям следует планировать работу таким образом, чтобы минимизировать риски.

Рассмотрим стохастическую модель с учетом трендов, описывающую ситуацию перехода значений характеристик в события [4]. Приведем алгоритм решения такой задачи на примере производства растениеводческой продукции в Нукутском районе Иркутской области.

На первом этапе в рядах характеристик модели выделяются многоуровневые тренды. Затем по разности фактических данных и значений трендов нижних уровней временных рядов формируются выборки, отрицательные значения которых соответствуют уровням, отнесенным к неблагоприятным событиям [4]. Значение, соответствующее переходу положительных разностей к отрицательным величинам, назовем критическим уровнем. Событие, определяющее наименьшую отрицательную разность, отнесем к редким значениям, при котором наблюдаются наибольшие потери урожайности. Каждому событию соответствует вероятность, полученная на основании закона

распределения, в качестве которого использовано распределение Пирсона III типа.

При отсутствии трендов строится закон распределения характеристики ряда. Для определения критических уровней можно использовать статистические критерии или физические отметки, выше или ниже которых наблюдаются неблагоприятные события. В частности, при оценке урожайности сельскохозяйственной культуры v критическим считается значение не выше $0,8\bar{v}$, где $\bar{v}$ — средняя величина ряда характеристики.

На следующем этапе формируется задача математического программирования с учетом полученных характеристик, часть из которых являются постоянными, а другая — вероятностными величинами. Затем осуществляется решение задачи, соответствующей некоторой усредненной вероятности.

Целевая функция параметрической задачи с вероятностными характеристиками ориентирована на максимум доходов сельскохозяйственных предприятий муниципального района

$$f = \sum_{s \in S} c_s^l x_s \rightarrow \max, \quad (10)$$

при следующих условиях:

1) ограниченности производственных ресурсов

$$\sum_{s \in S} a_{zs}^l x_s \leq A_z^l, z \in Z, \quad (11)$$

2) ограниченности размера растениеводческой отрасли

$$\underline{n}_r \sum_{s \in S} (1 + \beta_s) x_s \leq \bar{n}_r, r \in R, \quad (12)$$

3) заданному объему конечной продукции

$$\sum_{s \in S} v_{qs}^{lp}(t) x_s \geq V_q^l, q \in Q, \quad (13)$$

4) определенного количества вносимых удобрений и средств защиты растений

$$\sum_{s \in S} b_{ms}^l x_s \leq B_m^l, m \in M, \quad (14)$$

5) неотрицательности переменных

$$x_s \geq 0, \quad (15)$$

где x_s — искомая переменная, площадь культуры s или вида кормовых угодий;

l — номер уровня тренда (усредненные условия — 1, благоприятные условия — 2, неблагоприятные условия — 3);

c_s^l — доход от производства единицы s -культуры или вида кормовых угодий;

a_{zs}^l — расход ресурса z на единицу площади культуры s или вида кормовых угодий;

A^l — наличие ресурса z -вида;
 V^l — гарантированный (обязательный) объем
 производства продукции вида q ;
 $\bar{n}, \underline{n}$ — максимальная и минимальная воз-
 можная площадь культур группы r ;
 $v_{qs}^{lp}(t)$ — выход товарной продукции q -вида с
 единицы площади культуры s ;
 p — вероятность события, связанная с уров-
 нем тренда;
 t — время, характеризующее многолетний
 период с начальным и конечным значениями
 $[\tau_1, \tau_2]$;

β_s — коэффициент, учитывающий площадь
 семенных посевов для культуры s ;

b_{ms}^l — расход удобрений вида m и средств
 защиты на единицу площади культуры s или
 кормовых угодий;

B_m^l — необходимый объем удобрений вида m .

При этом функция $v_{qs}^{lp}(t)$ может быть описана
 линейным, степенным и логистическим выра-
 жениями при условиях значимости уравнений
 регрессии и коэффициентов этих уравнений по
 F -критерию Фишера и t -критерию Стьюдента
 (табл. 3, 4).

Символы p_s^{kp} и p_a^{kp} представляют собой эм-
 пирические и аналитические вероятности, по-
 лученные на основе закона распределения Пир-
 сона III типа по выборкам, сформированным
 как разности фактических значений рядов и
 значений последовательностей нижних уров-
 ней ($l = 3$). Эмпирические вероятности опреде-
 лялись по формуле

$$p_s^{kp} = \frac{d}{N+1}, \quad (16)$$

где d — порядковый номер ранжированного
 ряда;

N — число значений ряда.

Кроме вероятностей в табл. 3 и 4 приведены:
 — количество событий, выделенных по трен-
 дам последовательностей минимальных значе-
 ний (нижних уровней) $v_{н.у}$;

— выражения трендов всего ряда (v) и ниж-
 них уровней ($v_{н.у}$);

— критерии, описывающие значимость вы-
 ражений и коэффициентов;

— урожайность, соответствующая критиче-
 скому уровню;

Т а б л и ц а 3

**Эмпирические и аналитические вероятности событий, соответствующих
 критическим уровням урожайности сельскохозяйственных культур,
 полученных на основе трендов и законов распределения вероятностей
 по данным Нукутского района Иркутской области за 1996–2021 гг.**

**Empirical and analytical probabilities of events corresponding to critical levels of agricultural crop yields,
 based on trends and laws of probability distribution according to data from the Nukutsk district
 of the Irkutsk region for 1996–2021**

Культура	Характеристики						
	Эмпириче- ская вероят- ность критического уровня p_s^{kp}	Аналитиче- ская вероят- ность критическо- го уровня p_a^{kp}	Число событий	Выражение тренда ряда урожайности сельскохозяйствен- ной культуры, ц/га	Коэф- фициент детерми- нации R^2	F -критерий Фишера	t -критерий Стьюдента
Свекла	0,347	0,425	8	$v = \frac{276}{1 + e^{-0,133t}}$	0,55	25,6	–5,1
				$v_{н.у} = \frac{231,9}{1 + e^{-0,248t}}$	0,65	9,3	–3,1
Морковь	0,261	0,165	6	$v = 7,91t + 111,1$	0,65	36,9	6,0
				$v_{н.у} = 6,61t + 110,8$	0,75	12,0	3,5
Капуста	0,217	0,177	5	$v = 8,24t + 118,3$	0,73	54,9	7,4
				$v_{н.у} = 8,89t + 83,6$	0,80	20,2	4,5
Картофель	0,130	0,105	3	$v = 60,9t^{0,240}$	0,79	75,7	8,7
				$v_{н.у} = 51,4t^{0,278}$	0,96	85,5	9,2
Пшеница	0,222	0,176	6	$v = 8,15t^{0,270}$	0,38	14,7	3,8
				$v_{н.у} = 6,45t^{0,273}$	0,70	11,5	3,4
Ячмень	0,292	0,293	7	—	—	—	—
Овес	0,296	0,212	8	$v = 4,72t^{0,434}$	0,45	19,6	4,4
				$v_{н.у} = 2,30t^{0,610}$	0,76	18,9	4,4

Т а б л и ц а 4

**Критические значения урожайности сельскохозяйственных культур
и вероятные потери, по данным Нукутского района Иркутской области
за 1996–2021 гг.**

**Critical values of agricultural yields and probable losses according to data from
the Nukutsk district of the Irkutsk region for 1996–2021**

Сельско- хозяйственная культура	Урожайность для критического уровня, ц/га	Потери относи- тельно тренда всего ряда, ц/га	Потери относи- тельно тренда нижних уровней, ц/га	Минимальная урожайность, ц/га
Свекла	123	24,4	7,3	106,2
Морковь	173,5	40,5	23,3	122,9
Капуста	258,1	25	3,3	108,7
Картофель	95,2	10,8	2,3	54,0
Пшеница	6,0	2,2	0,5	5,6
Ячмень	12,8	3,3	0,3	8,8
Овес	10,8	3,6	0,2	9,7

Т а б л и ц а 5

**Оптимальные решения детерминированной задачи
параметрического программирования и задачи
параметрического программирования с вероятностными
характеристиками (среднее $P_a^{\text{сп}} = 0,188$) для Нукутского района
Иркутской области**

**Optimal solutions of a deterministic parametric programming problem and a
parametric programming problem with probabilistic characteristics
(average $P_a^{\text{сп}} = 0,188$) for the Nukutsky district of the Irkutsk region**

Культура	Характеристики	Объем, т	
		Детерминированная модель	Стохастическая модель
Пшеница	x_1	11612,9	6940,1
Ячмень	x_2	9754,4	5425,2
Овес	x_3	5743,7	3462,6
Картофель	x_4	2991,7	2739,3
Капуста	x_5	379,6	356,6
Морковь	x_6	227,0	224,8
Целевая функция, тыс. руб.		346 042,6	197187,4

– наименьшие события (минимальная урожайность за многолетний период);

– потери урожайности относительно усредненного значения (v) и тренда нижних уровней ($v_{\text{н.у.}}$).

Получены результаты реализации двух вариантов модели — детерминированной, основанной на значениях урожайности v , рассчитанных для усредненных условий ($l = 1$), и стохастической, соответствующей критическим уровням рядов урожайности сельскохозяйственных культур (табл. 5).

Для детерминированной задачи доходы почти на 43 % превышают аналогичную характери-

стику стохастической задачи. При этом объем производства продукции в первом случае на 45 % выше, чем объем во втором случае.

Выводы

На основе динамико-стохастических свойств характеристик временных рядов выделены три вида многоуровневых моделей для оптимизации производства продовольственной продукции.

Первая модель позволяет планировать производство продукции на краткосрочную и среднесрочную многолетнюю перспективу,

учитывая усредненные, благоприятные и неблагоприятные условия для производственных процессов.

Вторая модель ориентирована на решение задачи многолетнего планирования в разных условиях деятельности сельскохозяйственного товаропроизводителя и заготовителя дикоросов с учетом вероятностной оценки некоторых производственно-экономических характеристик временных рядов.

Третья модель отражает ситуацию производства продовольственной продукции в условиях влияния на производственные процессы экстремальных событий, что позволяет оценивать риски при планировании.

Предложенные модели апробированы на данных муниципальных районов Иркутской области.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 24-21-00502.

Список литературы

- [1] Ксенофонов М.Ю., Ползиков Д.А. К вопросу о влиянии климатических изменений на развитие сельского хозяйства России в долгосрочной перспективе // Проблемы прогнозирования, 2020. № 3(180). С. 82–92.
- [2] Багров М.Б. Прогнозирование динамики сельского хозяйства по временным рядам // Инновационные технологии как основа развития аграрного образования и АПК региона, Тверь, 01–03 июня 2010 года, Изд-во Тверской государственной сельскохозяйственной академии. Т. 2. Тверь: Тверская государственная сельскохозяйственная академия, 2010. С. 151–152.
- [3] Вайс А.А. Особенности применения регрессионных уравнений при прогнозировании урожайности дикорастущих ягодников // Плодоводство, семеноводство, интродукция древесных растений, 2019. Т. 22. С. 26–30.
- [4] Иванько Я.М., Петрова С.А. Об одном алгоритме выделения аномальных уровней временного ряда для оценки рисков // Актуальные вопросы аграрной науки, 2022. № 42. С. 48–57.
- [5] Писсинато Б., Вилан К.Э.Ф., Бобровская Т.В., Перейра А.Г. Использование временных рядов и новых информационных технологий для прогнозирования показателей сельскохозяйственного производства // Высокопроизводительные вычислительные системы и технологии, 2021. Т. 5, № 1. С. 284–291.
- [6] Касимова Т.М. Исследование и прогнозирование динамики показателей сельского хозяйства региона на основе моделей временных рядов и рядов динамики // Фундаментальные исследования, 2018. № 12–1. С. 113–118.
- [7] Бублик М.Б. Стратегическое планирование в сельском хозяйстве: сущность, преимущества, совершенствование // Научный вестник государственного образовательного учреждения Луганской Народной Республики «Луганский национальный аграрный университет», 2018. № 1. С. 54–61.
- [8] Булатов В.П., Федурин Н.И. Математическое моделирование развития и функционирования региональных систем // Инфокоммуникационные и вычислительные технологии и системы: Материалы Всерос. конф. Улан-Удэ. 2003. Ч. 1. С. 12–16.
- [9] Агибалов А.В., Терновых К.С. Экономико-математическое моделирование как инструмент стратегического планирования развития сельских территорий // АПК: экономика, управление, 2022. № 7. С. 11–20.
- [10] Тусков А., Ефимов И., Ефимов П. Математические модели и информационные технологии в Агропромышленный комплекс региона // Вестник Атырауского университета имени Х. Досмухамедова, 2023. Т. 69, № 2. С. 63–73.
- [11] Ivanyo Ya.M., Petrova S.A. Optimization models of food processing wild-growing products with expert assessments // Critical infrastructures: contingency management, intelligent, agent-based, cloud computing and cyber security (IWCI 2019), proceedings of the VI-th International Workshop. Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2019, pp. 108–113.
- [12] Дружинин И.П., Смага В.Р., Шевнин А.Н. Динамика многолетних колебаний речного стока. М.: Наука, 1991. 176 с.
- [13] Волков А.В., Шиков С.А., Темаева О.О. Алгоритм долговременного контроля путем выделения трендовой, периодической и случайной составляющих временных рядов // Научно-технический вестник Поволжья, 2020. № 8. С. 32–35.
- [14] Заяц О.А., Рогачев А.Ф. Выявление стационарности временных рядов урожайности методами теории случайных процессов // Новые направления в решении проблем АПК на основе современных ресурсосберегающих, инновационных технологий: Материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 65-летию Победы в Великой Отечественной войне, Волгоград, 26–28 января 2010 года. Т. 4. Волгоград: Изд-во Волгоградского государственного аграрного университета, 2010. С. 222–225.
- [15] Личко К.П., Романюк М.А., Маркин М.М. Оптимизация систем ведения сельского хозяйства // Вестник Московской государственной академии делового администрирования. Серия: Экономика, 2012. № 6(18). С. 141–151.
- [16] Кравец А.Г., Сальникова Н.А. Предсказательное моделирование трендов технологического развития // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета), 2020. № 55 (81). С. 103–108.
- [17] Нестеренко Е.А., Киселев М.В. Новый взгляд на проблемы экономического прогнозирования в условиях неопределенности // Вестник Саратовского государственного социально-экономического университета, 2019. № 3 (77). С. 164–167.
- [18] Шеин Е.В., Русанов А.М., Милановский Е.Ю. Математические модели некоторых почвенных характеристик: обоснование, анализ, особенности использования параметров моделей // Почвоведение, 2013. № 5. С. 595
- [19] Теньковская Л.И. Методология оптимизации внутренних и внешних факторов сельского хозяйства // Инновационная наука, 2016. № 2–2. С. 111–116.

- [20] Роднина Н.В. Методологические особенности прогнозирования регионального АПК на современном этапе: проблемы, решения // АПК: экономика, управление, 2021. № 10. С. 72–79.
- [21] Юдин Д.Б. Математические методы управления в условиях неполной информации. М.: Советское радио, 1974. 400 с.
- [22] Иваньо Я.М., Барсукова М.Н., Петрова С.А. Об одной модели оптимизации производства аграрной продукции в благоприятных и неблагоприятных внешних условиях // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2020. № 3 (19). С. 73–85.
- [23] Абдуллаев Р.А., Мевлют И.Ш. Моделирование в системе управления производственными ресурсами в сельском хозяйстве // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета, 2018. № 3 (61). С. 9–15.
- [24] Барсукова М.Н., Иваньо Я.М., Столопова Ю.В., Петрова С.А. Задача параметрического программирования с моделями прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур // Прикладная информатика, 2021. Т. 16. № 6 (96). С. 131–143.
- [25] Бирюкова Н.В., Завьялова А.В. Математическое моделирование в сельском хозяйстве // Мир Инноваций, 2022. № 2. С. 40–44.
- [26] Полковская М.Н. Планирование производства растениеводческой продукции с учетом изменчивости урожайности сельскохозяйственных культур // Вестник ИРГСХА, 2024. № 122. С. 49–57.
- [27] Снежко И.И. Цифровая модель агропромышленного хозяйства: инновационный подход к улучшению управления и производства в сельском хозяйстве // Сборник трудов, приуроченных к 77-й Всерос. студенческой науч.-практ. конф., посвященной 150-летию со дня рождения Алексея Григорьевича Дояренко, Москва, 12–14 марта 2024 года. М.: Изд-во Российского государственного аграрного университета, 2024. С. 140–142.
- [28] Березина А.В. Особенности идентификации внешних производственных рисков // Вестник Самарского государственного университета путей сообщения, 2010. Вып. 3 (9). С. 10–13.
- [29] Телегина Ж.А. Приоритетные инструменты управления производственными рисками в условиях цифровой трансформации сельского хозяйства // Экономика сельского хозяйства России, 2021. № 12. С. 19–25.
- [30] Абдуллаев Р.А., Мевлют И.Ш. Моделирование в системе управления производственными ресурсами в сельском хозяйстве // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета, 2018. № 3(61). С. 9–15.
- [31] Гармаш А.Н., Орлова И.В., Федосеев В.В. Экономико-математические методы и прикладные модели. М.: Юрайт, 2022. 328 с.
- [32] Блохинов Е.Г. Распределение вероятностей величин речного стока. М.: Наука, 1974. 169 с.
- [33] Рождественский А.В. Оценка точности кривых распределения гидрологических характеристик. Л.: Гидрометеоздат, 1977. 270 с.
- [34] Заляжных В.В. Расширение области применения критерия Ирвина при обнаружении аномальных измерений // Вестник СибГУТИ, 2020. № 2(50). С. 95–100.
- [35] Усенко Л.Н. Роль статистики в создании методологии исследований в сельском хозяйстве России: от общинного хозяйства до цифровой экономики // Учет и статистика, 2019. № 2 (54). С. 9–15.

Сведения об авторах

Барсукова Маргарита Николаевна✉ — канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского», margarita1982@bk.ru

Иваньо Ярослав Михайлович — д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского», iymex@rambler.ru

Цыренжапова Валентина Вячеславовна — аспирант, ФГБОУ ВО «Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского», valyaigsha@mail.ru

Ковадло Илья Андреевич — аспирант, ФГБОУ ВО «Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского», kovadlo95@gmail.com

Поступила в редакцию 05.06.2024.

Одобрено после рецензирования 06.03.2025.

Принята к публикации 24.04.2025.

PARAMETRIC OPTIMISATION OF FOOD PRODUCTION TAKING INTO ACCOUNT TIME SERIES CHARACTERISTICS

M. Barsukova[✉], Ya.M. Ivan'o, I. Kovadlo, V. Tsyrenzhapova

Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Ezhevsky, build. 1/1, 664038, Molodezhny settlement, Irkutsk district, Irkutsk reg., Russia

margarita1982@bk.ru

The article considers modeling of time series characteristics related to obtaining food products based on statistical methods. The analyzed characteristics of time series are divided into three groups by dynamic-stochastic properties: 1) characteristics of time series described by significant multilevel trends with significant coefficients of regression expressions; 2) characteristics of time series with higher dispersion than the characteristics of the first group; 3) characteristics of time series that are random or have significant low autocorrelation coefficients, for example, climatic and ecological ones. The revealed statistical patterns of the characteristics considered are presented. An algorithm for stochastic optimization of the parametric problem of food production under conditions of the transition of values of the time series characteristics of the model into events is proposed.

Keywords: time series modeling, probability, parametric programming problem, food products

Suggested citation: Barsukova M.N., Ivan'o Ya.M., Kovadlo I.A., Tsyrenzhapova V.V. *Parametricheskaya optimizatsiya polucheniya prodovol'stvennoy produktsii s uchetom osobennostey kharakteristik vremennykh ryadov* [Parametric optimisation of food production taking into account time series characteristics]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2025, vol. 29, no. 3, pp. 181–193. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-3-181-193

References

- [1] Ksenofontov M.Yu., Polzikov D.A. *K voprosu o vliyaniy klimaticheskikh izmeneniy na razvitie sel'skogo khozyaystva Rossii v dolgosrochnoy perspective* [On the issue of the impact of climate change on the development of Russian agriculture in the long term]. *Problemy prognozirovaniya* [Problems of forecasting], 2020, no. 3(180), pp. 82–92.
- [2] Bagrov M.B. *Prognozirovaniye dinamiki sel'skogo khozyaystva po vremennym ryadam* [Forecasting the dynamics of agriculture using time series]. *Innovatsionnye tekhnologii kak osnova razvitiya agrarnogo obrazovaniya i APK regiona* [Innovative technologies as the basis for the development of agricultural education and the agro-industrial complex of the region], Tver, June 01–03, 2010. *Tverskaya gosudarstvennaya sel'skokhozyaystvennaya akademiya. T. 2. Tver'*: Tverskaya gosudarstvennaya sel'skokhozyaystvennaya akademiya, 2010, pp. 151–152.
- [3] Vays A.A. *Osobennosti primeneniya regressionnykh uravneniy pri prognozirovaniy urozhaynosti dikorastushchikh yagodnikov* [Features of the use of regression equations in predicting the yield of wild berries]. *Plodovodstvo, semenovodstvo, introduktsiya drevesnykh rasteniy* [Fruit growing, seed production, introduction of woody plants], 2019, t. 22, pp. 26–30.
- [4] Ivan'o Ya.M., Petrova S.A. *Ob odnom algoritme vydeleniya anomal'nykh urovney vremennogo ryada dlya otsenki riskov* [About one algorithm for identifying anomalous levels of a time series for risk assessment]. *Aktual'nye voprosy agrarnoy nauki* [Current issues of agricultural science], 2022, no. 42, pp. 48–57.
- [5] Pissinato B., Vian K.E.F., Bobrovskaya T.V., Pereyra A.G. *Ispol'zovanie vremennykh ryadov i novykh informatsionnykh tekhnologiy dlya prognozirovaniya pokazateley sel'skokhozyaystvennogo proizvodstva* [Using time series and new information technologies for forecasting agricultural production indicators]. *Vysokoproizvoditel'nye vychislitel'nye sistemy i tekhnologii* [High-performance computing systems and technologies], 2021, t. 5, no. 1, pp. 284–291.
- [6] Kasimova T.M. *Issledovanie i prognozirovaniye dinamiki pokazateley sel'skogo khozyaystva regiona na osnove modeley vremennykh ryadov i ryadov dinamiki* [Research and forecasting of the dynamics of regional agricultural indicators based on models of time series and dynamics]. *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental Research], 2018, no. 12–1, pp. 113–118.
- [7] Bublik M.B. *Strategicheskoe planirovaniye v sel'skom khozyaystve: sushchnost', preimushchestva, sovershenstvovaniye* [Strategic planning in agriculture: essence, advantages, improvement]. *Nauchnyy vestnik gosudarstvennogo obrazovatel'nogo uchrezhdeniya Luganskoy Narodnoy Respubliki «Luganskiy natsional'nyy agrarnyy universitet»* [Scientific Bulletin of the State Educational Institution of the Luhansk People's Republic «Luhansk National Agrarian University»], 2018, no. 1, pp. 54–61.
- [8] Bulatov V.P., Fedurina N.I. *Matematicheskoe modelirovaniye razvitiya i funktsionirovaniya regional'nykh sistem* [Mathematical modeling of the development and functioning of regional systems]. *Materiyy Vserossiyskoy konferentsii «Infokommunikatsionnye i vychislitel'nye tekhnologii i sistemy»* [Proceedings of the All-Russian Conference «Infocommunication and Computing Technologies and Systems»]. Ulan-Ude, 2003, ch. 1, pp. 12–16.
- [9] Agibalov A.V., Ternovyykh K.S., Agibalov A.V., Ternovyykh K.S. *Ekonomiko-matematicheskoe modelirovaniye kak instrument strategicheskogo planirovaniya razvitiya sel'skikh territoriy* [Economic and mathematical modeling as a tool for strategic planning of rural development]. *APK: ekonomika, upravleniye* [AIC: economics, management], 2022, no. 7, pp. 11–20.
- [10] Tuskov A., Efimov I., Efimov P. *Matematicheskie modeli i informatsionnye tekhnologii v Agropromyshlennyy kompleks regiona* [Mathematical models and information technologies in the Agro-industrial complex of the region]. *Vestnik Atyrauskogo universiteta imeni Kh. Dosmukhamedova* [Bulletin of the Atyrau University named after H. Dosmukhamedov], 2023, t. 69, no. 2, pp. 63–73.

- [11] Ivanyo Ya.M., Petrova S.A. Optimization models of food processing wild-growing products with expert assessments. Critical infrastructures: contingency management, intelligent, agent-based, cloud computing and cyber security (IWCI 2019), proceedings of the VI-th International Workshop. Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2019, pp. 108–113.
- [12] Druzhinin I.P., Smaga V.R., Shevnin A.N. *Dinamika mnogoletnikh kolebaniy rechnogo stoka* [Dynamics of long-term fluctuations in river flow]. Moscow: Nauka, 1991, 176 p.
- [13] Volkov A.V., Shikov S.A., Temaeva O.O. *Algoritm dolgovremennogo kontrolya putem vydeleniya trendovoy, periodicheskoy i sluchaynoy sostavlyayushchikh vremennykh ryadov* [Algorithm for long-term control by identifying trend, periodic and random components of time series]. Nauchno-tehnicheskii vestnik Povolzh'ya [Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region], 2020, no. 8, pp. 32–35.
- [14] Zayats O.A., Rogachev A.F. *Vyyavlenie statsionarnosti vremennykh ryadov urozhaynosti metodami teorii sluchaynykh protsessov* [Detecting the stationarity of yield time series using the methods of the theory of random processes]. Novye napravleniya v reshenii problem APK na osnove sovremennykh resursosberegayushchikh, innovatsionnykh tekhnologiy: Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 65-letiyu Pobedy v Velikoy Otechestvennoy voyne [New directions in solving problems of the agro-industrial complex based on modern resource-saving, innovative technologies: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference dedicated to the 65th anniversary of Victory in the Great Patriotic War], Volgograd, January 26–28, 2010. T. 4. Volgograd: Volgogradskiy gosudarstvennyy agrarnyy universitet, 2010, pp. 222–225.
- [15] Lichko K.P., Romanyuk M.A., Markin M.M. *Optimizatsiya sistem vedeniya sel'skogo khozyaystva* [Optimization of agricultural systems]. Vestnik Moskovskoy gosudarstvennoy akademii delovogo administrirovaniya. Seriya: Ekonomikam [Bulletin of the Moscow State Academy of Business Administration. Series: Economics], 2012, no. 6(18), pp. 141–151.
- [16] Kravets A.G., Sal'nikova N.A. *Predskazatel'noe modelirovanie trendov tekhnologicheskogo razvitiya* [Predictive modeling of technological development trends]. Izvestiya Sankt-Petersburgskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo instituta (tekhnicheskogo universiteta) [News of the St. Petersburg State Technological Institute (Technical University)], 2020, no. 55 (81), pp. 103–108.
- [17] Nesterenko E.A., Kiselev M.V. *Novyy vzglyad na problemy ekonomicheskogo prognozirovaniya v usloviyakh neopredelennosti* [A new look at the problems of economic forecasting in conditions of uncertainty]. Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo sotsial'no-ekonomicheskogo universiteta [Bulletin of the Saratov State Socio-Economic University], 2019, no. 3 (77), pp. 164–167.
- [18] Shein E.V., Rusanov A.M., Milanovskiy E.Yu. *Matematicheskie modeli nekotorykh pochvennykh kharakteristik: obosnovanie, analiz, osobennosti ispol'zovaniya parametrov modeley* [Mathematical models of some soil characteristics: justification, analysis, features of using model parameters]. Pochvovedenie [Soil Science], 2013, no. 5, p. 595.
- [19] Ten'kovskaya L.I. *Metodologiya optimizatsii vnutrennikh i vneshnikh faktorov sel'skogo khozyaystva* [Methodology for optimizing internal and external factors of agriculture]. Innovatsionnaya nauka [Innovative science], 2016, no. 2–2, pp. 111–116.
- [20] Rodnina N.V. *Metodologicheskie osobennosti prognozirovaniya regional'nogo APK na sovremennom etape: problemy, resheniya* [Methodological features of forecasting the regional agro-industrial complex at the present stage: problems, solutions]. APK: ekonomika, upravlenie [Agro-industrial complex: economics, management], 2021, no. 10, pp. 72–79.
- [21] Yudin D.B. *Matematicheskie metody upravleniya v usloviyakh nepolnoy informatsii* [Mathematical methods of control under conditions of incomplete information]. Moscow: Sovetskoe radio [Soviet Radio], 1974, 400 p.
- [22] Ivan'o Ya.M., Barsukova M.N., Petrova S.A. *Ob odnoy modeli optimizatsii proizvodstva agrarnoy produktsii v blagopriyatnykh i neblagopriyatnykh vneshnikh usloviyakh* [On one model for optimizing the production of agricultural products in favorable and unfavorable external conditions]. Informatsionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii [Information and mathematical technologies in science and management], 2020, no. 3 (19), pp. 73–85.
- [23] Abdullaev R.A., Mevlyut I.Sh. *Modelirovanie v sisteme upravleniya proizvodstvennymi resursami v sel'skom khozyaystve* [Modeling in the production resource management system in agriculture]. Uchenye zapiski Krymskogo inzhenerno-pedagogicheskogo universiteta [Scientific notes of the Crimean Engineering and Pedagogical University], 2018, no. 3 (61), pp. 9–15.
- [24] Barsukova M.N., Ivan'o Ya.M., Stolopova Yu.V., Petrova S.A. *Zadacha parametricheskogo programmirovaniya s modelyami prognozirovaniya urozhaynosti sel'skokhozyaystvennykh kul'tur* [The problem of parametric programming with models for predicting the yield of agricultural crops]. Prikladnaya informatika [Applied Informatics], 2021, t. 16, no. 6 (96), pp. 131–143.
- [25] Biryukova N.V., Zav'yalova A.V. *Matematicheskoe modelirovanie v sel'skom khozyaystve* [Mathematical modeling in agriculture]. Mir Innovatsiy [World of Innovations], 2022, no. 2, pp. 40–44.
- [26] Polkovskaya M.N. *Planirovanie proizvodstva rastenievodcheskoy produktsii s uchetom izmenchivosti urozhaynosti sel'skokhozyaystvennykh kul'tur* [Planning the production of crop products taking into account the variability of agricultural crop yields]. Vestnik IrGSKhA [Bulletin of the Irkutsk State Agricultural Academy], 2024, no. 122, pp. 49–57.
- [27] Snezhko I.I. *Tsifrovaya model' agropromyshlennogo khozyaystva: innovatsionnyy podkhod k uluchsheniyu upravleniya i proizvodstva v sel'skom khozyaystve* [Digital model of agro-industrial economy: an innovative approach to improving management and production in agriculture]. Sbornik trudov, priurochennykh k 77-y vserossiyskoy studencheskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 150-letiyu so dnya rozhdeniya Aleksey Grigor'evicha Doyarenko [Collection of papers dedicated to the 77th All-Russian student scientific and practical conference dedicated to the 150th anniversary of the birth of Aleksey Grigorievich Doyarenko]. Moscow, March 12–14. Moscow: Rossiyskiy gosudarstvennyy agrarnyy universitet, 2024, pp. 140–142.

- [28] Berezina A. V. *Osobennosti identifikatsii vneshnikh proizvodstvennykh riskov* [Features of identification of external production risks]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Samara State University of Transport], 2010, v. 3 (9), pp. 10–13.
- [29] Telegina Zh.A. *Prioritetnye instrumenty upravleniya proizvodstvennymi riskami v usloviyakh tsifrovoy transformatsii sel'skogo khozyaystva* [Priority Tools for Managing Production Risks in the Context of Digital Transformation of Agriculture]. *Ekonomika sel'skogo khozyaystva Rossii* [Agricultural Economics of Russia], 2021, no. 12, pp. 19–25.
- [30] Abdullaev R.A., Mevlyut I.Sh. *Modelirovanie v sisteme upravleniya proizvodstvennymi resursami v sel'skom khozyaystve* [Modeling in the Production Resource Management System in Agriculture]. *Uchenye zapiski Krymskogo inzhenerno-pedagogicheskogo universiteta* [Scientific Notes of the Crimean Engineering and Pedagogical University], 2018, no. 3(61), pp. 9–15.
- [31] Garmash A.N., Orlova I.V., Fedoseev V.V. *Ekonomiko-matematicheskie metody i prikladnye modeli* [Economic and Mathematical Methods and Applied Models]. Moscow: Yurayt, 2022, 328 p.
- [32] Blokhinov E.G. *Raspredelenie veroyatnostey velichin rechnogo stoka* [Probability distribution of river flow values]. Moscow: Nauka, 1974, 169 p.
- [33] Rozhdestvenskii A.V. *Otsenka tochnosti krivyykh raspredeleniya gidrologicheskikh kharakteristik* [Assessment of the Accuracy of Distribution Curves of Hydrological Characteristics]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1977, 270 p.
- [34] Zalyazhnykh V.V. *Rasshirenie oblasti primeneniya kriteriya Irvina pri obnaruzhenii anomal'nykh izmereniy* [Expanding the scope of application of the Irwin criterion in detecting anomalous measurements]. *Vestnik SibGUTI* [Bulletin of SibSUTI], 2020, no. 2(50), pp. 95–100.
- [35] Usenko L.N. *Rol' statistiki v sozdanii metodologii issledovaniy v sel'skom khozyaystve Rossii: ot obshchinnogo khozyaystva do tsifrovoy ekonomiki* [The role of statistics in creating a research methodology in Russian agriculture: from communal farming to the digital economy]. *Uchet i statistika* [Accounting and statistics], 2019, no. 2 (54), pp. 9–15.

The study was financially supported by the Russian Science Foundation, grant no. 24-21-00502.

Authors' information

Barsukova Margarita Nikolaevna✉ — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Ezhevsky, margarita1982@bk.ru

Ivan'o Yaroslav Mikhaylovich — Dr. Sci. (Tech.), Professor of the Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Ezhevsky, iymex@rambler.ru

Tsyrenzhapova Valentina Vyacheslavovna — pg. of the Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Ezhevsky, valyaigsha@mail.ru

Kovadlo Il'ya Andreevich — pg. of the Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Ezhevsky, kovadlo95@gmail.com

Received 05.06.2024.

Approved after review 06.03.2025.

Accepted for publication 24.04.2025.

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article

The authors declare that there is no conflict of interest