

Оптимизация производства сельскохозяйственной продукции при сочетании орошаемых и неорошаемых земель

Я. М. ИВАНЬО, Е. А. КОВАЛЕВА, Ю. М. КРАКОВСКИЙ, С. А. ПЕТРОВА

Иркутский государственный аграрный университет имени А. А. Ежовского, пос. Молодежный, Иркутский р-н, Иркутская обл., 664038, Российская Федерация

Резюме. Результаты использования орошения показывают высокий его потенциал в развитии сельского хозяйства региона. Часто необходимо сочетать производство продукции на неорошаемых и орошаемых землях. При этом земельные ресурсы подвержены водной, ветровой эрозии и загрязнению. Цель исследований – разработка модели параметрического программирования для оптимизации сочетания производства сельскохозяйственной продукции на орошаемых и неорошаемых землях с интервальными характеристиками. Разработанная модель параметрического программирования позволяет оптимизировать земельные ресурсы для производства продукции с максимальной прибылью в зависимости от интервальной изменчивости характеристик растениеводства и животноводства, а также их динамики. Конечным результатом моделирования выступает множество оптимальных решений, из которых выбираются те, которые соответствуют наименьшей, медианной и наибольшей максимальной прибыли с учетом потерь от эрозионных и техногенных воздействий, а также динамики характеристик. Применение модели для сельскохозяйственного предприятия региона, специализирующегося на производстве растениеводческой и животноводческой продукции, позволило оценить планы производства продукции на 2024 и 2026 гг. для разных условий деятельности. Расхождения между верхней и нижней оценкой максимальной прибыли могут достигать 11,6...12,6 % относительно медианы. Ущерб, вызванный эрозионными и техногенными процессами, относительно прибыли, по медиане составляют 16,4...16,7 %. Разработанная модель позволяет получать разные варианты решений с применением метода статистических испытаний для выбора наиболее приемлемых из них, в том числе с учетом ущербов от эрозии и загрязнения почвы и воды. При этом расчетные значения не противоречат реальным данным, но позволяют улучшать планирование производства продукции в разных условиях внешней среды.

Ключевые слова: оптимизация, орошение, сельскохозяйственная продукция, планирование, неопределенность, тренд.

Сведения об авторах: Я. М. Иваньо, доктор технических наук, проректор; Е. А. Ковалева, аспирант; Ю. М. Краковский, доктор технических наук, профессор; С. А. Петрова, кандидат технических наук, доцент (e-mail: sofia.registration@mail.ru).

Для цитирования: Оптимизация производства сельскохозяйственной продукции при сочетании орошаемых и неорошаемых земель / Я. М. Иваньо, Е. А. Ковалева, Ю. М. Краковский и др. // Достижения науки и техники АПК. 2024. Т. 38. № 5. С. 48–54. doi: 10.53859/02352451_2024_38_5_48

Optimisation of agricultural production with a combination of irrigated and rain-fed lands

Ya. M. Ivanyo, E. A. Kovaleva, Yu. M. Krakovsky, S. A. Petrova

Ezhevsky Irkutsk State Agrarian University, pos. Molodezhny, Irkutskii r-n, Irkutskaya obl., 664038, Russian Federation

Abstract. The results of irrigation use show its high potential in the development of agriculture in the region. It is often necessary to combine production on rain-fed and irrigated lands. At the same time, land resources are liable to water and wind erosion and pollution. The purpose of the research is to develop a parametric programming model to optimise the combination of agricultural production on irrigated and non-irrigated lands with interval characteristics. The developed parametric programming model makes it possible to optimise land resources to produce products with maximum profit, depending on the interval variability of the characteristics of crop and livestock production, as well as their dynamics. The result of the modelling is a set of optimal solutions, from which those that correspond to the smallest, median and largest maximum profit are selected, accounting for losses from erosion and man-made impacts, as well as the dynamics of characteristics. Application of the model for an agricultural enterprise in the region specialising in the production of crop and livestock products makes it possible to evaluate production plans for 2024 and 2026 for different operating conditions. The discrepancies between the upper and lower estimates of maximum profit can reach 11.6–12.6% relative to the median. Damage caused by erosion and man-made processes, relative to profit, is 16.4–16.7% by median. The developed model allows us to obtain different solutions using the method of statistical tests to select the most acceptable ones, including considering damage from erosion and soil and water pollution. At the same time, the calculated values do not contradict real data, but make it possible to improve production planning under different environmental conditions.

Keywords: optimisation; irrigation; agricultural products; planning; uncertainty; trend

Author Details: Ya. M. Ivanyo, D. Sc. (Tech.), vice-rector; E. A. Kovaleva, post graduate student; Yu. M. Krakovsky D. Sc. (Tech.), prof.; S. A. Petrova, Cand. Sc. (Tech.), assoc. prof. (e-mail: sofia.registration@mail.ru).

For citation: Ivanyo YaM, Kovaleva EA, Krakovsky YuM, et al. [Optimisation of agricultural production with a combination of irrigated and rain-fed lands]. Dostizheniya nauki i tekhniki APK. 2024;38(5):48–54. Russian. doi: 10.53859/02352451_2024_38_5_48

Мелиорация земель способствует эффективному развитию сельского хозяйства. По этой причине в Российской Федерации Постановлением Правительства от 14 мая 2021 г. № 731 утверждена «Государственная программа эффективного вовлечения в оборот земель сельскохозяйственного назначения и развития мелиоративного комплекса Российской Федерации». Одной из стратегических целей этого документа выступает «обеспечение водного режима гидромелиоративных систем» до 2031 г. на площади более 1,35 млн га.

Во исполнение этой государственной программы в Иркутской области принято распоряжение от 20

декабря 2021 г. № 758-рп, утверждающее государственную региональную программу Иркутской области «Эффективное вовлечение в оборот земель сельскохозяйственного назначения и развитие мелиоративного комплекса Иркутской области» на 2022–2024 гг. Согласно этому документу до 2024 г. предполагается ввести в эксплуатацию 1506 га мелиорируемых земель посредством проведения гидромелиоративных мероприятий.

Возрождение гидромелиорации на территории региона осуществляется невысокими темпами. По данным министерства сельского хозяйства Иркутской области, в 2020–2022 гг. в эксплуатацию введены

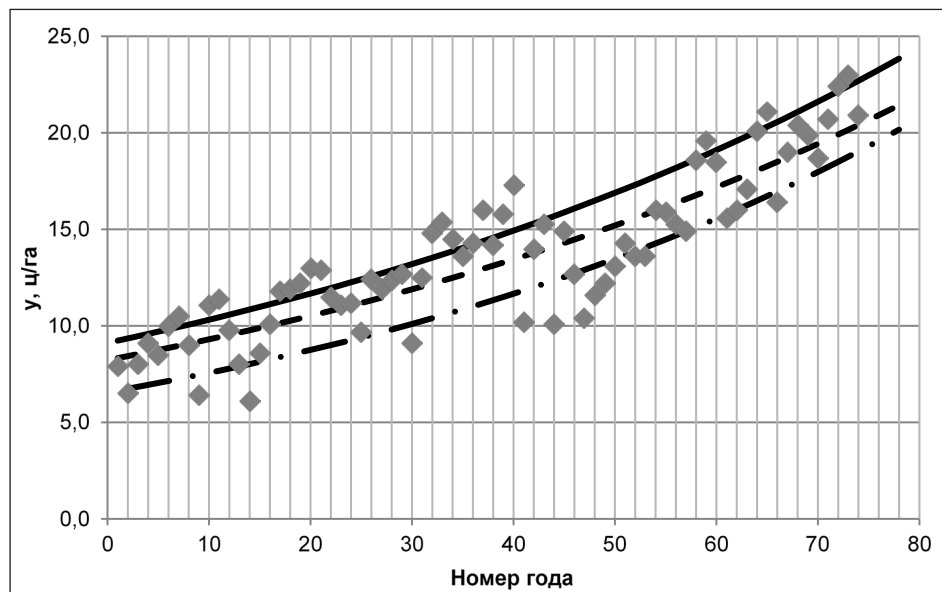


Рис. 1. Тренды урожайности зерновых культур в Иркутской области за 1950–2023 гг.: ♦ – фактические значения, — — — — — тренд уровней всего ряда, — · — — — — тренд локальных минимумов, — — — — — тренд локальных максимумов.

оросительные системы на площади 1000 га. На сегодняшний день, согласно информации ФГБУ «Управление «Иркутскмелиоводхоз», общая площадь орошаемых сельскохозяйственных угодий в регионе составляет 13402 га. Из них 43,5 % земель в 2023 г. не орошалось.

Согласно [1] повторяемость опасных метеорологических явлений в последние десятилетия увеличивается. При этом климатические факторы в период 1991–2020 гг. в меньшей степени влияли на производство зерна, чем в предыдущие тридцать лет [2]. Между тем изменчивость климата в Восточной Сибири не способствует оптимальному сочетанию тепла и влаги для устойчивого выращивания сельскохозяйственных культур. В частности, для получения хороших урожаев травосмесей в лесостепной зоне Красноярского края необходимо орошение [3].

Необходимость развития орошаемого земледелия в Иркутской области, как и во многих регионах страны, вызвана частыми засухами. На основе анализа многолетнего ряда средней урожайности зерновых

существуют, что усредненные потери урожайности зерновых культур в разные годы как разности между значениями трендов, описывающих весь ряд и последовательность локальных минимумов, могут составить от 5 до 20 %. Следует также отметить, что ряд Π обладает незначительным значимым первым коэффициентом автокорреляции, равным $R_1=0,43$. Тренды, как и коэффициенты роста, значимы согласно F -критерию Фишера, соответствующему уровню значимости α , и t -статистикам Стьюдента.

Сравнение результатов динамико-стохастического анализа с использованием линейных многоуровневых трендов показывает, что наименьшая вероятность p_{min} фактического события несколько выше у экспоненциальной функции (табл. 1). Это касается и максимальных потерь урожайности зерновых культур Π_m , которые составили для нелинейной функции – 2,5 ц/га, что на 0,6 ц/га меньше, по сравнению с линейной моделью.

Следует также отметить, что развитие гидромелиорации необходимо для обеспечения населения регио-

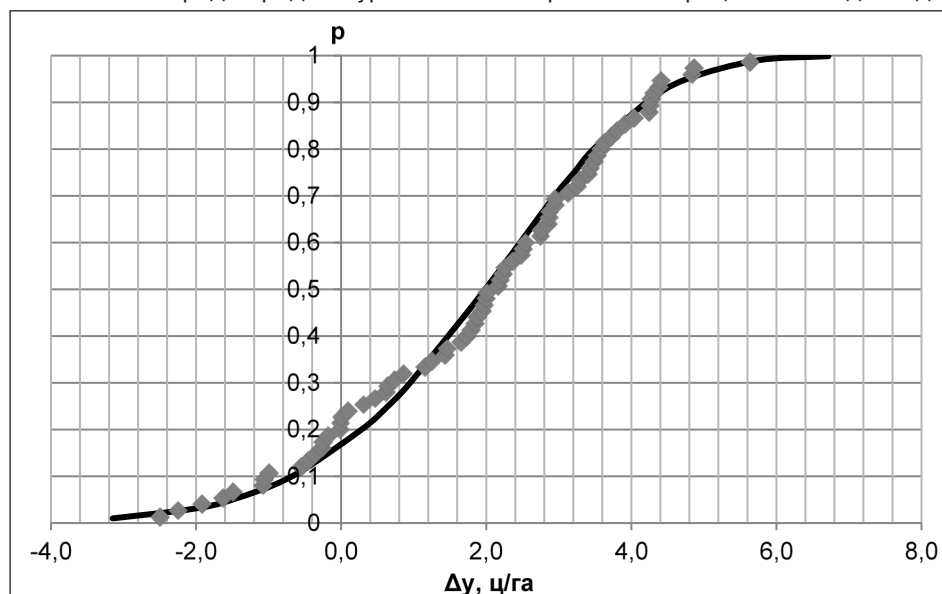


Рис. 2. Функция распределения потерь урожайности зерновых культур Пирсона III типа (2) и эмпирическая функция (1) в Иркутской области за 1950–2023 гг.; ♦ – 1, — — — — — 2.

культур по Иркутской области за 1950–2023 гг. с использованием многоуровневых трендов [4] в виде экспоненциальной функции $y = a_0 e^{kt}$ (рис. 1) получена вероятность очень низкой урожайности $p_k = 0,171$ по распределению Пирсона III типа [5]. Причем вероятность наиболее неблагоприятной ситуации, наблюдавшейся в 1996 г., $p_{min} = 0,0219$ (рис. 2).

Результаты анализа функции распределения вероятностей Пирсона III типа, характеризующей потери урожайности сельскохозяйственных культур относительно тренда последовательности локальных минимумов Π (отрицательные значения), свидетель-

ствуют, что усредненные потери урожайности зерновых культур в разные годы как разности между значениями трендов, описывающих весь ряд и последовательность локальных минимумов, могут составить от 5 до 20 %. Следует также отметить, что ряд Π обладает незначительным значимым первым коэффициентом автокорреляции, равным $R_1=0,43$. Тренды, как и коэффициенты роста, значимы согласно F -критерию Фишера, соответствующему уровню значимости α , и t -статистикам Стьюдента.

Сравнение результатов динамико-стохастического анализа с использованием линейных многоуровневых трендов показывает, что наименьшая вероятность p_{min} фактического события несколько выше у экспоненциальной функции (табл. 1). Это касается и максимальных потерь урожайности зерновых культур Π_m , которые составили для нелинейной функции – 2,5 ц/га, что на 0,6 ц/га меньше, по сравнению с линейной моделью.

Следует также отметить, что развитие гидромелиорации необходимо для обеспечения населения регио-

на овощами, поскольку производство этого вида продукции по данным министерства сельского хозяйства Иркутской области недостаточно и составляет 53,6 % от необходимого количества.

Иными словами, современное сельское хозяйство Иркутской области недостаточно использует гидромелиорацию для решения задач развития производства продукции, хотя можно привести примеры успешного использования орошения для достижения весомых результатов. В частности, в крестьянском (фермерском) хозяйстве Кичигина Леонида Петровича, благодаря безвирусной техноло-

Таблица 1. Результаты динамико-стохастического анализа ряда урожайности зерновых культур в Иркутской области с использованием многоуровневых трендов за 1950–2023 гг.

Уровень ряда	Уравнение регрессии	R ²	F-критерий Фишера	Уровень значимости, α	t-статистика Стьюдента	P _k	P _{min}	Π _m , ц/га	Год
Средний	$y_t = 8,23e^{0,0123t}$	0,74	201,9	$1,40 \times 10^{-22}$	14,2				
Нижний	$y_t = 6,55e^{0,0145t}$	0,80	68,2	$2,35 \times 10^{-7}$	8,26	0,171	0,0219	-2,5	1996
Верхний	$y_t = 9,12e^{0,0123t}$	0,89	144,1	$1,00 \times 10^{-9}$	12,0				
Средний	$y_t = 0,163t + 7,51$	0,76	223,1	$9,44 \times 10^{-24}$	14,9	0,190	0,0194	-3,1	1996
Нижний	$y_t = 0,168t + 5,61$	0,80	69,6	$2,04 \times 10^{-7}$	8,35				
Верхний	$y_t = 0,177t + 8,38$	0,89	139,6	$1,28 \times 10^{-9}$	11,8				

гии выращивания картофеля и капельному орошению, удастся получать урожай клубней не ниже 35...40 т/га. В СХАО «Белореченское» наращивается производство овощных культур. На основе использования оросительных систем средняя урожайность капусты достигает 80, а на отдельных полях – более 110 т/га.

Многие авторы обращают внимание на деградацию земель. Поэтому в статье [6] предлагается адаптивно ландшафтное управление для устойчивого развития сельскохозяйственного землепользования в Алтайском крае. В работе [7] рекомендуется изменить структуру площадей возделываемых сельскохозяйственных культур посредством увеличения удельного веса многолетних трав для устранения дисбаланса содержания органического вещества в почве. Для решения многих задач управления производством сельскохозяйственной продукции разрабатываются системы поддержки принятия решений [8]. В этом отношении немаловажное значение имеет оптимальное сочетание орошаемого и неорошаемого земледелия.

Цель исследований – разработка модели параметрического программирования для оптимизации сочетания производства сельскохозяйственной продукции на орошаемых и неорошаемых землях с интервальными характеристиками, и применение разработки для сельскохозяйственной организации Иркутской области.

Для достижения цели решали задачи по разработке модели линейного программирования с интервальными характеристиками и ее реализации для СХАО «Приморский».

Условия, материалы и методы. Использованы материалы Иркутскстата по производству сельскохозяйственной продукции за 1996–2023 гг., которые дополнены информацией Министерства сельского хозяйства Иркутской области по урожайности зерновых культур в регионе за многолетний период, начиная с 1950 г.

Для построения модели оптимизации сочетания производства сельскохозяйственной продукции использованы методы математического программирования в условиях неопределенности. Реализация модели основана на данных бухгалтерской отчетности СХАО «Приморский» Нукутского района.

При построении многоуровневых трендов использован способ выделения последовательностей локальных минимумов и максимумов ряда [9]. Для вероятностной оценки урожайности зерновых культур привлечен метод построения закона распределения вероятностей.

Результаты и обсуждение. В работах [10, 11] приведены модели, позволяющие оптимизировать сочетание производства сельскохозяйственной продукции на орошаемых и неорошаемых землях. В этих моделях помимо максимальной прибыли определяются ущербы окружающей среде. Предложены детерминированная модель и модели с интервальными и вероятностными характеристиками.

Модель оптимизации производства аграрной продукции с целевой функцией в виде максимума прибыли и учетом ущербов окружающей среде с интервальными характеристиками для сочетания орошаемого и неорошаемого земледелия может быть записана следующим образом.

Целевая функция достигает максимума прибыли:

$$f = \sum_{i \in I} (1 - \bar{l}_i) c_i \bar{y}_i x_i + \sum_{i \in I} (1 - \bar{l}_i') c_i' \bar{y}_i' x_i' + \sum_{k \in K} c_k r_k h_k + \sum_{j \in J} (1 - \bar{a}_j) g_j \bar{p}_j z_j + \sum_{j \in J} (1 - \bar{a}_j') g_j' \bar{p}_j' z_j' \rightarrow \max, \quad (1)$$

где c_i, g_j, c_i', g_j' – прибыль, получаемая от продажи 1 ц товарной продукции культуры вида i и кормов j при неорошаемом (орошаемом) земледелии, руб./ц; c_k – прибыль, получаемая от продажи 1 ц товарной продукции животных вида k , руб./ц; $\bar{l}_i, \bar{l}_i', \bar{a}_j, \bar{a}_j', \bar{a}_j', \bar{a}_j'$ – нижние и верхние оценки коэффициентов негативного воздействия техногенных и природных процессов на почву при возделывании культур i и j на неорошаемых (орошаемых) землях; I, J, K – множество культур для товарной продукции, кормовых культур и видов животных; $\bar{y}_i, \bar{y}_i', \bar{p}_j, \bar{p}_j', \bar{p}_j', \bar{p}_j'$ – нижние и верхние оценки урожайности культуры вида i и кормовых вида j при неорошаемом (орошаемом) земледелии, ц/га; r_k – продуктивность животных k , ц/гол.; h_k – количество животных вида k , гол. Искомые переменными служат: x_i, z_j, x_i', z_j' – площади неорошаемых (орошаемых) земель, га и h_k .

Ограничения по заданному объему производства товарной растениеводческой продукции имеют вид:

$$(1 - \bar{l}_i) \bar{y}_i x_i + (1 - \bar{l}_i') \bar{y}_i' x_i' \geq S_i, \quad (2)$$

где S_i – заданный объем производства товарной продукции растениеводства вида i , ц.

Ограничения по заданному объему производства животноводческой продукции имеют вид

$$r_k h_k \geq Y_k \quad (3)$$

где Y_k – заданный объем производства животноводческой продукции k , ц.

Условие по увязке производства растениеводческой продукции и потребности в ней животноводства записываются как:

$$\sum_{j \in J} (1 - \bar{a}_j) \beta_{\theta j} \bar{p}_j z_j + \sum_{j \in J} (1 - \bar{a}_j') \beta_{\theta j}' \bar{p}_j' z_j' \geq \sum_{k \in K} B_{\theta k} h_k \quad (\theta \in \Theta), \quad (4)$$

где $B_{\theta k}$ – минимальная потребность в элементе питания θ животного k , корм. ед./гол.; $\beta_{\theta j}$ – содержание θ -элемента питания в единице кормовой продукции, полученной от культуры j , Θ – множество элементов питания.

Ограничения по площади неорошаемых и орошаемых земель записываются в виде

$$\sum_{i \in I} x_i + \sum_{j \in J} z_j \leq a, \quad (5)$$

$$\sum_{i \in I} x'_i + \sum_{j \in J} z'_j \leq a', \quad (6)$$

где a (a') – площадь пашни на неорошаемых (орошаемых) землях без учета паров, га.

Ограничения по наличию трудовых ресурсов имеют вид

$$b_i x_i + b'_i x'_i \leq B_i \quad (7)$$

$$\zeta_j z_j + \zeta'_j z'_j \leq Z_j, \quad (8)$$

$$\varepsilon_k h_k \leq E_k \quad (9)$$

где b_i , ζ_j (b'_i , ζ'_j) – затраты трудовых ресурсов на обработку 1 га неорошаемых (орошаемых) земель, чел. • ч/га; ε_k – затраты трудовых ресурсов для ухода за животными, чел. • ч/гол.; B_i , Z_j , E_k – имеющиеся трудовые ресурсы для производства продукции вида i , j , k , чел. • ч.

Условия по непревышению предельно допустимой концентрации (ПДК) вредных веществ в почве выглядят так:

$$\sum_{i \in I} \phi_{in} x_i + \sum_{i \in I} \tilde{v}_{in} x'_i + \sum_{j \in J} u_{jn} z_j + \sum_{j \in J} \tilde{o}_{jn} z'_j \leq \Omega_n \quad (n \in N), \quad (10)$$

$$\sum_{i \in I} \phi'_{in} x'_i + \sum_{i \in I} \tilde{v}'_{in} x'_i + \sum_{j \in J} u'_{jn} z'_j + \sum_{j \in J} \tilde{o}'_{jn} z'_j \leq \Omega'_n \quad (n \in N), \quad (11)$$

где ϕ_{in} , v_{jn} (ϕ'_{in} , v'_{jn}) – исходная концентрация вредного вещества n на неорошаемых (орошаемых) землях, мг/кг; вредное вещество n с верхними и нижними оценками концентрации $\tilde{v}_{in} \leq v_{in} \leq \tilde{v}'_{in}$, $\tilde{o}_{jn} \leq o_{jn} \leq \tilde{o}'_{jn}$, ($\tilde{v}'_{in} \leq v'_{in} \leq \tilde{v}_{in}$, $\tilde{o}'_{jn} \leq o'_{jn} \leq \tilde{o}_{jn}$), поступающее на неорошаемые (орошаемые) земли; (мг/кг); Ω_n (Ω'_n) – значения предельно допустимой концентрации вредного вещества n в почве на неорошаемых (орошаемых землях), мг/кг; N – множество вредных веществ.

Ограничения на водозабор в реке имеет вид:

$$\sum_{i \in I} q_i x'_i + \sum_{j \in J} l_j z'_j \leq T' \tilde{\xi}, \quad (12)$$

где q_i , l_j – оросительная норма культуры i и кормовых культур j , м³/га; T' – вегетационный период, сут; $\tilde{\xi} \leq \xi \leq \tilde{\xi}$ – верхние и нижние границы суточного расхода воды, м³/сут.

Условия по непревышению предельно допустимой концентрации вредных веществ в реке записываются в виде:

$$\psi_n T' \tilde{\xi} + \mu_n \sum_{i \in I} [(q_i + \lambda) x'_i + \lambda x_i] + \mu'_n \sum_{j \in J} [(l_j + \lambda) z'_j + \lambda z_j] \leq W_n \quad (n \in N), \quad (13)$$

где ψ_n – исходная концентрация вредного вещества n в реке, мг/м³; μ_n , μ'_n – концентрация вредного вещества n в единице объема возвратных вод с полей культур i и j , мг/м³; λ – осадки, выпадающие за вегетационный период, м³/га; W_n – заданные величины предельно допустимой концентрации вредного вещества n в реке, мг/м³.

Ограничения на почвенные потери от водной и ветровой эрозии на орошаемых и неорошаемых землях имеют вид:

$$\sum_{i \in I} \tilde{R} U_i D_i V_i C_i P_i x_i + \sum_{j \in J} \tilde{R} U'_j D'_j V'_j C'_j P'_j z_j + \sum_{i \in I} M_i T x_i + \sum_{j \in J} M'_j T z_j \leq \eta, \quad (14)$$

$$\sum_{i \in I} \tilde{R} U_i D_i V_i C_i P_i x'_i + \sum_{j \in J} \tilde{R} U'_j D'_j V'_j C'_j P'_j z'_j + \sum_{i \in I} M_i T x'_i + \sum_{j \in J} M'_j T z'_j \leq \eta', \quad (15)$$

где η (η') – максимальные годовые почвенные потери на неорошаемых (орошаемых) землях, т/га;

$\tilde{R} \leq R \leq \tilde{R}$ – верхние и нижние границы эродирующей способности дождей, т/га; U_i (U'_j) – фактор податливости почв эрозии; D_i (D'_j) – фактор длины склона; V_i (V'_j) – фактор крутизны склона; C_i (C'_j) – фактор растительности и севооборота; P_i (P'_j) – фактор эффективности противоэрозионных мероприятий; M_i (M'_j) – интенсивность выноса почвы, т/га в 1 ч, T – время, в течение которого почва разрушается, ч. Для расчета характеристик, входящих в (14)...(15), используются нормативные методики.

Ограничения неотрицательности переменных выглядят так:

$$x_i, z_j, x'_i, z'_j, h_k \geq 0. \quad (16)$$

Результатом применения таких моделей выступает множество решений, среди которых можно выделить нижние, верхние и медианные оценки целевой функции и соответствующие им оптимальные планы. Не исключено использование других вариантов оптимальных решений для улучшения управления производственными процессами.

Приведенную модель (1)...(16) преобразуем в задачу параметрического программирования с интервальными оценками при условии, что урожайность сельскохозяйственных культур обладает значимыми трендами. Это касается и стабильной динамики увеличения продуктивности животноводческой продукции. В этом случае целевая функция (1) и ограничения (2)...(4) примут вид:

$$f = \sum_{i \in I} (1 - \tilde{f}_i) c_i y_i(t) x_i + \sum_{i \in I} (1 - \tilde{f}'_i) c'_i y'_i(t) x'_i + \sum_{k \in K} c_k r_k(t) h_k + \sum_{j \in J} (1 - \tilde{\alpha}_j) g_j p_j(t) z_j + \sum_{j \in J} (1 - \tilde{\alpha}'_j) g'_j p'_j(t) z'_j \rightarrow \max \quad (17)$$

$$(1 - \tilde{f}_i) y_i(t) x_i + (1 - \tilde{f}'_i) y'_i(t) x'_i \geq S_i \quad (18)$$

$$r_k(t) h_k \geq Y_k \quad (19)$$

$$\sum_{j \in J} (1 - \tilde{\alpha}_j) \beta_{\theta j} p_j(t) z_j + \sum_{j \in J} (1 - \tilde{\alpha}'_j) \beta_{\theta j} p'_j(t) z'_j \geq \sum_{k \in K} B_{\theta k} h_k \quad (\theta \in \Theta), \quad (20)$$

где t – параметр, характеризующий время.

Целевая функция (17) с ограничениями (5)...(16), (18)...(20) представляет собой задачу параметрического программирования с усредненными и интервальными характеристиками, которая вытекает из модели (1)...(16). Эта модель отличается от модели, приведенной в работе [10], которая основана на задаче параметрического программирования с вероятностными характеристиками. Кроме того, модель параметрического

программирования с усредненными и интервальными характеристиками отличается от модели линейного программирования с интервальными характеристиками [11] наличием характеристик, зависящих от параметра t . При этом в этой модели преобразованы ограничения по производству растениеводческой и животноводческой продукции (2) и (18), (3) и (19), по трудовым ресурсам (7)...(9).

В этой экстремальной задаче определяется максимальная прибыль и ущербы, вызванные эрозийными процессами и загрязнением почвы и воды. Оптимальными планами выступают площади неорошаемых (x_i, z_i) и орошаемых (x'_i, z'_i) земель, на которых производится товарная и кормовая продукция, а также поголовье животных (h_k). При этом оптимальные решения зависят от параметра t и изменчивости интервальных характеристик. Среди них выделяются решения с верхней оценкой, медианной и нижней оценкой максимума прибыли при заданном t с соответствующими оптимальными планами. Добавим к этому, что одна часть урожайностей сельскохозяйственных культур может быть описана трендами, а другая – интервальными характеристиками.

Опыт показывает [4], что при построении трендов, описывающих биопродуктивность сельскохозяйственных культур, применимы линейная и нелинейные функции – степенная, логарифмическая и экспоненциальная. Помимо приведенных нелинейных функций с неограниченным ростом хорошо зарекомендовали себя выражения с насыщением, которые могут использоваться для стабильно развивающихся хозяйств с высокими производственно-экономическими показателями и сильным рассеянием уровней ряда.

Модель параметрического программирования с интервальными характеристиками применена

для оптимизации сочетания производства растениеводческой и животноводческой продукции в СХАО «Приморский», которое помимо неорошаемого земледелия использует орошение для получения кормовых культур, в частности, кукурузы на силос. Это хозяйство специализируется на производстве животноводческой и растениеводческой продукции.

При моделировании использованы прогностические значения для урожайности зерновых культур, многолетних трав на сено и плановые значения для урожайности кукурузы, выращиваемой на силос с использованием оросительных систем.

Урожайность однолетних трав на сено и зеленый корм, многолетних трав на зеленый корм, силосных культур (без кукурузы), кукурузы на силос принималась в качестве интервальных оценок с нижними и верхними значениями, соответствующими наименьшим и наибольшим уровням многолетнего ряда за 1996–2021 гг. Что касается характеристик животноводства, то их увеличение основывалось на экспертных оценках специалистов. Коэффициенты негативного влияния

$\tilde{l}_i, \tilde{l}'_i, \tilde{\alpha}_j, \tilde{\alpha}'_j$, содержащиеся в модели, приняты постоянными для сельскохозяйственных культур. Их значения колеблются в диапазоне 0,0248...0,300.

Площадь орошаемых земель в СХАО «Приморский» составляет 320 га и используется для выращивания кукурузы на силос или многолетних трав. На орошаемых землях урожайность кукурузы на силос обычно на 50...100 % выше, чем при богарной технологии ведения производственных процессов. Отметим также, что Нукутский район, в котором находится сельскохозяйственная организация, характеризуется частыми проявлениями засушливых явлений. Ориентируясь на методику оценки событий с учетом многоуровневых трендов [4], по данным урожайности зерновых за 1996–2021 гг. выявлено семь засух. При этом вероят-

Таблица 2. Оптимальные решения задачи параметрического программирования с интервальными характеристиками для СХАО «Приморское» Нукутского района Иркутской области с прогностическими значениями урожайности некоторых сельскохозяйственных культур на 2024 и 2026 гг.

Решение	Площадь, га										Поголовье, гол.				Количество пчелосемей	Ущерб, млн руб.	f, млн руб.
	зерновых культур	рапса	однолетних трав на сено	однолетних трав на зеленый корм	многолетних трав на сено	многолетних трав на зеленый корм	многолетних трав на семена	силосных культур, без кукурузы	кукурузы на силос	орошаемой кукурузы на силос	коров основного стада	коров на откорме	лошадей основного стада	лошадей на откорме			
x_1	x_2	z_1	z_2	z_3	z_4	z_5	z_6	z_7	z'_7	h_1	h_2	h_3	h_4	h_5			
Факт (2023 г.)	10000	1100	1083	1761	100	864	765	2346	434	320	2611	1941	96	91	580	-	19,7
На 2024 г.																	
Нижняя оценка	11539	500	200	3300	1866	1191	500	927	436	320	2500	1800	150	150	423	3,5	21,5
Медиана	11791	500	1455	2045	500	700	500	804	414	320	2889	1800	150	150	423	3,8	23,2
Верхняя оценка	11791	500	1344	2156	500	700	500	798	414	320	3000	1800	150	150	423	4,0	24,2
На 2026 г.																	
Нижняя оценка	10998	500	200	3300	1809	2243	500	896	483	320	2500	1800	150	150	423	3,6	21,8
Медиана	11791	500	1368	2132	500	700	500	739	414	320	3000	1800	180	150	423	4,0	23,9
Верхняя оценка	11791	500	1350	2150	500	700	500	777	414	320	3000	1800	200	150	423	4.1	24.8

ность событий равна 0,266 (повторяемость примерно 1 раз в 4 года).

Хотя засушливые явления сильно влияют на урожай, сельскохозяйственной организации удастся развивать производство (табл. 2). Согласно приведенным результатам, прибыль между нижней и верхней оценкой может изменяться в пределах 21,5...24,2, и 21,8...24,8 млн руб. соответственно в 2024 и 2026 гг. Относительно медианного значения расхождения составляют 4,3...7,9 и 3,8...9,6 % по запланированным показателям на 2024 и 2026 гг. При этом ущерб, связанный с эрозийными процессами, определен на уровне 3,5...4,0 и 3,6...4,1 млн руб.

По результатам моделирования колебаниям подвергаются, прежде всего, площади кормовых культур: однолетних и многолетних трав на сено и зеленый корм, силосных культур и кукурузы на силос. Наибольшие расхождения между оптимальными планами 2024 и 2026 гг. отмечены для верхних оценок целевых функций, а наименьшие – для медиан.

Особой неустойчивостью характеризуются площади однолетних трав на сено и силосных культур без кукурузы, в животноводческой отрасли – поголовье коров основного стада. Другими словами, развитие орошения способствует более стабильному производству сельскохозяйственных культур, в конкретном случае кормовой продукции. Добавим к этому, что оросительные системы хозяйства требуют реконструкции и необходимо расширение площадей полива.

Предложенная модель планирования на основе задачи параметрического программирования с учетом интервальных характеристик и трендов позволяет моделировать лучшие и худшие ситуации производства растениеводческой и животноводческой продукции в зависимости от сочетания моделируемых интервальных значений характеристик с использованием метода Монте-Карло. Многократная реализация модели обуславливает выбор оптимальных планов, соответствующих наибольшей, наименьшей и медианной максимальной прибыли. Обычно достаточно 500 решений для выбора экстремумов и медианы целевой функции и соответствующих им оптимальных планов.

Как показали результаты моделирования на примере СХАО «Приморский», могут возникнуть ситуации расхождения между реальными посевными площадями культур и модельными значениями, хотя значения целевой функции не противоречат фактической прибыли хозяйства от производства продукции по данным 2023 года (см. табл. 2). Расхождение между фактической и плановой прибылью по медиане, полученной с использованием модели на 2024 год, составляет 18,0 %, а при сопоставлении фактического значения экономического показателя с верхней оценкой – 25,1 %. Плановые показатели характеризуются более высокими значениями. При этом посевные площади в планах увеличены на 1,3 % посредством использования залежных земель. В отличие от реальных показателей предприятия результаты моделирования

предполагают производить больше зерна, однолетних и многолетних трав на сено, развивать коневодство путем снижения производства рапса, силосных культур без кукурузы и уменьшения пчелосемей. При нестабильном производстве продукции (нижняя оценка прибыли) требуются дополнительные меры для уменьшения потерь и сохранения животноводческой отрасли. Одно из направлений – использование дополнительных площадей или закупка кормов. В этом случае нужно увеличить посевы почти на 10 %, уменьшив при этом пары. Другой вариант состоит в том, чтобы закупить корма, соответствующие валовому сбору, полученному на дополнительных площадях.

В некоторых случаях полезно ориентироваться не на оптимальные планы, соответствующие нижним и верхним оценкам максимальной прибыли, а на промежуточные результаты, которые ближе к требованиям сельскохозяйственной организации. В частности, это касается нижней оценки максимальной прибыли и соответствующих ей оптимальных планов, подверженных сильным колебаниям. Неблагоприятные ситуации в виде засух и сочетания разных факторов, способствующих снижению урожая, оказывают отрицательное влияние на поголовье животных.

Выводы. Разработана модель параметрического программирования с интервальными оценками для сочетания производства растениеводческой и животноводческой продукции с использованием орошаемых и неорошаемых земель. Результатом ее использования выступает максимум прибыли производства сельскохозяйственной продукции с верхними, нижними и медианными значениями, которым соответствуют оптимальные планы структуры посевных площадей и поголовья животных.

Модель реализована для сельскохозяйственной организации Нукутского района Иркутской области с определением планов производства продукции на перспективу до 2026 г., которые характеризуют некоторый усредненный, худший и лучший варианты. Разработанная модель обеспечивает получение разных вариантов решений для выбора наиболее приемлемых из них, в том числе с учетом ущерба от эрозии и загрязнения почвы и воды. При этом расчетные значения не противоречат реальным данным, но позволяют улучшать планирование производства продукции в разных условиях внешней среды.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа финансировалась за счет средств гранта Российского научного фонда (Соглашение № 24-21-00502). Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство этим конкретным исследованием получено не было.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

В работе отсутствуют исследования человека или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Литература.

1. Мохов И. И. Сезонные особенности изменений повторяемости опасных метеорологических явлений в российских регионах в последние десятилетия // *Метеорология и гидрология*. 2023. № 11. С. 50–64. doi: 10.52002/0130-2906-2023-11-50-64.
2. Павлова В. Н., Караченкова 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. doi: 10.52002/0130-2906-2023-9-29-42.
3. Семенова В. В., Бадмаева С. Э. Оптимизация водного режима чернозема обыкновенного лесостепной зоны Крас-

ноярского края // Вестник КрасГАУ. 2020. № 1 (154). С. 40–46. doi: 10.36718/1819-4036-2020-1-40-46.

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. Рождественский А. В. Оценка точности кривых распределения гидрологических характеристик. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 270 с.

6. Tatarintsev V. L., Lisovskaya Yu. S., Tatarintsev L. M. Agricultural land protection as a basis of sustainable land management in the dry steppes of Altai krai // Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture. 2022. Vol. 14. No. 2. P. 338–355. doi: 10.12731/2658-6649-2022-14-2-338-355.

7. Солодун В. И., Луговнина В. В. Агроэкологические аспекты формирования структуры использования пашни в Иркутской области // География и природные ресурсы. 2023. № 3. С. 111–116. doi: 10.15372/GIPR20230311.

8. Система поддержки принятия решений по рациональному использованию природно-ресурсного потенциала в агроландшафтах ЦЧР / О. Г. Чуян, А. Н. Золотухин, Л. Н. Караулова и др. // Достижение науки и техники АПК. 2022. Т. 36. № 9. С. 5–12. doi: 10.53859/02352451_2022_36_9_5.

9. Дружинин И. П. Долгосрочный прогноз и информация. Новосибирск: Наука, 1987. 254 с.

10. Ковалева Е. А., Иванько Я. М. Модуль «Планирование в условиях рисков» программного комплекса «Эколого-математическое моделирование аграрного производства» // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2022. № 3 (27). С. 135–147.

11. Kovaleva E. A., Ivanyo Ya. M. Management models of agrarian production taking into account natural and technogenic impacts on the environment // Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture. 2022. Vol. 14. No. 3. P. 24–39. doi: 10.12731/2658-6649-2022-14-3-24-39.

References

1. Mokhov II. [Seasonal features of changes in the frequency of dangerous meteorological phenomena in Russian regions in recent decades]. Meteorologiya i gidrologiya. 2023;(11):50-64. Russian. doi: 10.52002/0130-2906-2023-11-50-64.

2. Pavlova VN, Karachenkova AA. [Changes in agroclimatic resources of grain-producing regions of Russia and the productivity of grain crops in the new climatic period of 1991–2020]. Meteorologiya i gidrologiya. 2023;(9):29-42. Russian. doi: 10.52002/0130-2906-2023-9-29-42.

3. Semenova VV, Badmaeva SE. [Optimization of the water regime of ordinary chernozem in the forest-steppe zone of the Krasnoyarsk Territory]. Vestnik KrasGAU. 2020;(1):40-6. Russian. doi: 10.36718/1819-4036-2020-1-40-46.

4. Ivan'o YaM, Petrova SA. [About one algorithm for identifying anomalous levels of a time series for risk assessment]. Aktual'nye voprosy agrarnoi nauki. 2022;(42):48-57. Russian.

5. Rozhdestvenskii AV. Otsenka tochnosti krivyykh raspredeleniya gidrologicheskikh kharakteristik [Assessing the accuracy of distribution curves of hydrological characteristics]. Leningrad (USSR): Gidrometeoizdat; 1977. 270 p. Russian.

6. Tatarintsev VL, Lisovskaya YuS, Tatarintsev LM. Agricultural land protection as a basis of sustainable land management in the dry steppes of Altai krai. Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture. 2022;14(2):338-55. doi: 10.12731/2658-6649-2022-14-2-338-355.

7. Solodun VI, Lugovnina VV. [Agroecological aspects of the formation of the structure of arable land use in the Irkutsk region]. Geografiya i prirodnye resursy. 2023;(3):111-6. Russian. doi: 10.15372/GIPR20230311.

8. Chuyan OG, Zolotukhin AN, Karaulova LN, et al. [Decision support system for the rational use of natural resource potential in agricultural landscapes of the Central Chernozem Region]. Dostizhenie nauki i tekhniki APK. 2022;36(9):5-12. Russian. doi: 10.53859/02352451_2022_36_9_5.

9. Druzhinin IP. Dolgosrochnyi prognoz i informatsiya [Long-term forecast and information]. Novosibirsk (Russia): Nauka; 1987. 254 p. Russian.

10. Kovaleva EA, Ivan'o YaM. [Module "Planning under Risk Conditions" of the software package "Ecological and Mathematical Modelling of Agricultural Production"]. Informatsionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii. 2022;(3):135-47. Russian.

11. Kovaleva EA, Ivanyo YaM. Management models of agrarian production taking into account natural and technogenic impacts on the environment. Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture. 2022;14(3):24-39. doi: 10.12731/2658-6649-2022-14-3-24-39.

Поступила в редакцию 19.04.2024 После доработки 05.05.2024 Принята к публикации 05.19.2024

ВНИМАНИЮ СОИСКАТЕЛЕЙ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ И ДРУГИХ ЗАИНТЕРЕСОВАННЫХ ЛИЦ!

Редакция журнала «Достижения науки и техники АПК» издает монографии и другую книжную продукцию с редактированием и всеми выходными данными.

Цены договорные.

Заявки отправлять по адресу: 101000, г. Москва, Моспочтамт, а/я 166.

Тел.: (963) 758-48-44. E-mail: agroapk@mail.ru