
СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

УДК 004.94: 504.5:628.4:045
DOI: <https://doi.org/10.17308/sait.2020.2/2918>
Поступила в редакцию 30.12.2019
Подписана в печать 15.06.2020

ISSN 1995-5499

АЛГОРИТМ РЕАЛИЗАЦИИ ЭКОЛОГО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПРОДУКЦИИ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

© 2020 Я. М. Иванько, Е. А. Ковалева✉, С. А. Петрова

*Иркутский государственный аграрный университет имени А. А. Ежевского
п. Молодежный, Иркутский р-он, 664038 Иркутская обл., Российская Федерация*

Аннотация. В статье рассматривается описание групп эколого-математических моделей оптимизации аграрного производства с учетом ущербов от природных и техногенных процессов на окружающую среду в зависимости от вида мелиоративных работ, неопределенности параметров, происхождения внешних воздействий на почву и водную среду и содержанию критерия оптимальности. Построен алгоритм решения эколого-математических задач линейного программирования в условиях неопределенности. Выделены эколого-математические задачи для оптимизации аграрного производства с детерминированными, интервальными и случайными параметрами. Для их решения использованы пакеты прикладных программ с применением метода статистических испытаний. При этом получено множество оптимальных решений в условиях неопределенности. Моделирование интервальных параметров осуществлялось случайным образом в заданных интервалах изменения, а случайных величин с помощью законов распределения вероятностей. Результатом решения задачи с интервальными параметрами являются нижние, верхние и медианные оценки целевой функции и соответствующие им оптимальные планы. При реализации моделей со случайными параметрами определены зависимости значений критерия оптимальности от вероятностей параметров. При этом аналитическому значению этого критерия соответствует оптимальный план. Приведенный алгоритм реализован для аграрной организации, которая осуществляет деятельность на землях, часть из которых подвержена эрозии и загрязнению почв и водных ресурсов. Результаты, полученные с помощью эколого-математических моделей, учитывающие ущербы от негативного влияния природных и техногенных факторов в виде эрозии почвы и загрязнения земельных ресурсов, показывают возможности управления производством сельскохозяйственной продукции при минимизации ущерба окружающей среде.

Ключевые слова: оптимизация, аграрное производство, ущерб окружающей среде, богарное земледелие, орошение.

ВВЕДЕНИЕ

Многие факторы снижают плодородие почв и объемы производства продовольственной продукции. В частности, большое

влияние на плодородие почв оказывают природные, техногенные воздействия и их сочетание.

Эрозия почвы, загрязнение земель и воды снижает урожайность и качество сельскохозяйственных культур, что в свою очередь влияет на кормовую базу для животных и приводит к ухудшению результатов деятельности товаропроизводителей.

✉ Ковалева Евгения Александровна
e-mail: zhenia-93com@ya.ru



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

В этих условиях актуальным является использование эколого-математических моделей производства сельскохозяйственной продукции с целевой функцией в виде минимизации ущерба окружающей среде или максимизации прибыли с учетом ущербов, нанесенных природе.

Целью работы является построение алгоритма реализации разработанных эколого-математических моделей оптимизации производства сельскохозяйственной продукции в условиях неопределенности.

Для достижения цели решались следующие задачи:

1) описание предложенных эколого-математических моделей оптимизации получения аграрной продукции с учетом ущербов от природных и техногенных процессов на окружающую среду;

2) построение алгоритма решения эколого-математических задач линейного программирования в условиях неопределенности;

3) реализация эколого-математических моделей на реальном объекте.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ (ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ)

Теоретическую и методологическую основу исследования составляют труды российских и зарубежных ученых по эколого-математическому моделированию и методам математического программирования. Методы стохастического программирования описаны в [11]. Теоретическую основу решения задач математического программирования составляют работы [5, 6, 13]. Результаты математического моделирования в условиях орошения показаны в трудах [4, 7]. Отдельно выделим модели, связанные с эрозией почвы [8, 9]. Некоторые авторы [12, 14] предлагают применение экспертных оценок в моделях оптимизации производства сельскохозяйственной продукции. Влияние природных факторов в моделях оптимизации сельскохозяйственной и лесной отрасли изучено в работах [1, 15].

При построении эколого-математических моделей для оптимизации производства сель-

скохозяйственной продукции использованы следующие группы параметров: производственно-экономические, природно-климатические и показатели загрязнения и деградации сельскохозяйственных угодий. К производственно-экономическим параметрам относятся: площади сельскохозяйственных угодий, урожайность сельскохозяйственных культур, поголовье и продуктивность животных, затраты на производство по статьям расходов, прибыль с единицы площади и головы, объемы воды для нужд сельского хозяйства и другие. Природно-климатические параметры включают в себя: количество осадков, скорость ветра, характеристики рельефа, качество почвы и другие. Параметры загрязнения и деградации почв характеризуют: фоновое и фактическое содержание вредных веществ в почве и воде, предельно-допустимые концентрации загрязнителей, площади эродированных земель в результате водной и ветровой эрозии и др.

Для оценки свойств изменчивости параметров, входящих в эколого-математические модели оптимизации производства аграрной продукции, применены методы теории вероятностей и математической статистики, в частности, способы построения законов распределения вероятностей, корреляционно-регрессионный анализ, автокорреляционный и авторегрессионный анализ, метод статистических испытаний. Решение прикладных экстремальных задач основано на методах математического программирования в условиях неопределенности.

В качестве информации использованы многолетние данные бухгалтерской отчетности сельскохозяйственных организаций, регионального управления по гидрометеорологии, материалы государственных докладов «О состоянии и об охране окружающей среды Иркутской области», карты состояния почвенного покрова сельскохозяйственных угодий региона, сведения территориального органа Федеральной службы государственной статистики.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРЕДШЕСТВУЮЩИХ РАБОТ

Авторами в работах [2–3] приведены эколого-математические модели оптимизации аграрного производства с детерминированными и неопределенными параметрами, учитывающие техногенное и природное воздействие на земельные ресурсы, в частности, эрозийные процессы и загрязнения почвы тяжелыми металлами.

Линейная детерминированная эколого-математическая модель для производства сельскохозяйственной продукции на богарных и орошаемых землях выглядит следующим образом. В качестве критерия оптимальности модели аграрного производства для сочетания отраслей при использовании богарных и орошаемых земель принята максимальная прибыль:

$$f = \sum_{i \in I} (1 - l_i) c_i p_i x_i + \sum_{i \in I} (1 - l'_i) c'_i p'_i x'_i + \sum_{k \in K} (1 - \alpha_k) c_k r_k y_k \rightarrow \max, \quad (1)$$

где c_i, c'_i — прибыль, получаемая от продажи 1 ц товарной продукции культуры вида i при богарном и орошаемом земледелии; c_k — прибыль, получаемая от продажи 1 ц товарной продукции животных вида k ; x_i, x'_i — площадь богарных и орошаемых земель; p_i, p'_i — урожайность при богарном и орошаемом земледелии; r_k — продуктивность животных k ; l_i, l'_i — коэффициенты негативного воздействия техногенных и природных процессов на почву на богарных и орошаемых землях при возделывании культуры i ; α_k — коэффициент негативного воздействия на окружающую среду при выращивании животных k ; y_k — количество животных.

Ограничения по минимальному объему производства товарной растениеводческой продукции на предприятии выглядят так

$$\sum_{i \in I} (1 - l_i) p_i x_i + \sum_{i \in I} (1 - l'_i) p'_i x'_i \geq S_i, \quad (2)$$

где S_i — минимальный объем производства растениеводческой продукции.

Ограничения по минимальному объему производства животноводческой продукции имеют вид

$$\sum_{k \in K} (1 - \alpha_k) r_k y_k \geq S_k, \quad (3)$$

где S_k — минимальный объем производства животноводческой продукции.

Ограничения по увязке производства растениеводческой продукции и потребности в ней животноводства записываются так

$$S_i \geq \sum_{k \in K} h_{ik} y_k \quad (i \in I), \quad (4)$$

где h_{ik} — потребность животных вида k в корме с использованием культуры i .

Ограничения по наличию трудовых ресурсов имеют вид

$$\sum_{i \in I} b_i x_i + \sum_{i \in I} b'_i x'_i + \sum_{k \in K} b_k y_k \leq B, \quad (5)$$

где b_i, b'_i — затраты трудовых ресурсов на обработку 1 га богарных и орошаемых земель, соответственно; b_k — затраты трудовых ресурсов для ухода за животными; B — имеющиеся трудовые ресурсы.

Условия по предельно допустимой концентрации некоторых вредных веществ в почве выглядят так

$$\sum_{i \in I} \varphi_{ij} x_i + \sum_{i \in I} \varphi'_{ij} x'_i + \sum_{i \in I} v_{ij} x_i + \sum_{i \in I} v'_{ij} x'_i \leq \omega_j \quad (j \in J), \quad (6)$$

где $\varphi_{ij}, \varphi'_{ij}$ — исходная концентрация вредного вещества j на богарных и орошаемых землях, соответственно; v_{ij}, v'_{ij} — концентрация вредного вещества j , попавшего на богарные и орошаемые земли; ω_j — величина предельно допустимой концентрации вредного вещества j в почве. Показатели $\varphi_{ij}, \varphi'_{ij}, v_{ij}$ и v'_{ij} являются приведенными к единице площади сельскохозяйственных угодий.

Ограничения на водозабор в реке имеют вид

$$\sum_{i \in I} q_i x'_i \leq T' \xi, \quad (7)$$

где q_i — оросительная норма культуры i ; T' — вегетационный период; ξ — расход воды реки.

Условие по предельно допустимой концентрации некоторых вредных веществ в реке записываются в виде

$$\psi_j T' \xi + \mu_j \sum_{i \in I} ((q_i + \lambda) x'_i + \lambda x_i) \leq W_j \quad (j \in J), \quad (8)$$

где ψ_j — исходная концентрация вредного вещества j в реке; μ_j — концентрация вредного вещества j в единице объема возвратных вод хозяйства; λ — осадки, выпадающие за вегетационный период; W_j — заданные величины предельно допустимой концентрации вредного вещества j в реке.

Ограничение на почвенные потери от водной и ветровой эрозии имеет вид

$$\sum_{i \in I} R U_i D_i V_i C_i P_i x_i + \sum_{i \in I} R U_i D_i V_i C_i P_i x'_i + \sum_{i \in I} M_i T \leq \eta, \quad (9)$$

где η_i — максимальные годовые почвенные потери (т/га); R — эродирующая способность дождей; U_i — фактор податливости почв эрозии (т/га); D_i — фактор длины склона; V_i — фактор крутизны склона; C_i — фактор растительности и севооборота; P_i — фактор эффективности противоэрозионных мероприятий; M_i — интенсивность выноса почвы, т/га в 1 час, T — время, в течение которого почва разрушается, ч.

Интенсивность выноса почвы от ветровой эрозии зависит от скорости ветра и типов почв $M_i = f(v_g)$. На скорость ветра влияют формы рельефа, а также степень защищенности территории лесными полосами. Расчетная скорость ветра v_g (м/с) для определения выноса почвы с участков, имеющих выраженный рельеф местности и защищенных лесными полосами, вычисляется по формуле

$$v_g = v_{\phi} K_{pm} K_{ln}, \quad (10)$$

где v_{ϕ} — скорость ветра пыльных бурь, регистрируемая метеостанциями и приведенная к скорости ветра в аэродинамической трубе; K_{pm} — коэффициент изменения скорости ветра с учетом рельефа местности; K_{ln} — коэффициент защищенности территории.

Учитывая экологические факторы, неопределенность параметров и неоднородность сельскохозяйственных земель в работе [2] приведено описание групп эколого-математических моделей производства аграрной продукции на богарных и орошаемых землях, учитывающих ущербы окружающей среде от потерь почвы от водной и ветровой эрозии и загрязнения земельных ресурсов.

В зависимости от использования орошения предложены три группы эколого-математических моделей оптимизации отраслей аграрного производства и их сочетания для: неорошаемого, орошаемого и смешанного земледелия.

По отраслевому признаку эколого-математические модели оптимизации производства продовольственной продукции подразделяются на производство растениеводческой, животноводческой продукции и их сочетания.

Критерием оптимальности в этих задачах может быть максимум прибыли, минимум затрат и минимум ущерба окружающей среде. Из перечисленных целевых функций предлагается использовать максимум прибыли сельскохозяйственной продукции на богарных и орошаемых землях с учетом ущербов окружающей среде.

По степени неопределенности эколого-математические модели подразделяют на модели с детерминированными параметрами, интервальными и случайными оценками. Кроме того, можно рассматривать задачи с сочетанием интервальных и случайных оценок.

В зависимости от признаков техногенного и природного воздействия, вида отрасли, неопределенности параметров и содержания критерия оптимальности формулируется задача оптимизации сельскохозяйственного производства, соответствующая реальной ситуации.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На основе предложенных эколого-математических моделей, которые учитывают ущерб окружающей среде от эрозии и загрязнения почвы, разработан следующий алгоритм решения задач по оптимизации производства продовольственной продукции на богарных и орошаемых землях с учетом техногенных загрязнений (рис. 1).

На первом этапе вводятся данные производственно-экономических, природно-климатических параметров и показатели загрязнения и деградации почв.

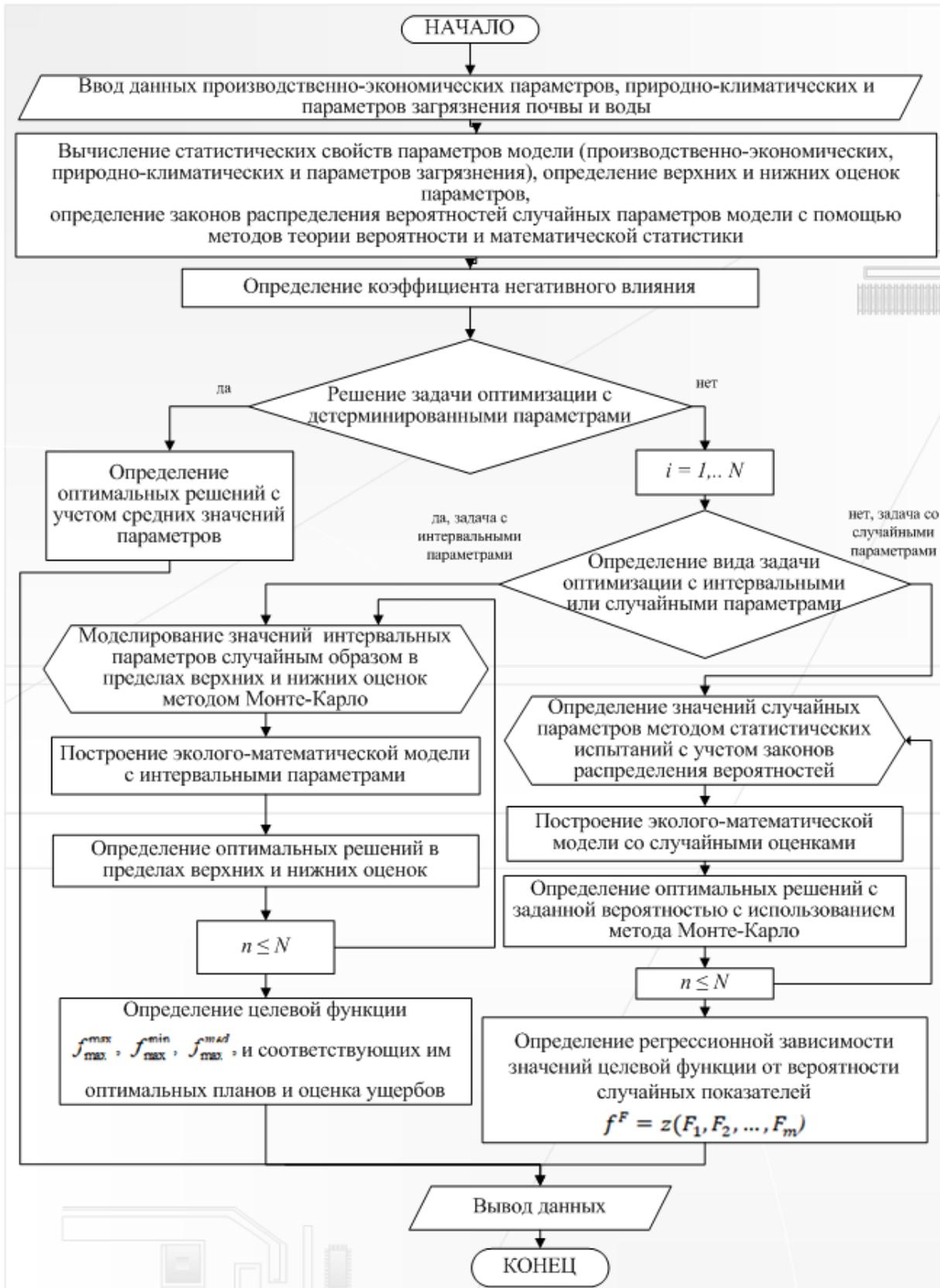


Рис. 1. Алгоритм решения эколого-математических задач оптимизации производства сельскохозяйственной продукции

[Fig. 1. Algorithm for solving ecological and mathematical models of optimization of agricultural production]

На втором этапе осуществляется статистический анализ исследуемых параметров, которые могут быть детерминированными, интервальными или случайными. Для интервальных параметров определяются верхние и нижние оценки, а для случайных параметров подбираются законы распределения вероятностей с помощью методов оценки статистических параметров и критериев соответствия эмпирических значений выборки аналитической функции. Что касается детерминированных коэффициентов при неизвестных целевой функции и левых частей ограничений, а также правых частей, то их значения могут быть получены на основе усреднения и использования регрессионных и циклических выражений.

На третьем шаге определяем коэффициент негативного влияния. Для этого определяются эродированные земли, загрязнённые почвы и оцениваются площади с пониженными возможностями производства аграрной продукции относительно площади сельскохозяйственных угодий.

На четвертом шаге определяется вид модели: детерминированная или неопределённая. При построении детерминированной задачи оптимизации вычисляется оптимальное решение с учетом средних значений параметров. При решении задачи с неопределёнными параметрами сначала задаем N — количество итераций. Если модель представляет собой задачу с интервальными параметрами, то осуществляется моделирование интервальных оценок для построения n задач. В результате их решения вычисляется n оптимальных планов, соответствующих целевой функции. При этом из всех оптимальных решений можно выделить наибольшее, медианное и наименьшее значение целевой функции и соответствующие им оптимальные планы. Не исключены другие варианты выделения оптимальных решений, например, характеризующие лучшие и худшие варианты решения, которые на определенную величину ниже (выше) верхних (нижних) оценок значений целевой функции.

На пятом этапе определяем регрессионную зависимость значений целевой функции

от вероятности параметров случайных величин. При допущении, что вероятностных событий не более двух, и они являются равновероятными, результатом решения задач является распределение вероятности значений целевой функции, каждому значению, которого соответствует оптимальный план. Кроме того, решение может быть основано на гипотезе соответствия целевой функции математическому ожиданию.

Приведенный алгоритм реализован при решении задачи оптимизации производства сельскохозяйственной продукции на богарных и орошаемых землях с учетом ущербов, наносимых окружающей среде от водной и ветровой эрозии почв и загрязнения земельных ресурсов, на примере СХЗАО «Приморский» Нукутского района.

Предприятие в основном специализируется на производстве растениеводческой продукции. Кроме того, с 1978 г. на предприятии работает система орошения с орошаемой площадью, составляющей в настоящее время 320 га.

В качестве неизвестных в эколого-математической задаче оптимизации производства аграрной продукции при богарном земледелии на предприятии СХЗАО «Приморский» использованы площади девяти сельскохозяйственных культур. К ним относятся: зерновые (x_1), рапс (x_2), однолетние травы на сено (x_3) и зеленый корм (x_4), многолетние травы на сено (x_5), зеленый корм (x_6) и семена (x_7), силосные культуры (x_8) и кормовая кукуруза (x_9). При оптимизации модели для богарного и орошаемого земледелия добавляется параметр урожайности кукурузы, подверженной орошению (x_{15}). Кроме того, в моделях использовано пять переменных отрасли животноводства: поголовье коров основного стада (x_{10}), поголовье коров на откорме (x_{11}), количество лошадей основного стада (x_{12}), и количество лошадей на откорме (x_{13}) и количество пчелосемей (x_{14}).

Рассмотрены три вида моделей. В первой модели значения коэффициентов при неизвестных в целевой функции, левых частях ограничений и правой части приняты в качестве усредненных величин (детерминирован-

ная модель). Во второй модели часть параметров, подверженных существенным колебаниям, описывалась с помощью интервальных оценок, а другая часть представляла собой усредненные значения. В третьей модели некоторые коэффициенты при неизвестных в целевой функции и ограничениях представляли собой случайные величины.

В качестве критерия оптимальности использован максимум прибыли с учетом ущербов окружающей среде. Особую актуальность решение такой задачи имеет в условиях техногенного и природного негативного воздействия на земельные и водные ресурсы.

Для этого хозяйства оценивались коэффициенты негативного влияния, характеризующие отношение загрязненных и эродированных земель к площади сельскохозяйственных угодий. По результатам исследований они колеблются для разных сельскохозяйственных культур от 0,2 до 0,4.

Модель с детерминированными параметрами. При реализации эколого-математической модели с детерминированными параметрами (усредненные коэффициенты при неизвестных в целевой функции и ограничениях, а также правые части условий) на основе приведенного алгоритма для сочетания орошаемого и богарного земледелия получена прибыль на 4 % больше, чем для неорошаемого земледелия. При этом ущербы окружающей среде в первом случае выше на 20 %.

Модель с интервальными параметрами. В качестве интервальных параметров использованы показатели годовых почвенных потерь и урожайности всех сельскохозяйственных культур кроме многолетних трав на семена. Остальные переменные приняты как усредненные.

Моделирование производства аграрной продукции с интервальными параметрами согласно алгоритму позволило получить следующие результаты для богарного земледелия:

– оптимальный план при медианном значении целевой функции: $x_1 = 14\,610$ га, $x_2 = 500$ га, $x_3 = 1\,354$ га, $x_4 = 5\,055$ га, $x_5 = 50$ га, $x_6 = 100$ га, $x_7 = 500$ га, $x_8 = 210$ га, $x_9 = 724$ га, $x_{10} = 1\,654$ голов, $x_{11} = 1\,000$ голов, $x_{12} = 96$ голов, $x_{13} = 91$ голов, $x_{14} = 580$ семей.

– оптимальный план при минимальном значении целевой функции: $x_1 = 8\,807$ га, $x_2 = 500$ га, $x_3 = 4\,478$ га, $x_4 = 7\,835$ га, $x_5 = 50$ га, $x_6 = 100$ га, $x_7 = 500$ га, $x_8 = 5\,015$ га, $x_9 = 1\,231$ га, $x_{10} = 4\,898$ голов, $x_{11} = 1\,000$ голов, $x_{12} = 96$ голов, $x_{13} = 91$ голов, $x_{14} = 580$ семей.

– оптимальный план при максимальном значении целевой функции: $x_1 = 11\,480$ га, $x_2 = 500$ га, $x_3 = 2\,042$ га, $x_4 = 10\,360$ га, $x_5 = 50$ га, $x_6 = 100$ га, $x_7 = 500$ га, $x_8 = 698$ га, $x_9 = 998$ га, $x_{10} = 4\,898$ голов, $x_{11} = 1\,000$ голов, $x_{12} = 96$ голов, $x_{13} = 91$ голов, $x_{14} = 580$ семей.

При решении эколого-математической задачи для сочетания двух видов земледелия получены близкие результаты к задаче богарного земледелия. Площадь кукурузы, подверженной орошению, остается неизменной и составляет 320 га.

Моделирование производства показало, что на землях с сочетанием орошаемого и богарного земледелия прибыль в эколого-математических задачах выше на 2,6–10,3 %, а ущербы увеличились на 3,4–22,2 % по сравнению с богарным земледелием.

При этом нижняя оценка прибыли для сочетания двух видов земледелия в задачах с параметрами различной степени неопределенности всегда выше минимальных значений целевой функции при решении задачи для богарного земледелия.

Модели со случайными параметрами. В отличие от моделей с интервальными параметрами, модели с вероятностными величинами предполагают, что некоторые коэффициенты при неизвестных целевой функции и ограничений можно описать вероятностными распределениями. В табл. 1 приведены вероятностные законы, описывающие многолетние ряды урожайности зерновых, однолетних и многолетних трав на зеленый корм, которые представляют собой случайные оценки.

При решении задачи оптимизации структуры производства сельскохозяйственной продукции со случайными оценками на основании статистических свойств параметров рядов и критерия согласия Колмогорова в качестве законов распределения вероятностей выбраны функция Гаусса для урожайности зерновых ($C_s \approx 0$) и гамма-распределение ($C_s \approx 2C_v$) —

Таблица 1. Законы распределения вероятностей случайных параметров в эколого-математической модели производства аграрной продукции на примере СХЗАО «Приморский», определенные на основе свойств статистических параметров и критерия Колмогорова

[Table 1. Laws of probability distribution of random parameters in the ecological and mathematical model of agricultural production on the example of «Primorskiy», determined on the basis of statistical properties of parameters and Kolmogorov's criterion]

Параметры	Закон распределения вероятностей	Статистические параметры распределения
Урожайность зерновых	<p>Нормальный</p> $p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}\right],$ <p>где \bar{x} — среднее значение ряда, а σ — среднее квадратическое отклонение.</p>	<p>$\bar{x} = 16,8; C_v = 0,20;$ $C_s = -0,21,$ где C_v — коэффициент вариации ряда, а C_s — коэффициент асимметрии.</p>
Урожайность однолетних трав на зеленый корм - многолетних трав на зеленый корм	<p>Гамма-распределение</p> $p(x) = \frac{\left(\frac{x}{b}\right)^{c-1} e^{-\frac{x}{b}}}{b\Gamma(c)},$ <p>где b и c — параметры распределения, связанные с C_v и C_s, а $\Gamma(c)$ — гамма-функция.</p>	<p>$\bar{x} = 50,9; C_v = 0,56;$ $C_s = 1,01$ $\bar{x} = 76,8; C_v = 0,35;$ $C_s = 0,63$</p>

для биопродуктивности однолетних и многолетних трав на зеленый корм.

Для урожайности сельскохозяйственных культур случайным образом моделируются вероятности, согласно которым по выбранным законам распределения вероятностей определяются значения биопродуктивности. Формируется задача линейного программирования и вычисляется оптимальное решение. Перечисленные операции повторяются многократно с заданным количеством. Как правило, при решении подобного типа задач используется не менее 300 итераций. Каждое оптимальное решение соответствует расчетным вероятностям урожайности сельскохозяйственных культур. Поскольку между многолетними рядами биопродуктивности разных культур не обнаружено значимых корреляционных связей, каждое оптимальное решение связано с множеством вероятностей. По результатам решения задачи строится зависимость значений целевой функции от вероятностей, соответствующих оптимальным решениям. Это позволяет определять анали-

тически значение целевой функции в зависимости от заданных вероятностей и выявлять среди вычисленных планов необходимый план для управления. При допущении равновероятных случайных величин задача упрощается благодаря уменьшению вероятностей. В простейшем случае оптимальные решения связаны с одной вероятностью.

Приведем реализацию эколого-математической модели со случайными коэффициентами при неизвестных левых частях ограничений. Определены регрессионные зависимости значений целевой функции от вероятности случайных величин для богарного земледелия и сочетания орошаемого и богарного земледелия, которые приведены в табл. 2. В этих формулах использованы следующие обозначения: F_1, F_2 и F_3 — вероятности урожайности зерновых культур, однолетних и многолетних трав на зеленый корм.

Данные регрессионные уравнения являются значимыми и позволяют оценивать целевую функцию с моделируемыми вероятностями. При этом значениям критерия оп-

Таблица 2. Результаты значений целевой функции при имитационном моделировании для СХЗАО «Приморский», тыс. руб
 [Table 2. The results of the values of the objective function of simulation for the agricultural enterprise "Primorskiy" (thousand rubles)]

Модель	Богарное земледелие		Сочетание орошаемого и богарного земледелия	
	(f)	в т. ч. ущербы	(f)	в т. ч. ущербы
Модель оптимизации производства с детерминированными параметрами	21 281,4	2 905,5	22 127,0	3 509,1
Модель оптимизации производства с интервальными параметрами, минимальное значение	18 331,6	2 015,9	20 216,5	2 463,8
Модель оптимизации производства с интервальными параметрами, медианное значение	23 254,7	3 340,6	24 537,2	3 543,8
Модель оптимизации производства с интервальными параметрами, максимальное значение	27 860,1	5 317,4	29 156,3	5 520,1
Модель оптимизации производства с вероятностными параметрами	$f = 7324500 + 7257241F_1 + +2871120F_2 - 312306F_3$		$f = 17324500 + 7257240F_1 + +2871120F_2 - 312306F_3$	

тимальности соответствуют значениям оптимальных планов.

Если целевая функция соответствует математическому ожиданию, то ее значение для богарного земледелия равно 21 957,3 тыс. руб., в том числе ущербы окружающей среде составят 3 464,4 тыс. руб. Для сочетания двух видов земледелий эти значения составляют 22 784,0 и 3 649,3 тыс. руб. соответственно. При этом оптимальный план для богарного земледелия выглядит так: $x_1 = 10\,560$ га, $x_2 = 500$ га, $x_3 = 2\,376$ га, $x_4 = 12\,098$ га, $x_5 = 50$ га, $x_6 = 100$ га, $x_7 = 500$ га, $x_8 = 0$ га, $x_9 = 1\,078$ га, $x_{10} = 3\,322$ голов, $x_{11} = 2\,157$ голов, $x_{12} = 96$ голов, $x_{13} = 91$ голова, $x_{14} = 580$ семей; для сочетания орошаемого и богарного земледелия оптимальный план следующий: $x_1 = 10\,937$ га, $x_2 = 500$ га, $x_3 = 2\,162$ га, $x_4 = 10\,533$ га, $x_5 = 50$ га, $x_6 = 100$ га, $x_7 = 500$ га, $x_8 = 657$ га, $x_9 = 10\,171$ га, $x_{10} = 4\,898$ голов, $x_{11} = 1\,000$ голов, $x_{12} = 96$ голов, $x_{13} = 91$ голов, $x_{14} = 580$ семей, $x_{15} = 320$ га.

В случае, когда $F_1 = F_2 = F_3 = 0,05$ значение целевой функции при оптимизации производства без орошения равно 18 414,2 тыс.

руб., в том числе ущербы окружающей среде составят 1 856,9 тыс. руб., для сочетания орошаемого и богарного земледелия эти показатели равны 19 557,5 тыс. руб. и 2 160,9 тыс. руб. соответственно. При решении этих задач в оптимальном плане упор делается на выращивание однолетних трав на сено и крупнорогатого скота на откорме, а поголовье основного стада крупнорогатого скота, площади зерновых и силосных культур минимальны.

При $F_1 = F_2 = F_3 = 0,95$ получен оптимальный план, где наибольшую часть занимают площади зерновых и силосных культур, а также максимальное поголовье основного стада крупнорогатого скота. Целевая функция и ущербы для богарного земледелия составили 27 269,1 тыс. руб. и 4 605,9 тыс. руб., для орошаемого и богарного земледелия они равны 27 971,8 тыс. руб. и 4 761,7 тыс. руб. соответственно.

Предложенные модели позволяют лицу, принимающее решение использовать результаты для повышения эффективности управления сельскохозяйственным производством с учетом загрязнения почв и водных объектов и эрозии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье описана эколого-математическая модель для оптимизации производства сельскохозяйственной продукции на богарных и орошаемых землях с учетом деградации почв и загрязнения водотоков. Приведены возможные варианты модели с учетом неопределенности параметра, техногенных и природных воздействий на окружающую среду, отрасли аграрного производства и содержания критерия оптимальности.

Предложен алгоритм решения эколого-математических задач оптимизации получения аграрной продукции для богарного земледелия и сочетания орошаемого и богарного земледелия. При этом выделены задачи с детерминированными, интервальными и случайными параметрами.

Эколого-математические модели оптимизации производства сельскохозяйственной продукции реализованы для предприятия Нукутского района СХЗАО «Приморский». Согласно полученным результатам сельскохозяйственное производство на богарных и орошаемых землях позволяет увеличивать прибыль организации и минимизировать ущербы окружающей среде, что способствует устойчивому развитию деятельности хозяйства.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Болтвина, Е. К. Модели оптимизации заготовки дикорастущей продукции с интервальными параметрами / Е. К. Болтвина, Я. М. Иванько // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2016. – № 6 (113). – С. 73–81.
2. Бендик, Н. В. Эколого-математические модели оптимизации производства сельскохозяйственной продукции / Я. М. Иванько, Е. А. Ковалева // Вестник Иркутского Государственного Технического Университета. – 2016. – № 4. – С. 66–74.
3. Иванько, Я. М. Математическое, алгоритмическое и информационное обеспечение программного комплекса эколого-математического моделирования производства сельскохозяйственной продукции / Я. М. Иванько, Е. А. Ковалева // Climate, ecology, agriculture of Eurasia : Materials of the international scientific-practical conference (Ulaanbaatar, May 30-31, 2017) : электронный ресурс. – Ulaanbaatar. 2017. – С. 82–89.
4. Кузнецов, М. Я. Разработка и использование математических моделей для исследования водного обмена на мелиорируемых землях: автореф. дис....канд. техн. наук / М. Я. Кузнецов; МНГУ.- Мн. – 1999. – 21 с.
5. Медведев, С. Н. О решении интервальной задачи линейной целочисленной оптимизации / С. Н. Медведев, О. А. Медведева // Вестник Воронеж. гос. ун-та. Сер. Системный анализ и информационные технологии. – 2016. – № 4. – С. 37–42.
6. Новиков, А. И. Планирование, моделирование и оптимизация процессов диагностики состояния почв и растений на основе автоматизированных систем: автореф. дис. доктора физ.-мат. наук. – Санкт-Петербург : АФИ. – 1994. – 36 с.
7. Полевой, А. Н. Моделирование формирования урожая сельскохозяйственных культур в условиях орошения черноземов Придунайской провинции / А. Н. Полевой, Т. Н. Хохленко // Почвоведение. – 1995. – № 12. – С. 1518–1524.
8. Малкина-Пых, И. Г. Моделирование эрозионных потерь гумуса на основе метода функций отклика // Почвоведение. – 1996. – № 10. – С. 1271–1276.
9. Сухановский, Ю. П. Модель дождевой эрозии почв / Ю. П. Сухановский // Почвоведение. – 2010. – № 9. – С. 1114–1125.
10. Хастингс, Н. Справочник по статистическим распределениям / Н. Хастингс, Дж. Пикок. – М. : Статистика. – 1980. – 95 с.
11. Юдин, Д. Б. Задачи и методы стохастического программирования / Д. Б. Юдин. – Москва : Советское радио. – 1979. – 392 с.

12. *Asalkhanov, P.* Management of the Agro-Industrial Enterprise: Optimization Uncertainty Expert Assessments / Ya. Ivanyo, P. Asalkhanov, N. Bendik // International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon. – 2019. – 7 p. doi: 10.1109/FarEastCon.2019.8934788
13. *Danzig, G. B.* Decomposition principle of linear programs / G. B. Danzig, P. Wolfe // Operations Research. – 1960. – N 8. – P. 101–111.
14. *Ivanyo, Ya.* Optimization models of the procurement of food wild-growing products with expert assessments. Irkutsk / Ya. Ivanyo, S. Petrova // Proceedings of the Vth International workshop «Critical infrastructures: Contingency management, Intelligent, Agent-based, Cloud computing and Cyber security» (IWCI 2019). Advances in Intelligent Systems Research. – 2019. – 6 p. doi:10.2991/iwci-19.2019.
15. *Ivanyo, Ya.* Modeling of the Production of Agrarian Products under the Conditions of Influence of Droughts, Rainfall and their Combinations / Ya. Ivanyo, S. Petrova, M. Polkovskaya, N. Fedurina // Proceedings of the Vth International workshop «Critical infrastructures: Contingency management, Intelligent, Agent-based, Cloud computing and Cyber security» (IWCI 2018). Advances in Intelligent Systems Research. – 2018. – V. 158. – P. 78–84. doi:10.2991/iwci-18.2018.

Иваньо Ярослав Михайлович – д-р техн. наук, профессор кафедры информатики и математического моделирования института экономики, управления и прикладной информатики. Иркутский государственный аграрный университет имени А. А. Ежевского.

E-mail: iymex@rambler.ru

ORCID iD: <http://orcid.org/0000-0003-4118-7185>

Ковалева Евгения Александровна – аспирантка кафедры информатики и математического моделирования института экономики, управления и прикладной информатики. Иркутский государственный аграрный университет имени А. А. Ежевского.

E-mail: zhenia-93com@ya.ru

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-3030-3558>

Петрова Софья Андреевна – канд. техн. наук, доцент кафедры информатики и математического моделирования института экономики, управления и прикладной информатики. Иркутский государственный аграрный университет имени А. А. Ежевского.

E-mail: sofia.registration@mail.ru

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-9586-583X>

ALGORITHM OF REALIZATION OF ECOLOGICAL-MATHEMATICAL PROBLEMS OF OPTIMIZATION OF AGRICULTURAL PRODUCTION IN CONDITIONS OF UNCERTAINTY

© 2020 Ya. M. Ivanyo, E. A. Kovaleva✉, S. A. Petrova

*Irkutsk State Agrarian University named after A. A. Ezhevsky
Molodezhny Settlement, Irkutsk District, 664038 Irkutsk region, Russian Federation*

Annotation. The article describes groups of mathematical models for the optimisation of agricultural production which take into account the natural and anthropogenic damage to the environment, depending on the type of reclamation work, the uncertainty of the parameters, the origin of the external influence on the soil and water, and the content of the optimality criterion. An algorithm for solving the mathematical ecology problems of linear programming in a situation of uncertainty is suggested. The article determines mathematical ecology problems for the optimisation of agricultural production with deterministic, interval, and random parameters. To solve these problems we used application software packages together with the Monte-Carlo method. As a result, we obtained a set of optimal solutions for uncertain situations. The parameters were randomly modelled in the given variation intervals. Random variables were modelled based on the probability distribution law. By solving the problem with interval parameters we obtained the lower, upper, and median estimates of the objective function and the corresponding optimum plans. When implementing the models with random parameters, the dependences of the values of the optimality criterion on the probabilities of the parameters were determined. The analytical value of this criterion corresponds to the optimum plan. The suggested algorithm was implemented by an agricultural enterprise which operates on lands, some of which are subject to erosion and soil and water pollution. The results obtained when using the described mathematical models, which take into account the damage caused by the negative impact of natural and anthropogenic factors, namely soil erosion and land pollution, demonstrated that these models can be used to manage the agricultural production while minimizing the environmental damage.
Keywords: optimisation, agricultural production, environmental damage, rainfed agriculture, irrigation.

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

REFERENCES

1. Boltvina E. K., Ivanyo Ya. M. Optimization models for harvesting wild products with interval parameters // *Vestnik of Irkutsk State Technical University*. 2016. N 6 (113). P. 73–81.

2. Bendik N. V., Ivanyo Ya. M., Kovaleva E. A. The ecology-mathematical models of optimization of the production of agrarian products // *Vestnik of Irkutsk State Technical University*. 2016. N 4. P. 66–74.

3. Ivanyo Ya. M., Kovaleva E. A. Mathematical, algorithmic and informative providing of programmatic complex of ecological and mathematical design of production of agricultural goods // *Climate, ecology, agriculture of Eurasia: Materials of the international scientific-practical conference (Ulaanbaatar, May 30–31, 2017): electronic resource*. Ulaanbaatar. 2017. P. 82–89.

4. Kuznetsov, M. Ya. Development and use of mathematical models for the study of water exchange on reclaimed lands: author. dis. cand. tech. Sciences. Minsk, 1999. 21 p.

✉ Kovaleva Evgeniya A.
e-mail: zhenia-93com@ya.ru

5. *Medvedev, S. N.* About solving the interval problem of linear integer optimization // Vestnik of Voronezh State University. 2016. N 4. P. 37–42.
6. *Novikov, A. I.* Planning, modeling and optimization of processes for diagnosing the state of soils and plants based on automated systems: abstract. dis. Doctors Phys.-Math. sciences. St. Petersburg. 1994.
7. *Polevoy A. N., Khokhlenko T. N.* Modeling crop formation under irrigation of chernozems of the Prydnay's province // Soil Science. 1995. N 12. P. 1518–1524.
8. *Malkina-Pykh, I. G.* Modeling of erosion losses of humus based on the method of response functions // Soil science. 1996. N 10. P. 1271–1276.
9. *Sukhanovsky Yu. P.* Model of soil rain erosion // Soil Science. 2010. N 9. P. 1114–1125.
10. *Hastings N., Peacock J.* Handbook of statistical distributions. Moscow : Statistics, 1980. 95 p.
11. *Yudin, D. B.* Tasks and methods of stochastic programming. Moscow : Soviet Radio, 1979. 392 p.
12. *Ivanyo Ya., Asalkhanov P., Bendik N.* Management of the Agro-Industrial Enterprise: Optimization Uncertainty Expert Assessments // International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon. 2019. 7 p. doi: 10.1109/FarEastCon.2019.8934788.
13. *Danzig G. B., Wolfe P.* Decomposition principle of linear programs // Operations Research. 1960. N 8. P. 101–111.
14. *Ivanyo Ya., Petrova S.* Optimization models of the procurement of food wild-growing products with expert assessments. Irkutsk // Proceedings of the Vth International workshop «Critical infrastructures: Contingency management, Intelligent, Agent-based, Cloud computing and Cyber security» (IWCI 2019). Advances in Intelligent Systems Research. 2019. 6 p. doi:10.2991/iwci-19.2019.
15. *Ivanyo Ya., Petrova S., Polkovskaya M., Fedurina N.* Modeling of the Production of Agrarian Products under the Conditions of Influence of Droughts, Rainfall and their Combinations // Proceedings of the Vth International workshop «Critical infrastructures: Contingency management, Intelligent, Agent-based, Cloud computing and Cyber security» (IWCI 2018). Advances in Intelligent Systems Research. 2018. Vol. 158. P. 78–84. doi:10.2991/iwci-18.2018.

Ivanyo Yaroslav M. – Doctor of technical sciences, Professor of the Department of informatics and mathematical modeling. Irkutsk State Agricultural University named after A. A. Ezhevsky.

E-mail: iymex@rambler.ru

ORCID iD: <http://orcid.org/0000-0003-4118-7185>

Kovaleva Evgeniya A. – Post-graduate student of the Department of informatics and mathematical modeling. Irkutsk State Agricultural University named after A. A. Ezhevsky.

E-mail: zhenia-93com@ya.ru

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-3030-3558>

Petrova Sofia A. – Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of informatics and mathematical modeling. Irkutsk State Agricultural University named after A. A. Ezhevsky.

E-mail: sofia.registration@mail.ru

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-9586-583X>