

На правах рукописи

Ковалева Евгения Александровна

**ЭКОЛОГО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ ОПТИМИЗАЦИИ
ПРОИЗВОДСТВА АГРАРНОЙ ПРОДУКЦИИ**

1.2.2 – Математическое моделирование, численные
методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук

Иркутск – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Иркутский государственный аграрный университет имени А. А. Ежевского»

Научный руководитель: **Иваньо Ярослав Михайлович,**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Деканова Нина Петровна,** доктор технических наук, профессор; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения»; профессор кафедры «Информационные системы и защита информации»

Куций Николай Николаевич, доктор технических наук, профессор; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет»; профессор-консультант Института информационных технологий и анализа данных, сотрудник Лаборатории сетевых систем и ИТ-инфраструктуры

Ведущая организация: **Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук»**

Защита состоится «12» марта 2024 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.271.01, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Байкальский государственный университет» по адресу: 664003, Сибирский федеральный округ, Иркутская область, г. Иркутск, ул. Ленина, д.11., корпус 2, ауд. 2-301, зал заседаний Ученого совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Байкальского государственного университета.

Полный текст диссертации, автореферат диссертации и отзыв научного руководителя размещены на официальном сайте Байкальского государственного университета по адресу: <http://bgu.ru>

Автореферат разослан «__» _____ 202__ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент



Т. И. Ведерникова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Математическому моделированию в экологии посвящено значительное число научных трудов отечественных и зарубежных ученых Н. Н. Моисеева, Н. В. Чепурных, А. М. Молчанова, В. Леонтьева, Д. Лаукса, Дж. Форрестера, Д. Медоуза и других. Интерес вызывают работы, посвященные разработкам моделей и методов применительно к природно-экологическим задачам региональной экономики В.К. Аргучинцева, В. А. Батурина, Я. М. Иваньо, В.В. Кузнецова, В. П. Булатова и других.

Основные результаты по применению экономико-математических моделей для управления аграрным производством приведены в работах В.А. Кардаша, Р. Г. Кравченко, К. А. Мальцева, Г.И. Новикова, О. Оуда и других.

Между тем недостаточно внимания уделяется проблеме оптимизации производства сельскохозяйственной продукции с учетом воздействия природных и техногенных процессов на деятельность сельскохозяйственных товаропроизводителей в условиях развития в стране орошаемого земледелия. Очевидно, что многообразие факторов, влияющих на экосистему при аграрном производстве, предполагает различные варианты решения задач. Поэтому при построении и реализации моделей оптимизации производства продукции в разных природно-климатических условиях региона и их реализации помимо прибыли нужно учитывать ущербы, наносимые окружающей среде от техногенных загрязнителей и эрозионных процессов. Для этого необходима разработка эколого-математических моделей, алгоритмов их реализации и программного обеспечения.

Целью диссертационной работы является разработка эколого-математических моделей и алгоритмов оптимизации производства аграрной продукции в условиях изменчивости климатических, экологических и производственных характеристик для создания программного комплекса решения управленческих задач.

В соответствии с целью выделены следующие **задачи**:

- постановка и формализация задачи эколого-математического моделирования производства аграрной продукции с учетом особенностей изменчивости производственно-экономических, природно-климатических и экологических характеристик;
- разработка и реализация моделей оптимизации производства аграрной продукции в условиях неопределенности природно-климатических и экологических характеристик;
- разработка и реализация в виде программного комплекса численных алгоритмов для имитационного моделирования производства аграрной продукции в условиях неопределенности экологических и климатических характеристик;
- создание программного комплекса моделирования производства аграрной продукции в регионе для разных вариантов изменчивости производственно-экономических, природно-климатических и экологических характеристик.

Объектом исследования является моделирование производства аграрной продукции в условиях воздействия природно-климатических и экологических факторов.

Предмет исследования – математические модели и цифровые технологии управления производством аграрной продукции на орошаемых и неорошаемых землях при влиянии техногенных загрязнителей и эрозионных процессов.

Научная новизна соответствует следующим пунктам паспорта специальности 1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ по техническим наукам:

Пункт 8. Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента.

1. Поставлена и формализована задача эколого-математического моделирования производства аграрной продукции и предложены ее варианты с учетом различных видов земледелия, техногенного и природного воздействия, неопределенности характеристик.

2. Предложены эколого-математические модели оптимизации производства аграрной продукции с учетом экологических ущербов в условиях неопределенности природно-климатических и экологических факторов, реализованные на реальных объектах с применением современных компьютерных технологий.

Пункт 3. Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента.

3. Разработаны и реализованы в виде программного комплекса алгоритмы имитационного моделирования для решения эколого-математических задач оптимизации производства аграрной продукции с интервальными и вероятностными климатическими и экологическими характеристиками.

Пункт 6. Разработка систем компьютерного и имитационного моделирования, алгоритмов и методов имитационного моделирования на основе анализа математических моделей.

4. Разработан программный комплекс моделирования различных ситуаций производства аграрной продукции в регионе с учетом изменчивости производственно-экономических, природно-климатических и экологических факторов.

Методы исследования. В диссертационной работе использованы методы теории вероятностей и математической статистики, имитационного моделирования и математического программирования. Кроме того, применены технологии проектирования и разработки программного комплекса.

Теоретическую и методологическую основу исследования составляют труды российских и зарубежных ученых по математическому моделированию, методам математического программирования и решению прикладных задач, связанных с аграрным производством и его влиянием на экологические условия.

Практическая значимость работы. Программный комплекс эколого-математического моделирования получения сельскохозяйственной продукции применим для планирования производства на предприятии агропромышленного комплекса. Он использован для оптимизации производства сельскохозяйственной продукции с оценкой ущербов окружающей среде для двух предприятий аграрного сектора Иркутской области: ЗАО «Иркутские семена» и СХАО «Приморский». Разработанные модели и алгоритмы используются в учебном процессе, в дисциплинах, связанных с математическим моделированием и информационными технологиями. Программный комплекс рекомендован министерством сельского хозяйства Иркутской области предприятиям для управления их деятельностью.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на региональной научно-практической конференции молодых ученых «Научные исследования и разработки к внедрению в АПК»

(Иркутский ГАУ, Иркутск, 2012-2013, 2020), международной научно-практической конференции, посвященной 110-летию со дня рождения А.М. Казанского (Иркутский ГАУ, Иркутск, 2012), XVIII-XIX, XXV-XXVII Байкальской Всероссийской конференции с международным участием «Информационные и математические технологии» (ИСЭМ СО РАН, Иркутск, 2013-2014, 2020, 2021, 2022), международной научно-практической конференции «Климат, экология, сельское хозяйство» (Иркутский ГАУ, Иркутск, 2014, 2020), международной научно-практической конференции «Информационные технологии, системы и приборы в АПК» - АГРОИНФО-2018 (СибФТИ СФНЦА РАН, Краснообск, 2018) VII International Workshop: "Critical Infrastructures in the Digital World" (Байкальск, 2020). Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Эколого-математическое моделирование аграрного производства». На XXIII Всероссийской агропромышленной выставке «Золотая осень 2021» автор получила диплом и награждена серебряной медалью за разработку программного комплекса «Эколого-математическое моделирование аграрного производства».

Публикации. Результаты диссертационного исследования опубликованы в 21 печатной работе, общим объемом 23,88 п. л., в том числе авторских – 5,75 п. л., из них три статьи в изданиях, рекомендованных ВАК, и две в изданиях, индексируемых в международной базе данных Scopus.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка использованных источников из 167 наименований. Общий объем работы составляет 167 страниц, которые содержат в себе 12 таблиц, 26 рисунков и 13 приложений.

Содержание работы. Во введении обосновывается актуальность темы, формулируется цель и задачи исследования, указываются научные результаты и практическая значимость работы. В первой главе описаны виды эколого-математических моделей, их применение. Проведен анализ математических методов, позволяющий оценить статистические особенности многолетних рядов природно-климатических, экологических и производственно-экономических характеристик. При этом рассмотрены задачи оптимизации производства аграрной продукции, а также проблемы загрязнения и эрозии почвы. На основе анализа моделей поставлена и формализована задача эколого-математического моделирования производства аграрной продукции. Во второй главе проанализированы производственно-экономические, природно-климатические характеристики и характеристики загрязнения и эрозии сельскохозяйственных угодий. Построены эколого-математические модели для неорошаемого и орошаемого земледелия в условиях неопределенности климатических и экологических характеристик. В третьей главе описана созданная база данных, предложенные численные алгоритмы для реализации разработанных оптимизационных моделей. Рассмотрен созданный программный комплекс «Эколого-математическое моделирование аграрного производства», апробированный на реальных объектах. В заключении приведены основные выводы.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

1 Поставлена и формализована задача эколого-математического моделирования производства аграрной продукции и предложены ее варианты с учетом различных видов земледелия, техногенного и природного воздействия, неопределенности характеристик (п. 8). При производстве сельскохозяйственной продукции используют орошаемые и неорошаемые земли, подверженные влиянию различных природных и техногенных факторов: водная и ветровая эрозия,

загрязнение почвы и воды в результате оседания вредных веществ из атмосферы, а также использования пестицидов и гербицидов. Для таких условий деятельности аграрного предприятия в течение года предлагается эколого-математическая модель, которая позволяет получать максимальную прибыль с учетом ущербов от негативных природных и техногенных факторов, наносимых окружающей среде. Такую задачу можно записать в виде:

$$f = \sum_{i \in I} (1 - l_i) c_i p_i x_i + \sum_{i \in I} (1 - l'_i) c'_i p'_i x'_i + \sum_{k \in K} c_k r_k y_k + \sum_{j \in J} (1 - \alpha_j) g_j \rho_j z_j + \sum_{j \in J} (1 - \alpha'_j) g'_j \rho'_j z'_j \rightarrow \max, \quad (1)$$

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); p_i, ρ_j (p'_i, ρ'_j) - урожайность культуры вида i и кормов вида j при неорошаемом (орошаемом) земледелии (ц/га); r_k - продуктивность животных k (ц/гол.); l_i, α_j (l'_i, α'_j) - коэффициенты 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. Искомые переменными являются: x_i, z_j (x'_i, z'_j) - площади неорошаемых (орошаемых) земель (га); y_k - количество животных вида k .

Произведения $l_i c_i p_i, \alpha_j g_j \rho_j, l'_i c'_i p'_i$ и $\alpha'_j g'_j \rho'_j$ характеризуют ущербы от негативного влияния техногенных и природных факторов на окружающую среду.

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

$$(1 - l_i) p_i x_i + (1 - l'_i) p'_i x'_i \geq S_i, \quad (2)$$

где S_i - заданный объем производства товарной продукции растениеводства вида i (ц).

Ограничения по заданному объему производства животноводческой продукции имеют вид

$$r_k y_k \geq Y_k, \quad (3)$$

где Y_k - заданный объем производства животноводческой продукции k (ц).

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

$$\sum_{j \in J} (1 - \alpha_j) \beta_{\theta j} \rho_j z_j + \sum_{j \in J} (1 - \alpha'_j) \beta_{\theta j} \rho'_j z'_j \geq \sum_{k \in K} B_{\theta k} y_k \quad (\theta \in \Theta), \quad (4)$$

где $B_{\theta k}$ - минимальная потребность в элементе питания θ животного k (ц/гол.); $\beta_{\theta j}$ - содержание θ - элемента питания в единице кормовой продукции, полученной от культуры j (кг/ц), 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 (га).

Ограничения по наличию трудовых ресурсов имеют вид

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

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

$$\varepsilon_k y_k \leq E_k, \quad (9)$$

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).

Выполнение условия по непревышению предельно допустимой концентрации (ПДК) вредных веществ в почве на неорошаемых и орошаемых землях выглядят так

$$\sum_{i \in I} \varphi_{in} x_i + \sum_{i \in I} \nu_{in} x'_i + \sum_{j \in J} \nu_{jn} z_j + \sum_{j \in J} o_{jn} z'_j \leq \Omega_n \quad (n \in N), \quad (10)$$

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

где φ_{in}, ν_{jn} (φ'_{in}, ν'_{jn}) - исходная концентрация вредного вещества n на неорошаемых (орошаемых) землях (мг/м³/га); вредное вещество n с концентрацией ν_{in}, o_{jn} (ν'_{in}, o'_{jn}), поступающее на неорошаемые (орошаемые) земли (мг/м³/га); Ω_n (Ω'_n) - значения предельно допустимой концентрации вредного вещества n в почве на неорошаемых (орошаемых землях) (мг/м³); N - множество вредных веществ.

Ограничение на водозабор в реке имеют вид

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

где q_i, l_j - оросительная норма культуры i и кормовых культур j (м³/га); T' - вегетационный период (сут); ξ - расход воды реки (м³/сут).

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

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

где ψ_n - исходная концентрация вредного вещества n в реке (мг/м³/м³); μ_n, μ'_n - концентрация вредного вещества n в единице объема возвратных вод с полей культур i и j (мг/м³/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 неорошаемых и орошаемых землях имеют вид:

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

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

где η (η') - максимальные годовые почвенные потери на неорошаемых (орошаемых) землях (т/га); R - эродирующая способность 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 час, T - время, в течение которого почва разрушается, ч. Для расчета характеристик, входящих в (14)-(15) используются нормативные методики.

Условие неотрицательности переменных

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

Особенностью разработанной эколого-математической модели оптимизации производства аграрной продукции является оценка ущербов от негативного влияния техногенных и природных факторов. Ущерб окружающей среде включены в качестве коэффициентов негативного влияния в критерий оптимальности и ограничения по объемам производства аграрной продукции. Разработан алгоритм по определению этих коэффициентов.

На первом этапе находится коэффициент эродированности почв под культурами для товарной продукции (кормовыми культурами) $l_9 (\alpha_9)$. Он определяется соотношением площади эродированных земель к общей площади определенного участка для хозяйства или района, или отношением недополученного объема продукции на эродированном участке к общему объему производства. Для определения этого коэффициента могут быть использованы экспертные оценки или репрезентативные данные согласно карте эродированности. Вторым шагом алгоритма является корректировка $l_9 (\alpha_9)$ умножением на характеристику устойчивости различных агротехнических фонов к эрозии и дефляции $l_a (\alpha_a)$. Третий этап включает в себя нахождение коэффициента загрязненности почв $l_3 (\alpha_3)$. Он определяется аналогично $l_9 (\alpha_9)$, соотношением загрязненных земель к общей площади определенного участка для хозяйства, района или отношением недополученного объема продукции на загрязненном участке к общему объему производства. Для определения этого коэффициента также можно использовать экспертные оценки или репрезентативные данные агрохимической службы.

Итоговый коэффициент негативного воздействия $l_{нв} (\alpha_{нв})$ предлагается рассчитывать путем сложения коэффициентов, характеризующих эродированность почв $l_9 (\alpha_9)$ и загрязненность вредными веществами $l_3 (\alpha_3)$. Этот коэффициент, характеризующий загрязнение площадей разных культур, выращенных на неорошаемых и орошаемых землях $(l_i, \alpha_j, (l'_i, \alpha'_j))$, используется в модели (1) – (16).

Из приведенной общей эколого-математической модели можно сформировать задачу оптимизации производства отдельно по отраслям – растениеводство, животноводство. Если предприятие не имеет орошаемых земель, то ставится задача оптимизации производства только для неорошаемого земледелия. Уровень загрязнения почв и воды вдали от промышленных центров региона нередко бывает намного ниже ПДК. Поэтому для аграрных товаропроизводителей подобных территорий не актуально учитывать ущербы от загрязнения почв или воды. Аналогично некоторым товаропроизводителям аграрной продукции нет необходимости определять потери от ветровой и водной эрозии.

Учитывая особенности эколого-математических моделей производства аграрной продукции, автором предложены их разные варианты: по неопределенности характеристик (детерминированные, интервальные, случайные), экологическим факторам (загрязнение воды и почвы, водная и ветровая эрозия, смешанное воздействие), отраслям сельского хозяйства (растениеводство, животноводство,

сочетание отраслей) и виду земледелия (неорошаемое, орошаемое земледелие, их сочетание).

2 Предложены эколого-математические модели оптимизации производства аграрной продукции с учетом экологических ущербов в условиях неопределенности природно-климатических и экологических факторов, реализованные на реальных объектах с применением современных компьютерных технологий. Предложенные детерминированные модели описывают некоторую усредненную ситуацию производства аграрной продукции. Очевидно, что более близки к отображению реальных ситуаций модели оптимизации сельскохозяйственного производства со случайными и интервальными оценками. При описании таких ситуаций задачи математического программирования имеют не одно, а множество решений, которые связаны с вероятностью или верхними и нижними оценками характеристик.

Исследования показывают, что изменчивость урожайности сельскохозяйственных культур, фактора эродирующей способности дождей, суточных расходов воды, концентрации вредных веществ, попавших в почву, коэффициентов негативного влияния на окружающую среду от природных и техногенных факторов можно описать интервальными оценками ввиду малого объемов данных, их неоднородности, начальной стадии развития предприятия.

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:

$$f = \sum_{i \in I} (1 - \tilde{l}_i) c_i \tilde{p}_i x_i + \sum_{i \in I} (1 - \tilde{l}'_i) c'_i \tilde{p}'_i x'_i + \sum_{k \in K} c_k r_k y_k + \sum_{j \in J} (1 - \tilde{\alpha}_j) g_j \tilde{\rho}_j z_j + \sum_{j \in J} (1 - \tilde{\alpha}'_j) g'_j \tilde{\rho}'_j z'_j \rightarrow \max, \quad (17)$$

- ограничение по заданному объему производства товарной растениеводческой продукции:

$$(1 - \tilde{l}_i) \tilde{p}_i x_i + (1 - \tilde{l}'_i) \tilde{p}'_i x'_i \geq S_i, \quad (18)$$

- условие по увязке производства растениеводческой продукции и потребности в ней животноводства:

$$\sum_{j \in J} (1 - \tilde{\alpha}_j) \beta_{\theta j} \tilde{\rho}_j z_j + \sum_{j \in J} (1 - \tilde{\alpha}'_j) \beta_{\theta j} \tilde{\rho}'_j z'_j \geq \sum_{k \in K} B_{\theta k} y_k \quad (m \in M), \quad (19)$$

- условие по непревышению предельно допустимой концентрации (ПДК) вредных веществ в почве:

$$\sum_{i \in I} \varphi_{in} x_i + \sum_{i \in I} \tilde{v}_{in} x_i + \sum_{j \in J} \nu_{jn} z_j + \sum_{j \in J} \tilde{o}_{jn} z_j \leq \Omega_n \quad (n \in N), \quad (20)$$

$$\sum_{i \in I} \varphi'_{in} x'_i + \sum_{i \in I} \tilde{v}'_{in} x'_i + \sum_{j \in J} \nu'_{jn} z'_j + \sum_{j \in J} \tilde{o}'_{jn} z'_j \leq \Omega'_n \quad (n \in N), \quad (21)$$

- ограничение на водозабор в реке:

$$\sum_{i \in I} q_i x_i + \sum_{j \in J} \iota_j z_j \leq T' \tilde{\xi}, \quad (22)$$

- условие по непревышению предельно допустимой концентрации вредных веществ в реке:

$$\psi_n T' \tilde{\xi} + \mu_n \sum_{i \in I} [(q_i + \lambda) x_i + \lambda x_i] + \mu'_n \sum_{j \in J} [(\iota_j + \lambda) z_j + \lambda z_j] \leq W_n \quad (n \in N), \quad (23)$$

- ограничение на почвенные потери от водной и ветровой эрозии:

$$\sum_{i \in I} \tilde{R} U_i D_i V_i C_i P_i x_i + \sum_{j \in J} \tilde{R} U'_j D'_j V'_j C'_j P'_j z_j + \sum_{i \in I} M_i T x_i + \sum_{j \in J} M'_j T z_j \leq \eta, \quad (24)$$

$$\sum_{i \in I} \tilde{R} U_i D_i V_i C_i P_i x'_i + \sum_{j \in J} \tilde{R} U'_j D'_j V'_j C'_j P'_j z'_j + \sum_{i \in I} M_i T x'_i + \sum_{j \in J} M'_j T z'_j \leq \eta', \quad (25)$$

где $\underline{\tilde{p}}_i \leq \tilde{p}_i \leq \overline{\tilde{p}}_i, \underline{\tilde{\rho}}_j \leq \tilde{\rho}_j \leq \overline{\tilde{\rho}}_j$ ($\underline{\tilde{p}}'_i \leq \tilde{p}'_i \leq \overline{\tilde{p}}'_i, \underline{\tilde{\rho}}'_j \leq \tilde{\rho}'_j \leq \overline{\tilde{\rho}}'_j$) - нижние и верхние оценки урожайности культуры вида i и кормовых вида j при неорошаемом (орошаемом) земледелии; $\underline{\tilde{l}}_i \leq \tilde{l}_i \leq \overline{\tilde{l}}_i, \underline{\tilde{\alpha}}_j \leq \tilde{\alpha}_j \leq \overline{\tilde{\alpha}}_j$ ($\underline{\tilde{l}}'_i \leq \tilde{l}'_i \leq \overline{\tilde{l}}'_i, \underline{\tilde{\alpha}}'_j \leq \tilde{\alpha}'_j \leq \overline{\tilde{\alpha}}'_j$) - нижние и верхние оценки коэффициентов негативного воздействия техногенных и природных процессов на почву при возделывании культур i и j на неорошаемых (орошаемых) землях; вредное вещество n с верхними и нижними оценками концентрации $\underline{\tilde{v}}_{in} \leq \tilde{v}_{in} \leq \overline{\tilde{v}}_{in}, \underline{\tilde{o}}_{jn} \leq \tilde{o}_{jn} \leq \overline{\tilde{o}}_{jn}$, ($\underline{\tilde{v}}'_{in} \leq \tilde{v}'_{in} \leq \overline{\tilde{v}}'_{in}, \underline{\tilde{o}}'_{jn} \leq \tilde{o}'_{jn} \leq \overline{\tilde{o}}'_{jn}$), поступающее на неорошаемые (орошаемые) земли; $\underline{\tilde{R}} \leq \tilde{R} \leq \overline{\tilde{R}}$ - верхние и нижние границы эродирующей способности дождей; $\underline{\tilde{\xi}} \leq \tilde{\xi} \leq \overline{\tilde{\xi}}$ - верхние и нижние границы суточного расхода воды.

Что касается ограничений по производству животноводческой продукции, по площади пашни, наличию трудовых ресурсов и неотрицательности переменных, то они соответствуют неравенствам (3), (5)- (9) и (16).

Результатом применения таких моделей является 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.

Многие характеристики, входящие в эколого-математические модели, изменяются случайно. Исследования показали, что изменчивость урожайности сельскохозяйственных культур при неорошаемом земледелии, эродирующая способность дождей, расходы воды реки, скорость ветра, концентрации вредных веществ, попавших в почву, могут быть вероятностными величинами, описываясь законами распределения. При этом ряды перечисленных характеристик должны составлять не менее 20-и значений. Статистический анализ свойств эмпирических данных показал, что для описания природно-климатических и производственно-экономических характеристик применимы следующие законы распределения: Пирсона III типа и трехпараметрического степенного гамма-распределения.

Критерий оптимальности задачи оптимизации аграрного производства для сочетания орошаемого и неорошаемого земледелия с вероятностными оценками выглядит следующим образом:

$$f = \sum_{i \in I} (1-l_i) c_i p_i^F x_i + \sum_{i \in I} (1-l'_i) c'_i p'_i x'_i + \sum_{k \in K} c_k r_k y_k + \sum_{j \in J} (1-\alpha_j) g_j \rho_j^F z_j + \sum_{j \in J} (1-\alpha'_j) g'_j \rho'_j z'_j \rightarrow \max, \quad (26)$$

- ограничение по заданному объему производства товарной растениеводческой продукции:

$$(1-l_i) p_i^F x_i + (1-l'_i) p'_i x'_i \geq S_i, \quad (27)$$

- ограничение по увязке производства растениеводческой продукции и потребности в ней животноводства:

$$\sum_{j \in J} (1-\alpha_j) \beta_{\theta} \rho_j^F z_j + \sum_{j \in J} (1-\alpha'_j) \beta_{\theta} \rho'_j z'_j \geq \sum_{k \in K} B_{\theta k} y_k \quad (\theta \in \Theta), \quad (28)$$

- ограничение на водозабор в реке:

$$\sum_{i \in I} q_i x'_i + \sum_{j \in J} l_j z'_j \leq T' \xi^F, \quad (29)$$

- условие по непревышению предельно допустимой концентрации вредных веществ в реке:

$$\psi_n T' \xi^F + \mu_n \sum [(q_i + \lambda) x'_i + \lambda x_i] + \mu'_n \sum [(l_j + \lambda) z'_j + \lambda z_j] \leq W_n \quad (n \in N) \quad (30)$$

- ограничения на почвенные потери от водной и ветровой эрозии:

$$\sum_{i \in I} R^F U_i D_i V_i C_i P_i x_i + \sum_{j \in J} R^F U'_j D'_j V'_j C'_j P'_j z_j + \sum_{i \in I} M_i T x_i + \sum_{j \in J} M'_j T z_j \leq \eta, \quad (31)$$

$$\sum_{i \in I} R^F U_i D_i V_i C_i P_i x'_i + \sum_{j \in J} R^F U'_j D'_j V'_j C'_j P'_j z'_j + \sum_{i \in I} M_i T x'_i + \sum_{j \in J} M'_j T z'_j \leq \eta', \quad (32)$$

где P_i^F, ρ_j^F - урожайность культуры вида i и кормов вида j на неорошаемых землях; R^F - эродирующая способность дождей; ξ^F - суточный расход воды реки; F - вероятность.

Характеристики $\varphi_{in}, \nu_{jn}, \varphi'_{in}, \nu'_{jn}, v_{in}, o_{jn}, v'_{in}$ и o'_{jn} являются случайными величинами, однако их определение представляет собой трудоемкий процесс, что связано с периодическими наблюдениями за состоянием почвы. Поэтому их значения могут быть усреднены или рассмотрены в виде интервальных оценок.

Ограничение по производству животноводческой продукции, площади пашни, наличию трудовых ресурсов и предельно допустимой концентрации некоторых вредных веществ в почве, неотрицательности переменных соответствуют неравенствам (3), (5)-(11) и (16).

Кроме того, предложена модель, которая описывает комбинацию растениеводства и животноводства на орошаемых и неорошаемых сельскохозяйственных землях с учетом влияния климатических событий. В этой модели целевую функцию (26) дополняют ущербы от экстремальных явлений. Ограничения описывают доступность земельных и трудовых ресурсов, объемы производства, загрязнение почвы и воды, эрозию сельскохозяйственных угодий, увязку производства продукции растениеводства и животноводства в условиях сильных засух или обильных осадков.

3 Разработаны и реализованы в виде программного комплекса алгоритмы имитационного моделирования для решения эколого-математических задач оптимизации производства аграрной продукции с интервальными и вероятностными климатическими и экологическими характеристиками (п. 3). На основе предложенных эколого-математических моделей, которые учитывают ущербы окружающей среде от эрозии и загрязнения почвы, нами разработан алгоритм решения задач по оптимизации производства аграрной продукции на неорошаемых и орошаемых землях с учетом техногенных загрязнений почвы, воды и эрозионных процессов (рис. 1).

На первом этапе вводятся производственно-экономические, природно-климатические и экологические данные.

На втором этапе осуществляется статистический анализ производственно-экономических, природно-климатических и экологических характеристик для определения их особенностей. Для интервальных характеристик определяются верхние и нижние оценки, а для случайных оценок подбираются законы распределения вероятностей с помощью методов оценки статистических параметров и критериев соответствия эмпирических значений выборки аналитической функции. Что касается характеристик детерминированных моделей, то их значения могут быть получены на основе усреднения и использования значимых регрессионных выражений.

На третьем этапе по разработанному алгоритму вычисляются коэффициенты негативного влияния.

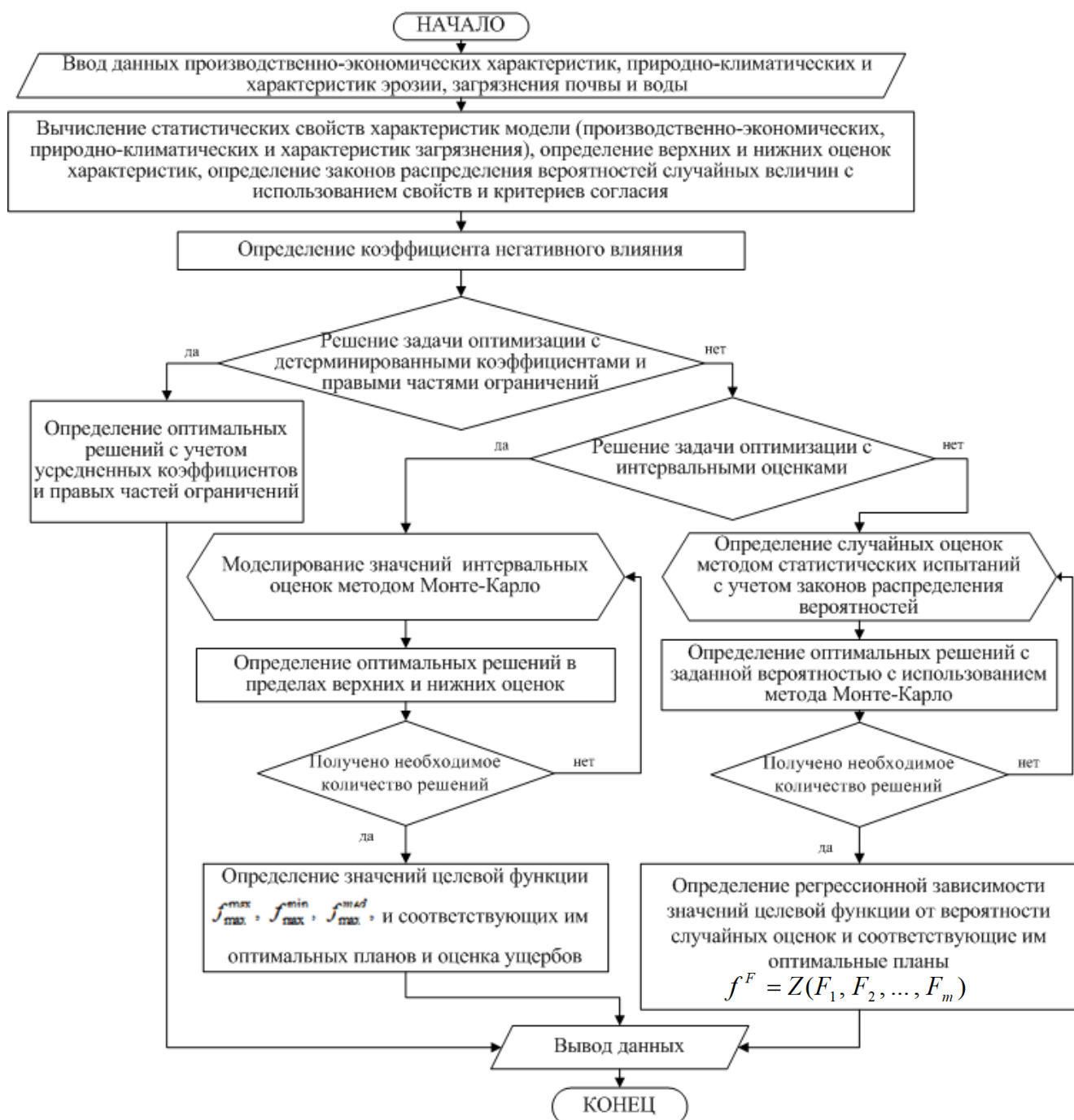


Рис. 1. Алгоритм решения эколого-математических задач оптимизации производства сельскохозяйственной продукции

На четвертом этапе определяется вид модели: детерминированная или неопределенная. Во втором случае рассматриваются варианты модели с интервальными или вероятностными характеристиками. При построении детерминированной задачи оптимизации вычисляется оптимальное решение для усредненных значений характеристик.

На пятом этапе осуществляется выбор - с интервальными или со случайными оценками решается задача. Если модель представляет собой задачу с интервальными оценками, то на шестом шаге методом статистических испытаний осуществляется моделирование интервальных характеристик. Для моделей со случайными характеристиками их значения также определяются методом Монте-Карло с использованием выбранных законов распределения вероятностей. Таким образом, для обоих случаев формируется определенное количество задач линейного программирования.

На седьмом этапе вычисляются оптимальные решения задач с интервальными или случайными характеристиками.

Процесс решения задач завершается при достижении задаваемой точности. Точность расчетов δ оценивается как разность значений целевых функций f_n^* и f_{n-1}^* при разных количествах итераций:

$$\frac{f_n^* - f_{n-1}^*}{f_n^*} 100\% \leq \delta. \quad (33)$$

Число итераций как разность последующего и предшествующего вычисления $n - (n - 1)$ принималось равным 100.

Для моделей с интервальными оценками из всех оптимальных решений можно выделить наибольшее, медианное и наименьшее значение целевой функции и соответствующие им оптимальные планы. Для задач с вероятностными оценками рассчитывается регрессионная зависимость значений целевой функции от вероятностей случайных характеристик. Кроме того, можно получить распределение значений целевой функции и соответствующие им оптимальные планы.

Для реализации численного алгоритма разработан программный комплекс, в котором предусмотрены все функции для осуществления операций, касающихся статистической обработки рядов характеристик моделей и решения задач линейного программирования с использованием программного продукта LP Solve. Алгоритм решения предложенных моделей, включающих производственно-экономические, природно-климатические и экологические характеристики применительно к задачам аграрного производства разработан впервые.

4 Разработан программный комплекс моделирования различных ситуаций производства аграрной продукции в регионе с учетом изменчивости производственно-экономических, природно-климатических и экологических факторов (п. 6). На рис. 2 показана схема функционирования программного комплекса «Эколого-математическое моделирование аграрного производства».

Реализация интерфейса программного комплекса осуществлялась с помощью интегрированной среды разработки Embarcadero Berlin 10.1. Эта же среда использована для обработки данных: оценки статистических параметров, построения законов распределения, моделирования характеристик моделей с помощью метода статистических испытаний, построения регрессионных выражений.

Для решения задачи оптимизации производства аграрной продукции применен программный продукт LP Solve. Результаты статистической обработки данных, решений задач математического программирования и сведения из базы данных можно экспортировать в табличном виде в приложение MS Excel.

Для формирования базы данных использована информация министерства природных ресурсов (МПР), министерства сельского хозяйства (МСХ) Иркутской области, центра агрохимической службы (ЦАС), Иркутского управления гидрометеорологической службы (УГМС), Иркутскстата, предприятий агропромышленного комплекса. База данных и справочник программного комплекса, реализованные в СУБД Microsoft Access 2010, включают в себя информацию об урожайности различных культур, площадях посевов, валовом сборе, поголовье животных, характеристиках рельефа и почвы, климатических характеристиках (скорость ветра и осадки) за многолетний период по муниципальным районам и сельскохозяйственным предприятиям Иркутской области. В справочник входят данные о предельно-допустимых концентрациях вредных веществ в почве и воде, их фоновое содержание.

Программный комплекс решает задачи с использованием исключительно базы данных и с участием пользователя, который может задавать верхние и нижние оценки интервальной характеристики, определять вид неопределенной задачи, закон распределения вероятностей, число решений задачи и другое.

Работа программного комплекса апробирована на двух предприятиях: СХАО «Приморское», в котором осуществляется производство растениеводческой и животноводческой продукции для неорошаемого земледелия и сочетания неорошаемого земледелия и орошения, и ЗАО «Иркутские семена», в котором производят продукцию, не используя орошаемое земледелие.

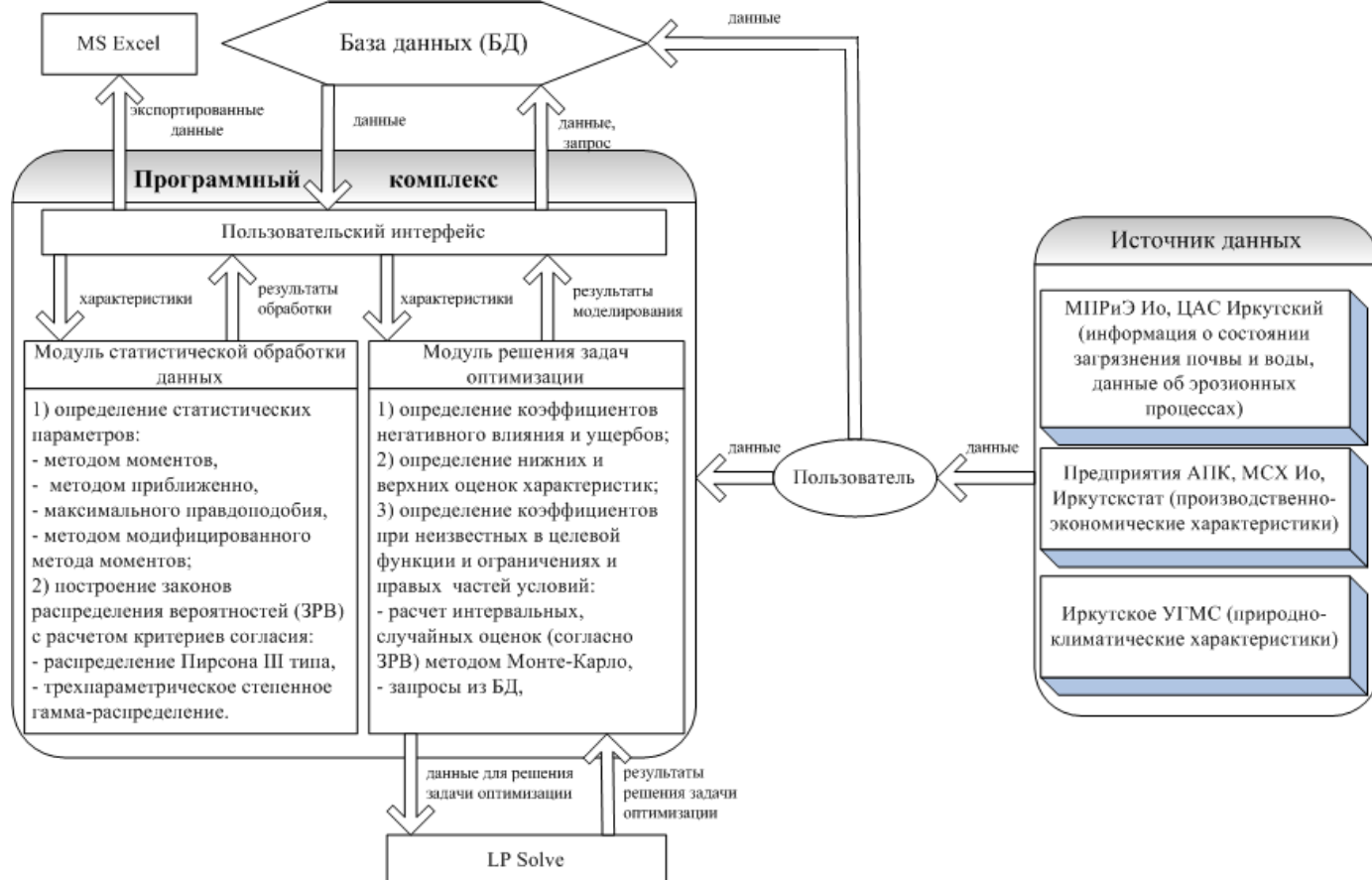


Рис. 2. Схема функционирования программного комплекса «Эколого-математическое моделирование аграрного производства»

Для СХАО «Приморское» реализованы модели для неорошаемого и сочетания орошаемого и неорошаемого земледелия с интервальными, усредненными и вероятностными характеристиками с учетом и без учета экстремальных событий. В частности, для сочетания производства аграрной продукции для орошаемого и неорошаемого земледелия согласно алгоритму (рис. 1) получена целевая функция распределения в виде выражения $f = 25517,8 - 6180,1F_1 - 1196,9F_2 + 126,2F_3$, где F_1 , F_2 , F_3 – вероятности урожайности зерновых культур, однолетних и многолетних трав на зеленый корм. Для частных случаев при вероятностях 0,05, 0,5 и 0,95 прибыль предприятия составила 18,9, 21,5 и 27,4 млн руб. с ущербами окружающей среде 14,0, 15,5 и 16,6%. При этом 7 из 15 искоемых переменных различаются для вероятностей 0,05 и 0,95. Для второго случая относительно первого площадь пшеницы увеличилась в 3,6 раза, однолетних трав на зеленый корм – в 1,5 раза, поголовье коров основного стада – в 2 раза. Вместе с тем площади однолетних трав на сено уменьшились в 5 раз, кукурузы на силос – в 2 раза, поголовье коров на откорме – в 3 раза. Площадь силосных культур для вероятностей 0,05 равна нулю, а для вероятностей 0,95 – 1251 га. Остальные искоемые переменные (площадь рапса, площади многолетних трав

на сено, зеленый корм и семена, площадь орошаемой кукурузы на силос, поголовье лошадей, поголовье лошадей основного стада и на откорме, количество пчелосемей) равны между собой.

В год сильной засухи с вероятностью 0,056 прибыль уменьшилась до 16,2 млн руб., при этом ущерб окружающей среде составил 14,6%. Таким образом, изменчивость климатических и экологических характеристик сильно сказывается на оптимальных планах в животноводстве и растениеводстве. При сильной засухе площадь зерновых культур относительно результатов детерминированной задачи уменьшилась до 3000 га (27%), однолетних трав на зеленый корм - до 2 002 га (20%), коров основного стада - до 1 000 (20%). Вместе с тем увеличились площади рапса до 806 га (в 1,6 раза), однолетних трав на сено до 14 068 га (в 5,3 раза), многолетних трав на зеленый корм до 2 019 га (в 20 раз) и коров на откорме до 2 088 (в 2 раза).

Для ЗАО «Иркутские семена» решены задачи оптимизации сочетания производства продукции растениеводства и животноводства на неорошаемых землях с интервальными и детерминированными характеристиками. Например, нижняя оценка целевой функции соответствует 5,55, а верхняя – 8,52 млн руб., в этом случае ущербы окружающей среде составили 24,4 и 25,0%. Колебания полученных оптимальных планов несколько ниже, чем для СХАО «Приморское». Для нижней оценки целевой функции по сравнению с моделью с детерминированными характеристиками площади зерновых для товарной продукции уменьшились до 1000 га (45%), а кормовых зерновых увеличились до 1725 га (в 3,5 раз). Для верхней оценки максимальной прибыли получен оптимальный план, в котором увеличены площади зерновых для товарной продукции до 2245 га (1%), картофеля - до 617 га (1%), а уменьшены площади многолетних трав на сено до 163 га (86%), поголовье свиней на откорме до 589 (84%).

Таким образом, программный комплекс с базой производственно-экономических, природно-климатических и экологических данных позволяет моделировать различные ситуации производства аграрной продукции для управления деятельностью предприятия с целью получения максимальной прибыли с учетом ущербов окружающей среде. Эксперименты показывают, что для достижения установленной точности, например $\delta \leq 2\%$, достаточно 500 оптимальных решений, а при $\delta \leq 1\%$ - 1000 решений. При этом продолжительность расчетов в зависимости от числа оптимальных решений описывается возрастающей квадратичной функцией.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Поставлена и формализована задача эколого-математического моделирования производства аграрной продукции с целевой функцией в виде максимума прибыли с учетом ущерба окружающей среде, и предложены их варианты с учетом различных видов земледелия, техногенного и природного воздействия, неопределенности характеристик.

Ущерб от техногенных и природных факторов, наносимые производственным ресурсам товаропроизводителей, предлагается учитывать с помощью введения в математическую модель эмпирических коэффициентов негативного воздействия на природную среду, получаемых согласно разработанному алгоритму на основе анализа данных региональной агрохимической службы и оценки развития эрозионных процессов.

Разработаны модели оптимизации производства аграрной продукции с интервальными и вероятностными природно-климатическими и экологическими характеристиками, реализованные для реальных производственных объектов.

Предложены и реализованы в виде программного комплекса алгоритмы имитационного моделирования для решения эколого-математических задач оптимизации производства аграрной продукции.

Создан программный комплекс эколого-математического моделирования производства аграрной продукции со специальным математическим, алгоритмическим и информационным обеспечением.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Ковалева Е. А. Модуль "Планирование в условиях рисков" программного комплекса "Эколого-математическое моделирование аграрного производства" / Е. А. Ковалева, Я. М. Иванько // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2022. – № 3(27). – С. 135-147. – DOI 10.38028/ESI.2022.27.3.013 (0,75 п.л., в т.ч. авторские 0,37 п.л.).
2. Ковалева Е.А. Алгоритм реализации эколого-математических задач оптимизации производства сельскохозяйственной продукции в условиях неопределенности / Я. М. Иванько, Е. А. Ковалева, С. А. Петрова // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. – 2020. – № 2. – С. 79-91. – DOI 10.17308/sait.2020.2/2918 (0,75 п.л., в т.ч. авторские 0,25 п.л.).
3. Ковалева Е.А. Эколого-математические модели оптимизации производства сельскохозяйственной продукции / Н.В. Бендик, Я.М. Иванько, Е.А. Ковалева // Вестник ИргТУ. – 2016. – Вып.4. – С. 66-74 (0,50 п.л., в т.ч. авторские 0,16 п.л.).

Публикации в изданиях, индексируемых в международной базе данных Scopus:

4. Kovaleva E. Ecological-Mathematical Modeling in Planning Production of Agricultural Products in Conditions of Risks / Ya. Ivanyo, S. Petrova, E. Kovaleva // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Virtual, Online, 10–12 января 2022 года. – Virtual, Online, 2022. – P. 022083. – DOI 10.1088/1755-1315/988/2/022083 (0,44 п.л., в т.ч. авторские 0,15 п.л.).
5. Kovaleva E. A. Management models of agrarian production taking into account natural and technogenic impacts on the environment / E. A. Kovaleva, Ya. M. Ivanyo // 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 (0,94 п.л., в т.ч. авторские 0,47 п.л.).

Публикации в прочих научных изданиях:

6. Ковалева Е.А. Математические и цифровые технологии оптимизации производства продовольственной продукции / Я. М. Иванько, П. Г. Асалханов, М. Н. Барсукова [и др.]. – Молодежный: Иркутский государственный аграрный университет им. А.А. Ежевского, 2021 – 219 с. (13,69 п.л., в т.ч. авторские 0,81 п.л.).
7. Ковалева Е. А. Коэффициенты негативного влияния на окружающую среду в эколого-математическом моделировании аграрного производства / Е. А. Ковалева, Я. М. Иванько // Научные исследования и разработки к внедрению в АПК : Материалы международной научно-практической конференции молодых ученых, п. Молодежный, 26–27 марта 2020 года. – п. Молодежный: Иркутский государственный аграрный университет им. А. А. Ежевского, 2020. – С. 149-159 (0,62 п.л., в т.ч. авторские 0,31 п.л.).
8. Хогоева Е. А. Особенности эколого-математического моделирования оптимизации сочетания отраслей / Е. А. Хогоева // Актуальные вопросы аграрной науки. – 2014. – № 10. – С. 60-67 (0,44 п.л.).
9. Хогоева Е.А. Модели прогнозирования социально-экономических, демографических и финансово-инвестиционных параметров региона / Е.А. Хогоева // Научные исследования и разработки к внедрению в АПК: материалы науч.-практ. конф. молодых ученых (17-18 апр. 2013 г.) : в 2 ч. – Иркутск, 2013. – № 2 – С. 156-191 (0,31 п.л.).

Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ

10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021660517 Российская Федерация. Эколого-математическое моделирование аграрного производства: № 2021614806 : заявл. 01.04.2021 : опубл. 28.06.2021 / Е. А. Ковалева, Я. М. Иванько, А. В. Теплов; заявитель ФГБОУ ВО «Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского».