Министерство сельского хозяйства Российской Федерации Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского»

На правах рукописи

be

Ковалева Евгения Александровна

ЭКОЛОГО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА АГРАРНОЙ ПРОДУКЦИИ

1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

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

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ4
1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭКОЛОГО-МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВА АГРАРНОЙ ПРОДУКЦИИ 10
1.1 Эколого-математическое моделирование
1.2 Оценка изменчивости производственно-экономических и природно-климатических характеристик
1.3 Природные и техногенные факторы, влияющие на производственные процессы
1.4 Формализация задачи эколого-математического моделирования производства аграрной продукции
Выводы по главе 1
2 ЭКОЛОГО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПРОДУКЦИИ С НЕОПРЕДЕЛЕННЫМИ ОЦЕНКАМИ
2.1 Оценка производственно-экономических характеристик
2.2 Изменчивость экологических характеристик
2.3 Эколого-математические модели оптимизации производства аграрной продукции с детерминированными характеристиками
2.4 Эколого-математические модели оптимизации производства аграрной продукции с интервальными оценками
2.5 Эколого-математические модели оптимизации производства аграрной продукции со случайными оценками
Выводы по главе 2
3 ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ЭКОЛОГО- МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
3.1 Модель базы данных
3.2 Алгоритмическое обеспечение программного комплекса
3.3 Программный комплекс
3.4 Реализация моделей
Выводы по главе 3
ЗАКЛЮЧЕНИЕ
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

ПРИЛОЖЕНИЯ	
Приложение 1	
Приложение 2	147
Приложение 3	
Приложение 4	158
Приложение 5	159
Приложение 6	160
Приложение 7	161
Приложение 8	162
Приложение 9	163
Приложение 10	164
Приложение 11	165
Приложение 12	166
Приложение 13	167

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность изучения эколого-математических моделей производства аграрной продукции связана с моделированием ситуаций для уменьшения влияния загрязнения почвы и воды, а также эрозионных процессов на окружающую среду [56], что позволяет повысить устойчивость ведения сельского хозяйства.

Необходимость увеличения производства аграрной продукции требует введения в эксплуатацию орошаемых земель, что обусловлено частыми проявлениями засух и постепенным вводом в оборот значительных площадей неиспользуемой пашни [56, 69, 103].

Математическому моделированию в экологии посвящено значительное число научных трудов: отечественных ученых Т. Г. Гильманова, В. Е. Куликова, Н. Н Моисеева, А. М. Молчанова, А. И. Новикова, Н. В. Тимофеева-Ресовского, Н. В. Чепурных и многих других [20, 78, 95, 96, 98, 129, 140]; зарубежных Д. Медоуза, Дж. Форрестера, Т. Т. Хун-Фэнь, исследователей: В. Леонтьева, Х. Цзе и других [81, 92, 134, 150]. Особый интерес вызывают работы, посвященные разработкам экологических моделей и методов, связанных с аграрным производством: B. A. Батурина, А. В. Зинга, Я. М. Иваньо, Г. Ю. Ризниченко, Д. О. Логофета, А. Н. Полевого, Ю. М. Свирежева, К. П. Смирнова, А. Б. Столбова, Ю. П. Сухановского, Г. И. Швебса и других [7, 41, 48, 70, 118, 121, 124, 127, 128, 143, 152, 154, 166, 167].

Основные результаты по применению экономико-математических моделей для управления аграрным производством приведены в работах, В. А. Кардаша, Р. Г. Кравченко, В. Е. Куликова, В. В. Кузнецова, К. А. Мальцева, Г. И. Новикова, О. Оуда, И. В. Шафранской и других [64, 73, 75, 76, 78, 83, 86, 98, 160].

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 необходимо учитывать ущербы, наносимые окружающей среде от техногенных загрязнителей и эрозионных процессов. Для этого необходима разработка эколого-математических моделей, алгоритмов их реализации и программного обеспечения [41, 70].

Целью диссертационной работы является разработка экологоматематических 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 экологоматематического моделирования получения сельскохозяйственной продукции применим для планирования производства на предприятии агропромышленного комплекса [120]. 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» (приложение 1). Разработанные модели и алгоритмы используются в учебном процессе, в дисциплинах, связанных с математическим моделированием и информационными технологиями. Программный комплекс хозяйства области министерством Иркутской рекомендован сельского 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 научнопрактической конференции, посвященной 110-летию co ДНЯ рождения А. М. Казанского (Иркутский ГАУ, Иркутск, 2012), XVIII-XIX, XXV-XXVII Байкальской Всероссийской конференции 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» (приложение 2) [120]. 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 печатных работах, 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 экологоматематических 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 Bo моделирования производства аграрной продукции. 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 и рассмотрены предложенные численные алгоритмы для реализации разработанных оптимизационных моделей. Дано описание созданного программного комплекса «Эколого-математическое моделирование аграрного производства», апробированного на реальных данных. В заключении приведены основные выводы.

1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭКОЛОГО-МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВА АГРАРНОЙ ПРОДУКЦИИ

1.1 Эколого-математическое моделирование

Анализ реальных экосистем может осуществляться с помощью методов математического программирования. Основы моделирования разных аспектов функционирования экономики с учетом устойчивого развития экосистем приведены в работах [20, 95, 96, 118, 121].

В литературе встречаются модели, описывающие мировое развитие цивилизации [81, 92, 134 и др.]. Тем не менее, не удалось построить универсальную модель решения, позволяющую решить проблемы обеспечения природными ресурсами и сельскохозяйственной продукцией населения планеты [130].

В работах [92, 134] построены модели глобального равновесия, позволяющие оценить возможности ресурсов Земли для обеспечения жизнедеятельности людей на планете.

Большой вклад в изучение глобальных моделей равновесия внесли Н.В. Тимофеев-Ресовский [129] и известный экономист В. Леонтьев [81].

Помимо планетарных моделей разработаны модели функционирования региона [10, 21, 23, 25, 26, 35, 55, 78, 91, 88, 94, 127, 131, 142, 146, 149], в которых рассмотрены разные стороны моделирования процессов экономики (энергетика, промышленность, ирригация, сельское хозяйство) с учетом изменчивости окружающей среды.

Современные математические модели в экологии можно разбить на три класса: количественные зависимости, не претендующие на раскрытие механизма описываемого процесса; качественные модели для выяснения динамического механизма изучаемого процесса, которые способны воспроизвести наблюдаемые динамические эффекты в поведении систем; имитационные модели конкретных экологических и эколого-экономических систем, учитывающие всю имеющуюся информацию об объекте. Цель построения таких моделей — детальное

прогнозирование поведения сложных систем или решение оптимизационной задачи их эксплуатации [118].

В работах [38, 106, 118] математические модели в экологии делятся на: модели динамики популяций, экологических сообществ, водных систем, продукционного процесса растений [1, 12, 63, 74, 79, 98, 155, 158], лесных сообществ, загрязнения атмосферы и поверхности земли [2, 15, 24, 28, 29, 36, 62, 93, 101, 102, 110, 115, 136] и глобальные модели [81, 92, 95, 129, 134, 154]. Кроме того, в работах [8, 22, 27, 67, 82, 104, 119, 128, 133, 143, 150, 163-166] выделены модели эрозионных процессов и мероприятия по уменьшению их ущерба.

Следует отметить, что в XX веке произошла стремительная трансформация сельского хозяйства в агропромышленное производство с механизацией и химизацией. Индустриализация агрокомплексов и ферм, широкое применение минеральных удобрений и пестицидов увеличило удельную продуктивность агроценозов, НО снизило их экологичность И экологические сельскохозяйственной продукции. Чтобы преодолеть эту тенденцию, необходим комплекс мероприятий, который, помимо требований характеристики экологизации промышленности, включает в себя дополнительно:

- ограничение использования солевых форм минеральных удобрений и замена их специально преобразованными органическими удобрениями и комбинированными органо-минеральными смесями (данную технологию иногда называют «биологическим» или «органическим» земледелием);
- минимизацию использования пестицидов и максимальную замену их биологическими средствами борьбы с вредителями;
- исключение гормональных стимуляторов и химических добавок при кормлении животных;
- осторожное применение геномодифицированных сельскохозяйственных растений и других продуктов генной инженерии;
 - максимально щадящая обработка земли.

В практике широкое распространение нашли параметрические модели оптимизации производственных процессов [6, 59], модели с учетом

неопределенности в виде нечетких множеств [80, 97, 132] или вероятностных оценок [46, 65, 66]. При этом часто приходится принимать компромиссные решения [13] и реализовывать многоэтапные модели [77]. При отсутствии параметров, влияющих на характеристики модели, большое значение имеют прикладные экстремальные задачи с интервальными и случайными оценками. В особую группу следует выделить модели, которые ориентированы на снижение негативного воздействия на окружающую среду [68, 69, 71]. Такие модели позволяют планировать мероприятия для устойчивого производства аграрной продукции, как на краткосрочную, так и на долгосрочную перспективу.

В работе [34] рассматривается эколого-экономико-математическая модель функционирования региона. В этой модели ограничения связаны с производством животноводческой и растениеводческой продукции [137]. Модель формулируется в виде многокритериальной задачи.

Ограничения по минимальному объему производства товарной растениеводческой продукции выглядят следующим образом

$$\sum_{i \in I} \sum_{t \in T} p_{idt} x_{idt} \ge S_d \quad \left(S_d \ge 0, d \in D \right), \tag{1.1}$$

где p_{idt} , S_d - заданные величины урожайности в сельскохозяйственной зоне i культуры d на земле t и требуемого объема производства растениеводческой продукции вида k в регионе; X_{idt} - искомая переменная величина, площадь угодий в сельскохозяйственной зоне i под культурой k на земле t, D —множество культур.

Ограничения по объему производства животноводческой продукции имеют вид

$$\sum_{i \in I} r_{ik} y_{ik} \ge Y_k \ (Y_k \ge 0, k \in K_2), \tag{1.2}$$

где Y_k - заданная величина объема производства животноводческой продукции вида k в регионе; \mathcal{Y}_{ik} - искомая переменная величина, количество животных вида

k в сельскохозяйственной зоне $i; r_{ik}$ - коэффициент выхода товарной продукции животноводства вида k с одной структурной головы в сельскохозяйственной зоне i, K_2 – множество видов животных.

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

$$\sum_{t \in T} p_{idt} x_{ik't} \ge \sum_{k \in K_2} h_{k'k} y_{ik} \quad (i \in I, k' \in K_1'), \tag{1.3}$$

где $h_{kk'}$ - потребность в корме на основе культуры k' животных вида k, K_1' - множество культур k'

Ограничения по площади пашни в каждой сельскохозяйственной зоне записываются в редакции

$$\sum_{d \in Dt \in T} x_{idt} \le a_i (i \in I), \tag{1.4}$$

где a_i - площадь пашни в сельскохозяйственной зоне i.

Ограничения на водозабор в основных притоках магистральной реки имеют вид

$$\sum_{i_S \in I_S} \sum_{d \in Dt \in T} q_{i_S dt} x_{i_S dt} \le T' \xi_S \left(s \in S \right), \tag{1.5}$$

где q_{i_Sdt} - оросительная норма в условиях сельскохозяйственной зоны i культуры d на земле t из притока $s;\ T'$ - количество дней вегетационного периода; ξ_S - суточный расход воды притока s.

Ограничения на водозабор из магистральной реки определены как

$$\sum_{i \in I_0} \sum_{d \in Dt \in T} q_{i_0 dt} x_{i_0 dt} \le T' \big(\xi_0 - \xi_0' \big) + \sum_{s \in S} \sum_{i_S \in I_S} \sum_{d \in Dt \in T} \Big(T' \xi_s - q_{i_S dt} x_{i_S dt} \Big), \tag{1.6}$$

где q_{i_0dt} - заданная величина оросительной нормы в условиях сельскохозяйственной зоны i_0 культуры d на земле $t; \xi_0$ - суточный расход воды в реке до прохождения плотины; ξ_0' - суточный объем воды, накапливаемый в нижнем бьефе водохранилища, x_{i_0dt} - искомая переменная величина, площадь угодий в сельскохозяйственной зоне i_0 под культурой d на земле t.

Ограничения по водному балансу представлены в виде

$$T'\xi_{0_{r}} - \left[T'\sum_{s \in S_{r}} \xi_{s} - \sum_{s \in S_{r}i_{S} \in I_{S}} \sum_{d \in Dt \in T} q_{i_{S}dt} + T'(\xi_{0} - \xi'_{0}) - \sum_{i_{0} \in I_{0_{r}}} \sum_{d \in Dt \in T} q_{i_{S}dt} x_{i_{S}dt} \right] = 0, \quad (1.7)$$

где ξ_{0_r} - суточный расход воды в магистральной реке в водомерном пункте r.

Характеристики суточного расхода воды в притоке, в магистральной реке в верхнем и нижнем бьефе водохранилища оцениваются нижними и верхними значениями: $\underline{\xi}_s \leq \xi_s \leq \overline{\xi}_s$, $\underline{\xi}_{0_r} \leq \xi_{0_r} \leq \overline{\xi}_{o_r}$, $\underline{\xi}_0' \leq \xi_0' \leq \overline{\xi}_0'$, где $\underline{\xi}_s$, $\overline{\xi}_s$ - минимально и максимально возможный объем суточный расход воды в притоке s; $\underline{\xi}_0$, $\overline{\xi}_0$ - минимально и максимально возможный объем воды, накапливаемый в верхнем бьефе водохранилища;. $\underline{\xi}_0'$, $\overline{\xi}_0'$ - минимально и максимально возможный объем воды, накапливаемый в нижнем бьефе водохранилища.

Ограничения по предельно допустимой концентрации некоторых вредных веществ в основных притоках имеют вид

$$\psi_{l_s} \xi_s + \mu_{l_s} \sum_{i_s \in I_s} \sum_{d \in Dt \in T} q'_{i_s dt} x_{i_s dt} \le W_l^* \ (l \in L, s \in S),$$
(1.8)

где ψ_{l_s} - исходная концентрация вредного вещества l в притоке s; μ_{l_s} - концентрация вредного вещества l в единице объема возвратных вод хозяйств, расположенных на территориях возле притока s; W_l^* - заданные величины предельно допустимой концентрации вредного вещества l .

Ограничения по наличию трудовых ресурсов в каждой сельскохозяйственной зоне представлены в виде

$$\sum_{d \in D} \sum_{i \in T} b_{idt} x_{idt} + \sum_{k \in K_2} b_{ik} y_{ik} \le B_i \quad (i \in I),$$

$$\tag{1.9}$$

где b_{idt} , b_{ik} - заданные величины затрат трудовых ресурсов в сельскохозяйственной зоне i на обработку 1 га культуры d на земле t и для ухода за животными вида k; B_i - трудовые ресурсы, которыми располагает сельскохозяйственная зона i [34].

Автором [34] предлагается две целевые функции.

Критерий оптимальности для сельскохозяйственного производства в регионе имеет следующий вид

$$f_1 = \sum_{i \in I_1} \sum_{d \in Dt \in T_1} c_{idt} p_{idt} x_{idt} + \sum_{i \in I} \sum_{k \in K_2} c_{ik} r_{ik} y_{ik} \to \max,$$
(1.10)

где C_{idt} , C_{ik} - приведенная прибыль, получаемая в сельскохозяйственной зоне i, соответственно с продажи 1 ц товарной продукции вида d на земле t по растениеводству и вида k по животноводству.

Экологический критерий оптимальности имеет вид

$$f_2 = \sum_{i \in I_2} \sum_{d \in D} \sum_{t \in T_2} c_{idt} l_{idt} p_{idt} x_{idt} \rightarrow \min,$$

$$\tag{1.11}$$

где l_{idt} - коэффициенты негативного воздействия экологических процессов на почву в сельскохозяйственной зоне i культуры d на земле t [54].

В работах [13, 132] представлена частная модель оптимизации сельскохозяйственного и промышленного производства в бассейне реки с наличием каскада гидростанций, регулирующим речной сток. Вода является общим ресурсом для сельскохозяйственного производства. Суточные расходы воды в основных притоках реки считаются случайными величинами, распределенными по закону Пирсона III типа. Модель связана с угрозой нарушения экологического равновесия в связи с нерациональным использованием общих природных ресурсов.

Очевидно, что эколого-экономическая оценка природных территорий помогает решать проблемы экологии и трансформации природно-ресурсного потенциала. Такие модели показывают преимущества и недостатки гармоничного развития экологической и производственной сферы [130].

Решение производственных задач, касающихся агропромышленного комплекса, с помощью моделирования может быть только частью ответов на комплекс проблем, связанный с последствиями хозяйственной деятельности в сельской местности: экологическими, природными, социальными, культурными, демографическими и другими [36, 62, 93, 114, 154, 157, 160].

В работе [1] разработана экономико-математическая модель оптимизации землепользования по структуре посевов и программируемой урожайности культур, позволяющая сохранять почвенное плодородие и экологическое равновесие, ориентированная на комплексное решение основных вопросов эффективного землепользования. В этой модели оптимизировались следующие характеристики: посевные площади зерновых культур, картофеля, овощных культур, кормовых культур и их урожайности. Ограничения модели, заложенные в условиях задачи, позволят сохранить почвенное плодородие, но для этого объемы вносимых органических удобрений придется немного повысить за счет

снижения доли минеральных удобрений. В статье [21] описаны методы экономико-математического моделирования для оптимизации землепользований сельскохозяйственных предприятий.

В исследованиях Е.С. Черновой разработан новый подход к построению математической динамической многокритериальной модели системы отраслевой структурой и многими управленческими характеристиками, которая функционирует по принципам состоятельности во времени и баланса в дискретном времени, и изучению устойчивого развития региональных социоэколого-экономических систем c использованием математического моделирования. На основе разработанного подхода, была построена модификация модели глобального развития Медоуза «Мир-3», пригодная для задачи устойчивого развития региона социо-эколого-экономической системы [142].

Выбраны следующие социальные характеристики при построении фазовых уравнений: численность населения; число умерших; число родившихся; миграционный прирост; численность населения с доходом ниже прожиточного минимума; доходы населения; удельный вес детей, обучающихся в общеобразовательных учреждениях; число больничных учреждений; число семей, состоящих на учете в качестве нуждающихся в жилых помещениях.

Набор характеристик экологической подмодели содержит: посевные площади сельскохозяйственных культур в хозяйствах всех категорий; лесовосстановление; объем сброса загрязненных сточных вод; выбросы в атмосферу загрязняющих веществ, поступающих от стационарных источников.

К характеристикам экономического развития относятся: валовой региональный продукт, валовое накопление основных фондов, производство тепловой энергии, добыча полезных ископаемых, количество убыточных предприятий и организаций [116].

В качестве общих управляющих показателей модели для всех трех отраслей рассматриваются доли бюджета региона, выделяемые ежегодно на национальную экономику, жилищно-коммунальное хозяйство, охрану окружающей среды, образование, культуру, здравоохранение и социальную политику [116].

Уравнения движения для каждой из характеристик получаются путем построения авторегрессионной модели или использования конечных разностей первого порядка [142]. Полученная модель представляет собой дискретную задачу оптимального управления со многими критериями качества.

Разработанный алгоритм решения задачи был реализован в виде программы. В целях автоматизации подобных расчетов для задачи устойчивого развития региональной социально-эколого-экономической системы в статье также предлагается реализация базы данных для хранения статистической информации Кемеровской области, на которой апробировалась модель [142].

В статье [23] рассматривается методика формирования математического базиса оценки эколого-экономической эффективности сельского хозяйства в регионе, формализованного в виде факторных моделей имитационного типа. Эколого-экономический эффект сельскохозяйственного производства предлагается рассчитывать за определенный период времени на основе сравнения результатов хозяйственной деятельности и фактических затрат производства, ущерба, причиненного сельским хозяйством окружающей среде, а также ущерба, В результате недобора продукции возникающего вследствие ухудшения качественных характеристик природной среды.

В дополнение к анализируемым моделям мы предлагаем разработку и реализацию моделей математического программирования для оптимизация сельскохозяйственного производства в условиях нарушения плодородия почв водной и ветровой эрозией и загрязнения водных и земельных ресурсов промышленными объектами и в результате использования минеральных удобрений, пестицидов и гербицидов. Подобные математические модели отражают особенности регионов, сельскохозяйственные угодья которых подвергаются воздействию эрозионных процессов и загрязнению почв. Чтобы подчеркнуть специфику таких моделей математического программирования, учитывающих экологические характеристики, предложено называть их экологоматематическими.

1.2 Оценка изменчивости производственно-экономических и природноклиматических характеристик

Процесс моделирования связан с рядом процедур, например, таких как выбор целевой функции, характеристик, описывающих производственный процесс и т.д. Эколого-математические модели сельскохозяйственного производства характеризуются комплексом характеристик [123]:

- производственно-экономические валовой сбор, урожайность, поголовье скота, объем производства молока, привес, площади сельскохозяйственных угодий, себестоимость произведенной продукции, прибыль, затраты по различным статьям расходов и другие [44, 142];
- природно-климатические среднегодовая температура, максимальные осадки за вегетационный период, скорость ветра, характеристики рельефа и другие [42].
- экологические объемы выбросов, концентрация загрязнителя, удельные выбросы, почвенные потери от водной и ветровой эрозии и другие [41].

Все перечисленные характеристики имеют различные свойства. Многие из них непосредственно или косвенно описывают эколого-математическую модель для оптимизации производства аграрной продукции [57, 58, 112]. Часть характеристик могут быть усредненными, поскольку обладают незначительными коэффициентами вариации. К ним можно отнести поголовье сельскохозяйственных животных, уровень производства молока и мяса, кормовые добавки, площади сельскохозяйственных угодий и другие.

характеризующая Другая часть характеристик, климат, эрозионные процессы, концентрации загрязнителей в почве и воде, претерпевают сильные колебания, поэтому они могут быть описаны в виде вероятностных или Между интервальных оценок. тем ряды производственно-экономических, климатических и экологических характеристик могут быть случайными или обладать значимыми автокорреляционными связями [108].

В работе [40] рассмотрена проблема выбора методов оценки характеристик математической модели функционирования экосистемы озера Байкал по

располагаемым неполным, неточным, разновременным, противоречивым данным. Для этих целей могут применяться различные методы. В этой статье представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований свойств методов оценки характеристик.

При оценке статистических параметров выборок часто используют метод моментов. Отличием метода моментов от других методов [48] является возможность получения оценок статистических характеристик по простым формулам. Расчет основных характеристик ряда осуществляется по известным выражениям (таблица 1.1), в которых y_i — значения исследуемой последовательности (i=1, 2,..., n) [108].

В таблице 1.1 приведены следующие параметры: n — объем выборки; τ - порядок сдвига, который изменяется от 0 до m (τ = 0, 1, 2,..., m); y_i — значения многолетнего ряда от y_1 до $y_{n-\tau}$; y_i^{cp} и σ_i — среднее значение и стандарт для части выборки от 1 до $n-\tau$; $y_{i+\tau}$ — значения ряда от $y_{1+\tau}$ до y_n ; $y_{i+\tau}^{cp}$ и $\sigma_{i+\tau}$ — среднее значение и стандарт для выборки размером от $1+\tau$ до n, \widetilde{C}_{ν} — коэффициент вариации по СКО, $R=y_{\rm max}-y_{\rm min}$ — размах; $y_{\rm min}$ — минимальное значение ряда; $y_{\rm max}$ — максимальное значение ряда.

Одним из недостатков метода моментов является низкая точность оценки центральных моментов с характеристиками степени равными и превышающими 3. Поэтому некоторыми авторами предложено улучшать оценки коэффициента асимметрии (третий порядок) с помощью использования значений моментов с отрицательным показателем степени [31].

В случае, когда первый коэффициент автокорреляции многолетнего ряда исследуемой характеристики составляет менее 0,3, считают, что ряд является случайным. В этом случае используются вероятностные распределения.

Статистические распределения бывают разными. В частности, по числу параметров они делятся на однопараметрические и многопараметрические.

Обычно в качестве статистических параметров используются характеристики распределительного центра, меры рассеяния и асимметрии.

Основные статистические параметры рялов, полученные метолом моментов

Таблица 1.1

Основные статистические параметры	рядов, полученные методом моментов
Показатель	Расчетная формула
1. Среднее значение	$y_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^{n} y_i}{n}$ $\sigma = \sqrt{D_x}$
2. Среднеквадратическое отклонение (СКО)	$\sigma = \sqrt{D_{_{x}}}$
3. Дисперсия	$D_{x} = \sigma^{2} = \frac{\sum_{i=1}^{n} (y_{i} - y_{cp})^{2}}{n}$ $\sigma_{H}^{2} = \frac{n\sigma^{2}}{n-1}$ $\sigma_{H} = \sqrt{\sigma_{H}^{2}}$
4. Несмещенная оценка дисперсии	$\sigma_n^2 = \frac{n\sigma^2}{n-1}$
5. Среднеквадратическое отклонение для несмещенной оценки дисперсии	
6. Среднее линейное отклонение	$l = \frac{\sum_{i=1}^{n} \left y_i - y_{cp} \right }{n}$
7. Моменты центральные: третий	$l = \frac{\sum_{i=1}^{n} y_i - y_{cp} }{n}$ $\mu_3 = \frac{\sum_{i=1}^{n} (y_i - y_{cp})^3}{n}$
четвертый	$\mu_{4} = \frac{\sum_{i=1}^{n} (y_{i} - y_{cp})^{4}}{n}$
7. Коэффициент асимметрии	$C_{s} = \frac{\mu_{3}}{\sigma^{3}}$ $C_{s}' = \frac{\sqrt{(n-1)n}}{n-2}C_{s}$
несмещенная оценка	
стандартная ошибка коэффициента асимметрии	$\sigma_{C_s} = \sqrt{\frac{6n(n-1)}{(n-2)(n+1)(n+3)}}$
8. Коэффициент автокорреляции	$R_{\tau} = \frac{\sum_{i=1}^{n-\tau} (y_i - y_i^{cp}) \cdot (y_{i+\tau} - y_{i+\tau}^{cp})}{\sigma_i \sigma_{i+\tau} (n - \tau - 1)}$
9. Коэффициент вариации с учетом автокорреляции	$C_{v} = \frac{\widetilde{C}_{v}}{\sqrt{1 - \frac{2R_{1}}{n(n-1)(1-R_{1})} \left(n - \frac{1-R_{1}^{n}}{1-R_{1}}\right)}}$

Согласно рассчитанным статистическим параметрам строят вероятностные распределения. В работе [135] описано 24 закона распределения вероятностей с основными свойствами. В статье [32] предлагаются идеи совершенствования

методов имитационного моделирования систем обработки статистических массивов.

Для оценки вероятностных характеристик эколого-математических моделей производства аграрной продукции использовались двухпараметрические и трехпараметрические законы распределения вероятностей (таблица 1.2) [47, 147].

Таблица 1.2

Плотности распределения вероятностей и критерии согласия

	ласпределения вероятностен и критерии согласия
Показатель	Расчетная формула
1. Нормальное распределение	$p(x, \overline{x}, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}e^{\frac{(x-x)^2}{2\sigma^2}}$
2. Гамма-распределение	$p(x,b,c) = \left(\frac{x}{b}\right)^{c-1} e^{-\frac{x}{b}} \frac{1}{b\Gamma(c)}$
3. Логарифмически нормальное распределение	$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\ln x}} e^{\frac{-(\ln x - \ln x)^2}{2\sigma_{\ln x}^2}}$
4. Распределение Пирсона III типа	$p(x) = \frac{\gamma^{\gamma}}{\Gamma(\gamma)(\overline{x} - l)} \left(\frac{x - l}{\overline{x} - l}\right)^{\gamma - 1} e^{-\gamma \left(\frac{x - l}{\overline{x} - l}\right)},$
5. Трехпараметрическое степенное гаммараспределение	$p(x) = \left[\frac{\Gamma(\gamma + b)}{\Gamma(\gamma)}\right]^{\gamma/b} \frac{1}{\Gamma(\gamma) b x} \left(\frac{x}{x}\right)^{\gamma/b-1} \times \exp\left\{-\left[\frac{x}{x} \frac{\Gamma(\gamma + b)}{\Gamma(\gamma)}\right]^{1/b}\right\},$ где $\frac{1}{x}$ - среднее; γ и b – параметры, связанные коэффициентами вариации C_v и асимметрии C_s ; $\Gamma(\gamma)$ - гамма-функция.
6. Критерий согласия χ_q^2	$\chi_{q}^{2} = \sum_{i=1}^{k} \frac{(m_{i} - np_{i})^{2}}{np_{i}}$
7. Критерий согласия Колмогорова	$D_{_{9}}=\max \left F_{_{9}}-F\right $

К двухпараметрическим распределениям вероятностей относятся нормальное (распределение Гаусса), бета-распределение, логистическое распределение и другие.

В таблице 1.2 x - среднее значение ряда случайных чисел x, а σ - среднее квадратическое отклонение; $c=(\overline{x}/\sigma)^2$; $b=\sigma^2/\overline{x}$; $\Gamma(c)$ - гамма-функция, определяемая с помощью интеграла $\int\limits_0^\infty t^{\alpha-1}e^{-t}dt$ для безразмерных величин ряда

статистики c и b вычисляются по формулам: $c=1/c_v^2$ и $b=c_v^2$; k — число интервалов, на которое разделено расстояние между максимальным и минимальным значениями ряда, n — объем выборки, m_i — количество значений ряда, попадающее в i-й интервал, p_i — вероятность попадания случайной величины для аналитического распределения вероятностей; параметры распределения γ и l — для распределения Пирсона III типа, связанные с коэффициентами вариации и асимметрии C_v и C_s ; γ и b — параметры для трехпараметрического степенного гамма-распределения, связанные коэффициентами асимметрии C_s и вариации C_v ; $\Gamma(\gamma)$ — гамма-функция.

Среди непрерывных функций распределения, зависящих от трех статистических параметров, популярны биномиальное распределение (закон Пирсона III типа), логарифмически нормальное и гамма-распределение. В то же время третье статистическое распределение является частным случаем первого. В отличие от закона Гаусса, гамма-распределение ассиметрично.

Нормальное распределение вероятностей применяется при описании температуры воздуха, гамма-распределение — для среднего годового расхода воды реки, трехпараметрическое степенное гамма-распределение [60] — для определения расходов воды реки, экстремальных климатических явлений, логарифмически нормальное — для описания осадков. Если асимметрия ряда большая, то для определения ливневых осадков часто применяется распределение Пирсона III типа [69]. Кроме того, этот закон используется для оценки гидрологический явлений, например, расчета годового стока.

По мере увеличения числа параметров статистическое распределение усложняется. При этом точность определения его ординат снижается из-за различной точности меры центра, рассеяния и асимметрии ряда. Центр распределения вычисляется с наименьшей ошибкой, а коэффициент асимметрии — с наибольшей. Статистические погрешности зависят от длины ряда, стандарта и распределения вероятностей. Чем больше число случайных величин и меньше

мера рассеяния, тем точнее оценка статистического параметра, т.е. меньше его ошибка [31, 126, 144].

Необходимо отметить, что коэффициенты вариации и асимметрии позволяют сделать предварительные выводы о соответствии того или иного закона распределения вероятностей.

Если $C_{\rm S}=0$, $C_{\rm S}\leq 3\sigma_{C_{\rm S}}$ или $E\leq 5\sigma_{E}$, то принимается гипотеза о соответствии нормальному распределению. В случае, когда $C_{\rm S}=C_{\rm v}^3+3C_{\rm v}$ распределение вероятностей выборки считается логарифмически нормальным, а если $C_{\rm S}=2C_{\rm v}$ - соответствует гамма-распределению [135, 144].

После вычисления статистических параметров, расчета их погрешностей и построения множества распределений вероятностей из них выбирается оптимальный вариант. С помощью критериев согласия, в частности χ^2 , Колмогорова и $n\omega^2$, определяется соответствие аналитического распределения вероятностей эмпирическим данным [19].

Если объем выборки увеличивается неограниченно $(n \to \infty)$, то случайная величина стремится к закону распределения χ^2 , который зависит от числа степеней свободы l = k - r - 1. В приведенной формуле r - число параметров вероятностного распределения. По уровню значимости α и значению l находится ордината χ^2_α . Сравнивая ее с величиной χ^2_q , оценивается расхождение между эмпирической и аналитической кривыми распределения.

Критерий К. Пирсона применим для рядов объемом более 50 значений. При этом он дает достаточно хорошие результаты при равномерном распределении точек в интервалах, если их количество соответствует условию $m_i \ge 5$.

Критерий согласия Колмогорова в отличие от критерия χ^2 основан на определении максимального расхождения между аналитической F и эмпирической F_3 функциями распределения.

При $n \to \infty$ распределение параметра $\lambda = D_{_9} \sqrt{n}$ не зависит от вида распределения вероятностей случайной величины и стремится к вероятностному

распределению Колмогорова. В результате, экспериментально вычислив значение λ , она сравнивается с критической величиной λ_{α} , где α – уровень значимости. Если $\lambda_{\alpha} \geq \lambda$ принимается гипотеза о соответствии аналитического закона распределения эмпирическим данным [126].

Некоторые авторы считают [46], что ряды, характеризующие поголовье сельскохозяйственных животных и их продуктивность, обладают высокими значимыми автокорреляционными связями и трендами, что можно использовать для моделирования ситуаций, связанных с планированием производства аграрной продукции. Считается, что в случае, когда первый коэффициент автокорреляции $R_{\tau} \ge 0.30$, то связь значимая. Если $R_{\tau} > 0.70$, то выборка имеет сильную внутрирядную связь и для прогнозирования временного ряда строится уравнение авторегрессии.

Необходимо отметить, что с увеличением сдвига τ погрешность возрастает. Поэтому при небольших значениях τ параметр R_{τ} определяется более точно, соответственно наибольшую достоверность имеет первый коэффициент автокорреляции [126, 138].

С помощью значимого уравнения авторегрессии можно получить точечный и интервальный прогноз. В авторегрессии значения выборки в данный момент линейно зависят от предыдущих значений этой же выборки.

Общий вид авторегрессионного уравнения модели имеет вид:

$$y_{\tau} = f(y_1, y_2, \dots y_{\tau-k}),$$
 (1.12)

где y_{τ} – прогнозируемое значение характеристики в τ -ом году; 1, 2, τ -k – база прогноза; k – период упреждения, в зависимости от которого прогноз может осуществляться на k лет. Авторегрессионная модель может быть линейной и нелинейной. Недостаток прогнозирования с помощью авторегрессии это – неопределенность факторов.

Значимыми авторегрессионными моделями описана изменчивость посевных площадей. Например, при описании многолетних рядов общей посевной площади Нукутского района и площади зерновых культур получены значимые линейные модели авторегрессии следующего вида:

$$y_{\tau+1} = 8148, 5 + 0,68y_{\tau},$$
 (1.13)

$$y_{\tau+1} = 6350 + 0.62_{\tau}.$$
 (1.14)

Полученные уравнения позволяют прогнозировать посевные площади с заблаговременностью 1-3 года.

С увеличением заблаговременности надежность методов прогноза, основанных на экстраполяции тенденции, снижается [145].

Кроме исследования рядов характеристик на наличие значимых автокорреляционных и авторегрессионных моделей, оценки статистических параметров необходимы для выделения во временных рядах трендов [95, 138].

Выражение вида $y_{\tau} = f(\tau)$, где $\tau = 0, 1, 2, ..., n$ — переменная времени; y_{τ} — прогнозируемое значение ряда, называют уравнением тренда. При этом вид тренда (табл. 1.3) зависит от специфики временного ряда. Например, линейная функция часто используется для рядов со стабильным приростом уровня.

Таблица 1.3

Виды трендовых функций

виды трендо	вых функции
Наименование функции	Аналитическое выражение
Степенная	$y_{\tau}=a\tau^{b}$
Показательная	$y_{\tau}=ab^{\tau}$
Парабола	$y_{\tau}=a+b\tau+c\tau^2$
Полулогарифмическая	$y_{\tau}=a+b\log \tau$
Гипербола	$y_{\tau}=a+b/\tau$
Линейная	$y_{\tau}=a+b\tau$

Линейный тип тренда описывает динамику поголовья скота, продуктивности животных, посевной площади и т.д. При этом часто применяются другие уравнения, приведенные в таблице 1.3.

Для оценки производственно-экономических, природно-климатических и экологических характеристик применимы методы вероятностной оценки и корреляционно-регрессионного анализа [145]. Они позволяют оценить случайность ряда, значимость автокорреляционных связей, трендов и факторных зависимостей. С помощью методов ретроспективного прогноза и оценки качества моделей выявляют прогностические возможности математических моделей и их использование в задачах оптимизации производственных процессов, в том числе аграрного производства [64, 65, 66, 156, 160-162, 166].

1.3 Природные и техногенные факторы, влияющие на производственные процессы

Рост населения и увеличение производства товаров для населения ведет к возрастанию техногенного воздействия на земельные и водные ресурсы. Обработка больших площадей земли, сельскохозяйственное освоение болотистых почв, использование различных методов мелиорации, строительство ирригации земель, интенсивный выпас скота и другие виды хозяйственной деятельности значительно нарушают существующий баланс биосферы, что приводит к негативным последствиям, например, водной и ветровой эрозии [8, 22, 67, 82, 104, 119, 143]. При этом задача состоит в сохранении плодородия почв [9, 33].

В последние годы значительно возрос интерес к прямым методам количественной оценки смыва-намыва почвы. Метод расчета водной эрозии предложенный американскими учеными [22] является ключевой и традиционной схемой. Для количественной оценки интенсивности водной эрозии используется значение потенциального смыва, которое представляет собой модуль смыва почвы в условиях чистого пара в тоннах на гектар в год. Предлагается применять универсальное уравнение:

$$\Im n = E \times \Pi \times P,\tag{1.15}$$

где $\Im n$ — потенциальный смыв от дождевых или талых вод; E — эрозионный индекс осадков; Π — эродируемость почв, т/га на единицу эрозионного индекса осадков; P — эрозионный потенциал рельефа. Поскольку приведенное уравнение свободно от частных, географических и климатических условий, оно считается универсальным.

Начало разработки моделей для дождевого смыва почвы связывают с работой A.W. Zing [166], в которой он по результатам дождевания приводит эмпирическую зависимость смыва почвы от уклона и длины склона. Дальнейшее исследование, проведенные в США, привели к созданию известного универсального уравнения потерь почвы [165], которое и в настоящее время широко используется. В частности, оно взято за основу при создании уравнения для расчета потерь почвы от водной эрозии в [27]:

$$A = R \times K \times L \times S \times C \times P, \tag{1.16}$$

где R - фактор эродирующей способности дождей; K - фактор податливости почв эрозии, т/га; L - фактор длины склона; S - фактор крутизны склона; C - фактор растительности и севооборота; P - фактор эффективности противоэрозионных мероприятий.

Большой вклад в изучение водной эрозии внесли ученые Одесского государственного университета Швебс Г.И. [143] и Светличный А.А. [119].

На сегодняшний день предложено большое количество методов оценки эрозионных процессов по характеристикам рельефа и данным дистанционного зондирования.

Булыгин С.Ю. с соавторами [14] предложили интегральный анализ данных дистанционного зондирования и цифровых моделей рельефа (ЦМР). В современном почвоведении количественный анализ ЦМР активно применяется для установления корреляций между отдельными почвенными характеристиками и характеристиками рельефа [37, 86, 105], оценки изменения структуры

почвенного покрова [101], построения цифровых почвенных карт [125]. Основным преимуществом предлагаемой методики является объективность выбора контуров грунтов, основанная на использовании логико-статистических моделей и методов геоинформационного анализа, а также единая процедура получения прогнозных которая позволяет обеспечить карт грунтов, повторяемость результатов картографирования [14]. Спутниковое дистанционное зондирование позволяет осуществлять картирование деградации земель вследствие эрозии почвы [163].

Согласно [72] совершенствование карт на основе новых технологий необходимо сочетать с сохранением достижений традиционной картографии.

Мальцев К. А. с соавторами [86] построили цифровую модель рельефа (ЦМР) на основе топографической карты с помощью программного продукта ArcGIS, с реализованным методом М. Хатчинсона. Для построения ЦМР был выбран шаг постоянной растровой сетки размером 5 м. Средние ошибки расположения объектов и контуров местности на карте (плане) составляют 0,5 мм. Для этого рассчитываются и используются для нахождения коэффициента местности три количественные характеристики: уклон, длина склона и площадь входного участка (S_{se}). Для расчета уклонов использовалась формула [148]:

$$S = \frac{180}{\pi} arctg \left(\sqrt{\left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2} + \sqrt{\left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2} \right), \tag{1.17}$$

где $\partial x, \partial z$ и ∂y — частные производные вдоль координатных осей. Длина склонов была оценена на основе такой характеристики, как длина линий тока. С использованием геоинформационных технологий длина линий тока может быть рассчитана различными методами [164]. В данном исследовании, для трёх моделей были вычислены характеристики S_{se} , выполнен их статистический анализ и построены гистограммы частот для следующих интервалов площади: 0-100; 100-250; 250-1000; 1000-10000; 10000-100000; более 100000 м². Расчёт смыва

проводился для условий чистого пара, обработка которой начинается летом или осенью. Были использованы базовый статистический анализ и гистограммы распределения площади пахотных земель по площади водосбора на основе карт смыва с разными бонитеровочными характеристиками смыва для сопоставления их с выведенными результатами [86]. Для создания цифровой модели рельефа используется модель ASTER GDEM v.2 [105].

Специалисты Японского международного исследовательского сельскохозяйственных наук провели исследования по выявлению эрозионных процессов с использованием спутниковых данных двух платформ: - Landsat и ALOS [163]. Был предложен метод, основанный на признаках, согласно которому каждое землепользование демонстрирует определенное временное изменение характеристик земного покрова, которое можно оценить по максимальному значению признаков, отражающих состояние поверхности. В работе используется 5 индексов: NDBSI (нормализованный разностный индекс голой почвы), NDSI (нормализованный разностный индекс почвы), NDVI (нормализованный относительный индекс растительности), LSWI (индекс поверхностных вод суши) и NDWI (нормализованный разностный водный индекс).

Потенциал потери почвы в Китае оценивался путем объединения спутниковых изображений, полевых образцов и наземных наблюдений с помощью пересмотренного универсального уравнения потери почвы [150].

Хотя во всем мире предпринимаются усилия по борьбе с эрозией почвы, существующие методы оценки эрозии почвы не обеспечивают достаточной точности на региональном уровне. В последние десятилетия было разработано множество концептуальных и эмпирических моделей для прогнозирования эрозии почв на основе оценки физических процессов. Однако большинство из них требуют больших объемов входных данных, полученных посредством экспериментов и исследований на местности.

Модели распространения вредных веществ в окружающей среде являются инструментом для количественной оценки техногенных воздействий. Особый

интерес вызывают модели, в которых помимо описания производства учитывается влияние загрязнений на окружающую среду [130, 136].

Модели загрязнения окружающей среды можно разделить на три группы: модели, описывающие загрязнение атмосферного воздуха, загрязнение почвы и загрязнение водных ресурсов. Рассмотрим некоторые модели.

Согласно источнику [102] дисперсионные модели загрязнения воздушной среды можно разделить на три группы: аналитико-эмпирические, численные и статистические. Большинство аналитико-эмпирических методов основано на общем уравнении диффузии:

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + w \frac{\partial c}{\partial z} = k_{T,x} \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + k_{T,y} \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + k_{T,z} \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} + Q(\tau, x, y, z) - ac, \quad (1.18)$$

где c - концентрация; τ — время; x,y,z — координаты; u,v — профили скорости ветра по горизонтальным координатам x,y как функция высоты z; w - скорость оседания (w<0) или всплывания $(w>0);k_{T,x},k_{T,y},k_{T,z}$ — горизонтальные (вдоль xиу) и вертикальный (вдоль z) коэффициенты турбулентной диффузии; a — константа, обуславливающая разложение примеси вследствие процессов фотосинтеза, химических реакций и т.п.; Q (τ , x, y, z) — функция источника примеси.

В настоящее время существует большое количество моделей, основанных на использовании соотношения(1.18), среди которых наиболее популярны модели Берлянда и Гиффорда. Эмпирические модели включают: модели Паскиля и Гиффорда, модели Института экспериментальной метеорологии, модель, разработанную в Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова. Большинство моделей апробированы в разных странах на государственном уровне для практического использования [24].

В основе численных моделей лежит приближенное решение общего уравнения диффузии (1.18) с использованием численных методов, при этом

предполагается задание ряда допущений, накладывающих меньше ограничений, чем аналитико-эмпирические модели. В тоже время постановка задачи моделирования становится существенно более общей, но возрастает сложность решения. Разнообразие численных моделей, используемых для расчета концентраций примесей, велико и определяется, главным образом, различиями в методах задания коэффициентов $k_{T,x}, k_{T,y}, k_{T,z}, a$. Наиболее известные модели – модели Лагранжа и Эйлера.

Численная модель Лагранжа представляет собой однослойную двухмерную модель, используемую для расчета распространения примесей:

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} = Q(\tau, x, y) - ac, \tag{1.19}$$

Численная модель Эйлера — это многослойная трехмерная модель, используемая для расчета распространения примеси, определяемая системой соотношений:

$$\begin{cases} \frac{\partial c}{\partial \tau} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} = k_{T,xy} \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \right) - ac + Q(\tau, x, y, z) \\ \frac{\partial c}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k_{T,z} \frac{\partial c}{\partial z} \right) \end{cases}$$
(1.20)

Численные модели Лагранжа и Эйлера лежат в основе большинства существующих программных продуктов, в основном зарубежных. Наиболее распространенными иностранными продуктами являются EMEP, CalPuff, AerMod, TAPM, Chimere, а из отечественных разработок – ЭПК Zone.

Распространение примесей в водной среде в целом можно описать теми же гидроаэродинамическими уравнениями, что и в атмосфере (уравнение турбулентной диффузии). Однако для конкретного водоема возникает ряд

факторов, существенно усложняющих расчеты (например, течения, характеристики русла и т. д.). Большое значение имеет учет взаимодействия сбрасываемых примесей с «принимающей» водой водоема. Поэтому органические вещества природного и антропогенного происхождения окисляются в воде за счет присутствия растворенного в воде кислорода. Также используют кислород для своих процессов жизнедеятельности потребители органического вещества — бактерии и другие гидробионты. Ввиду этого необходимо моделировать взаимосвязь между концентрацией кислорода в воде и отходах в воде [114].

При изучении загрязнения воды в качестве инструмента моделирования качества воды используется модель Стритера-Фелпса. Модель описывает процесс уменьшения растворенного кислорода в реке или ручье на определенном расстоянии в результате снижения биохимической потребности в кислороде [130].

Уравнение Стритера-Фелпса определяет соотношение между концентрацией растворенного кислорода и биологической потребностью в кислороде с течением времени и является решением линейного дифференциального уравнения первого порядка:

$$\frac{dD}{dt} = k_1 L - k_2 D,\tag{1.21}$$

где L — биохимическое потребление кислорода (БПК), мг/дм³; D — дефицит кислорода в воде вследствие загрязнения, мг/дм³; k_1 — скорость потребления кислорода на разложение отходов, вследствие выбора единиц измерения она равна скорости разрушения отходов, 1/сут; k_2 — скорость реаэрации, 1/сут.

Это дифференциальное уравнение утверждает, что общее изменение дефицита кислорода (D) равно разнице между двумя скоростями дезоксигенации и повторной аэрации в любой момент времени.

Уравнение Стритера—Фелпса, предполагающее, что поток скорости потребления кислорода на разложение отходов постоянно, выглядит следующим образом:

$$D = \frac{k_1 L_0}{k_2 - k_1} (e^{-k_1 t} - e^{-k_2 t}) + D_0 e^{-k_2 t}, \qquad (1.22)$$

где L_0 - биохимическое потребление кислорода (БПК), мг/дм 3 ; D_0 -дефицит кислорода в начальный момент времени количественно обусловлен источниками загрязнения, расположенными выше по течению реки.

Если концентрация кислорода падает ниже некоторого критического уровня, начинают гибнуть организмы (рыбы, ракообразные и другие), обитающие в водной среде. Таким образом, может инициироваться цепочка событий, которая способна привести к необратимым последствиям гибели нормальной экологической жизнедеятельности водоема. Максимальный дефицит кислорода $D_{\rm max}$ можно определить, приравнивая к нулю производную D'(t)=0. Отсюда получим:

$$D_{\text{max}} = L_0 \frac{k_1}{k_2} \left[\frac{k_2}{k_1} \left(1 - \frac{D_0 (k_2 - k_1)}{k_1} \right) \right]^{\frac{k_1}{k_1 - k_2}}.$$
 (1.23)

Время t связано с расстоянием x от места сброса. В случае, если V — скорость течения реки, то x = Vt. Тогда D_0 — начальное понижение концентрации, обусловленное наличием заводов в верхнем течении реки.

Таким образом, необходимо соответствие экологическому критерию безопасности жизнедеятельности водных организмов:

$$D_{\text{max}} \le D_{\text{lim}} \tag{1.24}$$

Описанная модель позволяет оптимизировать схему сброса корпоративных органических отходов в водоем.

В работе [74] модель качества воды разработана для оценки прогноза физических, химических и биологических взаимодействий многих компонентов и организмов, находящихся в природной водной среде. Кроме того, модель качества воды учитывает перемешивания загрязнений в водной среде. Главной целью большинства региональных моделей управления водными ресурсами является проверка способов, которые должны уменьшить как затраты, так и ущербы, связанные с загрязнением воды [130].

В [114] описана универсальная система гидрологического моделирования МІКЕ SHE, в основу которой положена модель Европейской гидрологической системы SHE (System Hydrologique European — Разработчик — DHIWater&Environment (Дания)). МІКЕ SHE является физико-математической моделью с распределенными характеристиками. Модель учитывает задержание осадков растительностью, эвапотранспирацию, снеготаяние, склоновый и русловой сток, движение воды в ненасыщенной и насыщенной зонах, миграцию загрязняющих веществ с сельскохозяйственных угодий.

Необходимо отметить работу [74], где рассмотрено загрязнение и очищение водотоков вследствие эрозии. Изучена взаимозависимость современной морфологии склонов и их эродируемости и её влияние на загрязнённость водных объектов. В зависимости от эродируемого участка или территории процесс может оказывать двоякое влияние на загрязнение водного объекта. Механизм переноса загрязнителей самоочищения определяется морфометрическими И гидрологическими характеристиками и гидрохимическим режимом водоёма, видами техногенного воздействия. Особая роль в процессах самоочищения рек принадлежит пойменным территориям.

В России большой вклад в направление оценки загрязнения атмосферы и подстилающей поверхности пассивными и активными примесями с помощью математических моделей внесли работы школы академика Г.И. Марчука. Модели такого типа широко используются в Европе и США при разрешении судебных

исков, предъявляемых населением или местными властями промышленным предприятиям в связи с нанесением определенного ущерба. В России в качестве основного документа для экономической оценки загрязнения используется [28].

Отметим работу [2], которая посвящена описанию математических моделей, разработанных авторами, для решения задач охраны атмосферы, гидросферы и подстилающей поверхности. В качестве гидродинамической основы используются трехмерные нестационарные модели мезомасштабных процессов в атмосфере и стратифицированных водоемах. В уравнениях переноса примесей учитываются химические реакции.

При решении задач, связанных с распространением атмосферных примесей антропогенного происхождения, возникает необходимость математического моделирования процесса переноса загрязнителя с целью определения накопления тяжелых частиц на подстилающей поверхности. Особенности поведения тяжелых примесей определяются наличием у них собственной скорости оседания, часто превышающей вертикальную скорость движения среды.

Количество выпавших на единицу площади взвесей за интервал времени Δt можно записать

$$\Pi_{\Delta t}(x_i, y_i) - \Pi(\rho, \theta, R_{ij}) \Delta t F(\rho, \theta),$$
 (1.25)

где
$$\Pi(\rho,\theta,R_{ij})=\sum_{k=1}^K\Pi(\rho,\theta,R_{ijk});\ \Pi(\rho,\theta,R_{ijk})=\sum_{k=1}^KS_k;\ F(\rho,\theta)$$
 - функция распределения вектора скорости; ρ - полярная координата; θ - полярный угол; K - количество источников; R_{ijk} - расстояние от источника k до расчетной точки $(x_i,y_j);\ S_k$ — решение в полярной системе координат; M_k - интенсивность источника; n — безразмерный коэффициент для интерполяции вертикального профиля скорости ветра; H — высота точечного источника:

$$s_{k}(\rho,\theta,R_{ij}) = \frac{A_{k}\rho^{\lambda_{1}} \exp(-\frac{R_{ijk} \sin^{2}\theta}{4k_{0}\cos 2\theta} - L_{k}\frac{\rho}{R_{ijk}\cos\theta})}{(k_{1}R_{ijk}\cos\theta)^{\lambda_{2}}\sqrt{\pi k_{0}R_{ijk}\cos\theta}};$$

$$A_{k} = \frac{M_{k}z_{1}^{\lambda_{1}+\lambda_{2}}}{2(1+n)^{\lambda_{1}+\lambda_{2}} - \Gamma(\lambda_{2})}; L_{k} = \frac{H^{1+n}z^{1-n}}{k_{1}(1+n)^{2}}.$$
(1.26)

В случае, когда источники примеси достаточно удалены от точки, для которых рассчитывается выпадение взвесей (наибольшее расстояние между источниками много меньше расстояния от источников до расчетной точки), можно объединить все источники в один, положение которого в пространстве определяется по принципу центра тяжести.

Что же касается оценки загрязнения почв, то в большинстве экологических проблем используются незначительное число количественных характеристик предельно допустимых содержаний и концентраций (ПДС и ПДК) вредных веществ во всех природных средах с указанием диапазонов содержаний [29].

Однако вопрос о предельно допустимых концентрациях тяжелых металлов и других загрязнителей в почвах находится лишь в стадии разработки. Отмечается, что унифицированные уровни загрязняющих веществ в почвах не могут быть установлены. Они неизбежно должны сильно варьировать в зависимости от конкретной экологической ситуации, в том числе от свойств почвы, климатических условий, вида растительности; на пахотных землях - от вида и сорта культур, системы агротехники и удобрений и т.д.

Переменные мониторинга почв обладают качественными характеристиками, непосредственно связанными со структурой загрязнения и изменяются в пространстве.

Пространственные переменные нельзя рассматривать как случайные величины, изучаемыми методами статистики. Во-первых, отсутствует теоретическая возможность бесконечного повторения опыта в точке отбора проб, где случайная величина приобретет то же значение. Можно повторить взятие

пробы в непосредственной близости, но это не будет то же самое испытание. Вовторых, результат взятия пробы может быть зависимой величиной. Например, если проба берется в аномальной зоне содержания загрязнителя, в непосредственной близости от предыдущей, то результат загрязнения также будет высоким.

Для оценки природных и техногенных факторов применимы методы вероятностной оценки и корреляционно-регрессионного анализа. При расчете эрозионных потерь нередко используют методы оценки с помощью рельефных данных и дистанционного зондирования.

В связи с фрагментарными наблюдениями за состоянием загрязнения вредными веществами почвы и воды для решения задач эколого-математического моделирования эти характеристики могут быть определены в виде усредненных значений за последние годы при наличии данных, либо в виде интервальных оценок [47].

1.4 Формализация задачи эколого-математического моделирования производства аграрной продукции

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 гербицидов. Для таких условий пестицидов 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: [54]:

$$f = \sum_{i \in I} (1 - l_i) c_i p_i x_i + \sum_{i \in I} (1 - l'_i) c'_i p'_i x'_i + \sum_{k \in K} c_k r_k y_k + \sum_{j \in J} (1 - \alpha_j) g_j \rho_j z_j + \sum_{j \in J} (1 - \alpha'_j) g'_j \rho'_j z'_j \rightarrow \max, \quad (1.27)$$

Искомыми 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

$$(1-l_i)p_ix_i + (1-l_i')p_i'x_i' \ge S_i, (1.28)$$

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

Ограничения по заданному объему производства животноводческой продукции имеют вид

$$r_k y_k \ge Y_k, \tag{1.29}$$

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

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

$$\sum_{j \in J} (1 - \alpha_j) \beta_{\theta_j} \rho_j z_j + \sum_{j \in J} (1 - \alpha'_j) \beta_{\theta_j} \rho'_j z'_j \ge \sum_{k \in K} \mathbf{B}_{\theta_k} y_k \quad (\theta \in \Theta),$$

$$(1.30)$$

где $B_{\theta k}$ - минимальная потребность в элементе питания m 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

$$\sum_{i \in I} x_i + \sum_{j \in J} z_j \le a,\tag{1.31}$$

$$\sum_{i \in I} x_i' + \sum_{i \in I} z_j' \le a',\tag{1.32}$$

где $a\left(a'\right)$ - площадь пашни на неорошаемых (орошаемых) землях (га).

Ограничения по наличию трудовых ресурсов имеют вид

$$b_i x_i + b_i' x_i' \le B_i, \tag{1.33}$$

$$\zeta_j z_j + \zeta_j' z_j' \le Z_j, \tag{1.34}$$

$$\varepsilon_k y_k \le E_k,$$
 (1.35)

где b_i , ζ_j (b_i' , ζ_j') - затраты трудовых ресурсов на обработку 1 га неорошаемых (орошаемых) земель (чел. ч/га); \mathcal{E}_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:

$$\sum_{i \in I} \varphi_{in} x_i + \sum_{i \in I} v_{in} x_i + \sum_{j \in J} v_{jn} z_j + \sum_{j \in J} o_{jn} z_j \le \Omega_n \quad (n \in N),$$
(1.36)

$$\sum_{i \in I} \varphi'_{in} x'_i + \sum_{i \in I} \nu'_{in} x' + \sum_{j \in J} \nu'_{jn} z'_j + \sum_{j \in J} \rho'_{jn} z'_j \le \Omega'_n \quad (n \in N),$$
(1.37)

где φ_{in} , \mathcal{O}_{jn} (φ'_{in} , \mathcal{O}'_{jn}) - исходная концентрация вредного вещества n на неорошаемых (орошаемых) землях (мг/м³/га); вредное вещество n с концентрацией V_{in} , \mathcal{O}_{jn} (V'_{in} , \mathcal{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.

Ограничения на водозабор в реке имеют вид

$$\sum_{i \in I} q_i x'_i + \sum_{j \in J} \iota_j z'_j \le T' \xi, \tag{1.38}$$

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

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

$$\psi_n T'\xi + \mu_n \sum_{i \in I} \left[(q_i + \lambda)x'_i + \lambda x_i \right] + \mu'_n \sum_{j \in J} \left[(\iota_j + \lambda)z'_j + \lambda z_j \right] \le W_n \quad (n \in N), \quad (1.39)$$

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).

Ограничение на почвенные потери от водной и ветровой эрозии на неорошаемых и орошаемых землях имеет вид:

$$\sum_{i \in I} RU_i D_i V_i C_i P_i x_i + \sum_{j \in J} RU'_j D'_j V'_j C'_j P'_j z_j + \sum_{i \in I} M_i T x_i + \sum_{j \in J} M'_j T z_j \le \eta, \quad (1.40)$$

$$\sum_{i \in I} RU_i D_i V_i C_i P_i x_i' + \sum_{j \in J} RU_j' D_j' V_j' C_j' P_j' z_j' + \sum_{i \in I} M_i T x_i' + \sum_{j \in J} M_j' T z_j' \le \eta', \qquad (1.41)$$

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 (1.40)-(1.41) используются нормативные методики.

Условие неотрицательности переменных

$$x_i, z_j, x_i', z_j', y_k \ge 0.$$
 (1.42)

Особенностью разработанной эколого-математической модели оптимизации производства аграрной продукции (1.27) — (1.42) является оценка ущербов от негативного влияния техногенных и природных факторов. Ущербы окружающей среде включены в качестве коэффициентов негативного влияния в критерий оптимальности и ограничения по объемам производства аграрной продукции. Разработан алгоритм по определению этих коэффициентов.

В [110] ущерб от загрязнения земель предлагается рассчитывать умножением нормативной стоимости сельскохозяйственных земель на площади загрязненных земель и на коэффициенты, характеризующих степень загрязнения земель, экологическую значимость территории, глубину загрязнения земель. Трудность определения коэффициентов негативного влияния заключается в нахождении площади загрязненных земель, глубины загрязнения земли и определении степени загрязненности земель, т. к. для этого необходимо наличие данных о концентрациях загрязняющих веществ на одних и тех же территориях за многолетний период.

Площади, глубина загрязнения земель, содержание и концентрация химических веществ определяются на основании материалов по обследованию земель, лабораторных анализов согласно соответствующим нормативным и методическим документам.

Помимо оценки загрязнения земельных ресурсов во многих случаях необходимо определить деградацию почв, связанную с технологическим нарушением, физическим (переуплотнение, утаптывание, изменение рельефа), агроистощением (уменьшение запасов гумуса, снижение или полная потеря плодородия); эрозией (промоины, овраги, опустынивание); засолением (засоление, осолонцевание; заболачивание).

В работе [99] для расчета ущерба от деградации почв используются следующие характеристики: норматив стоимости сельскохозяйственных земель, годовой доход с единицы площади, площадь деградированных земель, коэффициент экологической ситуации территории, коэффициент пересчета в зависимости от периода времени по восстановлению деградированных почв и земель, коэффициент пересчета, связанный с изменением степени деградации почв и земель.

Методика анализа состояния почв и водных объектов применима для оценки ущерба предприятия. При этом затраты на исследования несет само предприятие. Для расчета ущербов, например, по району или предприятию, которое не имеет возможности проведения дорогих проб и полевых расчетов эта методика является дорогостоящей, поэтому для оценки ущерба от загрязнения и деградации земель можно использовать данные статистических сборников, агрометеорологическую информацию, отчеты организаций, оценки состояния окружающей среды, авторские исследования и другие источники.

Иными словами, негативное влияние деятельности человека И гидрометеорологических явлений на почвенную И водную среду при сельскохозяйственном производстве можно оценить с помощью коэффициентов, которые учитывают: водную, ветровую эрозию и загрязненность почв вредными веществами.

В зависимости от наличия информации о загрязненности и эродированности почв предлагается несколько методов нахождения данного коэффициента.

коэффициента Первым способом нахождения негативного влияния техногенных и природных процессов на почву является определение соотношения загрязненной площади или эродированных земель К общей площади определенного участка, хозяйства, района или уменьшение объемов продукции на загрязненном и эродированном участке относительно общей площади. Нередко для определения этого коэффициента используют экспертные оценки.

Часто возникают случаи, когда нет информации по уровню эрозии и загрязненности вредными веществами земель сельскохозяйственных предприятий, тогда предлагается использовать данные муниципальных районов с последующей экстраполяцией.

В частности, на основании данных карты эродированности почв Иркутской области [62] и методики определения размеров ущерба от деградации и загрязнения земель выделено 5 групп районов по степени эродированности почвы и коэффициенты, соответствующие им (таблица 1.4).

Таблица 1.4 Коэффициенты негативного влияния, характеризующие эрозию почвы (l_9)

	1 1 '			bearing, respectively respective to the result (vg)	
	Степень		$l_{\scriptscriptstyle 9}$	Районы	
Э	эродированности		max	1 dholibi	
				Братский, Нижнеудинский,	
1	Очень слабая	0		Тайшетский, Тулунский, Усть-Илимский,	
	O Terrib estadous			Чунский	
2	Слабая	0,11	0,20	Зиминский, Киренский, Нижнеилимский	
	Средняя			Ангарский, Боханский, Жигаловский,	
3		0,21	0,30	Заларинский, Иркутский, Качугский,	
	_			Куйтунский, Черемховский	
				Аларский, Балаганский, Баяндаевский,	
4	Сильная	0,31 0,4	0,40	Нукутский, Ольхонский, Усольский, Усть-	
				Удинский, Эхирит-Булагатский	
5	Очень сильная	0,41	0,50	Осинский	

В работе [82] приведены характеристики устойчивости различных агротехнических фонов к водной эрозии и дефляции (таблица 1.5).

Коэффициент эродированности почвы, полученный по карте, предлагается корректировать умножением на характеристику устойчивости различных агрофонов к ветровой и водной эрозии.

Таблица 1.5 Коэффициенты устойчивости почвенного покрова при возделывании сельскохозяйственных культур по М.И. Лопыреву (l_a)

	J = J = I = J = I = J = I
Культура	Коэффициент
Пар	1,00
Озимые культуры	0,30
Многолетние травы	0,03
Яровые злаки с подсевом	0.20
многолетних трав	0,20
Яровые зерновые	0,40
Кукуруза	0,60
Однолетние травы	0,30

Согласно информации о предельно допустимых концентрациях вредных веществ, их фоновом содержании в почве по районам Иркутской области [93] и методике определения ущерба от загрязнения вредными веществами почвы проведено районирование региона по уровням загрязненности почв (таблица 1.6).

Коэффициенты негативного влияния, связанные с загрязнением почвы (l_3)

Таблица 1.6

	Коэффициенты негативного влияния, связанные с загрязнением почвы (l_3)							
No	Степень	l_3	$l_{\scriptscriptstyle 3}$	Районы				
п.п.	загрязненности	min	max	1 айоны				
				Аларский, Балаганский, Баяндаевский,				
				Боханский, Жигаловский, Заларинский,				
1	П		0	Зиминский, Качугский, Куйтунский,				
1	Допустимая	U		Нукутский, Ольхонский, Осинский,				
				Тайшетский, Тулунский, Усть-Удинский,				
				Чунский, Эхирит-Булагатский				
	Очень слабая			Ангарский, Братский, Иркутский,				
2		0,11	0,20	Киренский, Нижнеудинский, Усольский,				
				Черемховский, Шелеховский				
3	Средняя	0,21	0,30	-				
4	Сильная	0,31	0,40	-				
5	Очень сильная	0,41	0,50	-				

На рисунке 1.1 приведена схема последовательных операций по определению коэффициента негативного влияния природных и техногенных факторов на почву и водную среду. В этой схеме x_3 , x_3 (z_3 , z_3)— площади

эродированных, загрязненных земель относительно сельскохозяйственных площади угодий x_o (z_o) под культурами для товарной продукции (кормовыми культурами) [68].

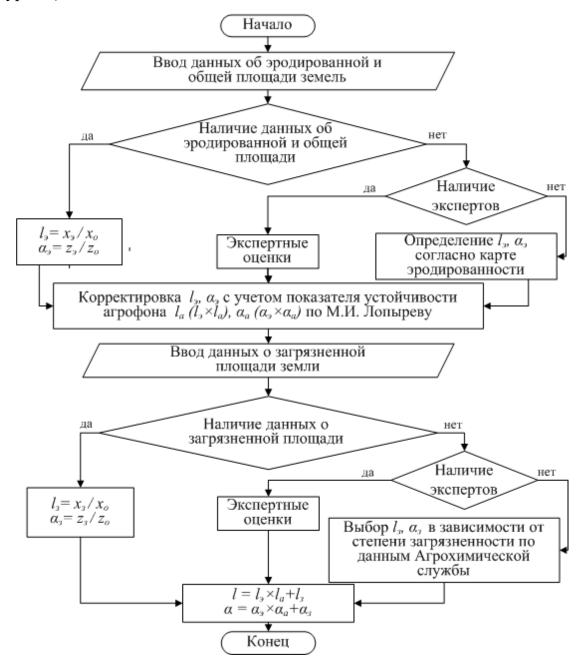


Рис. 1.1 Схема оценки коэффициентов негативного влияния природных и техногенных факторов на окружающую среду

На первом этапе находится коэффициент эродированности почв под культурами для товарной продукции (кормовыми культурами) $l_{\scriptscriptstyle 9}$ ($\alpha_{\scriptscriptstyle 9}$). 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 можно использовать экспертные оценки или репрезентативные данные согласно карте эродированности.

Вторым шагом алгоритма является корректировка l_3 (α_3) умножением на характеристику устойчивости различных агротехнических фонов к эрозии и дефляции l_a (α_a). Третий этап включает в себя нахождение коэффициента загрязненности почв l_3 (α_3). Он определяется аналогично l_3 (α_3), 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 $l_{{\scriptscriptstyle H}{\scriptscriptstyle B}}$ ($\alpha_{{\scriptscriptstyle H}{\scriptscriptstyle B}}$) предлагается рассчитывать путем сложения коэффициентов, характеризующих эродированность почв $l_{{\scriptscriptstyle 9}}$ ($\alpha_{{\scriptscriptstyle 9}}$) и загрязнённость вредными веществами $l_{{\scriptscriptstyle 3}}$ ($\alpha_{{\scriptscriptstyle 3}}$). Этот коэффициент, характеризующий загрязнение площадей разных культур, выращенных на неорошаемых и орошаемых землях (l_{i} , $\alpha_{{\scriptscriptstyle j}}$,(l'_{i} , $\alpha'_{{\scriptscriptstyle j}}$), используется в модели (1.27) – (1.42).

Из приведенной общей эколого-математической модели (1.27)-(1.42) можно сформировать задачу оптимизации производства отдельно по отраслям – растениеводство, животноводство [41, 54].

В зависимости от использования орошения нами предложены три группы эколого-математических моделей оптимизации производства аграрной продукции (рис. 1.2):

- неорошаемое земледелие;
- орошаемое земледелие;
- смешанное (неорошаемое и орошаемое) земледелие.

Кроме того, при моделировании производственных процессов необходимо учитывать неопределенность многих характеристик. Это обусловлено наличием огромного числа факторов, влияющих на сельское хозяйство. Как правило, детерминированные модели описывают некую усредненную ситуацию производства сельскохозяйственной продукции. Очевидно, что более близки к отображению реальных ситуаций модели оптимизации сельскохозяйственного производства со случайными и интервальными оценками [137].



Рис. 1.2 Классификация эколого-математических моделей с учетом различных видов земледелия, техногенного и природного воздействия, неопределенности характеристик

Большое влияние на плодородие почв оказывают техногенные и природные явления. В Иркутской области особо следует отметить усиливающееся развитие эрозионных процессов и загрязнение почвы тяжелыми металлами.

В регионе в наиболее освоенном в земледельческом отношении Усть-42% Ордынском Бурятском округе эрозией затронуто около сельскохозяйственных угодий. Здесь развиты водная и ветровая эрозии, нередко совместно. Среднегодовые потери проявляющиеся почв otэрозии на сельскохозяйственных землях меняются от 0,4 до 56 т/га в зависимости от геоморфологических условий и типа почв.

В дополнение к развитию эрозионных процессов почвы региона загрязнены свинцом, цинком, медью, фтором, нефтепродуктами и другими загрязнителями. Наиболее проблемными остаются территории, прилегающие к городам: Свирск, Слюдянка, Шелехов, Усолье-Сибирское, Черемхово и Братск [54].

Эрозия почвы и 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.

По отраслевому признаку эколого-математические модели оптимизации производства аграрной продукции подразделяются на растениеводческие, животноводческие и модели для сочетания отраслей. Автором приведены модели для сочетания отраслей, из которых можно получить модели оптимизации производства растениеводческой или животноводческой продукции.

В зависимости от признаков техногенного и природного воздействия, отрасли, неопределенности характеристик и вида земледелия формулируется задача оптимизации сельскохозяйственного производства, соответствующая реальным ситуациям. В работах [34, 41, 44, 45, 47, 49, 54, 56-58, 68-71, 137, 138, 152, 153] приведены эколого-математические модели производства сельскохозяйственной продукции, учитывающие техногенное и природное воздействие на почву, разработанные автором в соавторстве с другими исследователями.

Выводы по главе 1

- 1. Проанализированы модели оптимизации производства аграрной продукции с учетом воздействия природных и техногенных процессов на деятельность сельскохозяйственных товаропроизводителей в условиях развития в регионах страны орошаемого земледелия.
- 2. Приведены методы статистической оценки изменчивости производственно-экономических, природно-климатических и экологических

характеристик, которые описывают коэффициенты и правые части моделей оптимизации аграрной продукции.

- 3. Рассмотрены методы оценки природных и техногенных факторов, характеризующих эрозию почвы, загрязнение сельскохозяйственных угодий и водных ресурсов, что способствует негативному влиянию на производственные процессы.
- 4. Автором поставлена и формализована задача эколого-математического моделирования производства аграрной продукции и предложены ее разные варианты с учетом видов земледелия, отраслей, техногенного и природного воздействия, неопределенности коэффициентов и правых частей ограничений [54].

2 ЭКОЛОГО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПРОДУКЦИИ С НЕОПРЕДЕЛЕННЫМИ ОЦЕНКАМИ

2.1 Оценка производственно-экономических характеристик

Основными отраслями аграрного производства являются растениеводство и животноводство. В растениеводстве выращивается множество сельскохозяйственных культур. Основными зерновыми культурами являются пшеница, ячмень и овес [131]. При этом эти культуры предназначены для фуража и пищевых нужд. Кроме этого, на территории Иркутской области выращиваются различные виды овощей. В общей сложности с полей региона получают продукцию около 40 культур [39].

В основном выращиванием зерновых занимаются сельскохозяйственные предприятия и организации. Производство картофеля и овощей характерно для крестьянских (фермерских) хозяйств и личных подсобных хозяйств [131], хотя в последние годы они увеличили производственные объемы зерновых культур.

Количество производимой товарной продукции и кормов животным зависит в большей степени от урожайности. Урожайность сельскохозяйственных культур является основным фактором, который определяет экономическую характеристику производства продукции растениеводства [4, 5, 43, 54, 109, 113].

Рассмотрим особенности изменчивости характеристик, описывающие отрасли растениеводства и животноводства в природно-климатических условиях Иркутской области. Согласно формулам, приведенным в таблице 1.1, оценивались урожайности статистические характеристики многолетних рядов сельскохозяйственных культур: среднее значение (p_i) , коэффициент вариации (C_v) , коэффициент асимметрии (C_s) , отношение (C_s/C_v) и коэффициент детерминации (R^2) . Урожайность сельскохозяйственных культур величиной, которая может быть описана с помощью вероятностных законов случаях урожайности распределения [131]. Bo многих ряды сельскохозяйственных культур подчинены нормальному и логарифмически нормальному закону распределения [45, 108].

В работе [108] исследована урожайность 14 видов сельскохозяйственных культур за 1996-2012 гг. по различным муниципальным районам и агроландшафтным зонам Иркутской области по всем категориям хозяйств. На основе статистического анализа многолетних рядов урожайности различных групп и видов культур сделан вывод, что для описания изменчивости рядов применяются различные модели: функции распределения; авторегрессии и тренды; факторные зависимости.

Отметим, что в некоторых случаях ряды урожайности сельскохозяйственных культур подчиняются в основном распределению Гаусса, реже — гамма-распределению и логарифмически нормальному. В то же время для некоторых рядов урожайности выявлены значимые тренды и авторегрессионные зависимости.

В частности, анализ рядов биопродуктивности зерновых, однолетних и многолетних трав в Нукутском районе за 2000-2018 гг. показал, что они имеют низкие коэффициенты автокорреляции, поэтому можно считать ряды случайными. На рис. 2.1 приведены законы распределения вероятностей, которым подчиняются урожайности, где F — вероятность события и K_F — модульный коэффициент [56].

В результате статистического анализа выборки биопродуктивности по муниципальным районам Иркутской области были получены разные модели. Проверка на качество выявила, что некоторые из них не пригодны для прогнозирования. В случаях, когда для одной и той же характеристики имеются несколько моделей, выбирается та из них, которая наиболее точно описывает изучаемую выборку. Для оценки урожайности культур Нукутского района предлагается использовать нормальное и гамма-распределение.

Перейдем к рассмотрению следующей характеристики растениеводческой продукции - посевной площади сельскохозяйственных культур.

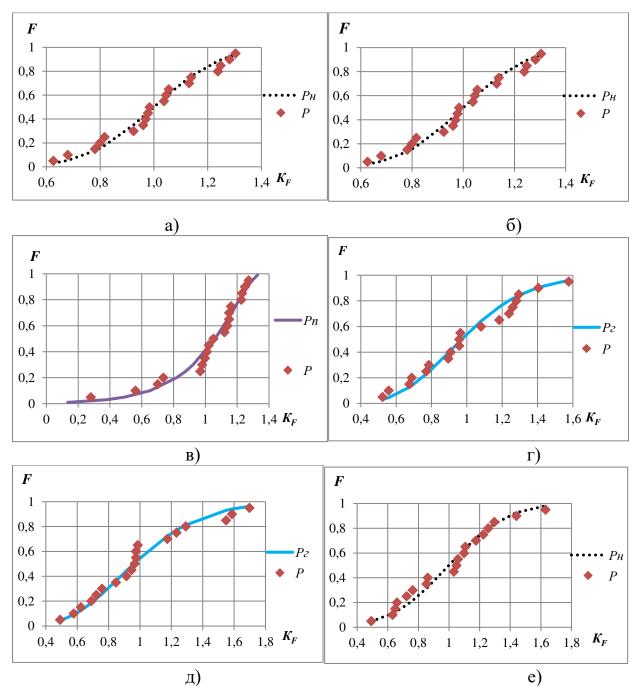


Рис. 2.1 Эмпирическая (F) и аналитические функции (Fn - нормальный закон, Fe - гамма-распределение, Fn - распределение Пирсона III типа) урожайности в Нукутском районе по данным за 2000-2018 гг. а) зерновые б) однолетние травы на зеленый корм в) однолетние травы на сено г) многолетние травы на сено д) многолетние травы на зеленый корм е) силосные культуры

На рис. 2.2 приведена динамика посевной площади по Нукутскому району. В приведенных функциях общего вида y_{τ} , $y_{\tau+1}$ – предшествующее и последующее значения характеристики, τ – годы. Согласно критерию Фишера полученные

выражения значимы. При этом точность оценена значением коэффициента детерминации \mathbb{R}^2 .

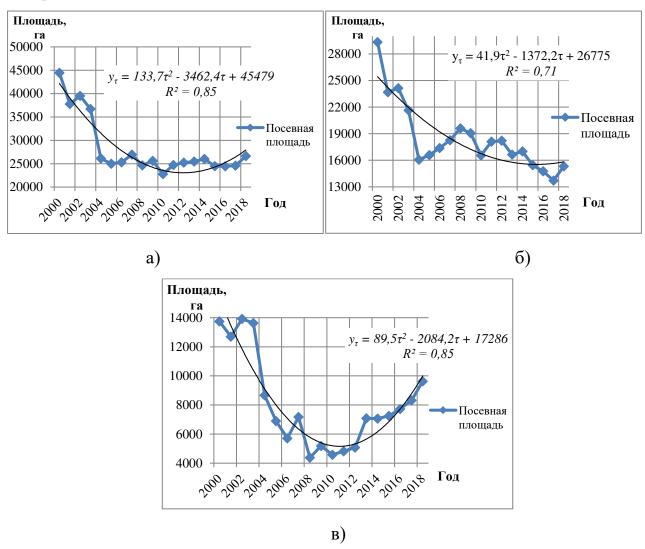


Рис. 2.2 Динамика посевной площади в Нукутском районе за 2000-2018 гг.

а) общая посевная площадь б) зерновые в) кормовые культуры

В Нукутском районе за рассматриваемый период наблюдается сокращение посевной площади, однако, с 2004 года посевная площадь остается примерно на одном уровне, а с 2010 г. наблюдается увеличение площади кормовых культур. Ряды посевной площади в Нукутском районе характеризуются высоким коэффициентом автокорреляции, близким к 1.

В таблице 2.1 приведены авторегрессионные уравнения $y_{\tau+1} = f(y_{\tau})$ и тренды $y_{\tau} = f(\tau)$, характеризующие изменчивость исследуемых характеристик, где τ – время, R^2 — коэффициент детерминации.

Таблица 2.1 Уравнения, описывающие изменчивость посевной площади в Нукутском районе, по данным 2000-2018 гг.

No	Vonovenonvonven	Авторегрессия		Тренд		
п.п.	Характеристика	Уравнение <i>R</i> ²		Уравнение	R^2	
1	Общая посевная площадь	$y_{\tau+I} = 8148, 5 + 0, 68y_{\tau}$	0,75	$y_{\tau} = 45479 - 3462, 4\tau + 133, 7\tau^2$	0,85	
2	Площадь зерновых культур	$y_{\tau+I} = 6350 + 0.62y_{\tau}$	0,69	$y_{\tau} = 26775 - 1372, 2\tau + 41, 9\tau^2$	0,71	
3	Площадь кормовых культур	$y_{\tau+1}=1509,3+0,78y_{\tau}$	0,72	$y_{\tau} = 17286 - 2084\tau + 89,5\tau^2$	0,85	

Точность прогнозов с помощью авторегрессионных и трендовых моделей, определялась согласно ретроспективному прогнозу (таблица 2.2) для различных значений сдвига (τ) и заблаговременности [45].

Полученные результаты позволили сделать вывод, что характеристики посевной площади можно прогнозировать с помощью трендов и авторегрессионных уравнений с заблаговременностью 1 - 3 года. Проверка адекватности моделей подтверждается случайностью остатков ряда [45].

Отрасль животноводства непосредственно связана с отраслью растениеводства. Кормовой базой животноводства являются сенокосы, пастбища. Кормом для животных служат однолетние и многолетние травы на сено, силос, зерновые культуры, корнеплоды, отходы пищевой промышленности.

Крупный рогатый скот составляет основу животноводства, имеет молочное и мясомолочное направления. С каждым годом личные подсобные хозяйства области увеличивают производство мяса и надои молока. Свиноводство - отрасль животноводства, способная в короткие сроки дать населению высококалорийное мясо. Овцеводство концентрируется в южных степных районах Иркутской области [17]. Птицеводство — быстро развивающаяся отрасль хозяйства в Иркутской области.

В одном из районов Иркутской области, где развито скотоводство (Нукутский район), наблюдается тенденция к увеличению поголовья скота.

Таблица 2.2 Ретроспективный прогноз посевной площади, полученный с помощью авторегрессионных и трендовых моделей по данным Нукутского района за 2000-2018 гг.

3a 2000-2010 11.								
No	Характеристика	Фактическое	Прогноз		Отклонение от фактических данных, %			
п.п		значение	авторегрессия	тренд	авторегрессия	тренд		
	$\tau = 1$							
1	Общая посевная площадь	26634	24855	28762	-6,7	8,0		
2	Площадь зерновых культур	15327	14856	16141	-3,1	5,3		
3	Площадь кормовых культур	9633	-	10241	-	6,3		
			$\tau = 2$					
4	Общая посевная площадь	26634	24994	30890	-6,2	16,0		
5	Площадь зерновых культур	15327	15960	-	4,1	-		
6	Площадь кормовых культур	9633	-	-	-	-		
			$\tau = 3$					
7	Общая посевная площадь	26634	25144,3	-	-5,9	-		
8	Площадь зерновых культур	15327	16245,2	-	5,7	-		
9	Площадь кормовых культур	9633	-	-		-		

На рис. 2.3 показана динамика поголовья скота по Нукутскому району.

В СХАО «Приморский», передовом предприятии рассматриваемого района, производство животноводческой продукции имеет большое значение, поголовье крупного рогатого скота в 2018 году составило 4552 головы. Для определения методов прогнозирования поголовья скота проведен анализ по данным Иркутской области и муниципальным районам [45].

Анализ рядов поголовья животных показал, что ряды имеют сильные внутрирядные связи. На основании полученных результатов сделан вывод, что поголовье крупного рогатого скота можно прогнозировать с помощью авторегрессии с заблаговременностью 1-3 года [52, 138]. В то же время адекватность модели подтверждается случайностью остатка ряда. Кроме того,

прогнозы трендов не столь точны, как авторегрессионных моделей, поэтому при оценке будущих ситуаций на основе полученных результатов они рекомендуются в качестве дополнительных [45].

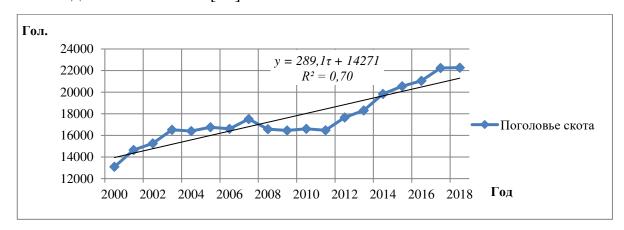


Рис. 2.3 Динамика поголовья крупного рогатого скота в Нукутском районе 2000-2018 гг.

Основной специализацией СХАО «Приморский» является производство растениеводческой продукции, характеристиками которой являются урожайность и посевная площадь. Урожайность предлагается оценивать с помощью законов распределения вероятностей, а посевную площадь, имеющую сильную внутрирядную связь, рекомендуется прогнозировать с помощью трендов и авторегрессионных уравнений на 1-3 года. Кроме того, с 1978 г. на предприятии работает система орошения, однако площадь орошаемых земель составила в 2018 г. всего 320 га.

Имея достаточные посевные площади, которые в 2018 г. составили 28 836 га, предприятие располагает хорошей кормовой базой при небольшом поголовье скота. На предприятии планируется увеличить поголовье животных.

2.2 Изменчивость экологических характеристик

Территория России и, в частности, Иркутская область, характеризуется различными климатическими условиями, которые определяются рядом географических факторов, в том числе географическим положением, размерами и протяженностью с запада на восток, с севера на юг, разнообразием рельефа. На климат Иркутской области влияют оз. Байкал и ангарские водохранилища. В непосредственной близости к ним зима заметно мягче, а лето прохладное.

Огромное количество воды и площадь этих водоёмов сглаживают резкие среднегодовые суточные колебания. У побережья оз. Байкал среднегодовая температура имеет положительное значение (до +0,5°C) [2].

В работах [42, 52] отмечено, что основные тенденции изменения сезонных и годовых значений метеорологических характеристик оз. Байкал за последние 40 лет зависят от активности зональной циркуляции. Повышенная влажность приводит к увеличению осадков и общего годового притока речной воды в озеро.

На основе пространственно-временного анализа среднегодовых температур за 100 лет значимость и характер выявленных трендов изменяются по мере продвижения на север от 52° до 58° широты [42].

Согласно полученным результатам, на юге наблюдается тенденция потепления. В центральной части территории тренд повышения температуры менее устойчив, а на севере устойчивый тренд в многолетних рядах среднегодовых температур практически отсутствует. Примерно то же самое происходит и с температурой в течение вегетационного периода.

Продолжающееся потепление климата в южной части региона может привести к увеличению продолжительности вегетационного периода и общему температур в вегетационного повышению течение периода, ЧТО будет способствовать использованию сортов с более продолжительной вегетацией и биопродуктивности сельскохозяйственных культур. этой увеличению положительной стороны есть и отрицательная – увеличивается возможность распространения вредителей, ранее не обитавших на территории [45, 49].

Разная реакция растений на повышение концентрации углерода в атмосфере может привести к увеличению площадей для выращивания пшеницы [62]. Повышение температуры воздуха приведет к усилению испарения и повышению температуры почвы, что приведет к ускорению химических реакций в растворе и при диффузии. С увеличением концентрации углерода усиливается фиксация атмосферного азота бобовыми растениями, снижается водопотребление растений за счет уменьшения транспирации с единицы листовой поверхности, а также изменяются вкусовые характеристики, пищевая ценность и сохранность

продовольственных культур. Потепление климата способствуют росту гроз и обильных осадков, что увеличивает возможность разрушения почв из-за усиления эрозионных процессов. Кроме того, возрастают производственные риски, связанные с потерями урожая [103].

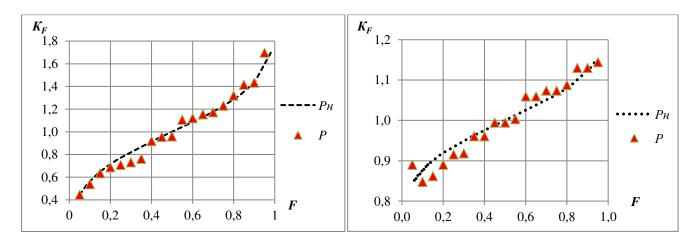
В отличие от температуры, годовое количество осадков и максимальное суточное количество осадков являются случайными величинами. [108].

По данным [5] в Иркутской области за последние 50 лет коэффициенты вариации (C_v) рядов суммарной температуры и осадков вегетационного периода составили 0,08 и 0,15 соответственно. Кроме того, наблюдалась положительная динамика суммы температур в течение вегетационного периода (1962-2012 гг.). В частности, для Иркутска, Тайшета и Нижнеудинска коэффициент детерминации (R^2) трендовой модели этой характеристики составляет 0,35-0,40. Однако для пунктов, расположенных на севере и северо-востоке (Балаганск, Братск, Бохан, Качуг), параметр R^2 ниже 0,22-0,30.

Примечательно, что характеристики тепла и влаги за период 1996-2012 гг. непредсказуемо изменяются по сравнению с 50-летним рядом [107].

Выборка максимальных суточных осадков вегетационного периода за 2000-2018 гг. подчиняются нормальному распределению вероятностей, при этом C_v составил 0,34. На рис. 2.4 (а) приведено нормальное распределение, которому подчиняется выборка максимальных суточных осадков по пункту наблюдений Новонукутск. По оси ординат отложен безразмерный модульный коэффициент (K_F) как отношение собственного значения к среднему многолетнему значению.

Кроме того, при моделировании производства сельскохозяйственной продукции с учетом ущербов окружающей среде в качестве переменных величин природных характеристик выступает скорость ветра [102]. Эта характеристика, как и осадки за вегетационный период, влияет на процессы ветровой эрозии, способствующие деградации почвы.



- а) эмпирическая функция (F) и нормальное распределение (FH) максимальных суточных осадков
- б) эмпирическая функция (F) и нормальное распределение $(F\mu)$ максимальной скорости ветра

Рис. 2.4 Эмпирическая и аналитические функции распределения климатических характеристик в пределах вегетационного периода по данным пункта наблюдений Новонукутск за 2000-2018 гг.

Скорость ветра за 2000-2018 гг. имеет коэффициент автокорреляции близкий к нулю, поэтому можно считать ряды случайными ($C_v = 0,10$). На рисунке 2.4 (б) приведено нормальное распределение, которому подчиняется максимальная скорость ветра в пункте наблюдений Новонукутск.

В соответствии с административным делением Иркутская область состоит из 33 муниципальных района, и 10 городских округов. Однако, принимая во особенности пространственного внимание варьирования климатических необходимо характеристик, разделить территорию. При определении сельскохозяйственных районов необходимо учитывать три основные группы характеристик: природные (рельеф, климат, почва); демографические (трудовые ресурсы, их расположение и потребители продукции); экономические (наличие необходимой инфраструктуры) [18].

В работе [141] рекомендуется зонировать территорию в соответствии с уровнем землепользования. Согласно результатам индексной оценки выделено 5 групп районов в соответствии с уровнем использования сельскохозяйственных земель в хозяйствах всех категорий.

В целом уровень использования земель сельскохозяйственного назначения в Иркутской области относительно невысок. Это видно из ее типологии. Более половины муниципальных районов относятся к группам с низким уровнем землепользования.

В работе [107] при оценке статистических характеристик многолетней выборки биопродуктивности сельскохозяйственных культур использовалось районирование по агроландшафтным районам [122]: северный приленский таежно-подтаежный; среднеангарский таежно-подтаежный; северо-западный подтаежно-таежный; центральный лесостепной; юго-восточный лесостепной; Боханско-Осинский лесостепной; Балаганско-Нукутский остепненный; Усть-Ордынско-Баяндаевский остепненно-лесостепной.

В зависимости от интенсивности развития водноэрозионных и дефляционных процессов, а также по результатам оценки площадного развития эрозионных процессов в работе [36] предлагается деление территории региона в соответствии со степенью деградации земель: слабая, сильная, средняя. Кроме того, по загрязнению почвенного покрова предлагается выделить в регионе 8 природных групп.

Авторский коллектив под руководством академика Воробьева В. В. составили карту эродированности в Иркутской области (рис. 2.5-2.7) [62]. Уровень эродированности на карте представлен на трех таксономических уровнях: типа, подтипа и вида. Эрозия делится на три типа: водная эрозия, дефляция и комбинированные проявления водной эрозии и дефляции. На первом уровне выделены: а) водная (плоскостная) эрозия, вызванная талыми водами и ливневым стоком, б) сочетание водной и ветровой эрозии с преобладанием водной; в) сочетание водной и ветровой эрозии с преобладанием ветровой.

В зависимости от интенсивности развития процессов водной и ветровой эрозии, определяемой степенью нарушенности почвенного профиля, выделяют три основные категории: слабые, средние и сильные.

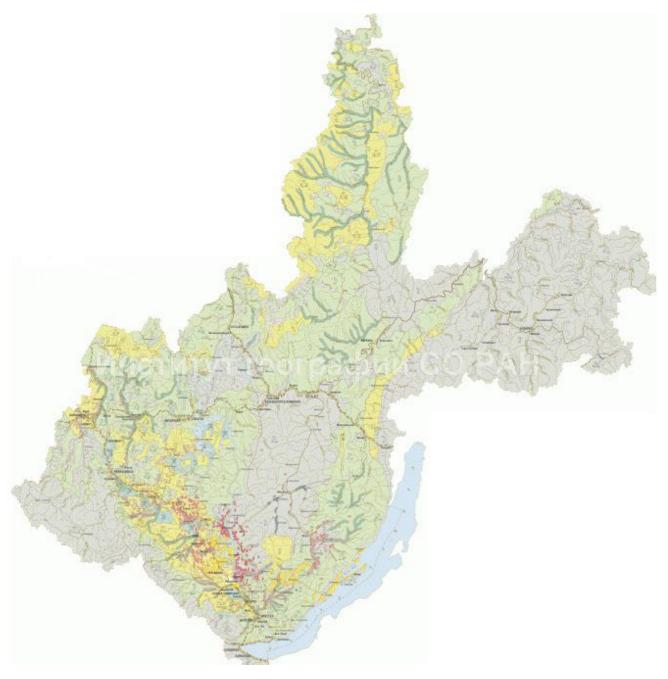


Рис. 2.5 Эродированность почв Иркутской области

При оценке площадного развития всех видов эрозионных процессов выделяют пять степеней (от 1 до 5 баллов): очень слабую, слабую, среднюю, сильную и очень сильную, в которых определяется процентное участие (менее 5, 50) 25-50 5-10, 10-25, более эродированных почв площади OT сельскохозяйственных угодий. Отмечено, что практически неэродируемой и недефлированной считается территория, общая площадь смытых где дефлированных 5% почв всех типов не превышает площади сельскохозяйственных угодий.

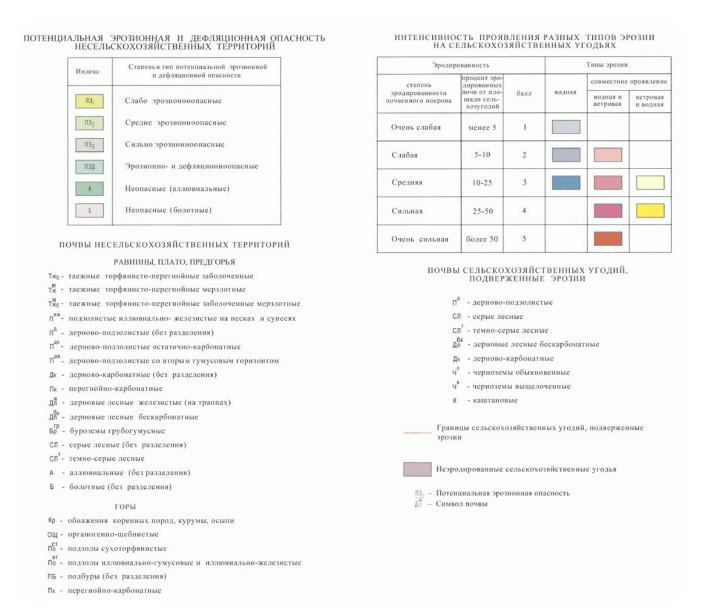


Рис. 2.6 Условные обозначения карты «Эродированность почв Иркутской области»

Леса и горы на карте охарактеризованы потенциально опасной эрозией и дефляцией. Внутри каждого типа эрозии можно выделить 4 уровня: потенциально неопасные, потенциально слабо-, средне- и сильноэрозионноопасные [62].

Нукутский район относится к районам с высокой степенью деградации почв — эродированность почв пахотных и пастбищных угодий более 25% от площади сельскохозяйственных земель, а по признаку загрязнение почв — к Енисейско-Приангарской низкогорной природной провинции со средней и слабой потенциальной опасностью техногенно-химического загрязнения.

№ на карте	Наименование районов	Степень эроди- рованности и тип эрозии*	Почвенно- эрозионный индекс	№ на карте	Наименование районов	Степень эроди- рованности и тип эрозии*	Почвенно- эрозионный индекс
			ИРКУТСКА:	я облас	ТЬ		
23	Ангарский			12	Тулунский		<u>1£+1↓</u> CЛ ^T +СЛ
14	Балаганский		<u>15+4↓⊎</u> Ч ⁰ +Ч ⁸ +Дк	22	Усольский		<u>1•+4↓⊎</u> сл ^т +сл
10	Братский		<u>1Г+1↓</u> Дк+СЛ ^Т	4	Усть-Илимский		<u>15+2+</u> Ди+П ^Д
16	Жигаловский		<u>1\$+3↓</u> Дн	15	Усть-Удинский		<u>1Г+4↓⊎</u> Дн+Ч ⁸
20	Заларинский		15+3↓ ∪ Cл [†] +4°	21	Черемховский		1 +3 Сл [™] +Сл
19	Зиминский		<u>1↓+2↓⊖</u> Cл+Сл [†]	3	Чунский		$\frac{1 + 1 + 1}{C U_{\perp} + U_{\parallel}}$
25	Иркутский						
18	Качугский		25 √ +34 € Дн+Ч ⁰	УС	ть-ордынский бурятск	сий автономныі	й округ
7	Киренский		<u>15+2↓</u> Дк	2	Аларский		<u>1Г•+4↓⊕</u> СЛ ^Т +Ч ⁰ +Дн
13	Куйтунский		1 <u>f+3↓⊎</u> 4 ^B +CЛ ^T	6	Баяндаевский		1.5 +4.1 ₩ 4 ⁸ + 1.6 H
5	Нижнеилимский		<u>1⊊+2↓</u> Дк+П ^Д	4	Боханский		<u>15+4↓⊌</u> 6к Дл +Дк+Ч
11	Нижнеудинский		15+14 Cn ^T +n ^A	1	Нукутский		<u>1∫•+4↓⊎</u> Ч ⁰ +Дн
26	Ольхонский		15 √ +41€ K	3	Осинский		15+5↓₩ Дл +48
2	Тайшетский			5	Эхирит-Булагатский		15 -+4. 4 ⁰ +4 ⁸ +Дл
Номе Почве зионн ризон носми почве	нцип раскраски изложен гра административных рай- енно-эрозионный индекс (на ных процессов, о типах эро втов почв. Так, первая ци дефлированных или дефлированных енного покрова на подвержне-, сильно- и очень сильн	онов соответству пример: $\frac{\ f+\ _1}{\ R+C\ ^2}$ зии (плоскости фра над черто почв, вторая — сенных эрозии	или 11-41-0 или 11-4-41-0 ой водной деф й обозначает сумму слабоем площадях	на карто ляции, г долевое иытых и	 "Административно-терр чает комплекс информа: их сочетании), о степени участие (в баллах) сумм 	иториальное делен ции о площадном эродированности ы средне-, сильно- чв; под чертой да	ние", стр.13 гразвитии з гумусовых г и очень сили на структур

Рис. 2.7 Условные обозначения карты «Эродированность почв Иркутской области»

В отличие от процесса дефляции водная эрозия (поверхностный или плоскостной смыв почвы) наблюдается на Лено-Ангарском плато, холмистых и

каменистых территориях (Усть-Ординский Бурятский автономный округ, Усть-Удинский и Куйтунский районы) и землях на Иркутско-Черемховской равнине. Общая площадь земель, пострадавших от водной эрозии, составляет 10,6% площади сельскохозяйственных угодий региона, из них около 14% составляют пашни.

Дефляционный процесс в регионе затронул около 11% сельскохозяйственных угодий и 15% пахотных земель. Эти значения сильно различаются в разных частях территории.

Водная и ветровая эрозия совместно проявляются на значительных площадях региона (в Усть-Ордынском Бурятском округе – 5,5% площади сельскохозяйственных угодий, в среднем по региону – 2,4%).

В Нукутском районе преобладает ветровая эрозия (53-73% площади нарушенных земель, доля нарушенных водной эрозией – 23-30%, совместное проявление смыва и дефляции – 15-18%).

Объём потерь почвы от водной и ветровой эрозии зависит от интенсивности дождей и скорости ветра [27, 29].

Максимальная скорость ветра за вегетационный период в пункте наблюдений Новонукутск за многолетний период превышает 10 м/с. Согласно методике расчета потерь почвы от ветровой эрозии, приведенной в [104], потери ежегодно составляют 31,2 т/га в год. Согласно [8] найденный размер потерь почвы соответствует умеренной силе эрозии. К сильной эрозии относят ежегодные потери почвы свыше 50 т/га.

Таким образом, можно сделать вывод, что изменчивость потерь почвы от эрозии можно описать с помощью закона, которым характеризуется изменчивость интенсивности осадков, т.е. нормального распределения вероятностей.

Перейдем к рассмотрению загрязнения атмосферы и сточных вод вредными веществами.

Экологическая ситуация в промышленных городах региона остается сложной. Так, на территории Иркутской области 9 городов (Ангарск, Братск, Зима, Иркутск, Саянск, Усолье-Сибирское, Усть-Илимск, Черемхово, Шелехов)

имеют повышенный уровень загрязнения атмосферного воздуха. Наибольшее отрицательное воздействие на атмосферу оказывают предприятия, занятые производством и распределением электроэнергии, газа и воды (53% всех выбросов), и обрабатывающие производства (31,9%) [30].

На рис. 2.8 приведена динамика валовых выбросов загрязняющих веществ в атмосферу с 2000 г. по 2018 г.

В 2018 г. общий объем сбросов загрязняющих веществ составил 659,9 тыс. т, что на 2,3 % больше, чем в 2017 г.

На основании статистического анализа выявлено, что выборка выбросов загрязняющих веществ имеет сильную внутрирядную связь с первым коэффициентом автокорреляции (R_1), равным 0,83.

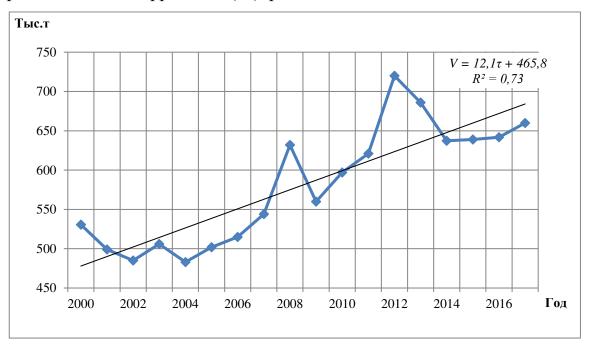


Рис. 2.8 Динамика валовых выбросов загрязняющих веществ в атмосферу по Иркутской области в 2000-2018 гг.

Изменчивость ряда объемов выбросов загрязняющих веществ определена с помощью тренда и авторегрессионного уравнения (таблица 2.3).

Точность прогнозов, полученных с помощью авторегрессии и трендов, оценивалась с помощью ретроспективного прогноза (таблица 2.4) для различных значений сдвига (t) и заблаговременности [45].

Авторегрессионное уравнение и тренд, характеризующие выбросы в атмосферу загрязняющих веществ

Vanarmanuamun	Авторегресси	Я	Тренд		
Характеристика	Уравнение	R^2	Уравнение	R^2	
Выбросы в атмосферу загрязняющих веществ	$V_{\tau+1} = 93,9+0,85V_{\tau}$	0,69	$V = 465,8+12,1\tau$	0,73	

Таблица 2.4.

Ретроспективный прогноз объема выбросов загрязняющих веществ в атмосферу, полученный на основании авторегрессионных и трендовых уравнений по данным Иркутской области за 2000-2017 гг., тыс. т

№ п.п.	Сдвиг	Фактическое значение	Прогноз		Отклонение от фактических данных, %	
			авторегрессия	тренд	авторегрессия	тренд
1	t = 1	659,9	639,4	690,4	-3,1	4,6
2	t = 2	659,9	641,4	701,2	-2,8	6,3
3	<i>t</i> = 3	659,9	-	713,6	-	8,1

Значимыми являются полученные тренды и авторегрессионные уравнения, причем уравнения трендов имеют коэффициент детерминации выше, чем авторегрессии. На основании ретроспективного прогноза оценена точность моделей и сделан вывод, что прогнозировать характеристику рекомендуется с помощью трендов и авторегрессии при заблаговременности 1-3 года.

Характеристики загрязнения почвы вредными веществами являются случайными величинами, однако их определение представляет собой трудоемкий процесс, что связано с периодическими наблюдениями за состоянием почвы [71]. Поэтому значения таких характеристик могут быть усреднены или рассмотрены в виде интервальных оценок [47]. В частности, на территории Нукутского района с 2007 года по докладам об окружающей среде в Иркутской области загрязнение почвы медью и ртутью не превышали предельно допустимые значения. В почве содержание меди было не более 14,9 г/га, ртути – 10,4; в воде эти характеристики составили менее 0,4 и 0,08 г/тыс. м³.

Аналогичная обстановка сложилась и с загрязнением этими металлами вод Братского водохранилища. Отметим, что в Нукутском районе основной

экологической проблемой является высокий уровень деградации земель, в основном от ветровой эрозии. Наименее проблемным вопросом является техногенное загрязнение почвы и воды.

Недостаточную изученность сельскохозяйственных земель Иркутской области подтверждают данные регионального доклада использования земель за 2019 год рис. 2.9 и рис. 2.10 [115].



Условные обозначения:

- районы Иркутской области, на территории которых проведены работы по мониторингу состояния и использования земель;

- неизученные территории

Рис. 2.9 Картограмма изученности «Мониторинг состояния и использования земель в Иркутской области по состоянию на 01.01.2020»



Условные обозначения:

- районы Иркутской области, в отношении земель сельскохозяйственного назначения, для которых, проведено почвенное обследование земель 1970-1980 г.);

- неизученные территории

Рис. 2.10 Картограмма изученности «Наличие материалов почвенного обследования земель в Иркутской области по состоянию на 01.01.2020»

Как видно из рисунка 2.10 масштабное почвенное обследование сельскохозяйственных земель на территории региона проходило лишь в 1970-1980 годах. К сожалению, подобная ситуация наблюдается и в других регионах Российской Федерации. Данная обстановка затрудняет более детальное изучение загрязненности или эродированности земель.

2.3 Эколого-математические модели оптимизации производства аграрной продукции с детерминированными характеристиками

В этом разделе на основании эколого-экономико-математической модели функционирования региона согласно работе [34], нами предлагаются модели с детерминированными характеристиками: эколого-математическая модель оптимизации производства продукции для сочетания отраслей растениеводства и орошаемых животноводства на неорошаемых И землях [54], экологопродукции для сочетания отраслей математическая модель производства растениеводства И животноводства на неорошаемых экологоземлях, математическая модель производства продукции для сочетания отраслей растениеводства и животноводства с использованием орошаемого земледелия. При этом в качестве целевой функции в перечисленных моделях использована прибыль, стремящаяся к максимуму, с учетом ущербов окружающей среде от природных и техногенных факторов.

Исходная эколого-математическая модель производства аграрной продукции при сочетании отраслей с использованием неорошаемых и орошаемых земель сформулирована в разделе (1.4) в виде целевой функции и ограничений (1.27) - (1.42).

Из этой модели можно получить модели только для неорошаемого или только для орошаемого земледелия. Так, детерминированная модель оптимизации сочетания производства растениеводческой и животноводческой продукции для неорошаемого земледелия будет выглядеть следующим образом:

- целевая функция:

$$f = \sum_{i \in I} (1 - l_i) c_i p_i x_i + \sum_{k \in K} c_k r_k y_k + \sum_{i \in J} (1 - \alpha_j) g_j \rho_j z_j \to \max,$$
(2.1)

- ограничения по заданному объему производства товарной растениеводческой продукции на предприятии выглядят так

$$(1-l_i)p_ix_i \ge S_i, \tag{2.2}$$

- ограничения по увязке производства растениеводческой продукции и потребности в ней животноводства имеют вид

$$\sum_{j \in J} (1 - \alpha_j) \beta_{\theta_j} \rho_j z_j \ge \sum_{k \in K} B_{\theta_k} y_k \quad (\theta \in \Theta), \tag{2.3}$$

- ограничения по наличию трудовых ресурсов имеют вид

$$b_i x_i \le B_i, \tag{2.4}$$

$$\zeta_j z_j \le Z_j, \tag{2.5}$$

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

$$\psi_n T' \xi + \mu_n \sum_{i \in I} \lambda x_i + \mu'_n \sum_{i \in J} \lambda z_i \le W_n \quad (n \in N), \tag{2.6}$$

- условие неотрицательности переменных

$$x_i, z_i, y_k \ge 0. (2.7)$$

Задача оптимизации аграрного производства с целевой функцией (2.1), ограничениями (1.29), (1.31), (1.35), (1.36), (1.40), (2.2) – (2.7) позволяет оптимизировать разные ситуации производства продукции на неорошаемых землях. В целевой функции (2.1) и ограничениях (2.2) – (2.7) использованы такие же обозначения как в модели (1.27) – (1.42).

Для орошаемых земель эколого-математическая модель оптимизации аграрного производства записывается в несколько ином виде:

- целевая функция:

$$f = \sum_{i \in I} (1 - l'_i) c'_i p'_i x'_i + \sum_{k \in K} c_k r_k y_k + \sum_{j \in J} (1 - \alpha'_j) g'_j \rho'_j z'_j \to \max,$$
(2.8)

- ограничения по заданному объему производства товарной растениеводческой продукции на предприятии выглядят так

$$(1 - l_i') p_i' x_i' \ge S_i, \tag{2.9}$$

- ограничения по увязке производства растениеводческой продукции и потребности в ней животноводства имеют вид

$$\sum_{j \in J} (1 - \alpha'_j) \beta_{\theta_j} \rho'_j z'_j \ge \sum_{k \in K} B_{\theta_k} y_k \quad (\theta \in \Theta), \tag{2.10}$$

- ограничения по наличию трудовых ресурсов выглядят так

$$b_i'x_i' \le B_i, \tag{2.11}$$

$$\zeta_j' z_j' \le Z_j, \tag{2.12}$$

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

$$\psi_n T' \xi + \mu_n \sum_{i \in I} (q_i + \lambda) x'_i + \mu'_n \sum_{j \in J} (\iota_j + \lambda) z'_j \le W_n \quad (n \in N),$$
(2.13)

- условие неотрицательности переменных

$$x_i', z_j', y_k \ge 0.$$
 (2.14)

В предложенную модель помимо целевой функции (2.8) и ограничений (2.9) - (2.14) входят ограничения по производству животноводческой продукции, площади орошаемых земель, трудовым ресурсам производства животноводческой продукции, загрязнению земли, ограничению на водозабор в реке и почвенные потери от эрозии, которые соответствуют неравенствам (1.29), (1.32), (1.35), (1.37), (1.38), (1.41).

Проведенный анализ производственно-экономических, природноклиматических и экологических характеристик выявил, что некоторые характеристики ввиду незначительных колебаний, либо отсутствия информации представляют собой усредненные значения.

Для решения задачи с усредненными характеристиками необходимо определить средние значения исследуемых рядов на основе оценки многолетней изменчивости рассматриваемых характеристик [54]. Затем решается задача линейного программирования. Конечным результатом такого решения является одно оптимальное решение с учетом усредненных коэффициентов при неизвестных в целевой функции и ограничениях [54].

Ввиду нерегулярных наблюдений за состоянием загрязнения вредными веществами почвы и воды для решения экстремальной задачи характеристики загрязнения почвы и воды определены на основе последних исследований или как усредненные значения за многолетний период. Концентрация загрязнителей, попавших в почву или воду, рассчитана как разность между фактическим и фоновым уровнем содержания вещества.

Характеристики рельефа и противоэрозионных мероприятий установлены экспертным путем. Фактор эродирующей способности дождей рассчитан на основании данных интенсивности дождей за вегетационный период.

В зависимости от скорости ветра, определенной по данным ФГБУ «Иркутское управление по гидрометеорологии и мониторингу

окружающей среды», определяется то или иное значение интенсивности выноса почвы от дефляции согласно таблице, приведенной в Инструкции по составлению проекта землеустройства в районах ветровой эрозии.

2.4 Эколого-математические модели оптимизации производства аграрной продукции с интервальными оценками

Предложенные детерминированные модели описывают некоторую усредненную ситуацию производства аграрной продукции. Очевидно, что более близки отображению ситуаций реальных 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 нижними и верхними оценками характеристик модели [47].

Исследования автора диссертации и работы других исследователей [5, 6, 15, 111, 131, 151, 152 и др.] показывают, что изменчивость урожайность сельскохозяйственных культур, фактор эродирующей способности дождей, суточные расходы воды, концентрации вредных веществ, попавших в почву, коэффициенты негативного влияния на окружающую среду от природных и техногенных факторов могут быть описаны с помощью интервальных оценок. Это обусловлено незначительным объемом данных, неоднородностью информации, уровнем развития предприятия (как правило, начальным).

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 [54]:

- целевая функция:

$$f = \sum_{i \in I} (1 - \tilde{l}_i) c_i \tilde{p}_i x_i + \sum_{i \in I} (1 - \tilde{l}_i') c_i' \tilde{p}_i' x_i' + \sum_{k \in K} c_k r_k y_k + \sum_{j \in J} (1 - \tilde{\alpha}_j) g_j \tilde{\rho}_j z_j + \sum_{j \in J} (1 - \tilde{\alpha}_j') g_j' \tilde{\rho}_j' z_j' \rightarrow \max, \quad (2.15)$$

- ограничения по заданному объему производства товарной растениеводческой продукции:

$$(1 - \tilde{l}_i) \tilde{p}_i x_i + (1 - \tilde{l}_i') \tilde{p}_i' x_i' \ge S_i, \tag{2.16}$$

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

$$\sum_{j \in J} (1 - \tilde{\alpha}_j) \beta_{\theta_j} \tilde{\rho}_j z_j + \sum_{j \in J} (1 - \tilde{\alpha}_j') \beta_{\theta_j} \tilde{\rho}_j' z_j' \ge \sum_{k \in K} B_{\theta_k} y_k \quad (m \in M),$$
(2.17)

- условия по непревышению предельно допустимой концентрации некоторых вредных веществ в почве:

$$\sum_{i\in I} \varphi_{in} x_i + \sum_{i\in I} \widetilde{V}_{in} x_i + \sum_{j\in J} \upsilon_{jn} z_j + \sum_{j\in J} \widetilde{\sigma}_{jn} z_j \le \Omega_n \quad (n\in N),$$
(2.18)

$$\sum_{i \in I} \varphi'_{in} x'_i + \sum_{i \in I} \widetilde{V}'_{in} x' + \sum_{j \in J} \upsilon'_{jn} z'_j + \sum_{j \in J} \widetilde{o}'_{jn} z'_j \le \Omega'_n \quad (n \in N),$$
(2.19)

- ограничения на водозабор в реке:

$$\sum_{i \in I} q_i x'_i + \sum_{j \in J} \iota_j z'_j \le T' \widetilde{\xi}, \qquad (2.20)$$

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

$$\psi_n T' \widetilde{\xi} + \mu_n \sum_{i \in I} \left[(q_i + \lambda) x'_i + \lambda x_i \right] + \mu'_n \sum_{j \in J} \left[(\iota_j + \lambda) z'_j + \lambda z_j \right] \le W_n \quad (n \in N), \quad (2.21)$$

- ограничения, связанные с почвенными потерями от водной и ветровой эрозии:

$$\sum_{i \in I} \tilde{R} U_i D_i V_i C_i P_i x_i + \sum_{i \in J} \tilde{R} U'_j D'_j V'_j C'_j P'_j Z_j + \sum_{i \in I} M_i T x_i + \sum_{i \in J} M'_j T Z_j \le \eta, \qquad (2.22)$$

$$\sum_{i \in I} \tilde{R} U_i D_i V_i C_i P_i x_i' + \sum_{j \in J} \tilde{R} U_j' D_j' V_j' C_j' P_j' z_j' + \sum_{i \in I} M_i T x_i' + \sum_{j \in J} M_j' T z_j' \le \eta', \qquad (2.23)$$

где $\underline{\widetilde{p}_i} \leq \widetilde{p}_i \leq \overline{\widetilde{p}_i}$, $\underline{\widetilde{\rho}_j} \leq \widetilde{\rho}_j \leq \overline{\widetilde{\rho}_j}$ ($\underline{\widetilde{p}_i'} \leq \widetilde{p}_i' \leq \overline{\widetilde{p}_i'}$, $\underline{\widetilde{\rho}_j'} \leq \widetilde{\rho}_j' \leq \overline{\widetilde{\rho}_j'}$) - нижние и верхние оценки урожайности культуры вида i и кормовых вида j при неорошаемом (орошаемом) земледелии; $\underline{\widetilde{l}_i} \leq \overline{\widetilde{l}_i} \leq \overline{\widetilde{d}_i} \leq \widetilde{\overline{d}_j} \leq \overline{\widetilde{d}_j} \leq \overline{\widetilde{d}_j'} \leq \overline{\widetilde{d}_i'} \leq \overline{\widetilde{d}_j'} \leq \overline{\widetilde{d}_j'} \leq \overline{\widetilde{d}_j'} \leq \overline{\widetilde{d}_j'} = 1$ 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 нижними и верхними оценками концентрации $\underline{\widetilde{V}_i} \leq \overline{\widetilde{V}_i} \leq \overline{\widetilde{V}_i} \leq \overline{\widetilde{V}_i'} \leq$

Что касается ограничений по производству животноводческой продукции, по площади пашни, наличию трудовых ресурсов и неотрицательности переменных, то они соответствуют неравенствам (1.29), (1.31) - (1.35) и (1.42).

Результатом применения таких моделей является множество оптимальных 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.

Из модели 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 выделим модели применительно к орошаемым и неорошаемым землям. Модель оптимизации производства аграрной продукции для неорошаемого земледелия при сочетании отраслей растениеводства и животноводства записывается в следующем виде[54]:

- целевая функция:

$$f = \sum_{i \in I} (1 - \tilde{l}_i) c_i \tilde{p}_i x_i + \sum_{k \in K} c_k r_k y_k + \sum_{j \in J} (1 - \tilde{\alpha}_j) g_j \tilde{\rho}_j z_j \to \max, \tag{2.24}$$

- ограничения по заданному объему производства товарной растениеводческой продукции:

$$(1 - \tilde{l_i})\tilde{p}_i x_i \ge S_i, \tag{2.25}$$

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

$$\sum_{j \in J} (1 - \tilde{\alpha}_j) \beta_{\theta_j} \tilde{\rho}_j z_j \ge \sum_{k \in K} B_{\theta_k} y_k \quad (m \in M),$$
(2.26)

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

$$\psi_n T' \widetilde{\xi} + \mu_n \sum_{i \in I} \lambda x_i + \mu'_n \sum_{j \in J} \lambda z_j \le W_n \quad (n \in N), \tag{2.27}$$

Модель оптимизации с целевой функцией (2.24) и ограничениями (1.29), (1.31), (1.35) (2.4) – (2.5), (2.7), (2.18), (2.22), (2.25) – (2.27) позволяет

моделировать производство аграрной продукции с использованием неорошаемого земледелия.

Для орошаемых земель модель при сочетании отраслей растениеводства и животноводства с интервальными характеристиками имеет вид [54]:

- целевая функция:

$$f = \sum_{i \in I} (1 - \tilde{l}'_i) c'_i \tilde{p}'_i x'_i + \sum_{k \in K} c_k r_k y_k + \sum_{i \in I} (1 - \tilde{\alpha}'_i) g'_i \tilde{\rho}'_i z'_i \to \max,$$
 (2.28)

- ограничения по заданному объему производства товарной растениеводческой продукции на предприятии выглядят так

$$(1 - \tilde{l}_i') \, \tilde{p}_i' x_i' \ge S_i, \tag{2.29}$$

- ограничения по увязке производства растениеводческой продукции и потребности в ней животноводства имеют вид

$$\sum_{j \in J} (1 - \tilde{\alpha}'_j) \beta_{\theta_j} \tilde{\rho}'_j z'_j \ge \sum_{k \in K} B_{\theta_k} y_k \quad (m \in M), \tag{2.30}$$

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

$$\psi_n T' \widetilde{\xi} + \mu_n \sum_{i \in I} (q_i + \lambda) x'_i + \mu'_n \sum_{j \in J} (l_j + \lambda) z'_j \le W_n \quad (n \in N).$$

$$(2.31)$$

Модель оптимизации производства аграрной продукции на орошаемых землях с целевой функцией (2.28) с интервальными характеристиками включает ограничения (1.29), (1.32), (1.35), (2.11) - (2.12), (2.14), (2.19) – (2.20), (2.23), (2.29) – (2.31).

В модели применительно к неорошаемому земледелию коэффициенты негативного влияния на окружающую среду рассматриваются как интервальные, а в модели с орошаемым земледелием – в виде усредненных значений. Понятно, что во второй задаче можно использовать интервальные, а в первой – усредненные коэффициенты. Использование интервальных оценок коэффициентов негативного воздействия на окружающую среду имеет смысл при их изменчивости для рассматриваемых земель. В частности, многие предприятия агропромышленного комплекса располагают землями на больших территориях с разными природно-климатическими условиями.

В моделях с интервальными характеристиками, кроме коэффициента негативного влияния интервальными являются некоторые природноклиматические, экологические производственно-экономические характеристики. Чтобы решить задачу с интервальными характеристиками, необходимо определить их нижние и верхние значения. Эти значения определяются на основе оценки многолетней изменчивости рассматриваемых характеристик, а также экспертами. Для многократного решения экстремальных задач с интервальными характеристиками эффективны методы статистического получения оптимального решения тестирования. Алгоритм сводится использованию метода Монте-Карло для моделирования значений интервальной характеристики последующему решению задачи математического программирования. Результатом применения таких моделей является не одно, а множество решений, среди которых можно выделить нижние и верхние оценки критерия оптимальности и соответствующие им оптимальные планы.

2.5 Эколого-математические модели оптимизации производства аграрной продукции со случайными оценками

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,

подчиняющимися законам распределения вероятностей [103]. При этом ряды перечисленных характеристик должны составлять не менее 20-и значений. Статистический анализ свойств эмпирических данных показал, что для описания производственно-экономических природно-климатических И характеристик законы распределения: Пирсона Ш применимы следующие типа И трехпараметрического степенного гамма-распределения [45, 103, 108].

Характеристики φ_{in} , ψ_{jn} , φ'_{in} , ψ'_{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 [47].

На основе детерминированной задачи оптимизации аграрного производства на неорошаемых и орошаемых землях при сочетании отраслей растениеводства и животноводства автором диссертации построена модель с вероятностными характеристиками [71].

Целевая функция имеет вид:

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

$$(2.32)$$

Ограничения записываются так:

- по заданному объему производства товарной растениеводческой продукции

$$(1-l_i)p_i^F x_i + (1-l_i')p_i' x_i' \ge S_i, \tag{2.33}$$

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

$$\sum_{j \in J} (1 - \alpha_j) \beta_{\theta j} \rho_j^F z_j + \sum_{j \in J} (1 - \alpha_j') \beta_{\theta j} \rho_j' z_j' \ge \sum_{k \in K} \mathbf{B}_{\theta k} y_k \quad (\theta \in \Theta), \quad (2.34)$$

- по водозабору в реке:

$$\sum_{i \in I} q_i x'_i + \sum_{j \in J} t_j z'_j \le T' \xi^F, \tag{2.35}$$

по непревышению предельно допустимой концентрации вредных веществ
 в реке:

$$\psi_n T' \xi^F + \mu_n \sum_{i \in I} [(q_i + \lambda) x'_i + \lambda x_i] + \mu'_n \sum_{j \in J} [(t_j + \lambda) z'_j + \lambda z_j] \le W_n \quad (n \in N), \quad (2.36)$$

- по почвенным потерям от водной и ветровой эрозии:

$$\sum_{i \in I} R^F U_i D_i V_i C_i P_i x_i + \sum_{i \in I} R^F U'_j D'_j V'_j C'_j P'_j z_j + \sum_{i \in I} M_i T x_i + \sum_{i \in I} M'_j T z_j \le \eta,$$
 (2.37)

$$\sum_{i \in I} R^F U_i D_i V_i C_i P_i x_i' + \sum_{j \in J} R^F U_j' D_j' V_j' C_j' P_j' z_j' + \sum_{i \in I} M_i T x_i' + \sum_{j \in J} M_j' T z_j' \le \eta', \quad (2.38)$$

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.

Дополнительно в задачу (2.32) - (2.38) вводятся ограничение по производству животноводческой продукции, площади пашни, наличию трудовых ресурсов и предельно допустимой концентрации некоторых вредных веществ в почве, неотрицательности переменных, соответствующие неравенствам (1.29), (1.31) - (1.37) и (1.42).

Модель для неорошаемого земледелия со случайными оценками при сочетании отраслей растениеводства и животноводства имеет следующий вид [35]:

- целевая функция:

$$f = \sum_{i \in I} (1 - l_i) c_i p_i^F x_i + \sum_{k \in K} c_k r_k y_k + \sum_{j \in J} (1 - \alpha_j) g_j \rho_j^F z_j \to \max, \qquad (2.39)$$

- ограничения по заданному объему производства товарной растениеводческой продукции на предприятии:

$$(1-l_i)p_i^F x_i \ge S_i, \tag{2.40}$$

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

$$\sum_{j \in J} (1 - \alpha_j) \beta_{\theta j} \rho_j^F z_j \ge \sum_{k \in K} B_{\theta k} y_k \quad (\theta \in \Theta), \tag{2.41}$$

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

$$\psi_n T' \xi^F + \mu_n \sum_{i \in I} \lambda x_i + \mu'_n \sum_{i \in I} \lambda z_i \le W_n \quad (n \in N), \tag{2.42}$$

Задача оптимизации аграрного производства с целевой функцией (2.39) и ограничениями (1.29), (1.31), (1.35) - (1.36), (2.4), (2.5), (2.7), (2.37), (2.40) - (2.42) предлагается для моделирования разных ситуаций получения продукции с использованием неорошаемого земледелия.

Приведем модель, в которую входят интервальные и случайные оценки. В частности, изменчивость урожайности сельскохозяйственных культур на неорошаемых землях может быть описана вероятностными, а урожайность на орошаемых землях — интервальными оценками. В дополнение к этому

интенсивность дождей, влияющая на эрозию почвы, расход воды реки, скорость ветра могут быть также случайными величинами [46, 47].

Задача оптимизации аграрного производства для неорошаемого и орошаемого земледелия с неопределенными оценками при сочетании отраслей сельского хозяйства [35, 41, 71] имеет вид:

- целевая функция:

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

$$(2.43)$$

- ограничения по заданному объему производства товарной растениеводческой продукции:

$$(1-l_i)p_i^F x_i + (1-l_i')\tilde{p}_i' x_i' \ge S_i, \tag{2.44}$$

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

$$\sum_{j \in J} (1 - \alpha_j) \beta_{\theta_j} \rho_j^F z_j + \sum_{j \in J} (1 - \alpha_j') \beta_{\theta_j} \tilde{\rho}_j' z_j' \ge \sum_{k \in K} B_{\theta_k} y_k \quad (\theta \in \Theta), \tag{2.45}$$

В этой задаче ограничения по производству животноводческой продукции, по площади, наличию трудовых ресурсов и непревышению предельно допустимой концентрации некоторых вредных веществ в почве, на водозабор в реке, непревышению ПДК вредных веществ в реке, по почвенным потерям, неотрицательности переменных соответствуют неравенствам (1.29), (1.31) – (1.35), (1.42), (2.18) – (2.19), (2.35) – (2.38).

В работе [152] приведена модель, которая описывает производство аграрной продукции при сочетании растениеводства и животноводства на орошаемых и неорошаемых сельскохозяйственных землях с учетом рисков. В этой модели целевая функция характеризует максимальную прибыль и ущерб окружающей среде в условиях природных рисков. Ограничения описывают доступность земельных и трудовых ресурсов, объемы производства, загрязнение почвы и воды, эрозию сельскохозяйственных угодий, сочетание продуктов растениеводства и животноводства в условиях проявления экстремальных явлений.

В общем виде сформулирована задача оптимизации производства аграрной продукции, учитывающая ущерб окружающей среде и риск наступления природного события [69, 152]. Целевая функция на максимум прибыли с учетом ущербов имеет вид:

$$f = \sum_{i \in I} (1 - l_i) c_i p_i x_i - \sum_{i \in I} (1 - l_i) \Delta c_i^F \Delta p_i^F \omega_i + \sum_{i \in I} (1 - l_i') c_i' p_i' x_i' - \sum_{i \in I} (1 - l_i') \Delta c_i'^F \Delta p_i'^F \omega_i' + \sum_{k \in K} c_k r_k y_k - \sum_{k \in K} \Delta c_k^F \Delta r_k^F y_k' + \sum_{j \in J} (1 - \alpha_j) g_j \rho_j z_j - \sum_{j \in J} (1 - \alpha_j) \Delta g_j^F \Delta \rho_j^F \Delta \omega_j + \sum_{j \in J} (1 - \alpha_j') g_j' \rho_j' z_j' - \sum_{j \in J} (1 - \alpha_j') \Delta g_j'^F \Delta \rho_j'^F \Delta \omega_j' \to \max,$$

$$(2.46)$$

где Δc_i^F , Δg_j^F ($\Delta c_i'^F$, $\Delta g_j'^F$) – потери прибыли, получаемой от продажи 1 ц товарной продукции культуры вида i и кормов j при неорошаемом (орошаемом) земледелии, связанные с влиянием климатического события; Δc_k^F - потери прибыли, получаемой от продажи 1 ц товарной продукции животных вида k, связанные с влиянием климатического события; ω_i , $\Delta \omega_j$ (ω_i' , $\Delta \omega_j'$) - площади неорошаемых (орошаемых) земель, подвергшиеся влиянию климатического события [70]; Δp_i^F , $\Delta \rho_j^F$ ($\Delta p_i'^F$, $\Delta \rho_j'^F$) - потери урожайности культуры вида i и кормов вида j при неорошаемом (орошаемом) земледелии с учетом влияния климатического события; Δr_k^F – потери продуктивности животных k с учетом

влияния климатического события; y'_k – количество животных, подвергшихся влиянию климатического события; F – вероятность события.

Ограничения для модели в условиях природных рисков выглядят следующим образом [47]:

- по заданному объему производства товарной растениеводческой продукции с учетом потерь от влияния события:

$$(1-l_i)p_ix_i + (1-l_i')p_i'x_i' - (1-l_i)\Delta p_i^F\omega_i - (1-l_i')\Delta p_i'^F\omega_i' \ge S_i, \qquad (2.47)$$

- по заданному объему производства животноводческой продукции с учетом потерь от влияния события:

$$r_k y_k - \Delta r_k^F y_k' \ge Y_k, \tag{2.48}$$

- по увязке производства растениеводческой продукции и потребности в ней животноводства при уменьшении объема кормов от влияния события:

$$\sum_{j \in J} (1 - \alpha_{j}) \beta_{\theta j} \rho_{j} z_{j} + \sum_{j \in J} (1 - \alpha'_{j}) \beta_{\theta j} \rho'_{j} z'_{j} - \sum_{j \in J} (1 - \alpha_{j}) \beta_{\theta j} \Delta \rho_{j}^{F} \Delta \omega_{j} - \sum_{j \in J} (1 - \alpha'_{j}) \beta_{\theta j} \Delta \rho'_{j}^{F} \Delta \omega'_{j} \ge \sum_{k \in K} B_{\theta k} y_{k} \quad (\theta \in \Theta), \tag{2.49}$$

- по площади неорошаемых и орошаемых земель с учетом их уменьшения от влияния события:

$$\sum_{i \in I} x_i + \sum_{j \in J} z_j \le a - \sum_{i \in I} \omega_i - \sum_{j \in J} \Delta \omega_j, \tag{2.50}$$

$$\sum_{i \in I} x_i' + \sum_{i \in J} z_j' \le a' - \sum_{i \in I} \omega_i' - \sum_{i \in J} \Delta \omega_j' , \qquad (2.51)$$

- по трудовым ресурсам с учетом дополнительных трудозатрат по восстановлению потерь от влияния события:

$$b_i x_i + b_i' x_i' + b_i^F \omega_i + b_i'^F \omega_i' \le B_i,$$
 (2.52)

$$\zeta_{j}z_{j} + \zeta_{j}'z_{j}' + \zeta_{j}^{F}\Delta\omega_{j} + \zeta_{j}'^{F}\Delta\omega_{j}' \leq Z_{j}, \qquad (2.53)$$

$$\varepsilon_k y_k + \varepsilon_k^F y_k' \le \mathcal{E}_k, \tag{2.54}$$

- по непревышению предельно допустимой концентрации (ПДК) вредных веществ в почве на неорошаемых и орошаемых землях:

$$\sum_{i\in I} \varphi_{in}(x_i + \omega_i) + \sum_{i\in I} \nu_{in}(x_i + \omega_i) + \sum_{j\in J} \nu_{jn}(z_j + \Delta\omega_j) + \sum_{j\in J} \sigma_{jn}(z_j + \Delta\omega_j) \le \Omega_n \quad (n \in N), \quad (2.55)$$

$$\sum_{i \in I} \varphi'_{in}(x'_i + \omega'_i) + \sum_{i \in I} v'_{in}(x' + \omega'_i) + \sum_{j \in J} v'_{jn}(z'_j + \Delta \omega'_j) + \sum_{j \in J} o'_{jn}(z'_j + \Delta \omega'_j) \le \Omega'_n \ (n \in N), (2.56)$$

- по водозабору из реки

$$\sum_{i \in I} q_i(x'_i + \omega'_i) \sum_{j \in J} t_j(z'_j + \Delta \omega'_j) \le T' \xi, \tag{2.57}$$

- по почвенным потерям от водной и ветровой эрозии на землях, подвергавшихся и не подвергавшихся влиянию события:

$$\begin{split} \sum_{i \in I} RU_i D_i V_i C_i P_i(x_i + \omega_i) + \sum_{j \in J} RU_j' D_j' V_j' C_j' P_j'(z_j + \Delta \omega_j) + \sum_{i \in I} M_i T(x_i + \omega_i) + \\ + \sum_{j \in J} M_j' T(z_j + \Delta \omega_j) \leq \eta, \end{split} \tag{2.58}$$

$$\sum_{i \in I} RU_{i}D_{i}V_{i}C_{i}P_{i}(x'_{i} + \omega'_{i}) + \sum_{j \in J} RU'_{j}D'_{j}V'_{j}C'_{j}P'_{j}(z'_{j} + \Delta\omega'_{j}) + \sum_{i \in I} M_{i}T(x'_{i} + \omega'_{i}) + \sum_{i \in J} M'_{j}T(z'_{j} + \Delta\omega'_{j}) \leq \eta',$$
(2.59)

- по неотрицательности переменных:

$$x_i, x_i', z_j, z_j', y_k, \omega_i, \omega_i', \Delta\omega_j, \Delta\omega_j', y_k' \ge 0, \tag{2.60}$$

где b_i^F , ζ_j^F ($b_i'^F$, $\zeta_j'^F$) - дополнительные трудозатраты по восстановлению потерь от влияния события на 1 га неорошаемых (орошаемых) земель культуры вида i и кормов j; ε_k^F - дополнительные трудозатраты по восстановлению потерь от влияния события на 1 гол. вида k.

Задача оптимизации аграрного производства (2.46) — (2.60) для целевой функции с максимальной прибылью, учитывающей ущерб окружающей среде и риск наступления природного события, позволяет оптимизировать разные ситуации производства продукции при сочетании неорошаемого и орошаемого земледелия.

Алгоритм реализации приведенной модели заключается в выполнении следующих операций. Во-первых, на основе исходных данных разных источников определяются коэффициенты при неизвестных и правые части. Во-вторых, вычисляются коэффициенты негативного влияния на окружающую среду. Вопределяются значения событий, влияющих третьих, на производство продукции. В-четвертых, с помощью разработанного программного комплекса решается линейного программирования задача вероятностными характеристиками. В-пятых, модель реализуется для разных ситуаций, связанных с повторяемостью и значением события, с использованием метода Монте-Карло.

Рассмотренная эколого-математическая модель позволяет оптимизировать производство аграрной продукции с учетом рисков, связанных с экстремальными климатическими событиям, прежде всего, засухами.

Выводы по главе 2

1. Определены статистические свойства производственно-экономических характеристик, описывающих отрасли растениеводства и животноводства. Урожайность сельскохозяйственных культур предлагается оценивать с помощью законов распределения вероятностей (трехпараметрическое степенное гаммараспределение) или интервально в зависимости от объемов данных.

Характеристики посевной площади, поголовья и продуктивности животных обладают сильными внутрирядными связями и могут быть смоделированы по трендам и авторегрессионным уравнениям.

- 2. На основании статистического анализа рядов скорости ветра, интенсивности осадков, почвенных потерь, загрязнений вредными веществами почвы и воды выявлено, что они являются случайными или интервальными. Для описания случайных оценок предлагается использовать распределение Пирсона III типа и трехпараметрическое степенное гамма-распределение.
- 3. Предложены детерминированные эколого-математические модели максимизации прибыли при производстве аграрной продукции с учетом ущербов окружающей среде в условиях влияния на процессы экологических и технологических факторов для неорошаемого и орошаемого земледелия.
- 4. Разработаны эколого-математические модели оптимизации сочетания производства растениеводческой и животноводческой продукции для орошаемого и неорошаемого земледелия с интервальными производственными, экологическими и климатическими характеристиками.
- 5. Предложены эколого-математические модели оптимизации производства аграрной продукции для отдельных отраслей и их сочетания с учетом вероятностных характеристик техногенных загрязнений, эрозионных процессов и климатических событий.

3 ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ЭКОЛОГО-МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

3.1 Модель базы данных

Одним из важнейших компонентов программного комплекса является база данных.

разработанных реализации моделей Для эколого-математических продукции производства аграрной необходимо соответствующее обеспечение. Для информационное программного комплекса экологоматематического моделирования производства с учетом техногенного природного воздействия на почву и водные объекты была создана специальная база данных.

При проектировании программного комплекса создана логическая модель базы данных с помощью CASE-средства ERwin [84, 87].

Информационная модель, полученная в процессе анализа, сначала преобразуется в логическую модель данных, показанную на рис. 3.1, а затем в физическую.

В модели данных для эколого-математического моделирования аграрного производства с учетом ущербов от негативного влияния природных и техногенных факторов на логическом уровне выделено 12 сущностей:

- классификаторы: «Муниципальное образование», «Предприятие», «Характеристика», «Район», «Сельскохозяйственные культуры», «Сельскохозяйственные животные», «Явления»;
- таблицы: «Значение характеристики», «Характеристики загрязнения», в том числе вспомогательные таблицы «Коэффициент агрофона», «Коэффициенты негативного воздействия», «Показатели деградации».

Каждая из сущностей имеет множество атрибутов, например, сущность «Характеристики загрязнения» имеет следующие атрибуты: «ID загрязняющего вещества», «Наименование», «ID района (FK)», «Год», «Значение», «Предельнодопустимая концентрация». Перечисленные атрибуты характеризуют указанную сущность с той стороны, которая необходима специалисту.

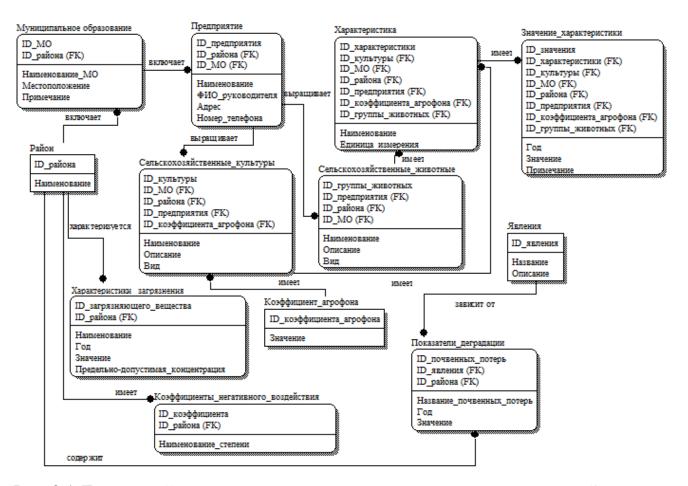


Рис. 3.1 Логический уровень модели данных программного комплекса «Экологоматематическое моделирование аграрного производства»

Разрабатываемый на основе базы данных программный комплекс может использоваться как самостоятельный продукт для моделирования аграрного производства с учетом техногенных факторов.

Информационное обеспечение программного комплекса реализовано в СУБД Microsoft Access 2010, которое состоит из базы данных и справочника. База данных включает в себя информацию об урожайности различных культур, площадях посевов, поголовье животных, а также данные о климатических характеристиках (скорость ветра, осадки, расходы воды) за многолетний период по муниципальным районам Иркутской области. В справочник входят данные о предельно-допустимых концентрациях вредных веществ в почве и воде, их фоновое содержание, а также материалы о рельефе и почве на различных территориях региона.

Источниками данных являются региональные министерства природных ресурсов (МПРиЭ) хозяйства экологии И сельского (MCX), агрохимической службы, Иркутское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей (Иркутское УГМС),предприятия среды агропромышленного комплекса (АПК) региона, Территориальный Федеральной службы государственной статистики по Иркутской области. Большое значение для оценки эрозии почвы имеют картографические материалы.

База данных может периодически дополняться из формализованных таблиц приложения MS Excel посредством пользовательского интерфейса программного комплекса. Кроме того, информацию в базе данных можно дополнять, обновлять или удалять непосредственно в СУБД.

3.2 Алгоритмическое обеспечение программного комплекса

Для моделирования многолетних рядов производственно-экономических, природно-климатических и экологических характеристик использовались вероятностные, авторегрессионные и трендовые модели.

При моделировании характеристик необходимо оценивать статистические выборки. коэффициентов параметры Анализ автокорреляции позволяет определить уровень связности значений ряда. Если ряд случайный, используются законы распределения вероятностей. Статистический анализ природносвойств эмпирических данных показал, ЧТО ДЛЯ описания климатических и производственно-экономических характеристик применимы следующие законы распределения: Пирсона III типа и трехпараметрического степенного гамма-распределения.

Кроме выбор методов моделирования исследуемой τογο, ДЛЯ характеристики зависит от значений коэффициента автокорреляции. В первом случае, когда значения ряда случайны, используются соответствующие методы теории вероятностей и математической статистики. Наличие сильных значимых внутрирядных связей позволяет использовать авторегрессионные модели для заблаговременностью прогнозирования характеристик c1-3 года, что подтверждается критериями оценки качества модели И методами

ретроспективного прогнозирования. В случае наличия во временных рядах низких значимых автокорреляционных связей применяются статистические методы обработки данных с учетом этих связей.

Тренды имеют большое значение при моделировании производственных характеристик. Трендовые модели являются значимыми для описания изменчивости поголовья животных, их валового продукта и посевной площади сельскохозяйственных культур. Значимые тренды можно использовать для прогнозирования характеристик с заблаговременностью 1 – 2 года [48].

При незначительных рядах наблюдений, неоднородности данных, уровня развития предприятия характеристики могут быть описаны с помощью интервальных оценок.

На основе предложенных эколого-математических моделей, приведенных во второй главе, 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. 3.2).

На первом этапе реализации алгоритма вводятся производственноэкономические, природно-климатические и экологические данные.

На втором этапе осуществляется статистический анализ производственноэкономических, природно-климатических и экологических характеристик для определения их особенностей. Для интервальных характеристик определяются нижние и верхние 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.

На четвертом этапе определяется вид модели: детерминированная или неопределенная. Во втором случае рассматриваются варианты модели с

интервальными или вероятностными характеристиками. При построении детерминированной задачи вычисляется оптимальное решение для усредненных значений характеристик.

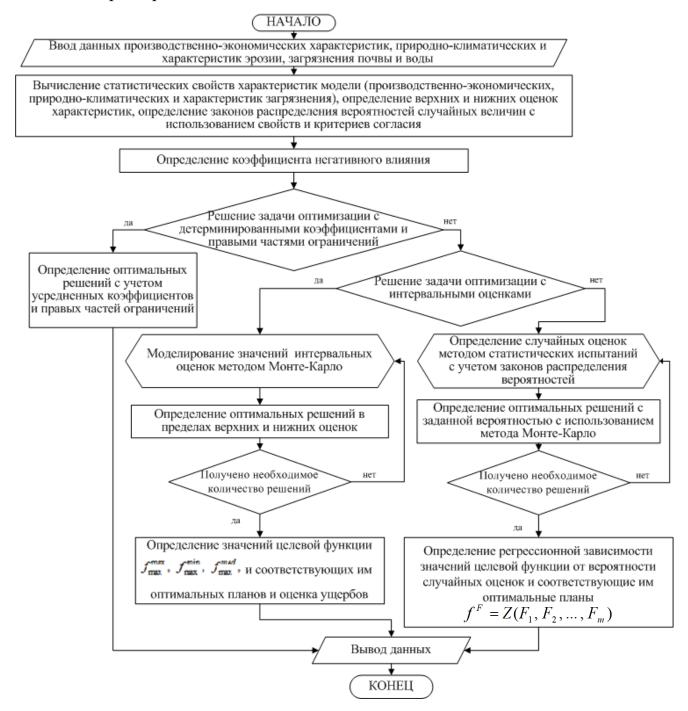


Рис. 3.2 Алгоритм решения эколого-математических задач оптимизации производства аграрной продукции

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 сформулированной совокупности задач с интервальными или случайными характеристиками.

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

$$\frac{f_n^* - f_{n-1}^*}{f_n^*} 100\% \le \delta. \tag{3.1}$$

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 [41].

На рис. 3.3 представлен алгоритм для решения эколого-математической задачи в условиях влияния на производственно-экономические характеристики экстремальных климатических событий. При этом целевая функция определялась в виде максимума прибыли с учетом ущербов окружающей среде.

Во-первых, на основе исходных данных разных источников определяются коэффициенты при неизвестных и правые части.

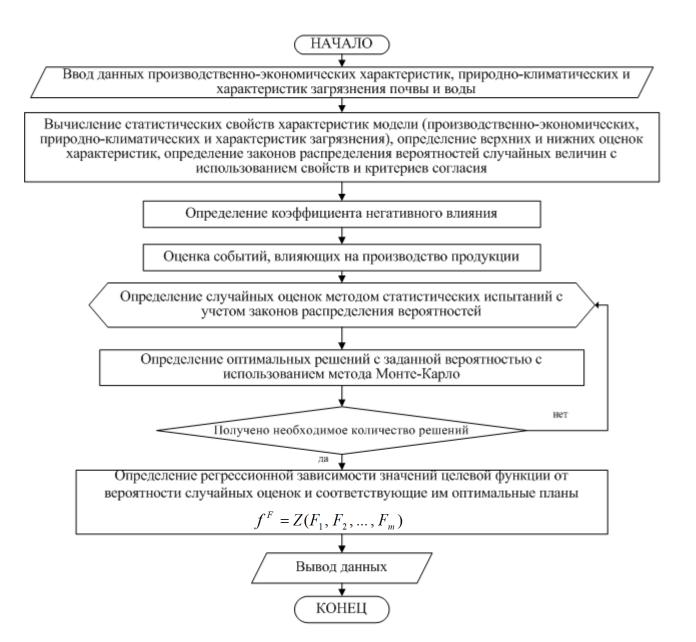


Рис. 3.3 Алгоритм решения эколого-математических задач оптимизации производства аграрной продукции в условиях природных рисков

Во-вторых, вычисляются коэффициенты негативного влияния на окружающую среду.

В-третьих, оцениваются значения событий, влияющих на производство продукции.

В-четвертых, с помощью разработанного программного комплекса решается задача линейного программирования.

В-пятых, модель реализуется для разных ситуаций, связанных с повторяемостью и значением события с использованием метода Монте-Карло.

При моделировании производства аграрной продукции большое значение имеет описание негативного влияния техногенных и природных процессов на земельные и водные ресурсы. Оценивать загрязнение и эрозию почвы в модели можно с помощью эмпирических коэффициентов, учитывающих ухудшение рассматриваемого объекта.

При решении задач математического программирования в условиях неопределенности используют разные методы [13, 66, 77, 80, 97], компьютерные программы [51, 108, 139] и имитационное моделирование [50, 100, 108].

Для реализации численных алгоритмов (рис. 3.1 и 3.2) разработан программный комплекс, В котором предусмотрены функции все обработки осуществления операций, касающихся статистической 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.

3.3 Программный комплекс

Для решения задач оптимизации производственных процессов разными авторами предложены информационные системы для управления разными процессами [44, 51, 53, 61, 85, 88-90, 111, 117, 148, 159, 160 и др.]. Из всех этих систем выделим те, которые предложены в работах [51, 117].

В статье [51] описан программный комплекс, позволяющий моделировать производство аграрной продукции в условиях влияния на деятельность товаропроизводителей экстремальных климатических явлений и их сочетания. Рассмотрены ситуации, учитывающие воздействия редких событий. Приведены результаты моделирования для некоторых предприятий.

Работа [117] посвящена системе поддержке принятия решения для управления ресурсами сложных систем. При этом авторы статьи связывают качество принимаемых решений с используемыми технологиями, методами, качеством данных и знаний. Другими словами, для повышения эффективности

получаемых результатов с помощью программных комплексов и систем поддержки принятия решений необходимы исходные данные определенного качества.

К основным функциональным требованиям к программному комплексу можно отнести:

- сбор, обработка и хранение данных о производственно-экономических, природно-климатических и экологических характеристиках;
- формирование и выдача необходимой информации: справочной информации, климатических или экологических сведений за многолетние периоды, текущей или плановой информации о результатах производства [3];
- оптимизация производства аграрной продукции с критерием оптимальности в виде максимума прибыли с учетом ущербов окружающей среде на основе сведений, которые хранятся в базе данных системы, с использованием методов математического моделирования;
- взаимодействие с другими программными продуктами для более эффективного использования полученных результатов [51].

При использовании структурного подхода для разработки программного комплекса спроектирована функциональная модель, декомпозированная на процессы. Описание функций, выполняемых системой, приведено в соответствии с нотацией IDEF0 [11,16].

Функциональная модель программного комплекса эколого-математического моделирования аграрного производства с учетом ущербов окружающей среде от негативных природных и техногенных факторов спроектирована с использованием программного продукта Erwin Process Modeler 7.3 [84].

Основной функцией проектируемой системы является «Экологоматематическое моделирование производства аграрной продукции» (рис. 3.4).

Функция «Эколого-математическое моделирование аграрного производства» декомпозирована на 5 функций нижнего уровня (рис. 3.5).

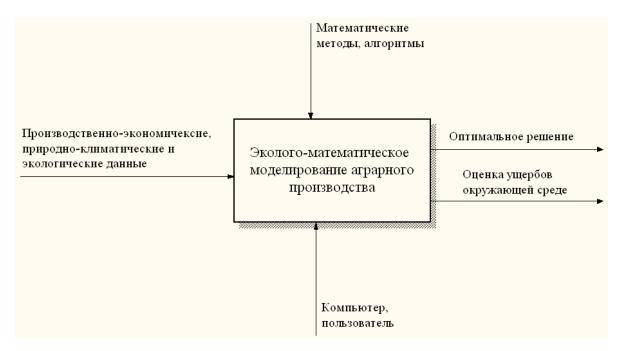


Рис. 3.4 Функциональная модель программного комплекса «Экологоматематическое моделирование аграрного производства» в нотации IDEF0

Согласно функциональной модели на первом этапе осуществляется статистическая обработка производственно-экономических, природно-климатических и экологических характеристик.

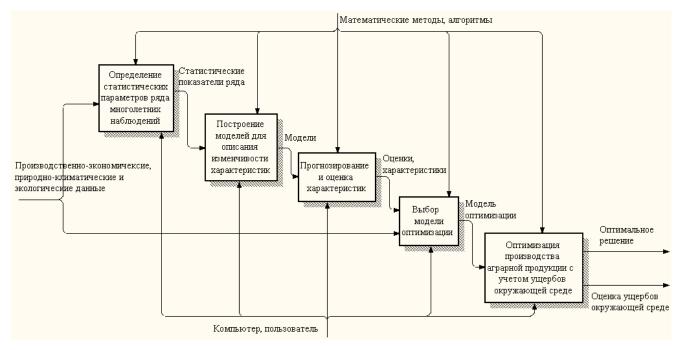


Рис. 3.5 Декомпозиция функции «Эколого-математическое моделирование аграрного производства» в нотации IDEF0

Затем на основе анализа полученной информации выявляются особенности изменчивости характеристик и строятся их модели для прогнозирования и оценки

изменчивости. Исходя из свойств характеристик и полученных моделей, осуществляется выбор задачи оптимизации производства аграрной продукции для получения максимальной прибыли с учетом ущербов окружающей среде [41].

Ввиду того, что характеристики являются неопределенными, используются методы получения оптимальных решений в условиях неполной информации [13, 66, 80]. Результаты реализации модели зависят от применяемой модели математического программирования.

Для детерминированных моделей результатом оптимизации аграрного производства будет максимальное значение прибыли с учетом ущербов окружающей среде и соответствующий им оптимальный план площадей используемых сельскохозяйственных культур и поголовье разных видов животных.

Применение модели с интервальными характеристиками позволяет находить множество оптимальных решений с привлечением имитационного моделирования характеристик. Из полученных решений выделяют верхнюю, нижнюю и медианную оценки максимальной прибыли и соответствующие им оптимальные планы искомых переменных — площадей посева разных видов культур и поголовья разных видов.

С помощью моделей с вероятностными характеристиками можно получить распределение вероятностей значений целевой функции и соответствующий каждому значению максимальной прибыли с учетом экологических ущербов оптимальный план искомых переменных. Для многократного моделирования характеристик применим метод статистических испытаний. Помимо вероятностного распределения максимальной прибыли с учетом экологических ущербов, моделирование, применяя имитационное онжом получить регрессионную зависимость значений целевой функции от вероятностей случайных характеристик. По смоделированным вероятностям на основе выражения целевой регрессионного определяется значение функции соответствующий этому значению оптимальный план.

Описание интерфейса программного комплекса. На рис. 3.6 показана схема функционирования программного комплекса «Эколого-математическое моделирование аграрного производства».

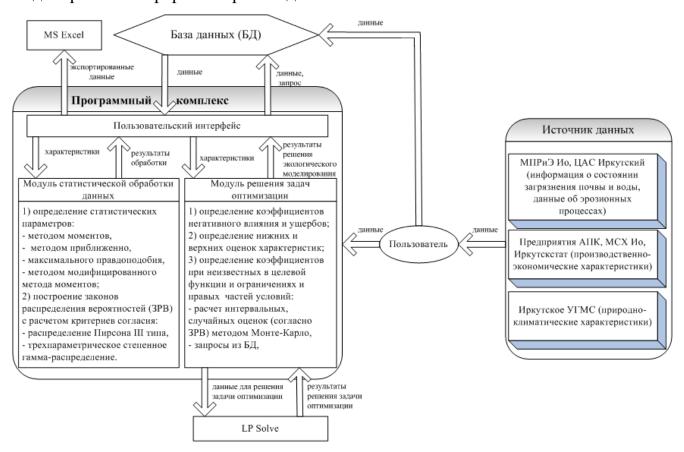


Рис. 3.6 Схема функционирования программного комплекса «Экологоматематическое моделирование аграрного производства»

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 [69, 70].

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 $(Y\Gamma MC),$ 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 [70].

Программный комплекс решает задачи с использованием исключительно базы данных и с участием пользователя, который может задавать нижние и верхние оценки интервальной характеристики, определять вид неопределенной задачи, закон распределения вероятностей, число решений задачи и другое. Кроме того, с помощью программной среды реализованы различные методы оценки статистических параметров, способы расчета критериев соответствия законов распределения вероятностей эмпирическим функциям. Окно заставки программного комплекса показано на рис. 3.7.

Интерфейс программного комплекса состоит из трех пунктов меню: «Классификаторы», «Исходная информация» и «Расчет».

Для работы сущностями базы используется данных меню «Классификаторы»: муниципальные образования, сельскохозяйственные культуры, сельскохозяйственные животные, загрязнение, эрозия, загрязняющие «Исходная информация» вещества. C помощью меню осуществляется дополнение, обновление и удаление сведений в базе данных; просмотр, их загрузка для проведения расчетов (рис. 3.8).

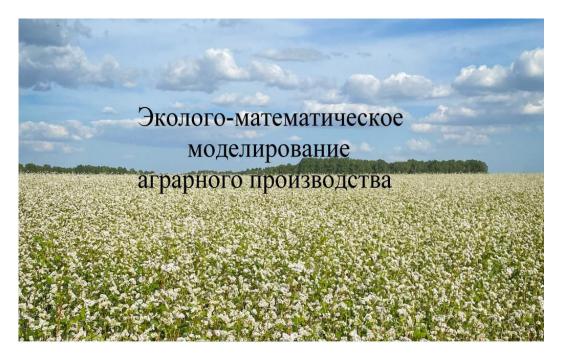


Рис. 3.7 Заставка программного комплекса

В меню «Расчет» можно активировать два пункта: «Статистика» и «Оптимизация».

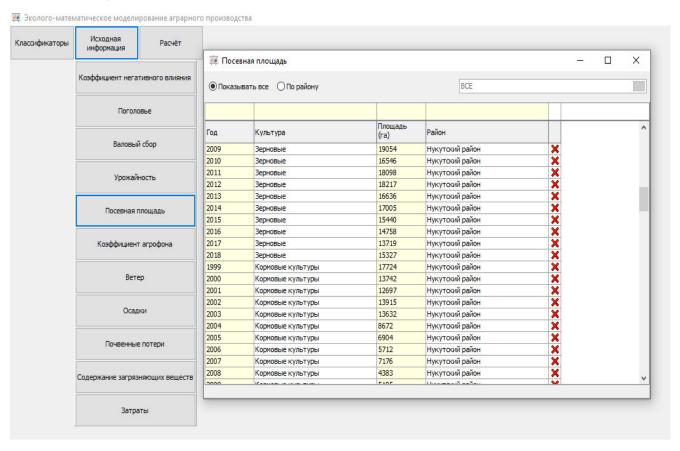


Рис. 3.8 Окно содержимого базы данных характеристик многолетних наблюдений и выбора данных для выполнения расчетов

С помощью пункта «Статистика» осуществляется статистическая обработка данных с использованием метода моментов, приближенно максимального правдоподобия, и модифицированного метода моментов (рис. 3.9).

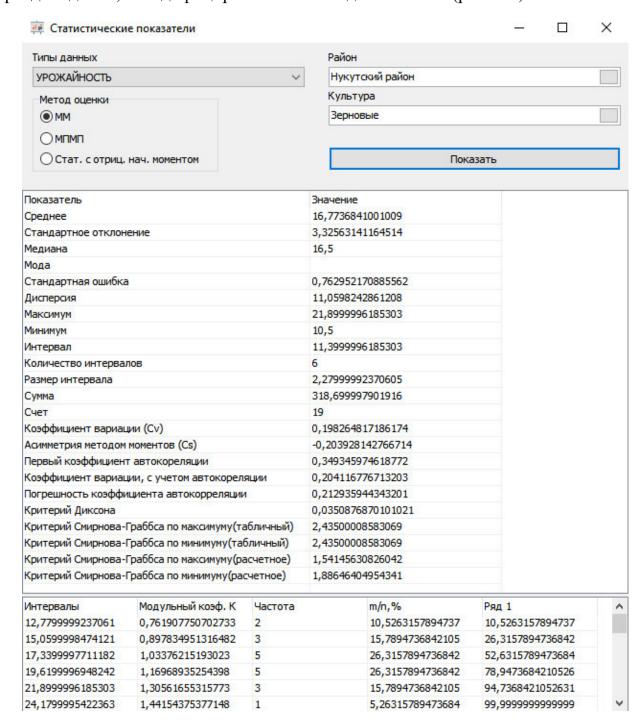


Рис. 3.9 Окно выбора данных и расчета статистических параметров для многолетних рядов разных характеристик

Кроме того, с помощью этого пункта меню можно подобрать закон распределения вероятностей исследуемого многолетнего ряда. При этом соответствие аналитического закона распределения эмпирическим данным

определяется с помощью критериев согласия Колмогорова-Смирнова и $\chi 2$ [126]. Согласно пункту «Оптимизация» решаются задачи математического программирования для получения оптимальных планов производства аграрной продукции с учетом негативного влияния окружающей среде по оценкам характеристик, полученных с помощью меню «Статистика».

На рис. 3.10 приведен фрагмент реализованной эколого-математической модели для СХАО «Приморский» Нукутского района с вероятностными характеристиками для неорошаемого земледелия.

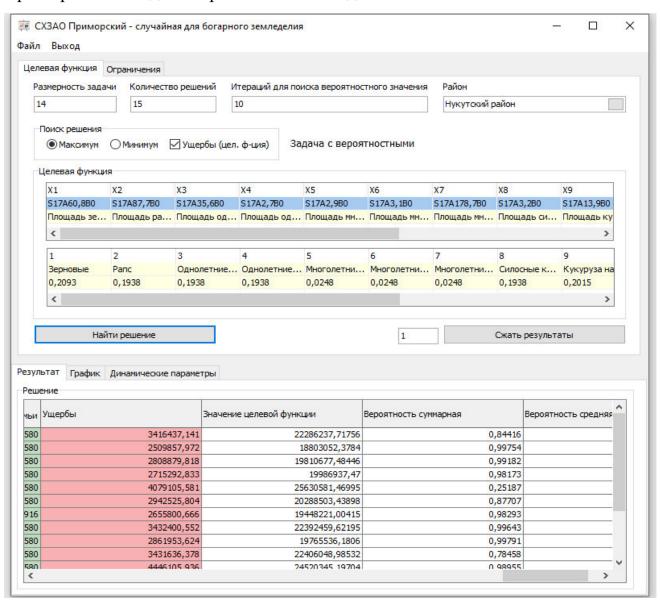


Рис. 3.10 Окно определения оптимального решения задачи экологоматематического моделирования аграрной продукции с учетом ущербов от негативного влияния на окружающую среду

При отмеченном флажке «Ущербы» целевая функция содержит в себе ущербы окружающей среде. Программный комплекс позволяет сохранять создаваемые модели оптимизации.

При отсутствии выбора флажка «Ущербы» программный комплекс позволяет получить целевую функцию без учета ущербов.

Интервальные характеристики обозначаются через знак «/» между минимальными и максимальными значениями (рис. 3.11).

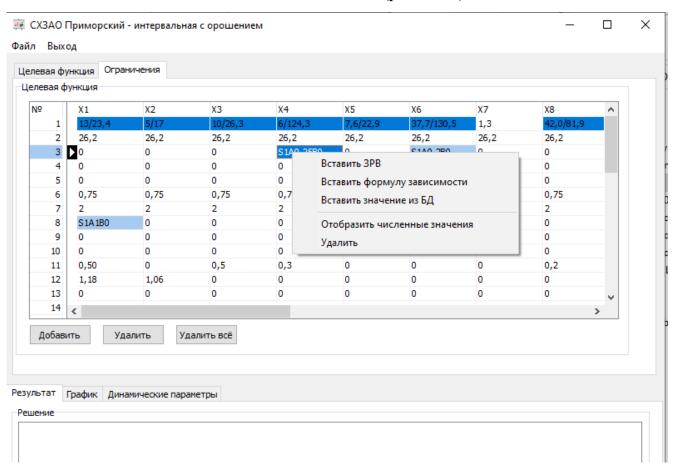


Рис. 3.11 Окно для ввода ограничений для определения оптимального решения задачи эколого-математического моделирования аграрной продукции с учетом ущербов от негативного влияния на окружающую среду

Кроме того, любую характеристику в левых и правых частях ограничений можно: 1) обозначить как вероятностный и задать для него один из реализованных в программном комплексе законов распределения вероятностей (рис. 3.12); 2) определить как функционально зависимый путём записи формулы для него; 3) определить как расчетное значение из базы данных (рис. 3.13). При

этом в ячейке будет отображаться набор символов для отображения фактических данных, полученных при решении задачи оптимизации.

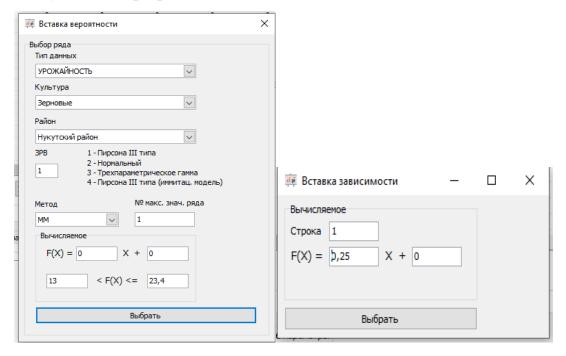


Рис. 3.12 Окно для задания вероятностной характеристики и вероятностной функции программного комплекса «Эколого-математическое моделирование аграрного производства»

Для просмотра численного значения необходимо выбрать пункт «Отобразить численные значения» в контекстном меню ячейки.

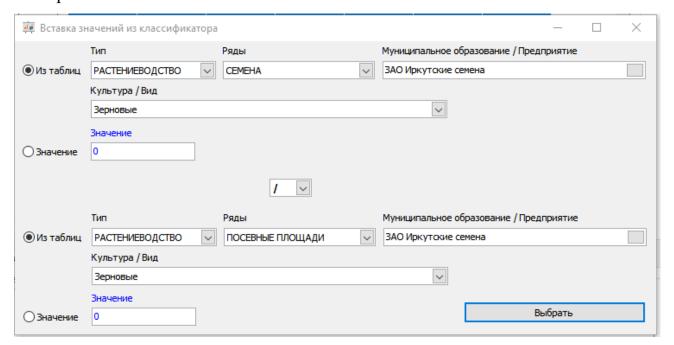


Рис. 3.13 Окно выбора расчетного значения из базы данных программного комплекса «Эколого-математическое моделирование аграрного производства»

Пункт «Вставка зависимости» позволяет установить связь между ограничениями. Выбирая номер строки из ограничений, определяем «х». В дальнейшем расчет характеристики ведется по линейному уравнению, отображенном в окне «Вставка зависимости».

Для удобства сохранения и анализа результатов программный комплекс позволяет выгрузить страницу результаты решения в Microsoft Excel посредством выбора соответствующего пункта контекстного меню (рис. 3.14).

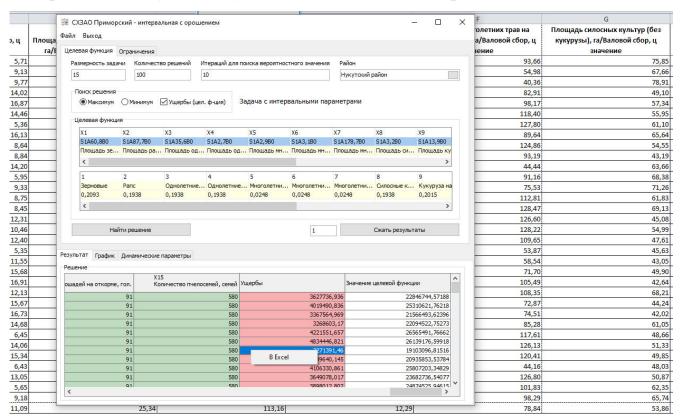


Рис. 3.14 Импорт полученных решений в Microsoft Excel программного комплекса «Эколого-математическое моделирование аграрного производства»

Программный комплекс эколого-математического моделирования аграрного производства, разработанный автором в соавторстве, позволяет оптимизировать структуру производства с целевой функцией в виде максимума прибыли, учитывая ущербы окружающей среде. Фрагмент программного кода решения задач оптимизации приведен в приложении 3.

Основными пользователями разработанного программного комплекса являются руководители предприятия, управленческий персонал, экономисты, агрономы и зоотехники сельскохозяйственного предприятия. Кроме того,

программный комплекс имеет значение для использования в работе профильными хозяйства специалистами министерства сельского региона районных управлений сельского хозяйства. Он может быть использован для подготовки заведений высших учебных И специалистов, студентов занимающихся планированием, оптимизацией управлением И аграрного производства (приложение 4).

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.

3.4 Реализация моделей

Разработанный алгоритм (рис. 3.2) реализован при решении предложенных задач оптимизации производства аграрной продукции на неорошаемых и орошаемых землях с целевой функцией в виде прибыли с учетом ущербов, наносимых окружающей среде водной и ветровой эрозией почв и загрязнением земельных ресурсов на примере СХАО «Приморский» Нукутского района.

Предприятие специализируется на производстве растениеводческой и животноводческой продукции. Здесь сохранилась с 70-х годов прошлого века система орошения, которая эксплуатируется для мелиорации 320 га.

В качестве неизвестных переменных в эколого-математической задаче оптимизации производства аграрной продукции при неорошаемом земледелии на предприятии СХАО «Приморский» использованы площади девяти сельскохозяйственных культур: 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) . В дополнение к этому в модели рассматривается пять переменных отрасли животноводства: поголовье коров основного стада (x_{10}) , поголовье коров на откорме (x_{11}) ,

количество лошадей основного стада (x_{12}) и на откорме (x_{13}) , количество пчелосемей (x_{14}) .

При сочетании неорошаемого и орошаемого земледелия неизвестными переменными в задаче оптимизации производства аграрной продукции являются площади десяти 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) , кормовая кукуруза (x_9) и кукуруза, подверженной орошению (x_{10}) . Кроме того, в моделях использовано пять переменных отрасли животноводства: поголовье коров основного стада (x_{11}) , поголовье коров на откорме (x_{12}) , количество лошадей основного стада (x_{13}) , количество лошадей на откорме (x_{14}) и количество пчелосемей (x_{15}) .

Рассмотрены три вида моделей: детерминированные, с интервальными и вероятностными характеристиками. В первой модели значения коэффициентов при неизвестных в целевой функции, левых частях ограничений и правой части приняты в качестве усредненных величин. Во второй модели часть характеристик, 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 принят 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 предприятия СХАО «Приморский» согласно алгоритму, приведенному в разделе 1.4, определены коэффициенты негативного влияния, характеризующие отношение загрязненных И эродированных земель К площади сельскохозяйственных По угодий. исследований результатам разных сельскохозяйственных культур они колеблются от 0,2 до 0,4.

Модель с детерминированными характеристиками. Моделирование производства аграрной продукции с усредненными характеристиками при неорошаемом земледелии с помощью программного комплекса позволило получить следующий оптимальный план: $x_1 = 11\ 131\ \text{гa}$, $x_2 = 500\ \text{гa}$, $x_3 = 2\ 679\ \text{гa}$, $x_4 = 10\ 064\ \text{гa}$, $x_5 = 50\ \text{гa}$, $x_6 = 100\ \text{гa}$, $x_7 = 500\ \text{гa}$, $x_8 = 435\ \text{гa}$, $x_9 = 1028\ \text{гa}$, $x_{10} = 4\ 898\ \text{голов}$, $x_{11} = 1\ 000\ \text{голов}$, $x_{12} = 96\ \text{голов}$, $x_{13} = 91\ \text{голов}$, $x_{14} = 580\ \text{семей}$ (таблица 3.1). В приложении 5 приведено решение этой задачи.

Таблица 3.1 Значения целевой функции f в виде прибыли с ущербами окружающей среде при оптимизации производства аграрной продукции для разных моделей и предприятий Иркутской области, тыс. руб.

Сочетание орошаемого и Неорошаемое земледелие неорошаемого земледелия Модель оптимизации производства в т. ч. в т. ч. ff ущербы ущербы СХАО «Приморский» С детерминированными 22 092,4 3 364,2 22 649,5 3 474,2 характеристиками С интервальными оценками, 18 705,5 19 031,8 2 643,0 2 645,2 нижнее значение С интервальными оценками, 24 200,0 4 429,8 23 827,7 3 729,2 медианное значение С интервальными оценками, 4 699,4 27 506,3 4 473,9 28 645,3 верхнее значение $f = 25901,0 - 6217,0F_1$ $f = 25517,8 - 6180,1F_1 -$ С вероятностными оценками $-1196,9F_2+126,2F_3$ $-1781,3F_2-36,6F_3$ 18 774,1 18 909,5 2 637,0 при вероятности 0,05 2 515,3 при вероятности 0,50 21 388,7 3 222,7 21 498,0 3 343,1 при вероятности 0,95 27 337,4 4 431,4 27 361,1 4 562,9 В условиях природных рисков: - наибольшие потери урожая, вероятность 0,056 16 199,0 2 367,2 - засуха 2015 года, вероятность 18 544,5 2 454,3 0,068 ЗАО "Иркутские семена" С детерминированными 7 391,3 1 812,9 характеристиками С интервальными оценками, 5 546,6 1 358.2 нижнее значение С интервальными оценками, 7 185,8 1 775,6 медианное значение С интервальными оценками, 8 523,1 2 136,9 верхнее значение

Моделирование производства аграрной продукции с усредненными характеристиками при сочетании неорошаемого и орошаемого земледелия с помощью программного комплекса позволило получить следующий оптимальный план: $x_1 = 10~744$ га, $x_2 = 500$ га, $x_3 = 2~679$ га, $x_4 = 8~918$ га, $x_5 = 50$ га, $x_6 = 100$ га, $x_7 = 500$ га, $x_8 = 1251$ га, $x_9 = 503$ га, $x_{10} = 320$ га, $x_{11} = 4~898$ голов, $x_{12} = 1~000$ голов, $x_{13} = 96$ голов, $x_{14} = 91$ голов, $x_{15} = 580$ семей (приложение 5).

При этом получены максимальные прибыли от производства аграрной продукции при неорошаемом и орошаемом земледелии, равные 22 092,4 и 22 649,5 тыс. руб. Ущербы окружающей среде составили 3 364,2 и 3 474,2 тыс. руб.

Согласно полученным результатам вторая модель несколько предпочтительнее первой – по прибыли и большей разности между прибылью и ущербом.

Модель с интервальными оценками. В качестве интервальных оценок использованы характеристики годовых почвенных потерь и урожайность сельскохозяйственных культур, кроме многолетних трав на семена. Остальные переменные приняты как усредненные.

Моделирование производства аграрной продукции с интервальными оценками согласно алгоритму (рис. 3.2) позволило получить следующие результаты для неорошаемого земледелия (приложение 6):

- оптимальный план при медианном значении целевой функции: $x_1 = 14\,592$ га, $x_2 = 500$ га, $x_3 = 1\,591$ га, $x_4 = 5\,502$ га, $x_5 = 50$ га, $x_6 = 100$ га, $x_7 = 500$ га, $x_8 = 30$ га, $x_9 = 725$ га, $x_{10} = 1433$ головы, $x_{11} = 1\,000$ голов, $x_{12} = 96$ голов, $x_{13} = 91$ голова, $x_{14} = 580$ семей.
- оптимальный план при минимальном значении целевой функции: x_1 = 8 918 га, x_2 = 500 га, x_3 = 4 329 га, x_4 = 7934 га, x_5 = 50 га, x_6 = 100 га, x_7 = 500 га, x_8 = 4 964 га, x_9 = 1 221 га, x_{10} = 4 898 голов, x_{11} = 1 000 голов, x_{12} = 96 голов, x_{13} = 91 голова, x_{14} = 580 семей.
- оптимальный план при максимальном значении целевой функции: $x_1 = 11~807$ га, $x_2 = 500$ га, $x_3 = 1~734$ га, $x_4 = 10~672$ га, $x_5 = 50$ га, $x_6 = 100$ га,

 $x_7 = 500$ га, $x_8 = 199$ га, $x_9 = 969$ га, $x_{10} = 4898$ голов, $x_{11} = 1000$ голов, $x_{12} = 96$ голов, $x_{13} = 91$ голова, $x_{14} = 580$ семей.

При решении эколого-математической задачи для сочетания двух видов земледелия получены близкие результаты к задаче неорошаемого земледелия. Площадь кукурузы, подверженная орошению, остается неизменной и составляет 320 га (приложение 7).

Моделирование производства с интервальными оценками показало, что на землях с сочетанием орошаемого и неорошаемого земледелия прибыль в экологоматематических задачах выше (табл. 3.1)на 1,7-4,0%, а ущербы увеличились на 0,1-4,8% по сравнению с неорошаемым земледелием.

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

Модели со случайными оценками. В отличие от моделей с интервальными модели с вероятностными характеристиками предполагают, что некоторые коэффициенты при неизвестных целевой функции и ограничений можно описать вероятностными распределениями.

При решении задачи оптимизации производства аграрной продукции со случайными оценками на основании статистических свойств характеристик и критерия согласия Колмогорова в качестве законов распределения вероятностей, описывающих многолетние выборки, выбраны функция Гаусса для урожайности зерновых $(\bar{x}=16.8;C_v=0.20;C_s=-0.21)$ и гамма-распределение - для биопродуктивности однолетних ($\bar{x}=50.9;C_v=0.56;C_s=1.01$) и многолетних трав на зеленый корм ($\bar{x}=76.8;C_v=0.35;C_s=0.63$).

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 500 итераций.

При решении эколого-математической задачи с вероятностными коэффициентами при неизвестных левых частей ограничений определены регрессионные зависимости значений целевой функции от вероятности случайных величин для неорошаемого земледелия и сочетания орошаемого и неорошаемого земледелия, которые приведены в таблице 3.1. В этих формулах использованы следующие обозначения: F_1 , F_2 и F_3 - вероятности урожайности зерновых культур, однолетних и многолетних трав на зеленый корм.

Полученные регрессионные уравнения являются значимыми и позволяют оценивать целевую функцию от моделируемых вероятностей. При этом значениям критерия оптимальности соответствуют оптимальные планы (приложение 8, 9).

Если целевая функция соответствует вероятности 0,5, то ее значение для неорошаемого земледелия равно 21 388,7 тыс. руб., в том числе ущербы окружающей среде составят 3 222,7 тыс. руб. Для сочетания двух видов земледелий эти значения составляют 21 498,0 и 3 343,1 тыс. руб. соответственно. При этом оптимальный план для неорошаемого земледелия выглядит так: $x_1 = 11 \ 131 \ \text{гa}, \ x_2 = 500 \ \text{гa}, \ x_3 = 2 \ 679 \ \text{гa}, \ x_4 = 10 \ 064 \ \text{гa}, \ x_5 = 50 \ \text{гa}, \ x_6 = 100 \ \text{гa}, \ x_7 = 500 \ \text{гa}, \ x_8 = 435 \ \text{гa}, \ x_9 = 1 \ 028 \ \text{гa}, \ x_{10} = 4 \ 898 \ \text{голов}, \ x_{11} = 1 \ 000 \ \text{голов}, \ x_{12} = 96 \ \text{голов}, \ x_{13} = 91 \ \text{голова}, \ x_{14} = 580 \ \text{семей}; \ для \ \text{сочетания орошаемого } \text{и}$ неорошаемого земледелия оптимальный план следующий: $x_1 = 10 \ 774 \ \text{гa}, \ x_2 = 500 \ \text{гa}, \ x_3 = 2 \ 679 \ \text{гa}, \ x_4 = 8 \ 918 \ \text{гa}, \ x_5 = 50 \ \text{гa}, \ x_6 = 100 \ \text{гa}, \ x_7 = 500 \ \text{гa}, \ x_8 = 1 \ 251 \ \text{гa}, \ x_9 = 503 \ \text{гa}, \ x_{10} = 320 \ \text{гa}, \ x_{11} = 4 \ 898 \ \text{голов}, \ x_{12} = 1 \ 000 \ \text{голов}, \ x_{13} = 96 \ \text{голов}, \ x_{14} = 91 \ \text{голова}, \ x_{15} = 580 \ \text{пчелосемей}.$

В случае, когда $F_1 = F_2 = F_3 = 0.05$ значение целевой функции при оптимизации производства без орошения равно 18 774,1 тыс. руб., в том числе ущербы окружающей среде составят 2 515,3 тыс. руб., для сочетания орошаемого и неорошаемого земледелия эти характеристики равны 18 909,5 тыс. руб. и

2 637,0 тыс. руб. соответственно. При решении этих задач в оптимальном плане упор делается на выращивание зерновых, однолетних трав на зеленый корм, силосных культур без кукурузы и основного стада крупнорогатого скота, а поголовье крупнорогатого скота на откорме, площади однолетних трав на сено и кукурузы на силос минимальны.

При $F_1 = F_2 = F_3 = 0.95$ получен оптимальный план, в котором наибольшую часть занимают площади однолетних трав на сено, силосных культур без кукурузы, а также максимальное поголовье крупнорогатого скота на откорме. При этом целевая функция и ущербы для неорошаемого земледелия составили 27 337,4 тыс. руб. и 4 431,4 тыс. руб., для орошаемого и неорошаемого земледелия они равны 27 361,1 тыс. руб. и 4 562,9 тыс. руб. соответственно.

Решение задачи со случайными оценками в условиях природных рисков (приложение 10) показало, что в худшем случае, при наименьших урожайностях сельскохозяйственных культур (вероятность случая 0,056), получена прибыль 16 199,0 тыс. руб., а ущербы составили 2 367,2 тыс. руб. Убыток равен 5 893,4 тыс. руб. Таким образом, изменчивость климатических и экологических характеристик сильно сказывается на оптимальных планах производства продукции. 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 1000 (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).

В 2015 году территория Иркутской области была подвержена сильной засухе, производители аграрной продукции понесли большие убытки. По сравнению со средними характеристиками в 2015 году прибыль снизилась на 2 628,0 тыс. руб. Вероятность такой ситуации соответствует 0,068.

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. (табл. 3.1). 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%). При этом уменьшены площади многолетних трав на сено до 163 га (86%), поголовье свиней на откорме до 589 (84%) (приложение 11).

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

На основе детерминированной модели с интервальными характеристиками коэффициентов негативного влияния природных и техногенных факторов на окружающую среду решена задача оптимизации производства аграрной продукции для сочетания неорошаемого земледелия и орошения на примере СХАО «Приморский». В приложениях 12 и 13 приведены оптимальные решения для неорошаемого и сочетания неорошаемого и орошаемого земледелия, а в таблице 3.2 – значения целевой функции.

На предприятии Нукутского района в растениеводстве площади изменяются от 0 до 11 136 га, а поголовье животных от 91 до 2 846 голов. Коэффициенты негативного влияния варьировали от 0,02 до 0,40.

Имитационное моделирование позволило получить оптимальные решения и соответствующие им коэффициенты негативного воздействия.

Моделирование производства продукции показало, что нижние и верхние значения прибыли на землях при сочетании орошаемого и неорошаемого земледелия выше на 1,0-1,6%, чем производство без орошения. Отклонения

ущербов составили 0,3-1,3%. Производство аграрной продукции с орошением более устойчиво по сравнению с неорошаемым земледелием [41].

Таблица 3.2 Значения целевой функции *f* в виде максимальной прибыли с учетом ущербов окружающей среде при решении задачи оптимизации производства аграрной продукции с интервальными коэффициентами негативного влияния для СХАО «Приморский», тыс. руб.

Модель оптимизации производства	Неорошаемое земледелие		Сочетание орошаемого и неорошаемого	
			земледелия	
	f без ущербов	ущербы	f без ущербов	ущербы
С интервальными оценками коэффициентов негативного влияния, нижнее значение	16 856,9	4 828,7	17 134,0	5 444,6
С интервальными оценками коэффициентов негативного влияния, медианное значение	17 788,3	4 098,0	18 039,6	4 513,2
С интервальными оценками в виде коэффициентов негативного влияния, верхнее значение	18 606,1	3 345,6	18 792,0	3 695,4

Таким образом, программный комплекс базой производственноэкономических, 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 $\delta \le 2\%$, достаточно 500 $\delta \leq 1\%$ 1000 решений. оптимальных решений, при При продолжительность расчетов в зависимости от числа оптимальных решений описывается возрастающей квадратичной функцией.

Следует отметить, что продолжительность расчета с помощью разработанного комплекса несколько уступает, например, программному комплексу «Управление рисками при планировании аграрного производства» [50]. Однако он решает более сложные задачи.

В заключении отметим, что предложенный программный комплекс успешно может решать задачи моделирования аграрного производства в рамках предложенных моделей для разных категорий товаропроизводителей.

Выводы по главе 3

- 1. Разработано информационное обеспечение для программного комплекса, которое состоит из базы данных и справочника. База данных включает в себя информацию об урожайности различных культур, площадях посевов, валовом сборе, поголовье животных, а также данные о климатических характеристиках (скорость ветра, осадки, расходы воды) за многолетний период, включая муниципальные районы и сельскохозяйственные предприятия Иркутской области. В справочник входят данные о предельно допустимых концентрациях вредных веществ в почве и воде, их фоновое содержание.
- 2. Предложены числовые алгоритмы для реализации моделей оптимизации производства аграрной продукции при сочетании отраслей с детерминированными и неопределенными характеристиками, включающими в себя коэффициенты негативного влияния на окружающую среду, при разных технологиях земледелия, а также в условиях воздействия на производственные процессы экстремальных явлений. Для многократного формирования разных ситуаций использован алгоритм имитационного моделирования.
- 3. Создан программный комплекс для эколого-математического моделирования производства аграрной продукции с разработанным математическим, алгоритмическим и информационным обеспечением, который может решать сложные задачи планирования в условиях неопределенности с необходимой точностью и быстродействием.
- 4. С помощью разработанного программного комплекса реализованы предложенные эколого-математические модели оптимизации производства аграрной продукции в условиях неопределенности при неорошаемом, орошаемом земледелии и их сочетании на примере сельскохозяйственных организаций Иркутской области.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе поставлена и формализована задача эколого-математического моделирования производства аграрной продукции и предложены ее различные варианты с учетом видов земледелия, техногенного и природного воздействия, неопределенности характеристик.

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

Критерием оптимальности в этих задачах является максимум прибыли с учетом ущерба окружающей среде.

Ущербы OT техногенных И природных факторов, наносимые производственным ресурсам товаропроизводителей, предлагается учитывать с помощью введения в математическую модель эмпирических коэффициентов воздействия негативного на природную среду, получаемых согласно разработанному алгоритму. В соответствии с алгоритмом, коэффициенты эродированности и загрязненности почв. Итоговый коэффициент воздействия негативного предлагается рассчитывать путем сложения коэффициентов, характеризующих эродированность почв и загрязнённость почвы вредными веществами.

Разработаны модели оптимизации для отдельных отраслей аграрного производства, их сочетания с учетом техногенных загрязнений с интервальными и вероятностными оценками для разных технологий земледелия, а также модель в условиях природных рисков.

Построены вероятностные модели планирования производства аграрной продукции с максимизацией прибыли и ущербами окружающей среде для сочетания отраслей аграрного производства для неорошаемого и орошаемого земледелия и алгоритмы их реализации.

Предложены алгоритмы решения эколого-математических задач оптимизации аграрного производства с неопределенными производственно-экономическими, климатическими и экологическими характеристиками;

алгоритмы использованы в сельскохозяйственных организациях Иркутской области при планировании объемов производства.

Разработано информационное обеспечение, которое состоит из базы данных и справочника. База данных включает в себя информацию об урожайности различных культур, площадях посевов, поголовье животных, а также данные о климатических характеристиках (скорость ветра и объем осадков) за многолетний период. В справочник входят данные о предельно-допустимых концентрациях вредных веществ в почве и воде, их фоновое содержание, а также материалы о рельефе и почве на различных территориях региона.

Создан программный комплекс эколого-математического моделирования аграрного производства с разработанным специальным математическим, алгоритмическим и информационным обеспечением, позволяющий решать задачи оптимизации производства аграрной продукции (максимум прибыли) с учетом ущерба окружающей среде с необходимой точностью и быстродействием.

Приведены результаты решения эколого-математических задач оптимизации производства аграрной продукции при неорошаемом, орошаемом и сочетании неорошаемого и орошаемого земледелия с помощью разработанного программного комплекса на примере предприятий Иркутской области.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- Б. Π. Эколого-экономические 1. Акмаров, аспекты повышения энергетической продуктивности сельскохозяйственных угодий моделях оптимального земледелия / П. Б. Акмаров, Е. С. Третьякова, Р. Г. Харисов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Социально-экономические науки. – 2012. – № 15. – С. 66-73.
- 2. Аргучинцев, В. К. Моделирование мезомасштабных гидротермодинамических процессов и переноса антропогенных примесей в атмосфере и гидросфере региона оз. Байкал / В. К. Аргучинцев, А. В. Аргучинцева ; Федеральное агентство по образованию, ГОУ ВПО «Иркутский гос. ун-т», Науч.-образовательный центр Байкал. Иркутск : Изд-во Иркутского гос. ун-та, 2007. 255 с.
- 3. Асалханов, П. Г. Математическое и программное обеспечение прогнозирования и планирования агротехнологических операций для природно-климатических зон региона : дис. ... канд. тех. наук : 05.13.01 : защищена 15.10.2013 / Асалханов Петр Георгиевич. Иркутск, 2013. 168 с. Библиогр.: с. 141-156.
- 4. Астафьева, М. Н. Моделирование урожайности сельскохозяйственных культур в условиях неполной информации / М. Н. Астафьева // Сборник научных трудов по материалам III этапа Всероссийского конкурса на лучшую научную работу среди студентов, аспирантов и молодых ученых высших учебных заведений Минсельхоза России, Ярославль, 22-25 мая 2011 года. Ярославль, 2011. С. 148-156.
- 5. Астафьева, М. Н. Пространственно-временные закономерности изменчивости климатических параметров и продуктивности сельскохозяйственных культур на юге Восточной Сибири / М. Н. Астафьева, Я. М. Иваньо, С. А. Петрова // Экологический вестник. 2013. № 3. С. 13-18.
- 6. Барсукова, М. Н. Анализ математического обеспечения программных комплексов управления аграрным производством / М. Н. Барсукова, А. Ю.

- Белякова, Т. С. Бузина // Актуальные вопросы аграрной науки. 2022. № 45. С. 38-47.
- 7. Батурин, В. А. Применение модели "Регион" для анализа медикоэкологических аспектов развития Байкальского региона / В. А. Батурин, А. Б. Столбов // Известия Байкальского государственного университета. — 2016. — Т. 26. — N_2 6. — С. 1019-1025. — DOI 10.17150/2500-2759.2016.26(6).1019-1025.
- Безуглов, В. Г. Состояние с эрозией почв в России / В. Г. Безуглов, Г. Д. Гогмачадзе, М. Е. Синиговец // АгроЭкоИнфо. 2008. № 1(2). С. 3.
- 9. Боинчан, Б. П. Биогеохимическая природа плодородия почв основа новых подходов к интенсификации современного земледелия / Б. П. Боинчан // Биохимические инновации в условиях коррекции техногенеза биосферы : Труды Международного биогеохимического Симпозиума, посвященного 125-летию со дня рождения академика А. П. Виноградова и 90-летию образования Приднестровского университета. В 2-х томах, Тирасполь, 05-07 ноября 2020 года. Тирасполь : Приднестровский государственный университет им. Т. Г. Шевченко, 2020. С. 33-40.
- 10. Болтвина, Е. К. Модели оптимизации заготовки дикорастущей продукции с интервальными параметрами / Е. К. Болтвина, Я. М. Иваньо // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2016. № 6(113). С. 73-81. DOI 10.21285/1814-3520-2016-6-73-81.
- 11. Брусакова, И. А. Информационные системы и технологии в экономике : учебное пособие / И. А. Брусакова, В. Д. Чертовской. Москва : Издательство "Финансы и статистика", 2007. 352 с. ISBN 9785279032457.
- 12. Брыксин, В. М. Прогнозирование урожайности зерновых культур на основе данных дистанционного зондирования и моделирования биопродуктивности / В. М. Брыксин, А. В. Евтюшкин, Н. В. Рычкова // Известия Алтайского государственного университета. 2010. № 1-2(65). С. 89-93.
- 13. Булатов, В. П. Численные методы решения некоторых игровых задач / В. П. Булатов // Методы оптимизации и их приложения / Сибирский

- энергетический институт CO AH CCCP. Иркутск : Ангарская городская типография, 1974. C. 164-178.
- 14. Булыгин, С.Ю. Использование интегрального анализа данных дистанционного зондирования И цифровых моделей рельефа при картографировании почвенного покрова Черноземной зоны / С. Ю. Булыгин, Ф. Н. Лисецкий Научные А. Б. Ачасов, ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Естественные науки. 2012. № 21(140). – C. 143-153.
- 15. Бутырин, М. В. Оценка опасности загрязнения окружающей природной среды тяжелыми металлами в условиях Иркутской области / М. В. Бутырин, Ш. К. Хуснидинов, Т. Н.Сосницкая, Р. В. Замащиков // Плодородие, 2017. № 6 (99). С. 45-48.
- 16. Буянова, Л. Н. Проектирование экономических информационных систем: учебное пособие / Л. Н. Буянова, И. И. Мальцева; Л. Н. Буянова, И. И. Мальцева Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский гос. ун-т водных коммуникаций, 2011.-275 с.
- 17. Винокуров, Г. М. Прибыль и рентабельность в сельских хозяйствах Иркутской области / Г. М. Винокуров, Т. В. Леус // Власть и управление на Востоке России. 2015. N 2015. –
- 18. Волков, С. Н. Землеустройство / С. Н. Волков. М : Колос, 2001. 648 с.
- 19. Газизов, Д. И. Обзор методов статистического анализа временных рядов и проблемы, возникающие при анализе нестационарных временных рядов / Д. И. Газизов // Научный журнал . -2016. N = 3(4). C. 9-14.
- 20. Гильманов, Т. Г. Математическое моделирование биогеохимических циклов в травяных экосистемах / Т.Г. Гильманов. М.: Изд-во МГУ, 1978. 168 с.
- 21. Гладнев, В. В. Применение методов экономико-математического моделирования при оптимизации землепользований сельскохозяйственных предприятий в современных условиях / В. В. Гладнев, Н. С. Ковалев // Динаміка наукових досліджень 2005 : матеріали IV міжнародної науково-практичної

- конференціі, Дніпропетроськ, 20–30 июня 2005 года. Дніпропетроськ : Наука і освіта, 2005. С. 45-47.
- 22. Голубев, И. А. Проблема определения интенсивности водной эрозии почв в Сибири / И. А. Голубев // Вестник КрасГАУ. 2009. № 1(28). С. 80-83.
- 23. Гонова, О. В. Моделирование эколого-экономической эффективности регионального сельскохозяйственного производства / О. В. Гонова // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. 2013. № 2(34). С. 39-44.
- 24. Горбачева, Е. С. Математический анализ и прогнозирование динамики загрязнения атмосферы Российской Федерации стационарными источниками / Е. С. Горбачева, И. М. Пешхоев // Безопасность техногенных и природных систем. 2020. № 1. С. 43-47. DOI 10.23947/2541-9129-2020-1-43-47.
- 25. Горстко, А. Б. Введение в моделирование эколого-экономических систем / А. Б. Горстко, Г. А. Угольницкий. Ростов н/Д. : Изд-во Ростовского университета, 1990.-112 с.
- 26. Горстко, А. Б. Модели управления эколого-экономическими системами / А. Б. Горстко, Ю. А. Домбровский, Ф. А. Сурков. М. : Наука, 1984. 120 с.
- 27. ГОСТ 17.4.4.03-86. Метод определения потенциальной опасности эрозии под воздействием дождей. М.: Стандартинформ, 2008. 5 с.
- 28. ГОСТ Р 56167-2014. Выбросы загрязняющих веществ в атмосферу. М.: Стандартинформ, 2019 15 с.
- 29. ГОСТ 17.4.3.04-85. Охрана природы (ССОП). Почвы. М. : Стандартинформ, 1985. – 4 с.
- 30. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Иркутской области в 2019 году» [Электронный ресурс]. https://irkobl.ru/region/ecology/%D0%B3%D0%BE%D1%81%D0%B4%D0%BE%D0%BA%D0%BB%D0%B0%D0%B4_%D0%B8%D1%82%D0%BE%D0%B3.pdf.
- 31. Гриневич, Г. А. Композитное моделирование гидрографов / Г. А. Гриневич, Н. А. Петелина, А. Г. Гриневич. М. : Наука, 1972. 182 с.

- 32. Гришко, А. К. Прогнозирование состояний и совершенствование методов имитационного моделирования систем обработки статистических массивов информации / А. К. Гришко, В. А. Корж, И. А. Плотникова // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". 2011. Т. 2. С. 329-330.
- 33. Гулюк, Г. Г. Сохранение и восстановление плодородия почв залог продовольственной безопасности страны / Г. Г. Гулюк // Природообустройство, 2015. № 5. C. 9-13.
- 34. Гусев, Б. П. Об одной эколого-экономико-математической модели функционирования региона со стохастическим характером общих водных ресурсов / Б. П. Гусев // Труды XII Байкальской международной конференции «Методы оптимизации и их приложения». 2001. С. 32-36.
- 35. Давыденко, А. Ю. Эколого-математическая модель производства сельскохозяйственной продукции со случайными параметрами / А. Ю. Давыденко, Я. М. Иваньо, Е. А. Хогоева // Вестник ИрГСХА. 2014. № 61. С. 115-121.
- 36. Деградация и загрязнение почвенного покрова Байкальского региона [Электроный ресурс]. Режим доступа: http://irkipedia.ru/content/degradaciya_i_ zagryaznenie_pochvennogo_pokrova_baykalskogo_regiona.
- 37. Евдокимова, Т. И. Почвенная съемка / Т. И. Евдокимова. М. : Изд-во МГУ, 1987. 270 с.
- 38. Есаулкова, О. В. Решение экологических задач методами математического моделирования / О. В. Есаулкова, А. Ю. Барабанова // Наука и образование: отечественный и зарубежный опыт : Четырнадцатая международная научно-практическая конференция : Сборник статей, Белгород, 28 сентября 2018 года. Белгород, 2018. С. 15-17.
- 39. Зверев, А. Ф. Модели рядов экономических характеристик региона / А. Ф. Зверев, Я. М. Иваньо // Актуальные проблемы АПК: Материалы региональной научно-практической конференции в 5 ч., Иркутск, 25 февраля. 01 марта 2002 года. Иркутск, 2002. С. 34-35.

- 40. Зоркальцев, В. И. Проблема выбора методов оценки параметров математической модели функционирования экосистемы озера Байкал / В. И. Зоркальцев, А. В. Казазаева, И. В. Мокрый // Вестник Ангарского государственного технического университета. 2017. № 11. С. 193-199.
- 41. Иваньо, Я. М. Алгоритм реализации эколого-математических задач оптимизации производства сельскохозяйственной продукции в условиях неопределенности / Я. М. Иваньо, 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.
- 42. Иваньо, Я. М. Изменчивость климатических характеристик и аграрное производство / Я. М. Иваньо // Климат, экология, сельское хозяйство Евразии : сб. ст. междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 75-летию образования ИрГСХА. Иркутск, 2009. С. 31-38.
- 43. Иваньо, Я. М. Климатическая изменчивость и агрометеорологические условия Предбайкалья: экспериментальные исследования и моделирование урожайности зерновых культур / Я. М. Иваньо, Ю. В. Столопова // Метеорология и гидрология. − 2019. − № 10. − С. 117-124.
- 44. Иваньо, Я. М. Математическое, алгоритмическое и информационное обеспечение программного комплекса эколого-математического моделирования производства сельскохозяйственной продукции / Я. М. Иваньо, Е. А. Ковалева // Climate, ecology, agriculture of Eurasia: Materials of the international scientific-practical conference, Ulaanbaatar, 30–31 мая 2017 года. Ulaanbaatar, 2017. С. 82-89.
- 45. Иваньо, Я. М. Модели оценки и прогнозирования природных, экологических и агропроизводственных параметров региона / Я. М. Иваньо, Е. А. Хогоева // Актуальные вопросы аграрной науки. 2013. № 7. С. 55-62.
- 46. Иваньо, Я. М. Модели с детерминированными и неопределенными параметрами применительно к оптимизации сельскохозяйственных процессов /

- Я. М. Иваньо, М. Н. Барсукова // Вестник Московского государственного университета леса Лесной вестник. 2007. № 6. С. 156-160.
- 47. Иваньо, Я. М. Модель оптимизации производства сельскохозяйственной продукции на орошаемых землях с неопределенными параметрами / Я. М. Иваньо, Е. А. Хогоева // Информационные и математические технологии в науке и управлении : Труды XIX Байкальской Всероссийской конференции, Иркутск Байкал, 28 июня 07 2014 года / Ответственный редактор Л. В. Массель. Иркутск Байкал, 2014. С. 167-174.
- 48. Иваньо, Я. М. О некоторых методах моделирования производства сельскохозяйственной продукции / Я. М. Иваньо // Вестник ИрГСХА. 2011. N 45. С. 129-136.
- 49. Иваньо, Я. М. Об основных аспектах устойчивого развития сельских территорий и информации / Я. М. Иваньо, Е. А. Хогоева // Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 110-летию со дня рождения А.М. Казанского, Иркутск, 21 декабря 2012 года. Иркутск : Издво ИРГСХА, 2012. С. 123-132.
- 50. Иваньо, Я. М. Оптимизационные модели аграрного производства в решении задач оценки природных и техногенных рисков / Я. М. Иваньо, С. А. Петрова. Иркутск : Иркутский государственный аграрный университет им. А.А. Ежевского, 2015. 180 с. ISBN 9785917771724.
- 51. Иваньо, Я. М. Программный комплекс моделирования природных и техногенных рисков / Я. М. Иваньо, С. А. Петрова // Известия Иркутской государственной экономической академии. 2015. Т. 25. № 3. С. 533-541. DOI 10.17150/1993-3541.2015.25(3).533-541.
- 52. Иваньо, Я. М. Статистическая оценка факторов производства аграрной продукции / Я. М. Иваньо, Е. А. Ковалева, С. А. Петрова // Актуальные вопросы аграрной науки. 2020. N = 35. C. 35-44.
- 53. Иваньо, Я. М. Функциональные возможности информационной системы об экстремальных природных явлениях / Я. М. Иваньо, Н. В. Старкова // Вестник

- Воронежского государственного технического университета. 2009. Т. 5. N_{\odot} 10. С. 82-87.
- 54. Иваньо, Я. М. Экономико-математические модели аграрного производства региона с интервальными природными и производственно-экологическими параметрами / Я. М. Иваньо, Е. А. Хогоева // Известия Иркутской государственной экономической академии. 2013. № 6. С. 138-143.
- 55. Иваньо, Я. М. Моделирование сельскохозяйственного производства с учетом экстремальных природных событий / Я. М. Иваньо // Фундаментальные проблемы изучения и использования воды и водных ресурсов : материалы науч. конф. Иркутск, 2005. С. 230-232.
- 56. Иваньо, Я. М. Об особенности информации, описывающей функционирование сельских территорий региона / Я. М. Иваньо, Е. А. Хогоева / Научные достижения производству : материалы науч.-практ. конф. молодых ученых с междунар. участием. Иркутск, 2012. С. 449-454.
- 57. Иваньо, Я. М. Оптимизация производства продовольственной продукции с учетом ущербов окружающей среде / Я. М. Иваньо, Е. А. Хогоева // Климат, экология, сельское хозяйство Евразии : Материалы III международной научно-практической конференции, посвященной 80-летию образования ИрГСХА (27-29 мая 2014 г.). Иркутск, 2014. Часть II. С. 57-64.
- 58. Иваньо, Я. М. Региональные модели аграрного производства с учетом техногенных загрязнений / Я. М. Иваньо, Е. А. Хогоева // Труды XVIII Байкальской Всероссийской конференции «Информационные и математические технологии в науке и управлении».— Иркутск, 2013. Часть II. С. 219-224.
- 59. Игумнов, И. В. Параметрическая оптимизация автоматической системы регулирования с дискретным ПИД-нейрорегулятором / И. В. Игумнов, Н. Н. Куцый // Прикладные аспекты математических и информационных технологий в образовании и науке: Материалы научно-методического семинара, Иркутск, 12–13 апреля 2017 года. Иркутск, 2017. С. 76-82.

- 60. Ильинич, В. В. Оценка асимметрии в рамках трехпараметрического гамма-распределения / В. В. Ильинич // Природообустройство. 2010. № 5. С. 71-74.
- 61. Информационные системы планирования производства продовольственной продукции / Т. С. Бузина, Е. С. Тулунова, Е. А. Ковалева, Ж. И. Вараница-Городовская // Информационные технологии, системы и приборы в АПК : материалы 7-й Международной научно-практической конференции "Агроинфо-2018", Новосибирская обл., р.п. Краснообск, 24-25 октября 2018 года. Краснообск, 2018. С. 90-94.
- 62. Иркутская область: экологические условия развития [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://irkipedia.ru/content/eroziya_pochv_atlas.
- 63. Использование динамической модели агроэкосистемы для оценки влияния климатических изменений на продуктивность посевов / Р. А. Полуэктов, А. Г. Топаж, В. П. Якушев, С. А. Медведев // Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук. 2012. N 2. С. 7.
- 64. Кардаш, В.А. Конфликты и компромиссы в рыночной экономике / В. А. Кардаш. М.: Наука, 2006. 248 с.
- 65. Клер, А. М. Оптимизация параметров энерготехнологических установок в условиях случайного характера исходной информации / А. М. Клер, Н. П. Деканова, Э. А. Тюрина // Теплофизика и аэромеханика. − 2003. − Т. 10. − № 1. − С. 135-145.
- 66. Кнопов, П. С. Метод эмпирических средних в задачах стохастической оптимизации и оценивания // Стохастическое программирование и его приложения. Иркутск, 2012. С. 125-149.
- 67. Кобзарь, Ж. Д. Мониторинг агроландшафтов в целях выявления процессов Ж. Д. Кобзарь // Научное эрозионных обеспечение агропромышленного комплекса : Сборник статей ПО материалам XI Всероссийской конференции молодых ученых, посвященной 95-летию Кубанского ГАУ и 80-летию со дня образования Краснодарского края, Краснодар, 29-30 ноября 2017 года. – Краснодар, 2017. – С. 726-727.

- 68. Ковалева, Е. А. Коэффициенты негативного влияния на окружающую среду в эколого-математическом моделировании аграрного производства / Е. А. Ковалева, Я. М. Иваньо // Научные исследования и разработки к внедрению в АПК : Материалы международной научно-практической конференции молодых ученых, п. Молодежный, 26-27 марта 2020 года. п. Молодежный, 2020. С. 149-159.
- 69. Ковалева, Е. А. Модуль "Планирование в условиях рисков" программного комплекса "Эколого-математическое моделирование аграрного производства" / Е. А. Ковалева, Я. М. Иваньо // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2022. № 3(27). С. 135-147. DOI 10.38028/ESI.2022.27.3.013.
- 70. Ковалева, Е. А. Программный комплекс для эколого-математического моделирования производства сельскохозяйственной продукции / Е. А. Ковалева, Я. М. Иваньо // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2020. № 2(18). С. 94-106. DOI 10.38028/ESI.2020.18.2.008.
- 71. Ковалева, Е. А. Эколого-математические модели оптимизации производства сельскохозяйственной продукции / Н. В. Бендик, Я. М. Иваньо, Е. А. Ковалева // Вестник ИрГТУ. 2016. Вып. 4. С. 66-74.
- 72. Козлов, Д. Н. Традиции и инновации в крупномасштабной почвенной картографии / Д. Н. Козлов, Н. П. Сорокина // Цифровая почвенная картография: теоретические и экспериментальные исследования / Российская академия сельскохозяйственных наук, Почвенный институт им. В. В. Докучаева, Всероссийское общество почвоведов им. В. В. Докучаева. Москва, 2012. С. 35-57.
- 73. Колеснев, В. И. Возможности использования методов математического моделирования для целей анализа и планирования развития систем АПК / В. И. Колеснев, И. В. Шафранская // Вестник Института экономики и управления Новгородского государственного университета им. Ярослава Мудрого. 2013. № 1. С. 18-24.

- 74. Коломийцев, Н. В. Загрязнение и очищение водотоков и водосборных территорий вследствие эрозии / Н. В. Коломийцев, Б. И. Корженевский // Теоретическая и прикладная экология. 2017. N 2. C. 24-28.
- 75. Кравченко, Р. Г. Математическое моделирование экономических процессов в сельском хозяйстве: [По спец. "Экон. кибернетика" (специализация "Экон. кибернетика в сел. хоз-ве")] /Р.Г. Кравченко М.: Колос, 1978. 424 с.
- 76. Кузнецов, В. В. Модели прогноза развития перерабатывающей промышленности регионального АПК / В. В. Кузнецов, А. Н. Тарасов, В. Л. Дунаев и др.; под науч. ред. акад. РАСХН В. В. Кузнецова. Ростов-н/Д. : ВНИИЭиН, 2003. 106 с.
- 77. Кузьменко, В. Н. Решение двухэтапных задач стохастического программирования большой размерности PNK-методом // Стохастическое программирование и его приложения. Иркутск, 2012. С. 150-159.
- 78. Куликов, В. Е. Моделирование хозяйственной деятельности сельскохозяйственного предприятия с учетом влияния факторов внешней среды : дис. ... канд. эконом. наук / Куликов В. Е. Владивосток, 2006. 157 с.
- 79. Лаукс, Д. Планирование и анализ водохозяйственных систем / Д. Лаукс, Дж. Стединжер. М.: Энергоавтомиздат, 1984. 400 с.
- 80. Левин, В. И. Интервальный подход к оптимизации в условиях неопределенности / В. И. Левин // Системы управления, связи и безопасности. 2015. N = 4. C. 123-141.
- 81. Леонтьев, В. Экономические эссе. Теория, исследования, факты и политика / В. Леонтьев. М.: Изд. полит. литературы, 1990. 415 с.
- 82. Лопырев, М. И. Защита земель от эрозии и охрана природы / М. И. Лопырев, Е.И. Рябов. М. : Агропромиздат, 1989. 239 с.
- 83. Макарова, И. Г. Методика изучения оптимизации размещения посевов и совершенствования структуры посевных площадей зерновых культур / И. Г. Макарова, Е. А. Аленичева // Естественные и технические науки. − 2016. − № 5(95). − С. 147-149.

- 84. Маклаков, С. В. BPwin и ERwin. CASE-средства разработки информационных систем / С. В. Маклаков. М. : Диалог-МИФИ, 1999. 256 с.
- 85. Малова, Н. Н. Построение моделей анализа и прогнозирования производства на сельскохозяйственном предприятии при проектировании информационных систем / Н. Н. Малова // Актуальные проблемы в современной науке и пути их решения : Сборник статей по материалам Международной научно-практической конференции, Москва, 31 октября 2017 года. Москва, 2017. С. 171-177.
- 86. Мальцев, К. А. Цифровые модели рельефа и их использование в расчётах темпов смыва почв на пахотных землях / К. А. Мальцев, В. Н. Голосов, А. М. Гафуров // Ученые записки Казанского университета. Серия: Естественные науки. 2018. Т. 160. N 2. С. 514-530.
- 87. Мартин, Дж. Организация баз данных в вычислительных системах / Дж. Мартин. М. : Мир, 1980.-662 с.
- 88. Массель, Л. В. Интеллектуальная поддержка принятия решений в энергетике и экологии с учётом качества жизни / Л. В. Массель, А. Г. Массель // Здоровье и качество жизни : Материалы III Всероссийской конференции с международным участием, Иркутск-Байкальск, 10-15 сентября 2018 года. Иркутск-Байкальск, 2018. С. 174-179.
- 89. Массель, Л. В. Информационно-вычислительная система для оценки влияния объектов энергетики на окружающую среду / Л. В. Массель, В. Р. Кузьмин // Программные продукты и системы. 2023. № 1. С. 60-70.
- 90. Массель, Л. В. Методы и интеллектуальные технологии научного обоснования стратегических решений по цифровой трансформации энергетики / Л. В. Массель // Энергетическая политика. 2018. № 5. С. 30-42.
- 91. Математическое моделирование процессов и систем: Коллективная монография / А. М. Ахтямов, А. Ф. Хабибуллина, С. И. Спивак [и др.]; под общей редакцией С. А. Мустафиной. Стерлитамак: Стерлитамакский филиал Башкирского государственного университета, 2012. 330 с. ISBN 978-5-86111-401-1.

- 92. Медоуз, Д. Х. Пределы роста : пер. с англ. / Д. Х. Медоуз, Д. Л. Медоуз. М. : Изд-во МГУ, 1991. 208 с.
- 93. Методические рекомендации исчисления размера вреда, причиненного землям (плодородному слою почвы) нарушением законодательства в области охраны окружающей среды и природопользования на территории Иркутской области [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://cawater-info.net/bk/improvement-irrigated-agriculture/files/irkutskland.pdf.
- 94. Моделирование и управление процессами регионального развития / А. В. Аргунчинцева, В. К. Аргунчинцев, В. А. Батурин [и др.]; Под редакцией С. Н. Васильева. Москва, 2001. 432 с. ISBN 5992101048.
- 95. Моисеев, Н.Н. Экологическая политика и математика / Н.Н. Моисеев // Экология и жизнь. -2002. -№ 4. C. 4-6.
- 96. Молчанов, А.М. Об устойчивости экосистем / А. М. Молчанов // Всесторонний анализ окружающей природной среды = Comprehensive Analysis of the Environment : тр. II Сов.-амер. симп., Гонолулу, Гавайи, 20–26 окт. 1975 г. / гл. ред. Ю. А. Израэль ; Гл. упр. Гидрометеоролог. службы СМ СССР. Л. : Гидрометеоиздат, 1976. С. 212–229 .
- 97. Нечеткое моделирование как инструмент для планирования мероприятий повышения качества и эффективности теплопотребления в зданиях / Н. П. Деканова, П. В. Хан, В. В. Хан, А. В. Ступина // Наука и бизнес: пути развития. $-2021.- \mathbb{N} \cdot 4(118).- \mathbb{C}.$ 118-122.
- 98. Новиков, А. И. Планирование, моделирование и оптимизация процессов диагностики состояния почв и растений на основе автоматизированных систем : автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук : 06.01.03 / Анатолий Иванович Новиков. СПб, 1994. 36 с.
- 99. О методике определения размеров ущерба от деградации почв и земель. [Электронный ресурс]: Письмо от 29 июля 1994 г. N 3-14-2/1139 / Комитет Российской Федерации по земельным ресурсам и землеустройству. Режим доступа: http://docs.cntd.ru/document/9014048.

- 100. Об использовании имитационного моделирования для решения задач аграрного производства / Е. В. Вашукевич, В. Р. Елохин, Я. М. Иваньо, Е. С. Тулунова // Природа и сельскохозяйственная деятельность человека : Сборник статей международной научно-практической конференции, Иркутск, 23-27 мая 2011 года. Иркутск, 2011. С. 179-185.
- 101. Общесоюзная инструкция по крупномасштабным почвенными агрохимическим исследованиям территории колхозов и совхозов и по составлению почвенных карт территорий производственных колхозно-совхозных управлений. М.: Колос, 1964. 112 с.
- 102. Павлий, В. А. Построение информационной модели расчета распространения примеси в приземном слое атмосферы над территориально-распределенными объектами / В. А. Павлий // Системный анализ и информационные технологии в науках о природе и обществе. 2011. № 1(1). С. 71-81.
- 103. Петрова, С. А. Оптимизационные модели аграрного производства в решении задач оценки природных и техногенных рисков : дис. ... канд. тех. наук: 05.13.18 : защищена 26.06.2015 / Петрова Софья Андреевна. Иркутск, 2015. 207 с. Библиогр.: с. 169-186.
- 104. Подготовительные работы по составлению проекта землеустройства в районах ветровой эрозии [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://kadastrua.ru/zemleustroitelnoe-proektirovanie/131-podgotovitelnye-raboty-posostavleniyu-proeta-zemleustrojstva-v-rajonakh-vetrovoj-erozii.html.
- 105. Подготовка цифровой модели рельефа для исследования экзогенных процессов северных территорий Российской Федерации / А. Л. Минеев, Ю. Г. Кутинов, З. Б. Чистова, Е. В. Полякова // Пространство и Время. 2015. № 3(21). С. 270-277.
- 106. Подходова, Н. С. Введение в моделирование. Математические модели в естествознании (биология, химия, экология) : учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению 540100 (050100) /

- Н. С. Подходова, Е. М. Ложкина; Российский гос. пед. ун-т им. А. И. Герцена. Санкт-Петербург: Изд-во РГПУ им. А. И. Герцена, 2009. 177 с.
- 107. Полковская, М. Н. О моделировании аграрного производства в экстремальных природно-климатических условиях Восточной Сибири / М. Н. Полковская // Винеровские чтения: Материалы IV Всероссийской конференции, Иркутск, 09-14 марта 2011 года. Иркутск, 2011. С. 224-231.
- 108. Полковская, М. Н. Оптимизация структуры посевов с учетом изменчивости климатических параметров и биопродуктивности культур : дис. ... канд. тех. Наук : 05.13.18 : защищена 03.06.2014 / Полковская Марина Николаевна. Иркутск, 2014. 138 с. Библиогр.: с. 119-131.
- 109. Полковская, М. Н. Факторный анализ урожайности сельскохозяйственных культур в агроландшафтных районах региона / М. Н. Полковская // Научные исследования и разработки к внедрению в АПК : материалы научно-практической конференции молодых ученых, Иркутск, 19-20 апреля 2012 года. Иркутск, 2012. С. 363-368.
- 110. Приказ Минприроды России от 08.07.2010 N 238 (ред. от 11.07.2018) «Об утверждении Методики исчисления размера вреда, причиненного почвам как объекту охраны окружающей среды» (Зарегистрировано в Минюсте России 07.09.2010 N 18364).
- 111. Программный комплекс оптимизации трудозатрат на производство аграрной продукции предприятиями с разной численостью работников / Ж. И. Вараница-Городовская, Я. М. Иваньо, С. А. Петрова, М. Н. Полковская // System Analysis and Mathematical Modeling. 2020. Т. 2, № 2. С. 49-61.
- 112. Проскуряков, А. Ю. Автоматизированная система мониторинга загрязняющих выбросов промышленных производств на локальном уровне : специальность 05.11.13 "Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Проскуряков Александр Юрьевич. Орел, 2014. 16 с.

- 113. Прудников, А. Г. О классификации методов прогнозирования урожайности / А. Г. Прудников // Экономика сельского хозяйства. 1983. N 10. С. 72-75.
- 114. Раткович, Л. Д. Факторы влияния диффузного загрязнения на водные объекты / Л. Д. Раткович, В. Н. Маркин, И. В. Глазунова, С. А. Соколова // Природообустройство. 2016. \mathbb{N} 3. С.64-74.
- 115. Региональный доклад о состоянии и использовании земель в Иркутской области 2019 г. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://rosreestr.ru/site/open-service/statistika-i-analitika/zemleustroystvo-i-monitoring/regionalnyy-doklad-o-sostoyanii-i-ispolzovanii-zemel-v-irkutskoy-oblasti-za-2015-god.
- 116. Региональная экономика : теория и практика / гл. ред. Л. А. Чалдаева. Москва : Финансы и кредит, 2017. Т.15, вып. 8. 198 с.
- 117. Ризванов, Д. А. Интеллектуальная поддержка принятия решений при управлении ресурсами сложных систем на основе многоагентного подхода / Д. А. Ризванов, Н. И. Юсупова // Онтология проектирования. 2015. Т. 5. № 3(17). С. 297-312. DOI 10.18287/2223-9537-2015-5-3-297-312.
- 118. Ризниченко, Г. Ю. Математические модели в биофизике и экологии / Г. Ю. Ризниченко. Ижевск : Институт компьютерных исследований, 2003. 184 с. ISBN 5939722458.
- 119. Светличный, А. А. Эрозиоведение: теоретические и прикладные аспекты / А. А. Светличный, С. Г. Черный, Г. И. Швебс. Сумы : Университетская книга, 2004.-410 с.
- 120. 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. Иваньо, А. В. Теплов ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского».

- 121. Свирежев, Ю. М. Устойчивость биологических сообществ / Д. О. Логофет, Ю.М, Свирежев. М.: Наука, 1978. 352 с.
- 122. Серышев, В. А. Агроландшафтное районирование Иркутской области / В. А. Серышев, В. И. Солодун // География и природные ресурсы. 2009. № 2. С. 86-94.
- 123. Скуднов, В. М. Экономические факторы, определяющие эффективность сельскохозяйственной деятельности / В. М. Скуднов // Actualscience. -2016. T. 2. № 2. C. 122-124.
- 124. Смирнов, К. П. Экономические основы повышения эффективности использования сельскохозяйственных земель (на примере Восточного природносельскохозяйственного района Новосибирской области): дис. ... канд. экон. наук: 08.00.05: / Смирнов Константин Павлович. Новосибирск, 2002. 158 с. Библиогр.: с. 136-146.
- 125. Сорокина, Н. П. Опыт цифрового картографирования структуры почвенного покрова / Н. П. Сорокина, Д. Н. Козлов // Почвоведение. 2009. N 2. С. 198-210.
- 126. Статистика с применением Excel : учебное пособие. / Под ред. Я. М. Иваньо, А. Ф. Зверева. Иркутск : ИрГСХА, 2006. 137 с.
- 127. Столбов, А. Б. Математическое и алгоритмическое обеспечение исследования региональных медико-эколого-экономических систем : дис. ... канд. тех. Наук : 05.13.01 : защищена 29.11.2016 / Столбов Александр Борисович. Иркутск, 2016. 166 с.
- 128. Сухановский, Ю. П. Модель дождевой эрозии почв /
 Ю. П. Сухановский // Почвоведение. 2010. № 9. С. 1114-1125.
- 129. Тимофеев-Ресовский, Н. В. Биосфера и человечество / Н. В. Тимофеев-Ресовский // Науч. труды Обнинского отд-ния Геогр. о-ва СССР. 1968. № 1/1. C. 3-12.
- 130. Травин, С. О. Возможности и ограничения математических моделей прогнозирования экологической безопасности / С. О. Травин, Ю. И. Скурлатов,

- А. В. Рощин // Химическая физика. 2020. Т. 39, № 2. С. 3-17. DOI 10.31857/S0207401X20020144.
- 131. Труфанова, Е. С. Оптимизация использования земельных ресурсов региона в условиях неполной информации : дис. ... канд. тех. Наук : 05.13.01 : защищена 17.05.2011 / Труфанова Евгения Степановна. Иркутск, 2011. 165 с.
- Н. И. 132. Федурина, Оценка сверху И снизу В моделях сельскохозяйственного производства В условиях неопределенности Н. И. Федурина // Информационные технологии в образовании и науке : второго научно-методического семинара «Информационные материалы технологии в образовании и науке». – Иркутск, 2003. – С. 19-22.
- 133. Фетюхин, И. В. Факторы развития, моделирование и прогнозирование эрозии почвы / И. В. Фетюхин, В. В. Черненко // Международный сельскохозяйственный журнал. $2018. N_{\odot} 1. C. 11-13.$
- 134. Форрестер Дж. Мировая динамика / Дж. Форрестер. М. : Наука, 1978. 167 с.
- 135. Хастингс, Н. Справочник по статистическим распределениям / Н. Хастингс, Дж. Пикок. – М.: Статистика, 1980. – 95 с.
- 136. Хачунц, Д. С. Математическое моделирование процессов переноса загрязняющих веществ в многокомпонентной воздушной среде в прибрежной зоне : дис. ... канд. физ.-мат. Наук : 05.13.18 : защищена 20.02.2014 / Хачунц Дианна Самвеловна. Таганрог, 2013. 157 с.
- 137. Хогоева, Е. А. Особенности эколого-математического моделирования оптимизации сочетания отраслей / Е. А. Хогоева // Актуальные вопросы аграрной науки. 2014. N 10. С. 60-67.
- 138. 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. Ч. 2. С. 156-191.

- 139. Цогоева, А. Р. Методика решения оптимизационных задач с помощью программного средства MS Excel / А. Р. Цогоева, А. Ю. Цогоев, М. Ч. Датиева // Вестник Иркутского государственного технического университета. -2017. Т. 21. № 12(131). С. 114-122. DOI 10.21285/1814-3520-2017-12-114-122.
- 140. Чепурных, Н. В. Социально-экономические факторы развития сельских территорий /А.В. Мерзлов, Н.В. Чепурных // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия Экономика и экологический менеджмент 2017. № 4. С. 92-101.
- 141. Чернигова, Д. Р. Сельскохозяйственное землепользование Иркутской области в новых социально-экономических условиях : дис. ... канд. геогр. наук : специальность 25.00.24 / Чернигова Дина Рашитовна. Иркутск, 2013. 167 с.
- 142. Чернова, Е. С. Исследование задач устойчивого развития региональных социо-эколого-экономических систем с применением математических моделей и вычислительного эксперимента : дис. ... канд. физ.-мат. наук : 05.13.18 : защищена 22.12.2014 / Чернова Екатерина Сергеевна. Кемерово, 2014. 257 с. Библиогр.: с. 164-187.
- 143. Швебс, Γ . И. Формирование водной эрозии, стока наносов и их оценка / Γ . И. Швебс Π . : Гидрометеоиздат, 1974. 184 с.
- 144. Шелутко, В. А. Вопросы применения метода Монте-Карло для оценки погрешностей выборочных оценок числовых характеристик по временным рядам наблюдений / В. А. Шелутко, Е. С. Урусова // Гидрометеорология и экология: научные достижения и перспективы развития : Труды II Всероссийской конференции, Санкт-Петербург, 19-20 декабря 2018 года. Санкт-Петербург, 2018. С. 713-714.
- 145. Юзбашев, М. М. Статистический анализ тенденций и колеблемости / А. М Манелля, М. М. Юзбашев. М.: Финансы и статистика, 1983. 207 с.
- 146. Agricultural production structure optimization: a case study of major grain [Electronic resource] / LU Sha-sha [et al.] // Journal of Integrative Agriculture. -2013. $Noldsymbol{0}$ 12 (1). P. 184–197. URL: https://ac.els-cdn.com/S209531191360218X/1-s2.0-S209531191360218X-main.pdf?_tid= 343592f0-1675-4e0a-ac99-

- b4f5339feb83&acdnat=1537339681_87d49f11c8426b b887256f81a5d7eeeb (дата обращения:14.05.2017).
- 147. Application of the theory of extreme events to problems of approximating probability distributions of water flow peaks / V. F. Pisarenko, T. A. Rukavishnikova, M. V. Bolgov, N. V. Osipova // Water Resources. 2002. Vol. 29. No 6. pp. 593-604. DOI 10.1023/A:1021124426653.
- 148. Burrough P. A. Principles of geographical information systems / P. A. Burrough, R. A. McDonnell, C. D. Lloyd. Oxford Univ. Press, 2015. 432 p.
- 149. Dudushki I., Leekassa Bekana D. Research and optimization of agricultural machinery maintenance service [Electronic resource]. Annals of faculty engineering Hunedoara International journal of engineering. 2010. Vol. VIII, Fascicule 3. pp. 335-343. URL: http://annals.fih.upt.ro/pdf-full/2010/ANNALS-2010-3-65.pdf (дата обращения: 14.04.2017).
- 150. Hong-fen T. et all Modelling and mapping soil erosion potential in China // Journal of Integrative Agriculture. 2019 No 18 (2). pp. 251-264.
- 151. Ivanyo Ya. M., Asalkhanov P. G., Bendik_N. V. Management of the Agro-Industrial Enterprise: optimization Uncertainty Expert Assessments. 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2019, Vladivostok, 01-04 okt. 2019. Vladivostok: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. P. 8934788. DOI 10.1109/FarEastCon.2019.8934788.
- 152. Ivanyo Ya. M., Petrova S. A., Kovaleva E. A. Ecological-Mathematical Modeling in Planning Production of Agricultural Products in Conditions of Risks. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Virtual, Online, 10-12 jan. 2022. Virtual, Online, 2022. P. 022083. DOI 10.1088/1755-1315/988/2/022083.
- 153. 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. pp. 24-39. DOI 10.12731/2658-6649-2022-14-3-24-39.

- 154. Logofet D. O. The model for human population dynamics as a part of the global biosphere model: Some aspects of modelling in a dialogue regime / D. O. Logofet, Y. M. Svirezhev // Ecological Modelling. 1980. Vol. 9. No C. pp. 269-280. DOI 10.1016/0304-3800(80)90021-6.
- 155. Malkina-Pykh I. G. Mathematical model of the growth and development of annual plants based on response functions: 1. General description of the model / I. G. Malkina-Pykh // Russian Journal of Plant Physiology. 1996. Vol. 43. No 6. pp. 724-732.
- 156. Modeling of the Production of Agrarian Products under the Conditions of Influence of Droughts, Rainfall and their Combinations / Ya. M. Ivanyo, S. A. Petrova, M. N. Polkovskaya, N. I. Fedurina // Critical infrastructures: Contingency management, Intelligent, Agent-based, Cloud computing and Cyber security: Proceedings of the Vth International workshop. Advances in Intelligent Systems Research, Irkutsk, 17-24 march 2018 y. Irkutsk, 2018. pp. 78-84. DOI 10.2991/iwci-18.2018.14.
- 157. Modelling and optimization of strictly hierarchical manpower system [Electronic resource] / Andrej Skraba [et al.] // ICINCO 2015 12th International conference on informatics in control, automation and robotics. Colmar, 2015. pp. 215–222. URL: https://www.scitepress.org/Papers/2015/55460/55460.pdf (дата обращения: 14.05.2017).
- 158. On Lack of Robustness in Hydrological Model Development Due to Absence of Guidelines for Selecting Calibration and Evaluation Data: Demonstration for Data-Driven Models / F. Zheng, H. R. Maier, T. Zhang [et al.] // Water Resources Research. 2018. Vol. 54. No 2. pp. 1013-1030. DOI 10.1002/2017WR021470.
- 159. On the Involvement of Intelligent Technologies for Modeling of Energy Systems by Volterra Polynomials in Evolving Energy Ecosystems / S. V. Solodusha, O. V. Dudareva, Yu. I. Kokonova, A. Yu. Nikishin // Ecosystems Without Borders: Opportunities and Challenges: Conference proceedings, Kaliningrad, 05-07 oktober 2021 year. Vol. 474. Springer Nature Switzerland AG: Springer Nature Switzerland AG, 2022. pp. 253-260. DOI 10.1007/978-3-031-05778-6_24.

- 160. Ouda O. Optimisation of aricultural water use: a decision support system for the Gaza Strip [Electronic resource] / Omar Ouda. Stuttgart : Ins. Für Wasserbau, 2003. 180 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/ 262201259/download (дата обращения: 14.05.2017).
- 161. Setlhare K. Optimization and estimation study of manpower planning models / Keamogetse Setlhare. Pretoria, 2007. 152 p.
- 162. Sun A. Modern optimization models and techniques for electric power systems operation [Electronic resource] / Andy Sun, Dzung T. Phan // Electric power system operations. 2012. URL: https://www.semanticscholar.org/paper/Modern-Optimization-Models-and-Tech niques-for-Power-Sun-Phan/479de39f9c0a9a8802e1543d7d038b803ac175ef?tab =references (дата обращения: 14.07.2017).
- 163. Uchida S. Applicability of satellite remote sensing for mapping hazardous state of land degradation by soil erosion on agricultural areas / S. Uchida // Procedia Environmental Sciences. 2015. No. 24. pp. 29-34.
- 164. Vigiak O. Adapting SWAT hillslope erosion model to predict sediment concentrations and yields in large Basins / O. Vigiak, A. Malagó, F. Bouraoui, M. Vanmaercke, J. Poesen // Sci. Total Environ. 2015. V. 538. pp. 855-875.
- 165. Wischmeier W. H. Predicting rainfall erosion losses. Agricultural handbook № 537 / W. H. Wishmeier, D. D. Smith. Washington, 1978. 65 p.
- 166. Zing A. W. Degree and length of land slope as is affects soil loss in runoff Текст. / A. W. Zing // Journal of agricultural engineers. 1940. No. 21/2. pp. 59-64.
- 167. Оцінка впливу кліматичных змін на галузієкономіки України: [монографія] / Коллектив авт.: С. М. Степаненко, А. М. Польовий, Є.П. Школьний [та ін]; за ред. С. М. Степаненко, А. М. Польового. Одеса : Екологія, 2011. 696 с.

приложения

Приложение 1

Справки и акты о внедрении

УТВЕРЖДАЮ: МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ Ректор, д.с.-х.н., доцент ДЕПАРТАМЕНТ НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОЛИТИКИ И ОБРАЗОВАНИЯ едеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «ИРКУТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ Н.Н. Дмитриев «02» декабря 2022 г. ИМЕНИ А.А. ЕЖЕВСКОГО» (ФГБОУ ВО Иркутский ГАУ) 664038 пос. Молодёжный Иркутский район, Иркутская область Телефон (3952) 23-73-30, Факс 23-74-18 E-mail: rectoratigsha.ru, www.igsha.ru OFPH 1023801535658 ИНН/КПП 3811024304/382701001 Ne Ha No OT

СПРАВКА

об использовании результатов диссертационной работы "Экологоматематические модели и алгоритмы оптимизации производства аграрной продукции" в учебном процессе ФГБОУ ВО "Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского"

Разработанные алгоритмы и программное обеспечение для решения эколого-математических задач оптимизации аграрного производства при богарном, орошаемом и сочетании богарного и орошаемого земледелия реализованы для сельскохозяйственных организаций Иркутской области, осуществляющих деятельность на территориях, подверженных эрозии почвы и загрязнению земельных и водных ресурсов.

Математическое, алгоритмическое и программное обеспечение, предложенное аспирантом кафедры информатики и математического моделирования Иркутского ГАУ Ковалевой Е. А. совместно с профессором Иваньо Я. М., используется в дисциплинах, связанных с математическим и имитационным моделированием, преподаваемых студентам по направлению прикладная информатика и аспирантам по специальности математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

«02» декабря 2022 г.

Начальник учебного отдела ____ А. И. Мартыненко

Сельскохозяйственное акционерное общество «Приморский» (СХАО «Приморский» (69417, Иркутская область, Усть-Ордынский Бурятский автономный округ, Нукутский район, с. Хадахан, ул. Административная, д. 3 тел.:8(39549) 9-44-37 е-mail: primorsky@inbox.ru ОГРН 1028500566929 ИНН/КПП 8504000808/385101001

July TITLE CONCUSTIONS

AKT

о внедрении результатов диссертационной работы " Эколого-математические модели и алгоритмы оптимизации производства аграрной продукции" для СХАО "Приморский" Нукутского района

Модели оптимизации производства сельскохозяйственной продукции с учетом техногенного воздействия вследствие загрязнений и эрозии на богарных и орошаемых землях, а также алгоритмы получения оптимальных решений, разработанные аспирантом Ковалевой Е.А. совместно с профессором Иваньо Я.М., применимы для планирования производства аграрной продукции и принятии управленческих решений.

Предварительный расчет эффективности применения модели с учетом техногенного воздействия от загрязнений и эрозии для СХАО «Приморский» показал, что минимальные и максимальные значения прибыли при сочетании орошаемого и богарного земледелия выше на 1,7 – 4,1%, чем производство без орошения, а ущербы окружающей среде увеличились на 0,1 – 5,0% по сравнению с богарным земледелием. Производство сельскохозяйственной продукции с орошением более устойчиво по сравнению с богарным земледелием. При этом полученная прибыль от производственной деятельности хозяйства согласно моделированию составила от 18,7 до 28,6 млн. руб. 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.

Для решения задач оптимизации производства аграрной продукции для минимизации ущерба окружающей среде разработан программный комплекс «Эколого-математическое моделирование аграрного производства», который был использован для получения результатов применительно к деятельности хозяйства. Даны рекомендации по использованию результатов моделирования для принятия управленческих решений. ЗАКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО

"ИРКУТСКИЕ СЕМЕНА"

(ЗАО «Иркутские семена»)

669417, Иркутская область,
ул. Горького, д. 6, г. Иркутск,
664025, Россия
тел.:8(3952) 33-61-73
e-mail: irksemena@yandex.ru
ОГРН 1023802453510
ИНН/КПП 3827011808/382701001

AKT

о внедрении результатов диссертационной работы "Эколого-математические модели и алгоритмы оптимизации производства аграрной продукции" для ЗАО "Иркутские семена" Иркутского района

Модели оптимизации производства сельскохозяйственной продукции с учетом техногенного воздействия вследствие загрязнений и эрозии на неорошаемых землях, а также алгоритмы получения оптимальных решений, разработанные аспирантом Ковалевой Е.А. совместно с профессором Иваньо Я.М., применимы для планирования производства аграрной продукции и принятии управленческих решений.

Результаты моделирования получения аграрной продукции показали, что прибыль от производственной деятельности ЗАО «Иркутские семена»варьирует от 5,6 до 8,6 млн руб. При этом ущербы изменяются от 1,4 до 2,1 млн руб.

Приведены возможные варианты решения задач оптимизации с учетом неопределенности параметров как результата техногенных и природных воздействий на аграрное производство на основе предложенного критерия эффективности эколого-математических моделей.

Для моделирования производства аграрной продукции с учетом ущербы окружающей среде использован разработанный программный комплекс «Эколого-математическое моделирование аграрного производства». Даны рекомендации по использованию результатов моделирования для принятия управленческих решений в хозяйстве.

18

Российская

« 2022 г. » декабря 2022 г.

Генеральный директор ЗАО "Иркутские семена"

Ширяев В.Ю.

СПРАВКА

об использовании разработок, связанных с управлением производства аграрной продукции в условиях загрязнения и эрозии почвы

Программный комплекс «Эколого-математическое моделирование аграрного производства», разработанный аспирантом кафедры информатики и математического моделирования Ковалевой Е. А. совместно с профессором Иваньо Я. М., при создании которого реализована методика оценки негативного влияния на земельные и водные ресурсы загрязнения и эрозии почвы на богарных и орошаемых землях, а также оптимизационные модели, рекомендуется организациям и крестьянским (фермерским) хозяйствам агропромышленного комплекса для применения с целью повышения эффективности принятия управленческих решений и снижения ущербов окружающей среде от производственной деятельности.

Результаты построения оптимальных планов производства с учетом негативного влияния на земельные и водные ресурсы загрязнителей и эрозионных процессов на примере хозяйств Нукутского и Иркутского районов показали, что предлагаемые методики решения экстремальных задач позволяют определять оптимальные варианты получения максимальной прибыли с минимальным ущербом окружающей среде от техногенных воздействий. Разработки авторов могут использоваться для сельскохозяйственных организаций и крестьянских (фермерских) хозяйств Иркутской области.

Opell relie

«紀» февраля 2023 г.

Первый заместитель министра сельского хозяйства Иркутской области

Жилкина Н.Г.

Свидетельство о государственной регистрации программы



Фрагмент кода программного комплекса «Эколого-математическое моделирование аграрного производства» модуля решения задач оптимизации

```
procedure THr_Opti_F.CaclFunction;
var
    nvars,nrows,r,i,j,k:
                             integer;
    op:
                       integer;
                                   array[0..128] of real;
    ConstData,colData,rowData:
    str,s:
                       AnsiString;
    s1,s2:
                        String;
    rh:
                       real;
                        real;
    sum:
    sRange:
                         TArg;
    sRange1:
                          TArg;
                  array of String;
    Parg:
    fDamage:
                           double;
    KN:
                       double;
    sCap:
                        String;
begin
    pFunction := 0;
    pFunction_avg := 0;
    iFunction_count := 0;
    nvars := Round(NxNumberEdit1.Value);
    SetLength(Parg,nvars);
    SetLength(fn,0);
                        // массив с аргументами ф-ции
    SetLength(rst,0);
                        // массив с аргументами ограничений
    lp := make_lp(0, nvars);
    sum := 0;
```

```
for i := 0 to NextGrid2.RowCount - 1 do
begin
    if NextGrid1.Cell [0,1].AsString = " then s1 := 'X1'
    else s1 := NextGrid1.Cell [0,1].AsString;
    if NextGrid2.Cell [NextGrid2.Columns.Count-1,i].AsString = "then s2 := IntToStr(i+1)
    else s2 := NextGrid2.Cell [NextGrid2.Columns.Count-1,i].AsString;
    sRange := CalcRangeRestrict(NextGrid2.Cell [0,i].AsString,s1+'/'+s2,0,i);
    if sRange.P = '-1000000' then
    begin
         FoundErrorP := True;
         exit;
    end;
    s := sRange.X;
    for j := 1 to NextGrid2.Columns.Count - 4 do
    begin
         if NextGrid1.Cell [j,1].AsString = "then s1 := 'X'+IntToStr(j+1)
         else s1 := NextGrid1.Cell [j,1].AsString;
         if NextGrid2.Cell [NextGrid2.Columns.Count-1,i].AsString = "then s2 := IntToStr(i+1)
         else s2 := NextGrid2.Cell [NextGrid2.Columns.Count-1,i].AsString;
         sRange := CalcRangeRestrict(NextGrid2.Cell [j,i].AsString,s1+'/'+s2,j,i);
         if sRange.P = '-1000000' then
```

```
begin
                 FoundErrorP := True;
                 //Application.MessageBox('He удалось подобрать значение ф-ции вероятности расчет
остановлен', 'Предупреждение', МВ_ОК);
                 exit;
             end;
             s := s + ' ' + sRange.X;
        end;
         if NextGrid2.Cell [NextGrid2.Columns.Count-3,i].AsString = '<=' then op := LE;
         if NextGrid2.Cell [NextGrid2.Columns.Count-3,i].AsString = '>=' then op := GE;
         if NextGrid2.Cell [NextGrid2.Columns.Count-3,i].AsString = '=' then op := EQ;
        s := ReplaceS(s);
         if NextGrid2.Cell [NextGrid2.Columns.Count-1,i].AsString = " then s2 := IntToStr(i+1)
        else s2 := NextGrid2.Cell [NextGrid2.Columns.Count-1,i].AsString;
        sRange := CalcRangeRestrict(NextGrid2.Cell [NextGrid2.Columns.Count-
2,i].AsString,s2,NextGrid2.Columns.Count-2,i);
         if sRange.P = '-1000000' then
         begin
             FoundErrorP := True;
             //Application.MessageBox('He удалось подобрать значение ф-ции вероятности расчет
остановлен', 'Предупреждение', МВ_ОК);
             exit;
        end;
        rh := StrToFloat(sRange.X);
        str_add_constraint(lp, pchar(s), op, rh);
    end;
```

```
if NextGrid1.Cell[0,1].AsString = "then sRange := CalcRange(NextGrid1.Cell [0,0].AsString, 'X1',0,0) else
    sRange := CalcRange(NextGrid1.Cell [0,0].AsString,NextGrid1.Cell[0,1].AsString,0,0);
    Parg[0] := sRange.P;
    s := sRange.X;
    for j := 1 to NextGrid1.Columns.Count - 1 do
    begin
         if NextGrid1.Cell[j,1].AsString = " then sRange := CalcRange(NextGrid1.Cell
[j,0].AsString,'X'+IntToStr(j+1),j,0) else
        sRange := CalcRange(NextGrid1.Cell [j,0].AsString,NextGrid1.Cell[j,1].AsString,j,0);
        Parg[j] := sRange.P;
        s := s + ' ' + sRange.X;
    end;
    s := ReplaceS(s);
    str_set_obj_fn(lp, pchar(s));
    if max.Checked = True then set_maxim(lp);
    // set_timeout(lp,9000000);
    fDamage := 0;
    if solve(lp) = 0 then
    begin
         nvars:=get_nColumns(lp);
        get_variables(lp,@colData);
        // get_constraints(lp,@ConstData); Получаем ограничения
```

```
get_row(lp,0,@rowData);
        if NextGrid3.Columns.Count = 0 then
        begin
            // Аргументы функции
            _fn_length := 0;
            for i := 0 to Length(fn) - 1 do
            begin
                 NextGrid3.Columns.Add(TNxNumberColumn);
                 NextGrid3.Columns[_fn_length].Header.Caption := fn[i].desc + chr(13)+'значение';
                 NextGrid3.Columns[_fn_length].Header.MultiLine := True;
                 NextGrid3.Columns[_fn_length].Header.Alignment := taCenter;
                 NextGrid3.Columns[_fn_length].Options :=
[coCanClick,coCanInput,coCanSort,coPublicUsing,coShowTextFitHint];
                 NextGrid3.Columns[ fn length].Width := 200;
                 NextGrid3.Columns[_fn_length].Visible := True;
                 _fn_length := _fn_length + 1;
                 NextGrid3.Columns.Add(TNxNumberColumn);
                 NextGrid3.Columns[_fn_length].Header.Caption := fn[i].desc + chr(13)+'p';
                 NextGrid3.Columns[ fn length].Header.MultiLine := True;
                 NextGrid3.Columns[_fn_length].Header.Alignment := taCenter;
                 NextGrid3.Columns[_fn_length].Options :=
[coCanClick,coCanInput,coCanSort,coPublicUsing,coShowTextFitHint];
                 NextGrid3.Columns[_fn_length].Width := 200;
                 if fn[i].P = '-1' then NextGrid3.Columns[ fn length].Visible := False
                 else NextGrid3.Columns[ fn length].Visible := True;
```

```
_fn_length := _fn_length + 1;
             end;
            // Аргументы ограничений
            _rs_length := 0;
            for i := 0 to Length(rst) - 1 do
             begin
                 NextGrid3.Columns.Add(TNxNumberColumn);
                 NextGrid3.Columns[ rs length+ fn length].Header.Caption := rst[i].desc +
chr(13)+'значение';
                 NextGrid3.Columns[_rs_length+_fn_length].Header.MultiLine := True;
                 NextGrid3.Columns[_rs_length+_fn_length].Header.Alignment := taCenter;
                 NextGrid3.Columns[_rs_length+_fn_length].Options :=
[coCanClick,coCanInput,coCanSort,coPublicUsing,coShowTextFitHint];
                 NextGrid3.Columns[_rs_length+_fn_length].Width := 200;
                 NextGrid3.Columns[_rs_length+_fn_length].Visible := True;
                 _rs_length := _rs_length + 1;
                 NextGrid3.Columns.Add(TNxNumberColumn);
                 NextGrid3.Columns[_rs_length+_fn_length].Header.Caption := rst[i].desc + chr(13)+'p';
                 NextGrid3.Columns[_rs_length+_fn_length].Header.MultiLine := True;
                 NextGrid3.Columns[_rs_length+_fn_length].Header.Alignment := taCenter;
                 NextGrid3.Columns[_rs_length+_fn_length].Options :=
[coCanClick,coCanInput,coCanSort,coPublicUsing,coShowTextFitHint];
                 NextGrid3.Columns[_rs_length+_fn_length].Width := 200;
                 if rst[i].P = '-1' then NextGrid3.Columns[ rs length+ fn length].Visible := False
                 else NextGrid3.Columns[_rs_length+_fn_length].Visible := True;
                 _rs_length := _rs_length + 1;
```

```
end;
            for i:=0 to nvars-1 do
            begin
                sCap := NextGrid1.Cell [i,1].AsString;
                 NextGrid3.Columns.Add(TNxNumberColumn);
                NextGrid3.Columns[i+_fn_length+_rs_length].Header.Caption :=
'X'+IntToStr(i+1)+chr(10)+sCap;
                NextGrid3.Columns[i+_fn_length+_rs_length].Header.MultiLine := True;
                 NextGrid3.Columns[i+_fn_length+_rs_length].Header.Alignment := taRightJustify;
                 NextGrid3.Columns[i+_fn_length+_rs_length].Options :=
[coCanClick,coCanInput,coCanSort,coPublicUsing,coShowTextFitHint];
                 NextGrid3.Columns[i+_fn_length+_rs_length].Width := 200;
                NextGrid3.Columns[i+_fn_length+_rs_length].Visible := True;
            end;
            NextGrid3.Columns.Add(TNxNumberColumn);
            NextGrid3.Columns[NextGrid3.Columns.Count - 1].Header.Caption := 'Ущербы';
            NextGrid3.Columns[NextGrid3.Columns.Count - 1].Options :=
[coCanClick,coCanInput,coCanSort,coPublicUsing,coShowTextFitHint];
            NextGrid3.Columns[NextGrid3.Columns.Count - 1].Width := 200;
            NextGrid3.Columns[NextGrid3.Columns.Count - 1].Visible := True;
            NextGrid3.Columns.Add(TNxNumberColumn);
            NextGrid3.Columns[NextGrid3.Columns.Count - 1].Header.Caption := 'Значение целевой
функции';
            NextGrid3.Columns[NextGrid3.Columns.Count - 1].Options :=
[coCanClick,coCanInput,coCanSort,coPublicUsing,coShowTextFitHint];
            NextGrid3.Columns[NextGrid3.Columns.Count - 1].Width := 200;
            NextGrid3.Columns[NextGrid3.Columns.Count - 1].Visible := True;
            NextGrid3.Columns.Add(TNxNumberColumn);
```

```
NextGrid3.Columns[NextGrid3.Columns.Count - 1].Header.Caption := 'Вероятность суммарная';
             NextGrid3.Columns[NextGrid3.Columns.Count - 1].Options :=
[coCanClick,coCanInput,coCanSort,coPublicUsing,coShowTextFitHint];
             NextGrid3.Columns[NextGrid3.Columns.Count - 1].Width := 200;
             NextGrid3.Columns[NextGrid3.Columns.Count - 1].Visible := True;
             NextGrid3.Columns.Add(TNxNumberColumn);
             NextGrid3.Columns[NextGrid3.Columns.Count - 1].Header.Caption := 'Вероятность средняя';
             NextGrid3.Columns[NextGrid3.Columns.Count - 1].Options :=
[coCanClick,coCanInput,coCanSort,coPublicUsing,coShowTextFitHint];
            NextGrid3.Columns[NextGrid3.Columns.Count - 1].Width := 200;
            NextGrid3.Columns[NextGrid3.Columns.Count - 1].Visible := True;
        end;
        NextGrid3.AddRow(1);
        k := 0;
        for i := 0 to Length(fn) - 1 do
        begin
            NextGrid3.Cell [k,NextGrid3.LastAddedRow].AsString := fn[i].X;
            k := k + 1;
            NextGrid3.Cell [k,NextGrid3.LastAddedRow].AsString := fn[i].P;
            k := k + 1;
        end;
        k := _fn_length;
        for i := 0 to Length(rst) - 1 do
        begin
            NextGrid3.Cell [k,NextGrid3.LastAddedRow].AsString := rst[i].X;
            NextGrid3.Cell [k,NextGrid3.LastAddedRow].Color := $00B3B0F9;
             k := k + 1:
```

```
NextGrid3.Cell [k,NextGrid3.LastAddedRow].AsString := rst[i].P;
    NextGrid3.Cell [k,NextGrid3.LastAddedRow].Color := $00B3B0F9;
    k := k + 1;
end;
k := _fn_length+_rs_length;
for i:=0 to nvars-1 do {Отображаем ответ}
begin
    // читаем Коэффициент негативного влияния
    if CheckBox1.Checked then
    begin
        // Через коэффициент
        if pos('S',NextGrid7.Cell[i*2,1].AsString) <> 0 then
        begin
             sRange1 := CalcRangeRestrict(NextGrid7.Cell[i*2,1].AsString,s1+'/'+s2,0,i);
             fDamage := fDamage + StrToFloat(sRange1.X);
        end
        else
        begin
             if NextGrid7.Cell[i*2,1].AsString = " then KN := 0
             else
             KN := GetValueFromInterval(NextGrid7.Cell[i*2,1].AsString);
             fDamage := fDamage + (RoundTo(colData[i]*KN*rowData[i+1],-3));
        end;
    end
    else
    begin
        // Последняя строчка из ограничений
```

```
fDamage := fDamage + calc_R[(NextGrid2.RowCount-1),i]*colData[i];
             end;
            NextGrid3.Cell [k,NextGrid3.LastAddedRow].AsString := FloatToStr(RoundTo(colData[i],-3));
            NextGrid3.Cell [k,NextGrid3.LastAddedRow].Color := clMoneyGreen;
            k := k + 1;
            sum := sum + colData[i]*rowData[i+1];
        end;
        NextGrid3.Cell [NextGrid3.Columns.Count - 4,NextGrid3.LastAddedRow].AsString :=
FloatToStr(RoundTo(fDamage,-5));
        NextGrid3.Cell [NextGrid3.Columns.Count - 4,NextGrid3.LastAddedRow].Color := $00B3B0F9;
        NextGrid3.Cell [NextGrid3.Columns.Count - 3,NextGrid3.LastAddedRow].AsString :=
FloatToStr(RoundTo(sum,-5));
        NextGrid3.Cell [NextGrid3.Columns.Count - 2,NextGrid3.LastAddedRow].AsFloat :=
RoundTo(pFunction,-5);
        if iFunction_count = 0 then NextGrid3.Cell [NextGrid3.Columns.Count -
1,NextGrid3.LastAddedRow].AsFloat := 0 else
        NextGrid3.Cell [NextGrid3.Columns.Count - 1,NextGrid3.LastAddedRow].AsFloat :=
RoundTo(pFunction_avg/iFunction_count,-5);
    end
    else
    FoundError := True;
    delete_lp(lp);
end;
```

Диаграмма вариантов использования



Приложение 5 Оптимальные решения эколого-математической задачи оптимизации аграрного производства CXAO «Приморский» с детерминированными характеристиками

Х1 Площадь зерновых, га	X2 Площадь рапса,	X3 Площадь однолетних трав на сено, га	X4 Площадь однолетних трав на зеленый корм, га	X5 Площадь многолетних трав н сено, га	X6 Площадь многолетних трав н зеленый корм, га	X7 Площадь многолетних трав на семена, га	X8 Площадь силосных культур (без кукурузы), га	X9 Площадь кукурузы на силос, га	X10 Площадь орошаемой кукурузы на силос, га	X11 Поголовье коров основного стада, гол.	X12 Поголовье коров на откорме, гол.	X13 Поголовье лошадей основного стада, гол.	X14 Поголовье лошадей на откорме, гол.	X15 Количество пчелосемей, семей	Ущербы, тыс.руб.	Значение целевой функции, тыс. руб.
		<u> </u>	<u> </u>	на	на	<i>(</i> 2)	Неоро	ошаемое	земледел		30					
11 131	500	2 679	10 064	50	100	500	435	1 028	1	4 898	1000	96	91	580	3 364 ,2	22 092 ,4
	-		-	-	C	очетани	е неорош	аемого и	орошаем	юго земл	еделия	•				
10 744	500	2 679	8 918	50	100	500	1 251	503	320	4 898	1 000	96	91	580	3 474,2	22 649,5

Приложение 6

Оптимальные решения эколого-математической задачи оптимизации аграрного производства CXAO «Приморский» с нижней (1), медианной (2) и верхней (3) оценкой целевой функции при неорошаемом земледелии

														36	емле,	делі	ИИ																
Урожайность зерновых ц/га	Урожайность рапса ц/га	Урожайность однолетних трав на сено, ц/га	Урожайность однолетних трав на зеленый корм ц/га	Урожайность многолетних трав на сено п/га	Урожайность многолетних трав на зеленый корм ц/га	Урожайность силосных культур (без кукурузы) ц/га	Урожайность кукурузы на силос ц/га	Площадь зерновых, га/Годовые почвенные потери значение	Площадь рапса, га/Годовые почвенные потери значение	Площадь однолетних трав на сено, га/Годовые почвенные потери значение	Площадь однолетних трав на зеленый корм, га/Годовые почвенные потери значение	Площадь многолетних трав на сено, га/Годовые почвенные потери значение	Площадь многолетних трав на зеленый корм, га/Годовые почвенные потери значение	Площадь многолетних трав на семена, га/Годовые почвенные потери значение	Площадь силосных культур (без кукурузы), га/Годовые почвенные потери значение	Площадь кукурузы на силос, га/Годовые почвенные потери значение	Х1 Площадь зерновых, га	Х2 Площадь рапса, га	ХЗ Площадь однолетних трав на сено, га	X4 Площадь однолетних трав на зеленый корм, га	X5 Площадь многолетних трав на сено, га	X6 Площадь многолетних трав на зеленый корм, га	Х7 Площадь многолетних трав на семена, га	X8 Площадь силосных культур (без кукурузы), га	Х9 Площадь кукурузы на силос, га	X10 Поголовье коров основного стада, гол.	Х11 Поголовье коров на откорме, гол.	X12 Поголовье лошадей основного стада, гол.	X13 Поголовье лошадей на откорме, гол.	Х14 Количество пчелосемей, семьи	Ущербы, тыс.руб.	Значение целевой функции, тыс.руб.	№ п.п.
14,3	10,9	10,1	46,9	22,0	103,9	77,2	56,6	30,0	23,4	23,0	26,4	19,4	41,2	23,0	29,0	25,1	8918	500	4329	7934	50	100	500	4964	1221	4898	1000	96	91	580	2 64,0	18 705,5	1
21,5	10,5	11,2	40,6	14,7	110,7	42,4	53,7	31,1	36,5	22,5	19,2	26,1	28,3	29,0	40,9	21,2	14592	500	1591	5502	50	100	500	30	725	1433	1000	96	91	580	4 429,8	24 200,0	2
21,7	11,6	25,4	96,3	19,9	82,2	57,6	98,7	25,6	31,8	30,7	26,7	35,3	29,3	26,6	22,6	38,8	11807	500	1734	10672	50	100	500	199	969	4898	1000	96	91	580	4 473,9	27 506,3	3

Приложение 7

Оптимальные решения эколого-математической задачи оптимизации аграрного производства СХАО
«Приморский» с нижней (1), медианной (2) и верхней (3) оценкой целевой функции при сочетании неорошаемого и орошаемого земледелия

Урожайность рапса ц/га	Урожайность однолетних трав на сено ц/га	Урожайность однолетних трав на зеленый корм ц/га/	Урожайность многолетних трав на сено ц/га	Урожайность многолетних трав на зеленый корм ц/га	Урожайность силосных культур (без кукурузы) п/га	Урожайность кукурузы на силос ц/га	Урожайность орошаемой кукурузы на силос ц/га	X1 Площадь зерновых, га	X2 Площадь рапса,	X3 Площадь однолетних трав на сено, га	X4 Площадь однолетних трав на зеленый корм, га	X5 Площадь многолетних трав на сено, га	X6 Площадь многолетних трав на зеленый корм, га	X7 Площадь многолетних трав на семена, га	X8 Площадь силосных культур (без кукурузы), га	Х9 Площадь кукурузы на силос, га	X10 Площадь орошаемой кукурузы на силос, га	X11 Поголовье коров основного стада, гол.	X12 Поголовье коров на откорме, гол.	X13 Поголовье лошадей основного стада, гол.	X14 Поголовье лошадей на откорме, гол.	X15 Количество пчелосемей, семей	Ущербы, тыс.руб.	Значение целевой функции, тыс. руб.	№ п.п.
14,2	13,2	12,0	13,7	121,6	61,6	92,6	114,2	5866	500	3870	0	50	2241	500	14556	932	320	4875	1000	899	91	580	2 645,2	19 031,8	1
14,9	19,8	123,2	18,5	78,2	66,4	100,2	101,5	11513	500	2221	10415	50	100	500	104	994	0	4898	1000	96	91	580	4 699,4	28 645,3	2
5,4	24,0	18,0	16,1	121,3	79,9	82,9	81,1	3000	500	15754	0	50	1534	500	0	1606	76	3714	1000	96	91	0	3 729,2	23 827,7	3

Приложение 8
Оптимальные решения эколого-математической задачи оптимизации аграрного производства СХАО
«Приморский» со случайными характеристиками при неорошаемом земледелии

X1 Площадь зерновых, га	Х2 Площадь рапса,	X3 Площадь однолетних трав на сено, га	X4 Площадь однолетних трав на зеленый корм, га	X5 Площадь многолетних трав на сено, га	X6 Площадь многолетних трав на зеленый корм, га	X7 Площадь многолетних трав на семена, га	X8 Площадь силосных культур (без кукурузы), га	X9 Площадь кукурузы на силос, га	X11 Поголовье коров основного стада, гол.	X12 Поголовье коров на откорме, гол.	X13 Поголовье лошадей основного стада, гол.	X14 Поголовье лошадей на откорме, гол.	X15 Количество пчелосемей, семей	Ущербы, тыс.руб.	Значение целевой функции, тыс. руб.
						I	$F_1 = F_2$	$=F_3=$	0,95						
11131	500	2679	10064	50	100	500	435	1028	4898	1000	96	91	580	4 431,4	27 337,4
							$\overline{F_1} = \overline{F_2}$	$=F_3=$	0,5						
11131	500	2679	10064	50	100	500	435	1028	4898	1000	96	91	580	3 222,7	21 388,7
						F	$\overline{F_1} = \overline{F_2}$	$= F_3 =$	0,05						
3000	500	13352	6531	50	100	500	0	1738	2614	2677	96	91	580	2 515,3	18 774,1

Приложение 9 Оптимальные решения эколого-математической задачи оптимизации аграрного производства СХАО «Приморский» со случайными характеристиками при сочетании неорошаемого и орошаемого земледелии

X1 Площадь зерновых, га	Х2 Площадь рапса,	X3 Площадь однолетних трав на сено, га	X4 Площадь однолетних трав на зеленый корм, га	X5 Площадь многолетних трав на сено, га	X6 Площадь многолетних трав на зеленый корм, га	X7 Площадь многолетних трав на семена, га	X8 Площадь — — — — — — — — — — — — — — — — — — —	Х9 Площадь Б кукурузы на силос, П	X10 Площадь орошаемой кукурузы с с на силос, га	X11 Поголовье коров основного стада, гол.	X12 Поголовье коров на откорме, гол.	X13 Поголовье лошадей основного стада, гол.	X14 Поголовье лошадей на откорме, гол.	X15 Количество пчелосемей, семей	Ущербы, тыс.руб.	Значение целевой функции, тыс.руб.
							$r_1 = r$	$F_2 = F_3 =$	= 0,93							
10774	500	2679	8918	50	100	500	1251	503	320	4898	1000	96	91	580	4 562,9	27 361,1
							$F_1 = I$	$\overline{F_2 = F_3}$	=0,5							
10774	500	2679	8918	50	100	500	1251	503	320	4898	1000	96	91	580	3 343,1	21 498,0
							$F_1 = I$	$F_2 = F_3$	= 0,05							•
3000	500	12843	6251	50	100	500	0	1182	320	2290	2914	96	91	580	2 637,0	18 909,5

Приложение 10 Оптимальные решения эколого-математической задачи оптимизации аграрного производства СХАО «Приморский» в условиях засухи при неорошаемом земледелии

Х1 Площадь зерновых, га	Х2 Площадь рапса,	X3 Площадь однолетних трав на сено, га	X4 Площадь однолетних трав на зеленый корм, га	X5 Площадь многолетних трав на сено, га	X6 Площадь многолетних трав на зеленый корм, га	X7 Площадь многолетних трав на семена, га	X8 Площадь силосных культур (без кукурузы), га	X9 Площадь кукурузы на силос, га	X10 Поголовье коров основного стада, гол.	X11 Поголовье коров на откорме, гол.	X12 Поголовье лошадей основного стада, гол.	X13 Поголовье лошадей на откорме, гол.	X14 Количество пчелосемей, семей	Ущербы, тыс.руб.	Значение целевой функции, тыс.руб.
				Реше	ние при	наиболь	ших пот	ерях уро	жая с веј	роятност	ъю 0,056				
3000	806	14068	2002	50	2219	500	0	1738	1000	2088	96	91	580	2 367,2	16 199,0
]	Решение	в условия	их засухи	2015 года	а с вероят	тностью 0	,068				
3000	500	12868	7443	50	100	500	0	1738	2046	3094	96	91	580	2 454,3	18 544,5

Оптимальные решения эколого-математической задачи оптимизации аграрного производства ЗАО "Иркутские семена" с детерминированными и интервальными характеристиками

Оптимальное решение эколого-математической задачи оптимизации аграрного производства ЗАО "Иркутские семена" с детерминированными характеристиками

X1 Зерновые (товарные), га	X2 Зерновые (кормовые)	X3 Рапс яровой	Х4 Картофель	X5 Многолетние травы на сено	X6 Свиноматки, гол.	X7 Свиньи на откорме, голов	Ущербы, тыс. руб.	Значение целевой функции, тыс.руб.	
2 225	500	50	611	189	75	698	1 812,9	7 391,3	

Оптимальные решения эколого-математической задачи оптимизации аграрного производства ЗАО "Иркутские семена" с нижней (1), медианной (2) и верхней (3) оценкой целевой функции

№ п.п.	X1/Валовой сбор значение	X2/Валовой сбор значение	X4/Валовой сбор значение	X1 Зерновые (товарные), га	X2 Зерновые (кормовые)	ХЗ Рапс яровой	Х4 Картофель	X5 Многолетние травы на сено	X6 Свиноматки, гол.	X7 Свиньи на откорме, голов	Ущербы, тыс.руб.	Значение целевой функции, тыс.руб.
1	11,25	12,00	151,52	1 000	1 725	50	611	189	75	698	1 358,2	5 546,6
2	18,51	18,41	162,19	2 225	500	50	611	189	75	698	1 775,6	7 185,8
3	23,78	21,37	179,10	2 245	500	50	617	163	75	589	2 136,9	8 523,1

Приложение 12 Оптимальные решения эколого-математической задачи оптимизации аграрного производства СХАО

«Приморский» с верхней (1), медианной (2) и нижнейй (3) оценкой целевой функции с интервальными коэффициентами негативного влияния при неорошаемом земледелии

	T		T	T		ОЭФС			CLIVITI I			O Dair		прп	псор		10111 9				Г	Г	Т	T	
Площадь зерновых, га/КНВ значение	Площадь рапса, га/КНВ значение	Площадь однолетних трав на сено, га/КНВ значение	Площадь однолетних трав на зеленый корм, га/КНВ значение	Площадь многолетних трав на сено, га/КНВ значение	Площадь многолетних трав на зеленый корм, га/КНВ значение	Площадь многолетних трав на семена, га/КНВ значение	Площадь силосных культур (без кукурузы), га/КНВ значение	Площадь кукурузы на силос, га/КНВ значение	X1 Площадь зерновых, га	X2 Площадь рапса, га	X3 Площадь однолетних трав на сено, га	X4 Площадь однолетних трав на зеленый корм, га	X5 Площадь многолетних трав на сено, га	X6 Площадь многолетних трав на зеленый корм, га	X7 Площадь многолетних трав на семена, га	X8 Площадь силосных культур (без кукурузы), га	X9 Площадь кукурузы на силос, га	X10 Поголовье коров основного стада, гол.	X11 Поголовье коров на откорме, гол.	X12 Поголовье лошадей основного стада, гол.	X13 Поголовье лошадей на откорме, гол.	X14 Количество пчелосемей, семьи	Ущербы тыс.руб.	Значение целевой функции тыс.руб.	№ п.п.
0,21	0,29	0,20	0,22	0,04	0,03	0,03	0,27	0,21	11131	500	2679	10064	50	100	500	435	1028	4898	1000	96	91	580	3 345,6	18 606,1	1
0,27	0,30	0,22	0,24	0,04	0,03	0,03	0,21	0,26	11131	500	2679	10064	50	100	500	435	1028	4898	1000	96	91	580	4 098,0	17 788,3	2
0,33	0,27	0,31	0,28	0,03	0,03	0,04	0,20	0,30	11131	500	2679	10064	50	100	500	435	1028	4898	1000	96	91	580	4 828,7	16 856,9	3

Оптимальные решения эколого-математической задачи оптимизации аграрного производства СХАО «Приморский» с верхней (1), медианной (2) и нижней (3) оценкой целевой функции с интервальными коэффициентами негативного влияния при сочетании неорошаемого и орошаемого земледелии

		1	T	4	1	1					I	_	1						F -			1	1			1	1
Площадь зерновых, га/КНВ значение	Площадь рапса, га/КНВ значение	Площадь однолетних трав на сено, га/КНВ значение	Площадь однолетних трав на зеленый корм, га/КНВ значение	Площадь многолетних трав на сено, га /КНВ значение	Площадь многолетних тра на зеленый корм, га/КНВ значение	Площадь многолетних трав на семена, га/КНВ значение	Площадь силосных культур (без кукурузы), га/КНВ значение	Площадь кукурузы на силос, га/КНВ значение	Площадь орошаемой кукурузы, га/КНВ значение	X1 Площадь зерновых, га	X2 Площадь рапса, га	X3 Площадь однолетних трав на сено, га	X4 Площадь однолетних трав на зеленый корм. га	X5 Площадь многолетних трав на сено, га	X6 Площадь многолетних тра на зеленый корм. га	X7 Площадь многолетних трав на семена, га	X8 Площадь силосных культур (без кукурузы), га	X9 Площадь кукурузы на силос, га	X10 Площадь орошаемой кукурузы, га	X11 Поголовье коров основного стада, гол.	X12 Поголовье коров на откорме, гол.	X13 Поголовье лошадей основного стада, гол.	X14 Поголовье лошадей на откорме, гол.	X15 Количество пчелосемей, семьи	Ущербы, тыс.руб.	Значение целевой функции тыс.руб.	№ п.п.
0,21	0,28	0,21	0,10	0,03	0,04	0,03	0,04	0,21	0,25	10781	500	2663	8924	50	100	500	1264	502	320	4898	1000	96	91	580	3 695,4	18 792,0	<u> </u>
0,27	0,27	0,25	0,09	0,03	0,03	0,03	0,03	0,21	0,28	10781	500	2663	8924	50	100	500	1264	502	320	4898	1000	96	91	580	4 139,2	18 039,6	2
0,33	0,32	0,27	0,19	0,03	0,03	0,03	0,03	0,26	0,32	9523	500	4084	8044	50	100	500	2229	612	320	4819	1000	2846	91	580	4 891,6	17 134,0	3