

ЗАХАРЯН ЮРИЙ ГАЙКАЗОВИЧ

**ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ АДАПТАЦИИ АГРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
РЕШЕНИЙ К ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ**

Специальность 06.01.03.– агрофизика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора сельскохозяйственных наук

Санкт-Петербург
2018

Работа выполнена в лаборатории агроклимата Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Агрофизический научно-исследовательский институт» (ФГБНУ АФИ)

Научный консультант:

Усков Игорь Борисович

доктор физико-математических наук,
член-корреспондент РАН, профессор, главный
научный сотрудник ФГБНУ АФИ

Официальные оппоненты:

Иванов Дмитрий Анатольевич

доктор с.-х. наук, профессор, член-корреспондент
РАН, главный научный сотрудник, заведующий
отделом мониторинга состояния и использования
осушаемых земель Федерального
государственного бюджетного научного
учреждения «Всероссийский НИИ
мелиорированных земель»

Терлеев Виталий Викторович

доктор с.-х. наук, профессор, профессор кафедры
«Водохозяйственное и гидротехническое
строительство» Федерального государственного
автономного образовательного учреждения
высшего образования «Санкт-Петербургский
политехнический университет Петра Великого»

Хомяков Дмитрий Михайлович

доктор техн. наук, профессор, заведующий
кафедрой агроинформатики Федерального
государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования «Московский
государственный университет имени
М. В. Ломоносова»

Ведущая организация

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Санкт-Петербургский
государственный аграрный университет»

Защита диссертации состоится «__»_____ 2018 года в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д006.001.01 при Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Агрофизический научно-исследовательский институт» по адресу: 195220, Санкт-Петербург, Гражданский проспект, д.14. Тел. +7 (812) 534-13-24, факс +7 (812) 534-19-00, e-mail: office@agrophys.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Агрофизического научно-исследовательского института и на сайте <http://www.agrophys.ru>, с авторефератом - на сайте <http://vak.ed.gov.ru> и <http://www.agrophys.ru>.

Автореферат разослан «__»_____ 2018 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просим направлять по адресу: 195220, Санкт-Петербург, Гражданский пр., д. 14, ФГБНУ АФИ.

Учёный секретарь
диссертационного совета

Д 006.001.01 доктор биологических наук _____

Е. В. Канаш

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования

В настоящее время интенсивно развивается точное земледелие, в основе которого заложено применение адресных локализованных технологических агрономических процедур. Имеются опытные данные, свидетельствующие о том, что неоднородность сельскохозяйственных территорий по основным агрометеорологическим, микроклиматическим и почвенным факторам играет существенную роль и должна учитываться при планировании хозяйственной деятельности. Теоретические основы пространственно-временной адаптации агротехнологий к неоднородности почвенно - климатических условий практически не разработана. Это обстоятельство определило методическую направленность диссертационной работы.

С точки зрения теоретического обоснования создания эффективной системы планирования агротехнологии при геостатистической адаптации к неоднородности сельскохозяйственных земель по факторам продуктивности необходимо установить: в какой степени пространственная неоднородность почвенных и агрометеорологических условий влияет на формирование урожая и экономическую эффективность проводимых агротехнологических операций; что дает переход от недифференцированной агротехнологии к дифференцированной стратегии; в каких ситуациях такой переход целесообразен; каково влияние на степень дифференциации агротехнологий антропогенной неоднородности, «создаваемой» в процессе реализации агротехнических мероприятий. Общая проблема и разработка отдельных ее сторон составляют содержание настоящей диссертации.

Цель и задачи исследования. Целью диссертационной работы являлось создание методических основ и алгоритмов принятия эффективных агротехнологических решений на неоднородных по почвенно-климатическим

условиям сельскохозяйственных территориях в рамках пространственно-временного континуума ($D \times T$).

В соответствии с этим были поставлены и решены следующие задачи:

1. Разработать классификацию основных вариантов (стратегий) планирования агротехнических мероприятий на неоднородных по агрометеорологическим показателям территориях.

2. Разработать принципы и алгоритмы построения оптимальных недифференцированных стратегий хозяйственного планирования, учитывающих пространственно-временную геостатистику агрометеорологической неоднородности территории.

3. Обосновать принципы построения и оценки потенциальной эффективности частично дифференцированных стратегий; разработать методику выбора рационального уровня детализации решений, дифференцируемых по грациям варьирующего почвенно-климатического фактора.

4. Разработать комплекс математических моделей и алгоритмов для оценки потенциальной эффективности пространственной дифференциации агротехнических решений с учетом геостатистического анализа.

5. Разработать методику учета антропогенной неоднородности территории, возникающей вследствие случайных колебаний заданного технологического режима при реализации агротехнологии.

6. Обосновать модели формирования информационной базы данных для оценок дифференциации агротехнологий с учетом пространственно-временной структуры.

Научная новизна.

- Впервые разработан количественный подход, позволяющий оценивать влияние неоднородности сельскохозяйственных территорий на эффективность планируемых агротехнических мероприятий с учетом геостатистического анализа в системе точного земледелия (ТЗ);

- разработан комплекс моделей и алгоритмов для оценки экономического эффекта, который теоретически может быть получен за счет детальной дифференциации решений в соответствии с пространственной неоднородностью территории. Соответствующий анализ выполнен для различных типов дискретных (альтернативных) и непрерывных (квадратичной, кусочно-линейной и экспоненциальной) моделей, описывающих широкий круг возможных на практике ситуаций;

- введено понятие оптимальной недифференцированной стратегии и нахождение условий, при которых такая стратегия существенно более эффективна, чем ориентация на пространственно осредненные агрометеорологические условия, и условий, когда она незначительно уступает дифференцированному планированию. На основании этого можно заключить, когда и в каких случаях пространственная дифференциация целесообразна и когда она нецелесообразна;

- разработаны принципы и алгоритмы дифференциации решений по определенным грациям пространственно-временного варьирующего агрометеорологического фактора (частичная дифференциация) с учетом комплексирования базы данных (БД) и моделей, описывающих процессы в окружающей среде.

Теоретическая и практическая значимость работы.

В результате выполненного исследования разработаны методики и алгоритмы, доведенные до расчетных формул, позволяющие:

- оценивать теоретически достижимый (потенциальный) эффект, который может быть получен за счет дифференциации агротехнических мероприятий в соответствии со статистическими закономерностями пространственной неоднородности сельскохозяйственной территории.

- находить оптимальные недифференцированные стратегии и устанавливать целесообразность (или нецелесообразность) перехода от планирования адаптивных агротехнических мероприятий в расчете на средние

условия с ориентацией на некоторый оптимальный уровень пространственно варьирующего фактора;

- обосновывать рациональные схемы планирования агротехнических мероприятий, предусматривающие дифференциацию принимаемых решений по определенным градациям пространственно варьирующего почвенно-климатического фактора, оценивать потенциальную эффективность адаптации частично дифференцированных стратегий (ЧДС);

- проводить оптимальное районирование неоднородной территории, «увязывая» эту процедуру с конкретной задачей потребителя и детализированной почвенно-климатической информацией;

- формулировать требования к качеству реализации агротехнологии для обеспечения одинаковых характеристик установленного технологического режима во всех точках рассматриваемой территории в системе ТЗ.

Полученные в работе методические результаты в настоящее время используются в Агрофизическом научно-исследовательском институте как элемент обоснования дифференцированных технологий ТЗ, а также при разработке методики оптимального (в хозяйственном отношении) районирования территории и выделения на ней агроэкологически псевдооднородных зон.

Методы исследований. В основе работы лежит анализ эмпирико-статистических моделей, которые в количественной форме выражают связь между варьирующим по территории почвенно-климатическим фактором и регулируемым технологическим воздействием с одной стороны, и урожайностью или определенным хозяйственно-экономическим эффектом (выигрышем или потерями), получаемым при реализации выбранной стратегии планирования агротехнических мероприятий, с другой. В качестве основного математического аппарата в диссертации используются теория вероятностей и принципы теории геостатистических решений. Отдельные вопросы требовали постановки специальных полевых экспериментов, которые были выполнены по соответствующим программам.

Положения выносимые на защиту:

- Методика нахождения эффективных стратегии хозяйственного планирования с учетом геостатистических адаптаций и характеристик агрометеорологической неоднородности сельскохозяйственных земель.
- Комплекс математических моделей и алгоритмов, позволяющих оценивать потенциальную эффективность пространственно-временной дифференциации агротехнологии.
- Методика учета антропогенной неоднородности сельскохозяйственных территории, возникающей вследствие случайных колебаний заданного технологического режима при реализации агротехнологии.

Личный вклад автора

Автором сформулирована цель работы, разработаны методологические и инструментальные основы, их реализации в полевых условиях Ленинградской области. Проанализированы и интерпретированы результаты исследований и сделаны соответствующие выводы при участии научного консультанта. Разработка алгоритмов решения задач выполнялась лично автором в составе научного коллектива. Общий личный вклад соискателя в объем диссертационного исследования составляет не менее 87%.

Апробация результатов.

Полученные в ходе выполнения работы результаты исследований периодически рассматривались на заседаниях Ученого Совета Агрофизического института по научно-организационным вопросам, а также докладывались и обсуждались на научных конференциях, форумах и собраниях:

на 3-ей научно-практической конференции Всероссийского научно-исследовательского института механизации с/х, машинные технологии производства продукции в системе точного земледелия и животноводства (Москва, 2006 г.);

на IX Международной научно-практической конференции «Автоматизация и информационное обеспечение производственных процессов в сельском хозяйстве» (Углич, 2006 г.);

на Международной конференции «Современная агрофизика-высоким агротехнологиям» (Санкт-Петербург, 2007 г.);

на Международной научно-практической конференции «Интенсификация, ресурсосбережение и охрана почв в адаптивно-ландшафтных системах земледелия» (Курск, 2008 г.);

Expedient spatial differentiation of technologies of precise agriculture according to productivity factors (The Netherlands, 2009);

на научно-практической Международной конференции «Агроэкосистемы в естественных и регулируемых условиях: от теоретической модели к практике прецизионного управления», ФГБНУ АФИ (Санкт-Петербург, 2016 г.);

на XI Международном Яснополянском форуме, Устойчивое развитие, рациональное природопользование. Технологии здоровья (Тула, 2017 г.).

Публикации.

По материалам исследований лично и в соавторстве опубликовано 39 печатных работ, в т.ч. 14 в журналах, рекомендованных ВАК.

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов и списка литературы, изложена на 272 страницах, включает 16 таблиц, 73 рисунка и 3 приложения. Библиографический список состоит из 226 источников, из них 32 иностранных.

Благодарности. Автор считает своим приятным долгом высказать искреннюю благодарность своему научному консультанту, д. физ.-мат. наук, профессору, член-корреспонденту РАН Ускову И.Б.; канд. техн. наук, заслуженному мелиоратору РФ Янко Ю.Г.; д. физ.-мат. наук, профессору Жуковскому Е.Е.; д. с.-х. наук Комарову А. А. за проведение экспериментальных разработок на полигонах Ленинградской области; д. с.-х. наук, профессору Осипову А.И.; канд. с.-х. наук Кононенко О. В.; Митрофанову Е. П.; Митрофановой О. А. за помощь в оформлении диссертации.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1 Моделирование пространственной дифференциации агротехнических решений по факторам продуктивности. Обсуждаются проблемы пространственно-временной неоднородности сельскохозяйственных территорий в рамках статистических обобщений почвенно-метеорологических явлений, позволяющих получить модель их распределения в пространстве. Установлена направленность геостатистических исследований и приводится математическая формулировка решения задач с учетом климатических, почвенно-агрофизических и агрохимических факторов. Ключевым принципом моделирования пространственной дифференциации агротехнологии является адаптация элементов планируемых технологических воздействий к внутрислолевому варьированию условий. В первой главе диссертации рассмотрены методологические аспекты геостатистики и вариограммного анализа для решения одной из принципиальных задач в системе ТЗ, связанной с обоснованием целесообразности дифференциации агротехнологических воздействий в рамках пространственного варьирования условий внутри сельскохозяйственного поля, а также предложены разработанные подходы для формирования информационно-технологической базы для ТЗ.

Вопросы пространственного моделирования

Статистическое моделирование пространственных явлений позволяет обобщить имеющиеся измерения и получить модель их распределения в пространстве. Пространственно распределенные данные используются при моделировании опасных агрометеорологических явлений.

Глубокий анализ и моделирование пространственных данных требуют применения комплексов геоинформационных систем (ГИС) и различных методов, характеризующих ту или иную особенность агрометеорологических явлений. Сложность такого анализа обусловлена несколькими факторами: наличием больших объемов количественной и качественной информации, многомасштабностью и многопеременностью, наличием различных факторов влияния. В работе рассматриваются элементы методологии геостатистического

анализа пространственно распределенных данных почвенно-климатических факторов и приводятся примеры исследования с применением этих методов для планирования дифференцируемых агротехнологий с учетом варьирующих агрометеорологических параметров в системе «почва-растение-деятельный слой атмосферы».

Для решения задач необходимо применение комплекса исследований с помощью методов геостатистики — статистики пространственно распределенной информации в следующей последовательности процедур: оценить значение параметра в точке, где измерение не проводилось; выполнить картирование информации, построить изолинии на плотной сетке; оценить ошибку интерполяционной оценки; оценить значение переменной, по которой мало измерений, используя значения другой коррелированной с ней переменной, по которой проведено много измерений; определить вероятность того, что значения наблюдаемой переменной превысят заданный уровень в заданной области; получить набор равновероятных стохастических пространственных реализаций распределения наблюдаемой переменной.

Первые четыре задачи — примеры задач регрессии или классификации, две последние задачи относятся к вероятностному анализу и связаны с оценками риска агрометеорологических явлений.

Подходы, основные этапы, оценка анализа и моделирования пространственно распределенных данных.

Подходы к анализу и обработке пространственно распределенных данных варьирующих агрометеорологических факторов можно условно разделить на три группы: детерминистические модели— линейная интерполяция, метод обратных расстояний, мульти-квадратичные уравнения и т. п.; геостатистика — модели, базирующиеся на статистической интерпретации данных; алгоритмы, основанные на обучении — искусственные нейронные сети, генетические алгоритмы, статистическая теория обучения.

Одним из важных составляющих традиционной геостатистики является пространственный корреляционный анализ. Мерой пространственной

корреляции является вариограмма. Для получения наиболее достоверной в статистическом смысле пространственной оценки используются модели из семейства кригинга. Кригинг является «наилучшим» оценителем и моделированием пространственно распределенных данных в статистическом смысле в классе линейных интерполяторов.

Пространственная непрерывность и стационарность

Случайная функция $Z(x)$ обладает стационарностью второго порядка, если: математическое ожидание $m(x)$ существует и не зависит от местоположения x ; для любого вектора h разность $Z(x) - Z(x + h)$ имеет конечную вариацию, не зависящую от x (стационарность приращений). Модель вариограммы является функцией, определяющей зависимость изменения исследуемой величины в пространстве от расстояния.

Агрометеорологические факторы, влияющие на рост и развитие растений и определяющие особенности агротехники варьируют во времени и в пространстве. Исследованию их временной изменчивости и ее оптимальному учету при планировании агротехнических мероприятий посвящена достаточно обширная литература. В частности, Агрофизический институт располагает хорошо разработанной теорией принятия оптимальных решений на основе прогнозов и климатологической информации.

До недавнего времени не уделялось достаточного внимания адаптации агротехнологий к пространственно-временной изменчивости почвенно-климатических характеристик, хотя специалистам в области агрономии давно было ясно, что пространственная неоднородность сельскохозяйственных территорий должна учитываться при планировании и проведении агротехнических мероприятий в течение всего вегетационного периода. Именно с этим обстоятельством связано принятое в ряде регионов страны деление сельскохозяйственных полей на агрофизические псевдооднородные (паспортизированные) контуры (Захарян, Усков, 2007; Захарян, Усков, 2009).

Пространственно-временная неоднородность продуктивности по климатическим факторам.

Проблема изучения пространственной неоднородности сельскохозяйственных территорий и оценки ее влияния на урожай и эффективность агротехнических мероприятий включает в себя несколько аспектов, которые показаны на рис. 1.1. Этот рисунок одновременно иллюстрирует информационную связь между отдельными направлениями исследования и указывает место поставленных в диссертации вопросов в общей проблеме. В рассматриваемой многоплановой и сложной предметной области могут быть выделены следующие основные стороны, составляющие ее содержание: временные категории пространственной неоднородности и изменчивости; природа наблюдаемой пространственной изменчивости агрометеорологических и почвенных параметров, установление их зависимости от различных причинно-обуславливающих факторов; влияния неоднородности сельскохозяйственных территорий на интегральный урожай и эффективность отдельных агротехнических мероприятий; микроклиматическое и почвенное картирование; построение тематических карт, отражающих особенности неоднородности территории по факторам для конкретных хозяйств, районов, областей и т.д.; статистический анализ пространственного варьирования отдельных агрометеорологических показателей; статистический анализ пестроты территории; обоснование мероприятий по выравниванию микроклимата сельскохозяйственных полей и характеристик почвенного плодородия; принятие решений по оптимизации принимаемых решений и дифференциации агротехнологии в соответствии с пространственным варьированием тех или иных агрометеорологических факторов.

Первые четыре аспекта рассматриваемой проблемы относятся к области изучения и описания пространственной неоднородности сельскохозяйственных территорий; пятый касается управления неоднородностью агрометеороусловий с целью ее выравнивания; два последних составляют содержание исследований по оптимальному планированию агротехнологии при наличии пространственно

- временной неоднородности. Именно это является предметом настоящей диссертационной работы. Из рис. 1, однако, видно, что интересующие нас исследования не изолированы и в значительной степени должны опираться на смежные разделы. Учитывая это, дадим оценку современного состояния проблемы пространственно - временной неоднородности почвенно – климатических условий сельскохозяйственных территорий в основных перечисленных аспектах.



Рис. 1. Геостатистическое описание неоднородности и основные направления исследований.

Пространственная неоднородность по почвенным факторам: агрофизическим и агрохимическим

Наиболее развитой областью исследований является разработка различных методов описания пространственной вариабельности различных агрометеорологических и почвенных параметров. В первую очередь, среди них следует выделить исследования по изучению пространственной изменчивости и картированию характеристик микроклимата сельскохозяйственных территорий. Большой цикл работ в этом плане выполнен под руководством И. А. Гольцберг (1967, 1970) и Е. Н. Романовой (1977, 1980). Изучение микроклиматической неоднородности термических ресурсов в условиях холмистой местности было продолжено З. А. Мищенко (1984, 2000). Как показывают исследования А. М. Шульгина (1972), значительной пространственной изменчивостью, наблюдаемой даже в пределах одного поля, обладает температура почвы в зимнее время. Исследованию неоднородности сельскохозяйственных

территорий по радиационным характеристикам посвящены работы А. Ф. Захаровой (1959), Т. А. Голубовой (1976), О. Н. Денисенко (1975) и др.

Наибольшее число работ посвящено изучению пространственной изменчивости условий увлажнения. показано в работах (Мещанинова, 1971), существенный вклад в пространственное варьирование влажностного режима вносит пестрота почвенного покрова, определяющая интенсивность впитывания осадков и испарения почвенной влаги. Агрометеорологическим показателем, характеризующим водный режим растений, а также условия проведения различных агротехнических мероприятий, является влажность почвы (запасы почвенной влаги). Закономерности пространственной variability этого важнейшего параметра, его связь с рельефом и характеристиками почвенного покрова, особенности микроклиматического картирования и другие вопросы изучались многими авторами. (Захарян, Насонова, 1988; Петрова, 1971).

Многими авторами детально изучались вопросы пространственного варьирования различных почвенных характеристик (Витковская, 2009; Глобус, Бодров, 1981; Куртнер, Усков, 1982 и др.). Общие закономерности пространственного варьирования мощности гумусового горизонта и других почвенных характеристик в пределах небольших территорий были детально проанализированы в фундаментальных работах В. М. Фридлянда (1965, 1972). В ряде работ изучались закономерности пространственного варьирования кислотности, содержания фосфора, калия, обменного кальция и других элементов (Суровый, Чеботаревская, 1969; Прохорова, Сорокина, 1978; Самсонова, Мешалкина, Дмитриев, 1999; Литвинович, 2007).

Применительно к неоднородным территориям больших масштабов пространственная изменчивость урожаев в связи с агрометеорологической неоднородностью территории изучалась П. Х. Карингом (1981) и Х. Г. Тоомингом (1981) с соавторами. Х. Г. Тооминг и Ю. В. Сепп (1983) показали, что в условиях микроклиматической неоднородности территории, как

правило, варьируют не только средние многолетние урожаи, но и характеристики многолетней устойчивости урожая.

Число исследований имеют методическую и экспериментально-прикладную направленность и посвящены описанию неоднородности сельскохозяйственных территорий, ее анализу, статистике, картированию и т.п. Однако, оценки влияния неоднородности на урожай дают лишь общие представления, слабо подкрепленные экспериментальным материалом и тем более – теоретическим анализом. Практически отсутствуют методические работы по оценке влияния неоднородности на хозяйственную деятельность и обоснованию рационального планирования адаптивных агротехнологий с учетом геостатистики на неоднородных сельскохозяйственных территориях.

Пространственная неоднородность по эффективности и интеграционному показателю; агротехнологические задачи дифференциации при пространственном варьировании

В зависимости от степени пространственной дифференциации агротехнических решений и объема агрометеорологической информации, все варианты стратегии и планирования агротехнологий на неоднородной сельскохозяйственной территории можно разделить на три основных класса: недифференцированные стратегии (НДС); детально дифференцированные стратегии (ДДС); частично дифференцированные стратегии (ЧДС) (Захарян, 2009).

Характерной особенностью НДС является то, что пространственная изменчивость влияющего фактора X учитывается лишь в некотором среднем, и в соответствии с этим в целом для всей территории принимается одно и то же агротехническое решение (НДС_с) по территории значения варьирующего элемента. Другой тип НДС – так называемая статистически оптимальная недифференцированная стратегия (НДС₀), обеспечивающая при отсутствии учета значений X в отдельных точках достижение максимального экономического эффекта в среднем на единицу площади. Стратегии класса ДДС предполагают пространственное варьирование принимаемых

агротехнических решений с учетом конкретных агрометеорологических, почвенных и других условий в каждой точке рассматриваемой неоднородной территории. Очевидно, что для реализации ДДС должны иметься сведения о пространственной изменчивости влияющего фактора. К классу ЧДС относятся стратегии промежуточные между НДС и ДДС, например, принимаются во внимание средние условия каждого поля, в то время как в пределах поля дифференциация не проводится.

Полагаем, что эффект от проводимых мероприятий в каждой точке неоднородной территории зависит как от величины управляющего воздействия d , так и от конкретного значения $X=x$ в этой точке. Пусть функция $U(x, d)$ характеризует этот эффект, причем величина U – это некоторый экономический выигрыш (или потери). В общем случае значения x и d от точки к точке меняются. Поэтому чтобы охарактеризовать эффективность выбранного варианта планирования на некоторой неоднородной территории в целом, следует рассматривать среднюю величину выигрыша по множеству пар событий (x, d) . Можно записать, что $U = \overline{U(x, d)}$.

Очевидно, что если значения x и d задать как функции координат (ξ, η) различных точек рассматриваемой территории S , то вместо будет иметь место равенство $U = \frac{1}{S} \iint_{\langle S \rangle} U[x(\xi, \eta); d(\xi, \eta)] d\xi d\eta$. При этом в случае деления территории на n однородных по X зон средний на единицу площади выигрыш вычисляется по формуле $U_g = \sum_{i=1}^n g_i U[x_i; d_0(x_i)]$. Другой крайний случай состоит в том, что планирование осуществляется в целом для всей территории без учета пространственной изменчивости X . При этом простейший случай состоит в том, что общее для всей территории решение принимается в расчете на средние условия и соответствующий выигрыш $U_{ng} = \sum_{i=1}^n g_i U[x_i; d_0(\bar{x})]$. Разность $\Delta U_1 = U_g - U_{ng}[d_0(\bar{x})]$ характеризует средний абсолютный выигрыш. Безразмерная неотрицательная величина $\lambda_1 = \Delta U_1 / U_{ng}[d_0(\bar{x})]$ рассматривается как критерий эффективности пространственно дифференцированного планирования.

По аналогии с ΔU_1 целесообразно ввести величину $\Delta U_2 = U_{ng}[d_0(a_0)] - U_{ng}[d_0(\bar{x})]$, характеризующую выигрыш, который теоретически может быть получен за счет перехода от ориентации на средние условия к оптимальной дифференцированной стратегии. При этом подобно λ_1 можно вычислить показатель $\lambda_2 = \Delta U_2 / U_{ng}[d_0(\bar{x})]$, который характеризует потенциальную эффективность оптимальной недифференцированной стратегии. Очевидно, что в тех случаях, когда отношение $\omega = \Delta U_2 / \Delta U_1$ существенно меньше единицы, дифференциация может быть целесообразной. В случаях, когда $\omega \approx 1$ дифференциация нецелесообразна.

Геостатистическая модель пространственной неоднородности сельскохозяйственного поля

Пространственная неоднородность сельскохозяйственного поля представляет собой достаточно сложное явление, которое обусловлено природным и антропогенно-технологическим варьированием и пространственно распределенных почвенных, микроклиматических и иных факторов продуктивности посева. Статистическая структура поля пространственно распределенного фактора может быть описана вариограммой.

Сведения о вариограммной функции

Основная идея геостатистического подхода (Каневский, Демьянов, 1999) состоит в том, что при выполнении гипотезы стационарности, статистическая структура поля пространственно распределенного фактора может быть описана с помощью вариограммной функции $\gamma(\vec{h})$. Для того, чтобы сделать переход от недифференцированной стратегии к детально дифференцированному планированию агротехнологий необходимо иметь дело не с отдельными компонентами, а с суммарной неоднородностью. Для получения эмпирических оценок вариограммы обычно используется формула

$$\gamma^*(\vec{h}) = \frac{1}{2n(\vec{h})} \sum_{i=1}^n [f'(\vec{r}_i + \vec{h}) - f'(\vec{r}_i)]^2,$$

Символ звездочки отличает эмпирическую оценку от соответствующей теоретической величины; $n(\vec{h})$ —, число пар точек, взаимно удаленных на расстояние \vec{h} .

Расчет и аналитическая аппроксимация эмпирических вариограмм

Эмпирическая вариограмма рассчитывается для поля отклонений $f'(\vec{r})$. При выраженной макронеоднородности поля условие его стационарности нарушается, и вместо характерного стремления вариограммы к некоторому порогу насыщения с увеличением \vec{h} эмпирическая кривая $\gamma^*(\vec{h})$ будет обнаруживать тенденцию к постоянному росту.

Глава 2. Методика частично дифференцированной стратегии (ЧДС)

Принципы анализа ЧДС

Глава посвящена исследованию различных вариантов частично пространственно-временной дифференциации решений. При этом в качестве исходного допущения принимается, что весь диапазон пространственно варьирующей переменной X разделяется на непересекающиеся градации $\Omega^{(1)}, \Omega^{(2)}, \dots, \Omega^{(N)}$. Наиболее детально изучаются альтернативная и трехфазовая схемы, оцениваемые по отношению к экспоненциальной модели.

Задача оценки потенциальной эффективности пространственно-временной дифференциации почвенно-климатических условий сельскохозяйственных земель, обусловленная пространственной неоднородностью почвенно-климатических характеристик сельскохозяйственных полей, по существу сводится к анализу и сопоставлению между собой трех величин (Захарян 2009): среднего на единицу площади экономического эффекта U_g , который получается при детальной пространственной дифференциации решений; среднего на единицу площади экономического эффекта $U_{ng} = U_{ng}[d_0(\bar{x})]$, который соответствует геостатистической адаптации недифференцированному планированию в расчете на осредненные по рассматриваемой территории агрометеорологические условия; среднего на единицу площади экономического эффекта $U_{ng}^0 = U_{ng}[d_0(a_0)]$, отвечающего адаптации оптимальной недифференцированной стратегии планирования, т.е. такой НДС, когда a_0 находится из условия максимизации значения $U_{ng} = U_{ng}[d_0(a)]$.

Нахождение всех перечисленных величин предполагает построение некоторой экономико-агрометеорологической модели $U(x, d)$, оценивающей одновременное хозяйственное действие варьирующего по территории почвенно-климатического фактора X и реализуемых на поле агротехнических мероприятий d .

Если распределение X является нормальным и планирование производится в расчете на средние условия $\bar{x}^{(1)}$ и $\bar{x}^{(2)}$ по каждой градации, а диапазон изменения X делится на градации $X \leq \bar{x}$ и $X > \bar{x}$, то по сравнению с ориентацией на генеральное среднее \bar{x} будет получен выигрыш.

Дифференциация решений по двум градациям пространственно варьирующего фактора

Исследование потенциальной эффективности пространственно–временной дифференциации решений на агрометеорологически неоднородных территориях посвящено созданию методики оценки ЧДС расчетного (потенциального) эффекта, который теоретически может быть получен за счет детального учета сведений о пространственной изменчивости влияющего почвенно-климатического фактора.

Рассматривалась ситуация, когда пространственная неоднородность территории выражается в варьировании от точки к точке некоторого непрерывного по шкале возможных значений агрометеорологического фактора X (температура, осадки и пр.), а последствия принятого хозяйственного решения d , ориентированного на некоторое $X = a$, определяются аналитически заданной функцией $U(x, d)$. В частности, для случая, когда функция $U(x, d)$ выражается кусочно-линейной зависимостью

$$U(x, d) = \begin{cases} C_y[y_0(x) + bd] - C_d d & \text{при } d \leq d_0, \\ C_y[y_{max} - b'(d - d_0)] - C_d d & \text{при } d > d_0, \end{cases}$$

где $y_{max} = y_0(x) + bd_0$

В предположении нормальности распределения X было получено соотношение для расчета величины ΔU_1 :

$$\Delta U_1 = C_y(1 + \eta) \frac{l\sigma_x}{\sqrt{2\pi}}.$$

Здесь y и d имеют смысл урожая и интенсивности агротехнического воздействия, соответственно $y_0(x)$ – урожай, который при $X = x$ достигается, когда $d = 0$, т. е. продуктивность посева в природных условиях; y_{max} – максимально достижимый урожай; $d_0 = d_0(a)$ – оптимальная интенсивность агротехнического воздействия, обеспечивающая при данном x максимум урожая; b и b' – коэффициенты, характеризующие соответственно «скорость» возрастания урожая с ростом интенсивности воздействия и скорость снижения урожая при $d > d_0$; l – коэффициент пропорциональности в линейной зависимости $y_0(x) = lx$; $\eta = b'/b$; σ_x – среднее квадратическое отклонение пространственно варьирующего фактора X ; C_d и C_y – затраты на агротехническое воздействие единичной интенсивности и стоимость единицы готовой продукции соответственно.

Применительно к рассматриваемой модели показано, что оптимальная НДС, обеспечивающая получение максимального эффекта на единицу площади, отличается от ориентации на средние условия и сводится к планированию интенсивности агротехнического воздействия в расчете на некоторое $X = a_0$, определяемое из уравнения: $\Phi(t) = \frac{\mu + \eta}{1 + \eta} - \frac{1}{2}$,

где $t = (a - \bar{x})/\sigma_x$; $\mu = C_d/bC_y$; $\eta = b'/b$; Φ – интеграл вероятности.

Такой переход позволяет снизить потери из-за неоднородности территории на величину $\Delta U_2 = \Delta U_1[1 - \exp(-t_0^2/2)]$.

Примером практической реализации описанной методики является рассмотренная в диссертации задача оценки потенциальной эффективности пространственной дифференциации оросительных норм при выращивании яровой пшеницы в климатических условиях Кулундинской степи.

Дифференциация решений по экспоненциальной модели

Аналогичный теоретический анализ выполнялся для экспоненциальной модели вида

$$u(x, d) = C_y y_{max} [1 - e^{-\gamma(x+d)}] - C_d d,$$

где γ – параметр модели.

Общую схему функции эффективности иллюстрирует рисунок 2.

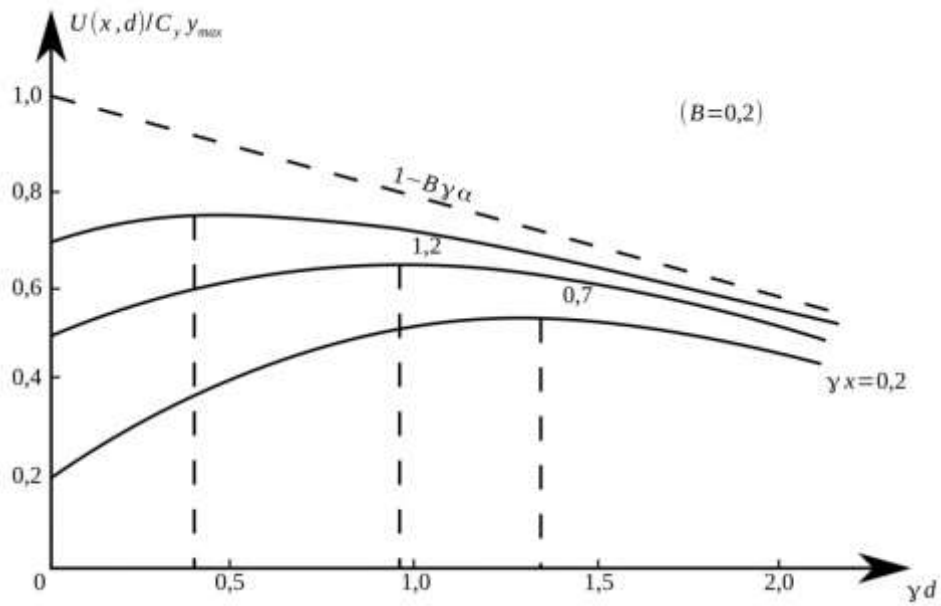


Рис. 2. Общий вид функции выигрыша $U = U(x, d)$ для экспоненциальной модели.

Как и в предыдущем случае, здесь найдены основные соотношения, позволяющие оценить потенциальную эффективность дифференциации решений. Так, например, показано, что если распределение пространственно варьирующего фактора X подчиняется нормальному закону, то выигрыш на единицу площади, получаемый в результате перехода от ориентации на средние условия к дифференцированному планированию, будет равен

$$\Delta U_1 = \frac{C_d}{\gamma} (e^{\theta^2/2} - 1),$$

а переход от того же планирования на средние условия к статистически оптимальной НДС позволяет снизить потери из-за неоднородности территории на величину

$$\Delta U_2 = \frac{C_d}{\gamma} (e^{\theta^2/2} - \frac{\theta^2}{2} - 1),$$

где $\theta = \gamma \sigma_x$.

В диссертации получены также формулы для расчета этих величин в общем случае.

Влияние характера варьирующего фактора

Теоретически показано, что потери урожая из-за отсутствия дифференциации решений по неоднородной территории оказываются прямо пропорциональны среднему квадратическому отклонению пространственно варьирующего фактора продуктивности X . Зависимость урожая от любого лимитирующего фактора выражается кривой с максимумом. Если исходить из этого обстоятельства, то зависимость урожая y от лимитирующего фактора z можно представить кривой второго порядка:

$$y = y_{max} - m(z - z_0)^2.$$

Здесь z_0 - значение z , при котором обеспечиваются оптимальные агрометеорологические условия; m - некоторый коэффициент пропорциональности

Рассмотрены варианты недифференцированного планирования: $\bar{z} = z_0$ и $\sigma_z^2 = \sigma_x^2$. В этом случае относительные потери урожая, вызванные пространственной неоднородностью территории, совпадают с квадратом коэффициента вариации лимитирующего фактора z .

В рамках исследованной квадратичной модели оптимальная НДС совпадает с недифференцированным планированием в расчете на средние условия.

Обобщение результатов анализа ЧДС при климатической повторяемости альтернативных агрометеорологических условий

Методика ЧДС распространена на ситуацию, когда пространственная неоднородность территории выражается в осуществлении ($F = F_1$) или не осуществлении ($F = F_2$) на отдельных участках некоторого опасного агрометеорологического явления, либо в территориальной изменчивости климатической повторяемости этого явления P_1 . Показано, что если агротехнические решения d , как и агрометеорологические условия F , носят альтернативный характер, и если при этом пространственное варьирование $P_1 \in [0,1]$ описывается бета-законом, то потенциальная эффективность от

дифференциации агротехнологий при повторяемости опасного явления имеет вид нормального распределения.

Выигрыш от дифференциации решений в случае пространственного распределения P_1 по бета-закону может существенно превышать соответствующую величину выигрыша при нормальном распределении P_1 .

Численные оценки показали, что параметры бета-функции закона распределения потенциального урожая являются важным фактором и существенно влияют на уровень климатообусловленных рисков; климатообусловленный сдвиг кривой распределения влево, в сторону более низких уровней продуктивности, повышает агроклиматический риск крупных неурожаев; учитывая среднюю эффективность агротехнологических решений на фактор продуктивности с учетом заданного закона распределения вероятностей, как правило, показатель $\lambda_{1,max}$ остается более климаточувствительным.

Принятие решений и вариации агрометеорологических опасных явлений на фактор продуктивности

Оценка аномальных последствий изменения климата сельскохозяйственных территорий, необходимые условия обеспечения стабильного функционирования потенциального выигрыша в области аграрии служат основой для разработки детально-дифференцированной стратегии, которая сказывается на интенсивности агрометеорологических рисков при вариации почвенно-климатических факторов. В основе лежат следующие критерии: агрометеорологические элементы варьируют от точки к точке во времени и в пространстве по заданному закону распределения вероятностей; последствия изменения климата зависят от статистических характеристик распределения возможного фактора продуктивности; основное значение придается не анализу оценок средней урожайности, а прогнозу чувствительности риска последствий хозяйственно-опасных агроклиматических явлений.

Последующий анализа выполняется по предложенной математической модели, когда варьирующие переменные от точки к точке изменяются внутри поля и создают неоднородность агроклиматических элементов. В рамках этой модели потенциальный урожай Y , отражающий агроклиматические ресурсы рассматриваемого сельскохозяйственного региона, интерпретируется как случайная величина с конкретными значениями y , средним значением \bar{Y} и известным распределением вероятностей, заданным функцией плотности $g(y)$ или интегральным законом $G(y)$, и определяется через геостатистическую интерполяцию переменной x , ориентированной на средние условия варьирующего фактора X .

Риск в земледелии, ЧДС и современный климат

Для решения большинства прикладных задач достаточно располагать не самим законом распределения, а некоторыми числовыми характеристиками, позволяющими судить о средних результатах хозяйственной деятельности на достаточно большом временном интервале. Особое значение при этом имеют характеристики рисков земледелия в конкретных почвенно-климатических условиях.

Многие авторы подтверждают, что глобальные климатические изменения сопровождаются практически повсеместным снижением устойчивости климата при одновременном росте повторяемости различных неблагоприятных и опасных гидрометеорологических явлений. Сохранение подобной тенденции в будущем, безусловно, окажет существенное влияние на все отрасли экономики. В первую очередь, это касается сельского хозяйства, где снижение устойчивости урожаев может привести к кардинальной перестройке существующих систем земледелия. Таким образом, происходящие изменения климата ведут к возрастанию хозяйственных рисков.

Оценка ожидаемых изменений риска неурожаев, обусловленных предстоящими изменениями климата, несомненно, важна с точки зрения принятия планирования частично дифференцированной стратегии (ЧДС), направленных на климатическую адаптацию земледелия.

Риск, оцениваемый по вероятности крупных неурожаев, отличается повышенной климатической чувствительностью. В результате, на фоне сравнительно небольших изменений среднего многолетнего урожая риски хозяйственно значимых снижений за критический уровень часто могут меняться в несколько раз, что и будет главным доводом в пользу принятия тех или иных ЧДС агротехнологических решений.

Задавая определенный риск неурожая P_0 в рамках рассматриваемой модели, тем самым одновременно устанавливаем также критически низкий порог $U_{кр}$, который равен $U_{кр} = \bar{U}_0 - t_0 \sigma_0$.

При неблагоприятных изменениях климата риск серьезных хозяйственных неудач часто может повышаться в несколько раз, тогда как средний урожай снижается лишь на проценты. Например, если $\delta \bar{U} = 0,8$, то $C_{v,0} = 15\%$ соответствует снижению среднего урожая на $\theta \bar{U} = 12\%$, неурожаи, случающиеся, в среднем, раз в 10 лет ($P_0 = 10\%$), станут приблизительно в три раза более частыми, а неурожаи, имеющие сегодня 5%-ый риск (вероятны лишь раз в 20 лет), будут повторяться каждые 5 лет. Именно это возрастание рисков – наиболее серьезный фактор происходящих климатических изменений.

Моделирование риска неурожаев при пространственно-временной изменчивости

Рассмотрим простую модель, согласно которой распределение урожаев как в современных, так и в будущих климатических условиях полагается нормальным. Понятно, что любые вероятностные характеристики при этом однозначно определяются двумя параметрами: средним многолетним урожаем \bar{U} и средним квадратическим отклонением урожаев (СКОУ), обозначим далее σ .

В данном случае формула для расчета коэффициента изменения риска приобретает вид:

$$\eta = N_0 \left\{ \frac{1}{2} + \Phi \left[\frac{\delta \bar{U} - t_0}{\mu} \right] \right\}.$$

где $N_0 = 1/P_0$ и имеет смысл интервала времени, на котором неурожаи, характеризующиеся при современном климате риском P_0 , наблюдаются в среднем один раз; $\delta\bar{U} = \Delta\bar{U}/\sigma_0$ - климатообусловленное изменение среднего многолетнего урожая, выраженное в долях СКОУ для современных условий; $\mu = \sigma_1/\sigma_0$ - отношение СКОУ урожаев при предполагаемом изменении климата к СКОУ, наблюдаемому в современных условиях; Φ – интеграл вероятностей (нормированная функция Лапласа); t_0 - корень уравнения

$$\Phi(t_0) = \frac{1}{2} - P_0.$$

Ограничение числа неурожаев в пространственно-временном континууме ($D \times T$) с учетом изменения климата

Переход от современного климата к прогнозируемому сопровождается не только изменением риска единичных неурожаев, но и изменением характеристик распределения числа неурожаев на заданном пространственно-временном интервале ($D \times T$). Для описания этого распределения в качестве первого приближения предлагаем использовать биномиальную модель:

$$p(N, n) = {}_N C_n P^n (1 - P)^{N-n},$$

где $p(N, n)$ - вероятность того, что за N – летний период наблюдений ($n \leq N$) случится n неурожайных лет, ${}_N C_n$ - число сочетаний из N элементов по n , P – риск единичного неурожая, который в рассматриваемом временном интервале принимается неизменным от года к году. Полагаем, что на относительно небольших временных интервалах климатические изменения не слишком существенны, потому оценки, полученные с помощью биномиальной модели, в качественном отношении достаточно реалистичны.

Легко показать, что в ситуации условного современного климата, которому соответствует зачерненная гистограмма (рис.3), с вероятностью 35% за десятилетие неурожаев не должно случаться, с 39%-й вероятностью может быть только один, вероятность же более одного неурожайного года составляет 26%. Таким образом, среднее число неурожаев за десятилетие – один. Эти цифры относятся к неурожаям, характеризующимся 10%-м ежегодным риском.

При неблагоприятном изменении климата и соответствующем снижении среднего урожая на величину $\theta\bar{U} = 10\%$ произойдет значительная деформация описанного распределения (незачерненная гистограмма). Расчетная вероятность десятилетий, с не более чем одним неурожайным годом, составит в этом случае только 20% вместо прежних 74, а вероятность десятилетий с двумя и более неурожайными годами возрастет, соответственно, с 26 до 80% при среднем числе неблагоприятных лет за десятилетие – 2,7.

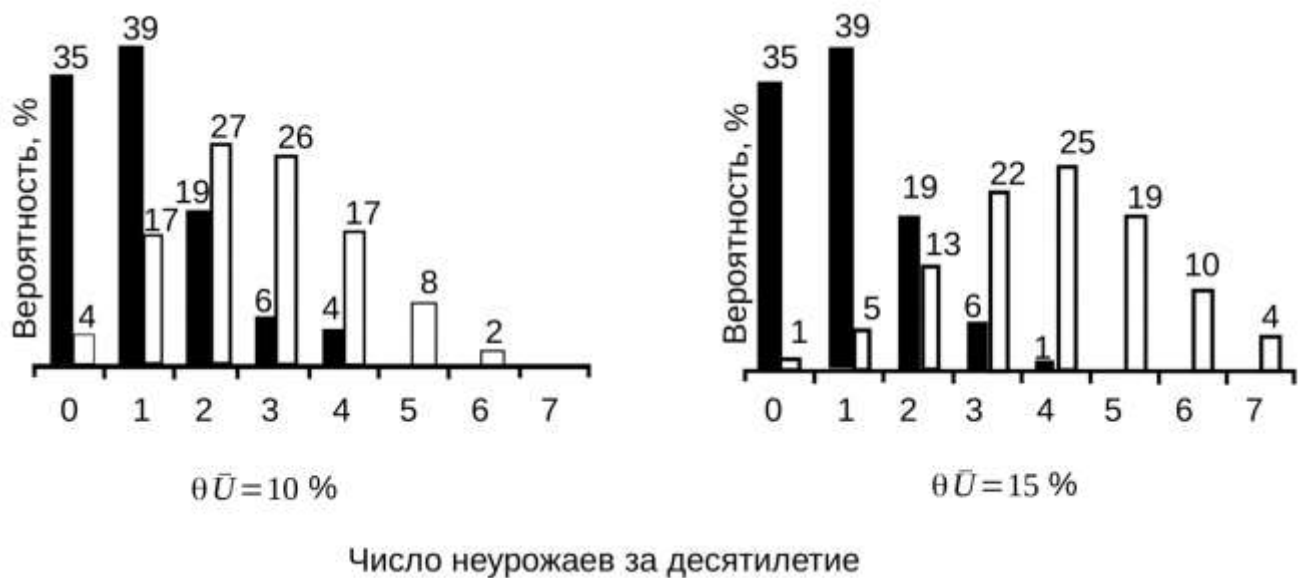


Рис. 3. Влияние изменений климата на распределение числа неурожаев

$$U < U_{кр} \quad (U_{кр} = \bar{U}_0 - 1,28\sigma_0) \text{ за 10-летний период:}$$

- – современные условия ($\theta\bar{U} = 0$); □ – то же распределение при климатообусловленном снижении среднего урожая на $\theta\bar{U}$, %

Отмеченные изменения будут, естественно, еще более выраженными при климатообусловленном снижении среднего урожая на 15%. В данном случае расчетная вероятность десятилетия с не более чем одним неурожайным составит уже только 5%, в то время как в 95% случаев будет наблюдаться два и более неурожаев при среднем их числе за десятилетие – 3,9.

Изменение среднего квадратического отклонения урожаев и геостатистическая адаптация агротехнологии

Современные климатические изменения выражаются не только в изменениях средних многолетних значений (норм) температур и осадков, но

сопровождается также повышением частоты различных экстремальных и опасных гидрометеорологических явлений, то есть снижается устойчивость климата. Естественно допустить, что дисперсия урожаев, а, следовательно, и риск неурожайных лет при этом также будут расти.

Традиционный анализ риска неурожая, обусловленных изменениями климата, предполагал, что среднеквадратическое отклонение σ_x урожаев при этом не меняется. На самом деле ситуация представляется более сложной (Якушев В.П. и др., 2010).

Графики (рис. 4) показывают, как возрастает риск неурожая по мере увеличения σ_x , происходящего на фоне фиксированного снижения среднего урожая $\theta\bar{U} = const = 0,5, 10$ и 15% . Увеличение σ_x эквивалентно увеличению показателя μ . Все расчеты выполнены при $C_{v,0} = 15\%$ в отношении неурожая, характеризующихся первоначальным риском $P_0 = 10\%$, то есть для $U_{кр} = \bar{U}_0 - 1,28\sigma_0$.

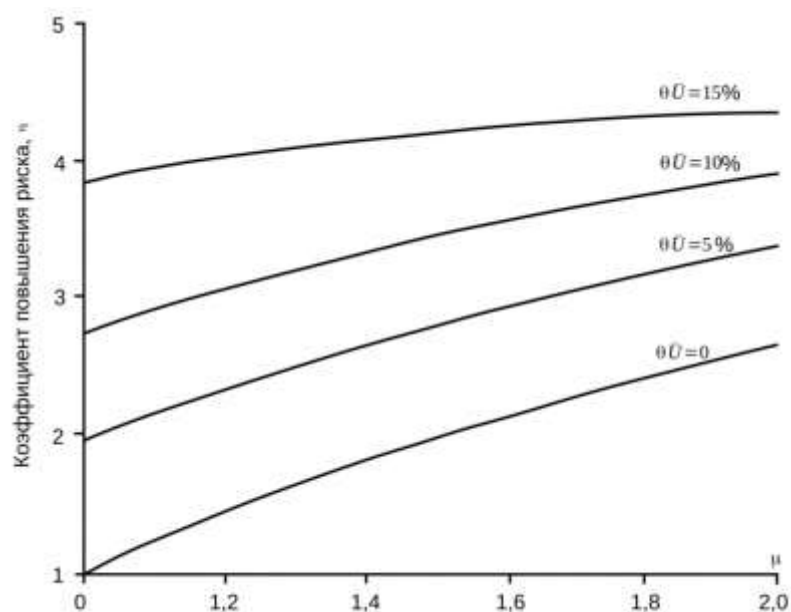


Рис. 4. Повышение риска при климатообусловленном возрастании σ_x урожаев (для $P_0 = 10\%$ и $C_{v,0} = 15\%$).

При прочих равных условиях, постепенное возрастание риска, обусловливаемое увеличением σ_x урожаев, оказывается тем более значительным, чем меньше климатообусловленное снижение среднего урожая $\theta\bar{U}$, на фоне которого происходят соответствующие изменения σ_x .

Как следствие этой закономерности, одно и то же увеличение σ_x повышает риск неурожая в максимальной степени при $\theta\bar{U} = 0$, то есть в случае, когда неблагоприятные изменения климата не влияют на средний урожай и лишь снижают его устойчивость. В этой гипотетической ситуации двукратное увеличение σ_x ведет к возрастанию риска рассматриваемых неурожаев в 2,7 раза. Аналогичное двукратное возрастание σ_x на фоне 15%-го снижения среднего урожая сказывается на риске неурожаев существенно слабее. В последнем случае коэффициент η увеличивается с 3,9 ($\mu = 1$) до 4,4 ($\mu = 2$), риск возрастает лишь в 1,3 раза.

В противоположность рассмотренной ситуации, в которой речь шла о климатообусловленном возрастании σ_x урожаев и, соответственно, о повышении риска неурожаев, представляло бы интерес выяснить, в какой степени уменьшение σ_x урожаев, могло бы способствовать снижению риска неурожаев. Уменьшая σ_x и, тем самым, «сужая» кривую распределения урожаев, можно в определенной степени компенсировать неблагоприятный эффект возрастания риска, возникающий на фоне снижения среднесуточного урожая.

Глава 3. Численное моделирование эффективности дифференциации агротехнологий

Алгоритм численного моделирования

Дифференциация решений в соответствии с конкретными условиями в каждой точке не только практически неосуществима, но, очевидно, и экономически нецелесообразна, так как с увеличением детальности дифференциации растут затраты на реализацию соответствующих технологий. Поэтому сопоставление детально дифференцированной и недифференцированной стратегий принципиально важно с точки зрения оценки теоретически достижимого эффекта дифференциации. Однако если иметь в виду практическую сторону дела, то необходимо более подробно исследовать частично дифференцированные стратегии (ЧДС) в системе ТЗ.

Согласно нашей концепции, всегда существует некоторый оптимальный уровень пространственной дифференциации решений. Для его нахождения необходимо, в первую очередь, выяснить, в какой мере та или иная ЧДС компенсирует отрицательное влияние неоднородности территории и как эта компенсация зависит от детальности дифференциации.

Показатель $\nu^{(N)} = \Delta U_3^{(N)} / \Delta U_1$ может служить критерием эффективности ЧДС, ориентированной на средние значения X по выделенным грациям.

Рассматривая различные варианты районирования территории, например (рис. 5), разделяя ее вначале на зоны с $x \leq \bar{x}$ и $x > \bar{x}$, далее – на зоны с $x < \bar{x} - \Delta$, $x \in \bar{x} \pm \Delta$ и $x > \bar{x} + \Delta$ (где Δ - задано), переходя затем к четырех-, пяти- и т.д. – к N –уровневой схеме классификации и рассчитывая каждый раз величины $\Delta U_3^{(N)}$, $\Delta U_4^{(N)}$ и $\Delta U_5^{(N)}$, можно получить ясное представление о том, как с ростом детальности пространственной дифференциации решений компенсируются потери, вызываемые, к примеру, агрометеорологической неоднородностью территории.

Следует особо отметить, что при одном и том же N , т.е. при одинаковой детальности пространственно-временной дифференциации, почвенно-климатических условий с/х земель эффективность соответствующей ЧДС будет зависеть от того, по каким грациям X произведено районирование территории. Например, если речь идет о симметричной трехуровневой схеме $[x \leq \bar{x} - \Delta, x \in \bar{x} \pm \Delta, x \geq \bar{x} + \Delta]$, то здесь принципиальное значение имеет выбор величины Δ , определяющей ширину центральной грации. При некотором Δ эффект от дифференциации решений будет максимальным и соответствующее разделение территории может интерпретироваться как задача экономически оптимального районирования.

Для анализа ЧДС должны привлекаться методы, предусматривающие проведение численных экспериментов над картированной неоднородностью. Одна из таких методик была реализована Ю. Г. Захаряном, А. А. Комаровым.

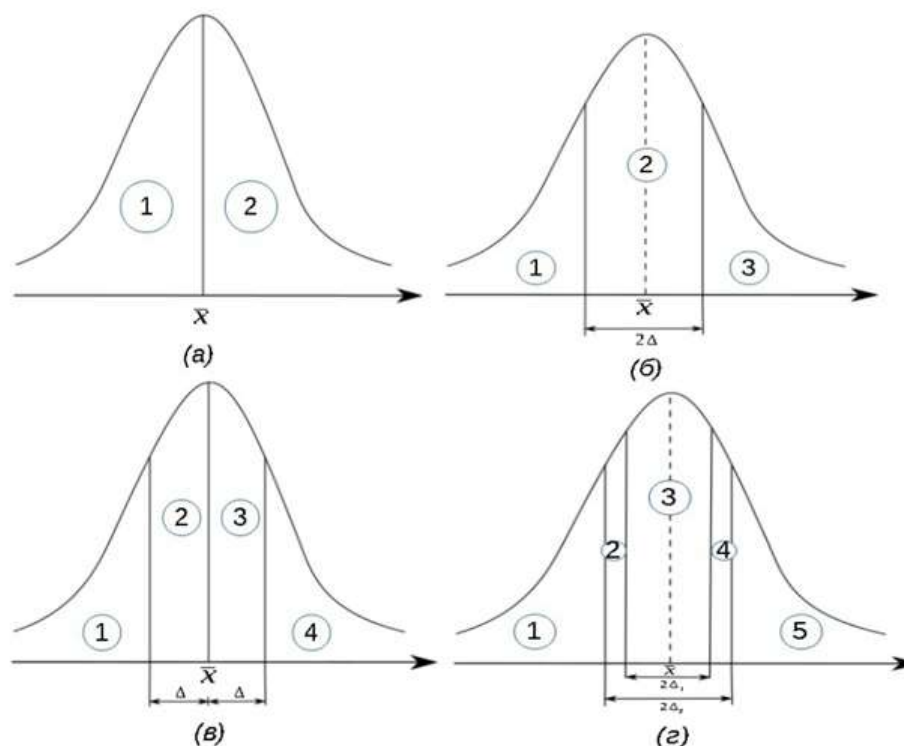


Рис. 5. Варианты деления области возможных значений варьирующего агрометеорологического фактора X на градации: а.- альтернативная схема; б, в, г – симметричная трех-, четырех- и пятиуровневая схемы дискретизации.

Моделирование дифференциации адаптивной агротехнологии при детальном обследовании в большом масштабе

Для подтверждения возможности практического использования описанного подхода проведено сопоставление результатов ряда численных экспериментов, выполненных Ю. Г. Захаряном и А.А. Комаровым (2016) на конкретном материале, с оценками, вытекающими из разработанной теории. Итоги такого сопоставления иллюстрирует таблица 1.

Таблица 1. Теоретическая и фактическая (экспериментальная) эффективность дифференциации решений по двум градациям

Район, пространственно варьирующий почвенно-климатический фактор	θ	$\nu^{(2)}$		$\delta, \%$
		теор.	фактич.	
Армения; сумма температур выше 10°C	0,06	0,789	0,838	7,0
Лен. область; сумма температур выше 10°C	0,23	0,768	0,835	12,1
Лен. область; годовая сумма осадков	0,23	0,658	0,732	1,7
Территория ЗАО «Гатчинское» Лен.области; P_2O_5 в почве	0,05	0,81	0,92	11,0

В качестве объектов исследования рассматривались поля пространственного распределения: средней многолетней суммы температур выше 10°C – для территорий Армении и Ленинградской области; средней многолетней суммы осадков за год – для Ленинградской области; запасов фосфора (P_2O_5) в почве – для территории ЗАО «Гатчинское» Ленинградской области. Теоретические оценки выполнялись для тех же, что и в численных экспериментах, значений γ ($1,3 \cdot 10^{-3} \text{град}^{-1}$ - для температуры; $3,5 \cdot 10^{-3} \text{мм}^{-1}$ - для осадков; $2,1 \cdot 10^{-3} \text{ мг/100 г}$ почвы – для фосфора) и характерного для каждого фактора значения σ_x (соответственно: 819°C и 100°C – для сумм температур; $30,3 \text{ мм}$ – для осадков; $20,1 \text{ мг/100 г}$ почвы – для фосфора). Как видно из табл. 3.1, во всех рассмотренных случаях совпадение теоретических оценок показателя $\nu^{(2)}$ с его фактическими значениями вполне удовлетворительное расхождение не превышает 10-12%.

Моделирование дифференциации при типовом агрохимическом обследовании

Применительно к задаче разбиения диапазона значений пространственно варьирующего фактора X на три градации исследовалась симметричная схема

$$\left. \begin{aligned} \Omega^{(1)}: x \leq \bar{x} - 0,6\sigma_x, \\ \Omega^{(2)}: x \in \bar{x} \pm 0,6\sigma_x, \\ \Omega^{(3)}: x > \bar{x} + 0,6\sigma_x \end{aligned} \right\}$$

Эффективность такой трехфазовой ЧДС существенно зависит от значения полуширины центральной градации Δ и достигает максимума при $\Delta = 0,6\sigma_x$. Это справедливо как в отношении ЧДС, ориентированной на средние условия по отдельным градациям X (сплошные кривые), так и для оптимальной ЧДС (пунктиры).

Сравнение полученных теоретических результатов с оценками, следующими из численных экспериментов, показывает их хорошее совпадение (рис. 6 б), причем основной причиной наблюдаемых небольших различий является, по-видимому, несовпадение теоретического и фактического распределений X .

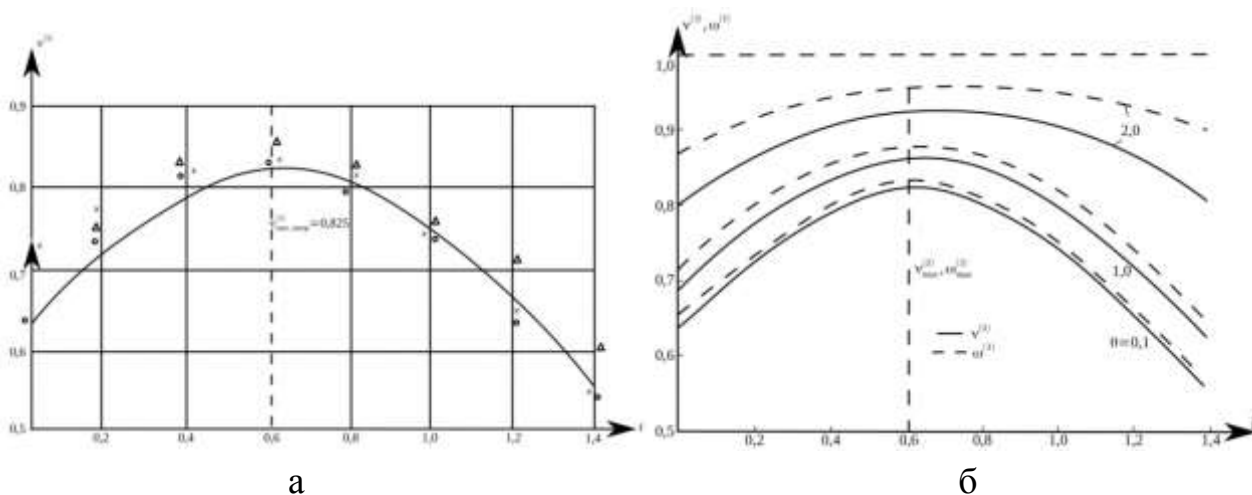


Рис. 6. Пространственно дифференцированное планирование по трем градациям варьирующего фактора:

- а. - теоретические кривые $v^{(3)}(\hat{t})$ и $\omega^{(3)}(\hat{t})$, где $\hat{t} = \Delta/\sigma_x$;
 б. - сравнение теоретических оценок $v^{(3)}(\hat{t})$ с результатами численных экспериментов (Лен. область, ЗАО "Гатчинское"), где Δ - сумма температур выше 10°C ; \circ – годовая сумма осадков; \times - содержание P_2O_5 в почве.

Моделирование при обобщении факторов продуктивности в масштабе административного района

С целью более детального выяснения данного вопроса дополнительно исследовалась ситуация, когда распределение X является равномерным. Как следует из проведенного анализа, при одинаковых σ_x эффективность дифференциации решений при равномерном распределении X оказывается несколько выше, чем при нормальном. Максимальные различия характерны для малых θ . В частности, когда $0 < \theta < 1$, показатель $v^{(2)}$ лежит в пределах 0,64-0,68 для нормального распределения и 0,75-0,78 для равномерного; для показателя $v_{max}^{(3)}$ пределы соответственно составляют 0,81-0,84 для нормального и 0,89-0,90 для равномерного распределений (таб. 2 и таб. 3). Указанные различия четко выявляются и в численных экспериментах, выполнявшихся на ЭВМ для территории Армении по осадкам (нормальное распределение) и по суммам температур выше 10°C (распределение близко к равномерному).

Таблица 2.

Сравнительная эффективность альтернативной ЧДС для нормального ($v_{\text{н}}^{(2)}$) и равномерного ($v_{\text{р}}^{(2)}$) пространственно варьирующего агрометеорологического фактора.

θ	0	0,5	1,0
$v_{\text{н}}^{(2)}$	0,64	0,65	0,68
$v_{\text{р}}^{(2)}$	0,75	0,76	0,78

Таблица 3.

Максимальная эффективность трехфазовых ЧДС при нормальном ($v_{\text{max,н}}^{(3)}$, $\omega_{\text{max,н}}^{(3)}$) и равномерном ($v_{\text{max,р}}^{(3)}$, $\omega_{\text{max,р}}^{(3)}$) пространственно варьирующего агрометеорологического фактора.

θ	0	0,5	1,0
$v_{\text{max,н}}^{(3)}$	0,81	0,82	0,84
$v_{\text{max,р}}^{(3)}$	0,89	0,89	0,90
$\omega_{\text{max,н}}^{(3)}$	0,81	0,83	0,86
$\omega_{\text{max,р}}^{(3)}$	0,89	0,89	0,91

Концепция использования обобщенных анализов в практике растениеводства на тестовых полигонах Ленинградской области

Для анализа частично дифференцированного планирования предусматривалось проведение численных экспериментов над конкретной картированной неоднородностью.

Рассмотрены результаты мониторинга для трех сроков наблюдения за дифференциацией вегетационного индекса NDVI по элементарным участкам полигонов ЗАО «Мельниково», ЗАО «Осьминское», ЗАО «Культура-Агро Ленинградской области (Захарян, Комаров, 2016).

В целом по первому полигону для трех сроков наблюдения отмечена дифференциация вегетационного индекса от 0,55 до 0,85. (рис. 7)

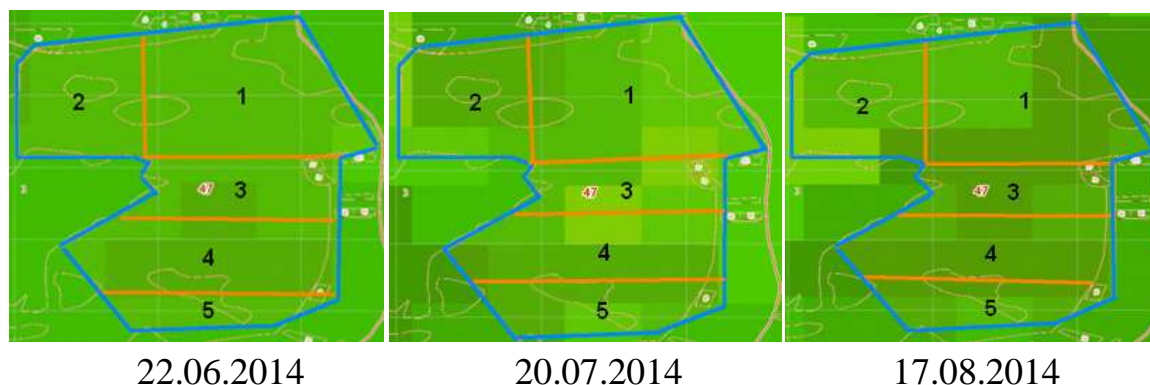


Рис. 7. Изменение состояния растений за вегетационный период на полигоне ЗАО «Мельниково»

Второй срок наблюдений (20.07.2014) показал, что участок №3 снижал показатель вегетационного индекса по сравнению с более ранним периодом (июнь). Последнее указывает на уменьшение накопления хлорофилла в травах и снижение кормовой ценности травостоя. На участке №4 кормовая ценность травостоя сократилась на 10-20%. На участке №2 отмечено увеличение вегетационного индекса и накопление хлорофилла, данный участок находится в состоянии оптимальном для уборки. Критерий неоднородности развития растений по вегетационному индексу согласовался с данными по урожайности культуры.

Данные учета урожайности на полигоне ЗАО «Мельниково» приведены в таблице 4.

Таблица 4. Урожайность сельскохозяйственных культур на тестовом полигоне ЗАО «Мельниково» в 2014 году

Тестовый полигон №1	Сельскохозяйственная культура	Урожайность по элементарным участкам, ц/га				Средняя урожайность по полигону
		1	2	3	4	
ЗАО «Мельниково»	Многолетние травы	164	158	172	182	169

Характер динамики развития растений на полигоне ЗАО «Осьминское» представлен на рис. 8.

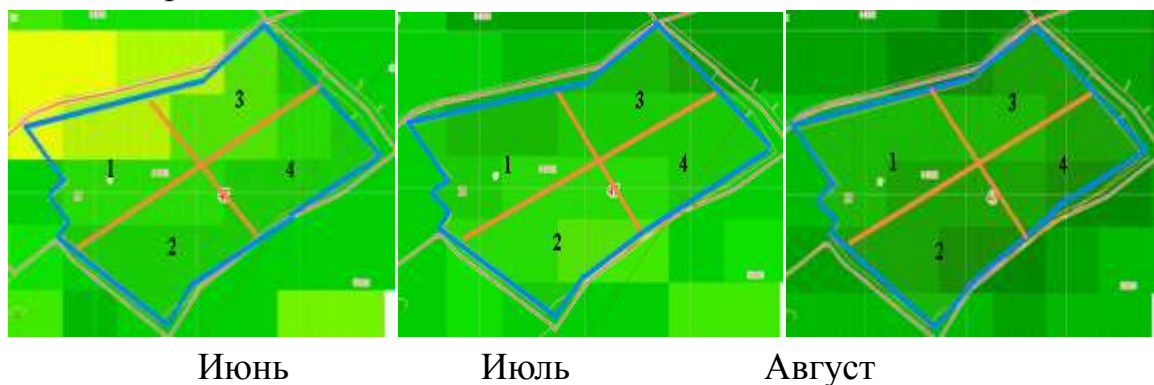


Рис. 8. Изменение состояния растений за вегетационный период на полигоне ЗАО «Осьминское»

На полигоне отмечена большая неравномерность роста и развития растений по элементарным участкам. Данные учета урожайности сельскохозяйственных культур на этом полигоне в 2014 году приведены в таблице 5.

Таблица 5. Урожайность сельскохозяйственных культур на тестовом полигоне ЗАО «Осьминское» в 2014 году

№ п.п	Тестовый полигон	Сельскохозяйственная культура	Урожайность по элементарным участкам, ц/га				Средняя урожайность по полигону
			1	2	3	4	
6	«Осьминское»	Многолетние травы	196	206	203	209	206

На тестовом полигоне ЗАО «КУЛЬТУРА-АГРО» выращивались многолетние травы; травостой представлен преимущественно злаковыми травами. В целом по полигону наблюдалось равномерное развитие растительного покрова (рис. 9). При весенней диагностике отмечен вегетационный индекс 0,55-0,7, который характеризует интенсификацию весенних ростовых процессов. Несколько отличается вегетационный индекс на элементарном участке №1 и 3. На этих участках вегетационный индекс более высокий - 0,75-0,85 и характеризует большее накопление хлорофилла, биомассы и интенсивность развития трав.

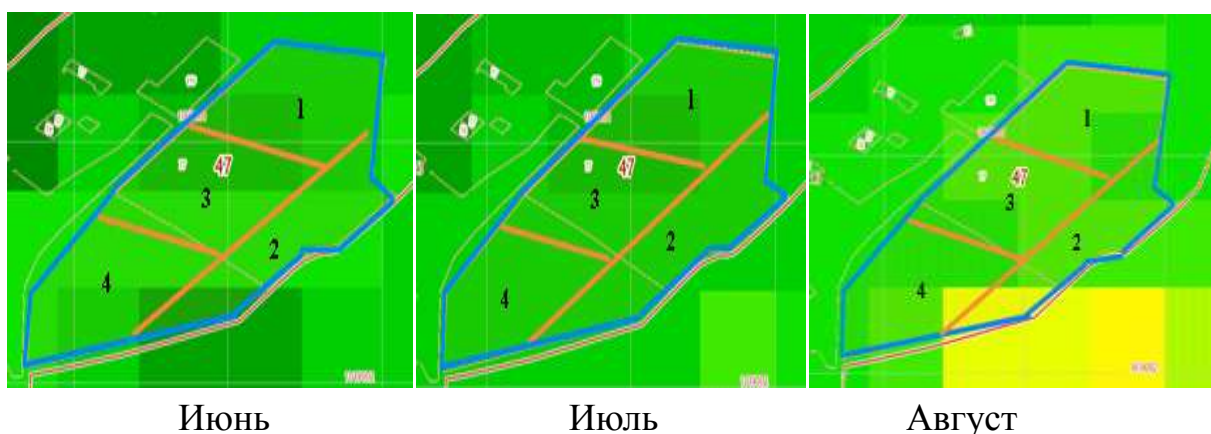


Рис. 9. Изменение состояния растений за вегетационный период на полигоне ЗАО «КУЛЬТУРА-АГРО»

Данные учета урожайности сельскохозяйственных культур на этом полигоне в 2014 году представлены в табл. 6.

Таблица 6. Урожайность сельскохозяйственных культур на тестовом полигоне ЗАО «КУЛЬТУРА-АГРО» в 2014 году

№ п.п.	Тестовый полигон	Сельскохозяйственная культура	Урожайность по элементарным участкам, ц/га				Средняя урожайность по полигону
			1	2	3	4	
10	ЗАО «КУЛЬТУРА-АГРО»	Многолетние травы 4 года	180	178	174	176	177

Совместное рассмотрение и анализ рисунков и таблиц 4, 5 и 6 показал целесообразность выделения выбранного числа квазиоднородных контуров на исследуемых полях по показателю вегетационного индекса.

Если учесть дифференциацию NDVI показателя на оцениваемых контурах, сопряженную с дифференциацией по урожайности на тех же контурах и провести оценки пространственного варьирования по выше приведенным формулам, то возможно показать, что предпринятая пространственная дифференциация уборки урожая и последующих подкормок по пространственному варьированию критерия NDVI на фоне пространственной неоднородности агрометеорологических факторов продуктивности удовлетворительно подтвердили работоспособность рассмотренных выше моделей.

В процессе выполнения сельскохозяйственных работ было установлено, что характер изменения вегетационного индекса по неоднородности анализируемого пространства полигона позволял определять (прогнозировать) оптимальный срок уборки по каждому из выделенных элементарных участков. Наиболее высокий вегетационный индекс NDVI-показатель соответствовал наибольшей интенсивности развития растений и, соответственно, предопределял первоочередность уборки.

По результатам проведенных полевых исследований показано, что на основании дифференциации неоднородности полей и посевов по критериям: почвенного, агроклиматического и NDVI - индекса развития растений и урожайности в вегетационный период возможно проводить оценку пространственно-временной неоднородности состояния территорий и посевов с использованием алгоритмов геостатистики и геостатистического анализа.

Принципы выделения сельскохозяйственных территорий и контуров для дифференцированных оптимальных стратегий

Заключительный раздел главы 3 посвящен обобщению развиваемого подхода путем перехода от операций с функцией выигрыша $U(x, d) = U[x, d_0(a)]$ к операциям с некоторой связанной с ней функцией $r(x, a) = U[x, d_0(x)] - U[x, d_0(a)]$, показывающей, какие потери возникают при несовпадении фактического значения $X = x$ со значением $X = a$, в расчете на которое осуществлялось хозяйственное планирование. Целесообразность такого перехода связана с тем, что различным, иногда весьма сложным функциям выигрыша $U(x, d)$ часто отвечает одна и та же, причем более простая функция потерь $r(x, a)$. Например, выяснено, что при малых θ вместо экспоненциальной модели может анализироваться простейшая квадратичная функция $r(x, a) = \frac{C_d \gamma}{2} (x - a)^2$. На рис. 10а показано, как в этом случае с ростом N повышается эффективность оптимальной N -фазовой ЧДС при нормальном и равномерном распределениях пространственно варьирующего фактора. Рис. 10б подтверждает близость этих теоретических результатов с эмпирическими оценками, полученным для экспоненциальной модели, где θ принималось равным 0,10-0,13.

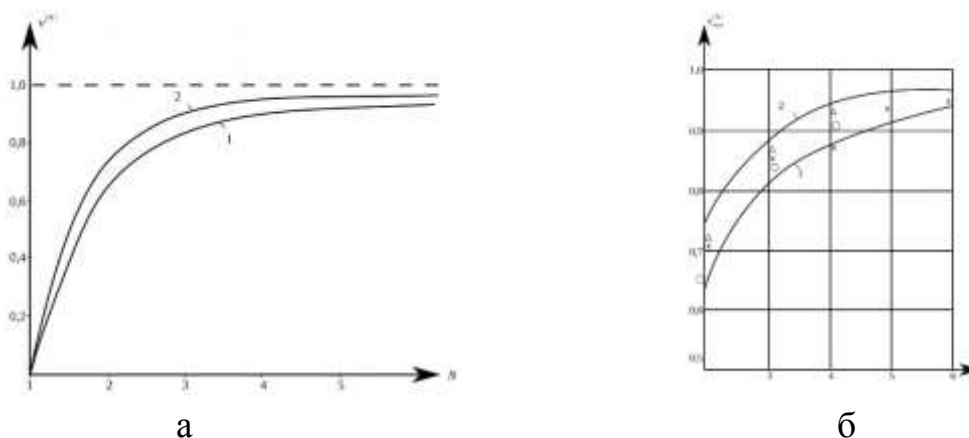


Рис. 10. Потенциальная эффективность оптимальной N -фазовой ЧДС при квадратичной функции потерь $r(x, a) = \frac{c_d \gamma}{2} (x - a)^2$:

а. - теоретические кривые $v_{max}^{(N)} = v_{max}(N)$ для нормального (1) и равномерного (2) законов распределения пространственно варьирующего параметра;

б. - сравнение теоретических результатов с численными экспериментами (Лен. область, ЗАО "Гатчинское"), Δ - сумма температур выше 10°C ; \circ - годовая сумма осадков; \times - содержание P_2O_5 в почве.

Как следует из графиков, с ростом N зависимость $v_{max}(N)$ быстро достигает насыщения и для практических целей в большинстве случаев достаточно ограничиться дифференцированным планированием по 3-4 (не более) градациям варьирующей величины. Влияние остаточной неоднородности при этом оказывается мало существенным.

Глава 4. Влияние пространственной variability на интенсивность агротехнологических воздействий

Глава содержит изложение общей концепции необходимости учета при принятии решений не только природной, но и антропогенной неоднородности сельскохозяйственной территории, возникающей в результате реализации агротехнологии неидеально работающими машинами и агрегатами (неравномерность внесения удобрений, колебания объемов подаваемой в различные точки поля поливной воды; варьирование глубины обработки почвы и т. д.).

Антропогенная неоднородность сельскохозяйственных территорий

При рассмотрении вопросов пространственной дифференциации решений на неоднородной сельскохозяйственной территории до сих пор принималось во внимание только естественное, т.е. природообусловленное, варьирование влияющих на урожай агрометеорологических факторов. При этом любая дифференциация технологии теоретически оказывалась экономически выгодной и тем в большей степени, чем детальнее учитывается пестрота территории. Однако при переходе к реальным задачам, касающимся пространственной дифференциации агротехники от поля к полю или внутри поля вопрос становится существенно более сложным. Здесь приходится учитывать некоторые дополнительные экономические факторы. С повышением детальности дифференцированного планирования технология усложняется и одновременно удорожается. Растут также трудности качественного исполнения технологических операций, например, удлиняются или смещаются сроки проведения полевых работ, что в конечном итоге ведет к снижению урожая. По этим причинам дифференцированное планирование всегда должно иметь некоторый разумный уровень, превышение которого оказывается уже экономически неоправданным.

Другое обстоятельство, состоит в ограниченных возможностях точного регулирования технологических режимов, их неуправляемых колебаниях от точки к точке. Неодинаковая интенсивность технологического воздействия, возникающая из-за неидеальности работы сельскохозяйственной техники, является источником дополнительной пестроты территории.

При этом важную роль играют особенности неуправляемых вариаций влияющего фактора. В частности, если отклонения δ от заданного технологического режима в отдельных точках носят случайный характер с дисперсией σ_δ^2 , то минимальные дополнительные потери на единицу площади в случае экспоненциальной модели будут равны

$$\Delta U = \frac{c_d \varepsilon^2}{\gamma^2},$$

где $\varepsilon = \gamma\sigma_\delta$.

Если этот фактор не учитывается, то дополнительные потери могут быть значительно большими. При наличии заметной антропогенной составляющей неоднородности дифференцированное планирование может вообще не давать положительного практического эффекта.

Эффективность адаптации дифференцированного планирования при наличии антропогенной неоднородности

В процессе соответствующего анализа будем исходить из предположения об экспоненциальном характере функции выигрыша. Поскольку технологическая погрешность является случайной, целесообразно провести по ней статистическое осреднение. При ориентации на конкретное значение x оптимальное хозяйственное решение $d_0(x)$ естественно выбрать согласно условию максимума $\overline{U(x, \tilde{d})}$. При правильном учете антропогенной неоднородности дифференцированное планирование будет давать по сравнению с НДС тот же положительный эффект, что и при её отсутствии антропогенной неоднородности.

Когда недифференцированное планирование ведется в расчете на средние условия и антропогенная составляющая неоднородности при этом учитывается, средний на единицу площади выигрыш по сравнению с отсутствием технологических ошибок снижается на ту же величину, что и для НДС. Если недифференцированное планирование осуществляется без учета погрешностей реализации агротехнологии, игнорирование антропогенной неоднородности при недифференцированном планировании может иметь более существенные отрицательные последствия, чем при дифференцировании решений.

Глава 5. Формирование информационной базы для оценок эффективности дифференциации агротехнологий

Для организация базы данных необходимо выбрать соответствующую структуру (БД), которая должна содержать: идентификатор – id, информацию о положении объекта (географическая) – pos; тематическую информация (атрибутивная) – att, таким образом, объекты описываются кортежами

$O = \{id, pos, att\}$. При формировании БД для объектов $O = \{id, pos, att\}$ в программном обеспечении (ПО) используется три подхода к организации связи $pos \leftrightarrow att$: геореляционный, интегрированный, объектный.

В соответствующем разделе диссертации представлены результаты по комплексированию БД с агрофизическими, математическими моделями и алгоритмами с использованием теории нечетких множеств. Выделяемые при комплексировании участки поля различаются свойствами почв, уровнем грунтовых вод, видами культур и системами выращивания растений. В результате были получены тематические карты, содержащие информацию для планирования частично дифференцированной стратегии (ЧДС) с учетом варьирующих агрометеорологических факторов. В частности, расчетным путем была получена информация о влажности почвы об уровне грунтовых вод и о нормах поливов. Подобный подход был применен для получения информации о параметрах водного режима почв НПУиК «Концерн Детскосельский». Выделенные контура отличались гидрофизическими свойствами почв, начальным уровнем грунтовых вод, видами сельскохозяйственных культур и системами культивирования растений. В результате были получены соответствующие тематические карты, необходимые при планировании частично дифференцированной стратегии (ЧДС) поливов.

Комплексирование БД и моделей, описывающих процессы в окружающей среде, позволяет разрабатывать новый тип интегрированных информационных систем, которые, с одной стороны, включают методы обработки и анализа данных, с другой – методы работы с пространственно-временной информацией.

Для решения технологических задачи, например, выбора сроков сева зерновых культур необходимо знать степень физической зрелости почвы, т.е. температуры и влажности корнеобитаемого слоя. С этой целью рассчитывается температура почвы каждого из контуров по модели теплопереноса. Аналогично получены карты дифференциации влажности почв в том же слое по каждому из контуров. Результаты таких вычислений, как показано в диссертации, могут быть согласованы, к примеру, с данными космического зондирования.

ВЫВОДЫ

Итогом выполненных исследований являются разработанные методические основы и алгоритмы принятия эффективных агротехнологических решений на неоднородных по почвенно-климатическим условиям сельскохозяйственных территориях.

1. Разработана классификация различных вариантов планирования агротехнических мероприятий на неоднородных по почвенно-климатическим условиям сельскохозяйственных территориях. В основе предложенной схемы лежит учет таких признаков, как уровень пространственной детализации принимаемых решений и объем исходной статистической информации, необходимой для реализации выбранного варианта планирования. При этом выделяются недифференцированные (НДС), детально дифференцированные (ДДС) и частично дифференцированные (ЧДС) стратегии.

2. Введено представление об оптимальной недифференцированной стратегии. Показано, что в ряде случаев существенный экономический выигрыш может быть получен за счет перехода от планирования хозяйственных мероприятий на средние условия к агротехническим решениям, ориентированным на некоторые условия, отличные от средних, и выбираемые с учетом пространственной статистики варьирующего агрометеорологического фактора.

3. Показано, что разрабатываемый подход может быть использован для расчета потерь урожая, вызываемых пространственным варьированием лимитирующего агрометеорологического фактора. При достаточно общих условиях, снижение урожая вследствие неоднородности территории оказывается пропорционально квадрату коэффициента вариации пространственно варьирующей величины.

4. Показано, что выигрыш, который получается при переходе от ориентации на средние условия к детально дифференцированной стратегии,

т. е. величина ΔU_1 , оказывается тем больше, чем больше параметр η в системе точного земледелия.

5. Показано, что поиск эффективных путей уменьшения среднеквадратического отклонения с целью повышения устойчивости урожаев следует рассматривать как одно из перспективных направлений адаптации земледелия к меняющемуся климату.

6. В рамках методологии, используемой геостатистикой, показано, что фактическая производительность зависит не только от климата, но и от стратегии применяемых агротехнологических решений и, исходя из этого, оценить перспективность пространственно-временной дифференциации почвенно-климатических условий в агропромышленном комплексе.

7. Численные оценки и рассмотренные геостатистические модели показывают, что бета-функции закона распределения потенциального урожая являются важным фактором и существенно влияют на уровень климатообусловленных рисков.

8. Показано, что при уменьшении среднего квадратического отклонения и сужении кривой распределения урожаев, можно в определенной степени компенсировать неблагоприятный эффект при резкой изменчивости климатообусловленных факторов, возникающий на фоне снижения многолетнего урожая.

9. На основании критериев неоднородности по почвенным, агроклиматическим, NDVI-индексу развития растений и урожайности на оцениваемых полигонах произведена оценка состояния территорий с использованием алгоритма геостатистики.

10. Сформулирована и решена задача оптимального районирования сельскохозяйственных территорий. Для ряда важных практических ситуаций получены соотношения, позволяющие проводить такую оптимизацию. В частности, показано, что при районировании территории по трем градациям варьирующего агрометеорологического фактора ширину центральной градации целесообразно принять равной $1,26\sigma_x$, где σ_x - среднее квадратическое

отклонение варьирующей переменной X , причем этот результат слабо зависит от вида закона распределения X .

11. Обоснованы рациональные (часто оптимальные) варианты районирования и пространственно-временной дифференциации хозяйственных решений с учетом статистики варьирующих агрометеорологических факторов.

12. Разработаны принципы построения и оценки эффективности адаптации частично дифференцированных стратегий. Выяснено, что в большинстве случаев отсутствует необходимость производить дифференциацию агротехнологических решений по более чем трем-четырем градациям варьирующего агрометеорологического фактора. При такой детальности районирования основная доля потерь, вызываемых почвенно-климатической неоднородностью территории, оказывается скомпенсированной.

13. Установлено, что при альтернативной дифференциации решений по градациям «ниже среднего – выше среднего» в случае нормально распределенного варьирующего фактора устраняется более 60% потерь, вызываемых неоднородностью территории, а при оптимальной дифференциации по трем градациям этот эффект составляет уже более 80%.

14. Дана общая формулировка проблемы учета антропогенной неоднородности территории, которая неизбежно создается из-за погрешностей реализации расчетных технологических воздействий (неравномерность внесения удобрений, колебания глубины обработки почвы, варьирование поливной нормы и т.д.). Показано, что этот фактор снижает эффективность пространственной дифференциации агротехнологии и в ряде случаев может сделать ее полностью нецелесообразной.

15. Установлено, что неуправляемые колебания (антропогенная неоднородность) расчетного технологического режима от точки к точке оказывают серьезное влияние на эффективность проводимых хозяйственных мероприятий.

16. Следует отметить, что применение геоинформационных систем в реализации технологии ТЗ вне зависимости от конкретного вида выбранного

показателя фактора продуктивности во всех случаях он будет являться определяющей величиной, для нахождения которой могут использоваться различные математические модели для расчета эффективности технологических воздействий.

17. Сравнение полученных теоретических результатов с численными экспериментами на ЭВМ подтверждает возможность использования разработанных методик и алгоритмов при планировании хозяйственной деятельности на неоднородных по почвенно-климатическим характеристикам сельскохозяйственных территориях.

18. Усовершенствована и апробирована в полевых условиях методика выделения однородных технологических зон (по грациям) на сельскохозяйственном поле по результатам его почвенно-климатического обследования в системе ТЗ при использовании любой структуры БД.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ

1. **Захарян Ю. Г., Усков А. О.** Технологическая дифференциация и выбор планируемого урожая по фактической продуктивности в системах точного земледелия // Плодородие, 2009, № 2. С. 26–28.

2. **Захарян Ю. Г.** Геостатистический анализ неоднородностей агрометеорологических факторов продуктивности полей в системе точного земледелия // Информация и космос. Научно-технический журнал. 2014. № 4. С. 55–58.

3. **Захарян Ю. Г.** Разработка теоретических основ геостатистической оценки агроклиматических рисков по фактору продуктивности // Известия Санкт-Петербургского Государственного Аграрного Университета, 2015, № 38. С. 304–308.

4. **Захарян Ю. Г.** Количественные модели и методы оценки технологических воздействий // Известия Санкт-Петербургского Государственного Аграрного Университета 2016. № 43. С. 321–327.

5. **Захарян Ю. Г.** Моделирование и оценка пространственных колебаний интенсивности технологических воздействий на урожайность // Агрофизика. 2016. № 3. С. 42–50.

6. **Захарян Ю. Г.** Анализ влияния пространственной вариации агрометеорологических опасных явлений на фактор продуктивности // Информация и космос. Научно-технический журнал. 2016. № 3. С. 97–101.

7. **Захарян Ю. Г.** Экономическая эффективность учета пространственной дифференциации решений на агрометеорологических неоднородных территориях // Известия Санкт-Петербургского Государственного Аграрного Университета, 2016, № 44. С. 222-230.

8. **Захарян Ю. Г.** Численное моделирование пространственной вариации на фактор продуктивности и эффективность агротехнологии в системе точного земледелия // Известия Санкт-Петербургского Государственного Аграрного Университета, 2016, № 45. С. 307-310.

9. **Захарян Ю. Г.** Вероятностная модель оценки эффективности дифференциации агрометеорологических воздействий // Информация и космос. Научно-технический журнал. 2016. № 4. С. 138–143.

10. **Захарян Ю. Г.,** Комаров А. А., Кирсанов А. Д. Перспективы использования геостатистических анализов в практике растениеводства // Информация и космос. Научно-технический журнал. 2016. № 1. С. 92–99.

11. **Захарян Ю. Г.** Влияние пространственной вариабельности на продуктивность агроэкосистем и эффективность агротехнических решений // Агрофизика. 2017. № 2. С. 54-58.

12. **Захарян Ю. Г.** Применение перспективных направлений пространственно-временной геостатистики в агропромышленном комплексе // Информация и космос. 2017. № 2. С. 129–135.

13. **Захарян Ю. Г.** Концепция использования геоинформационных систем в реализации дифференцированного планирования агротехнологии // Известия Санкт-Петербургского Государственного Аграрного Университета. 2017. № 46. С. 273-280.

14. Комаров А. А., **Захарян Ю. Г.,** Кирсанов А. Д. Анализ пространственных распределений урожайности для обоснования дифференциации агротехнологии // Известия Санкт-Петербургского Государственного Аграрного Университета, 2017. № 2 (47). С. 48-57.

Статьи в журналах, сборниках трудов, материалах конференций

15. Архипов М. В., Тюкалов Ю. А., Данилов Т. А., Прияткин Н. С., **Захарян Ю. Г.** Совершенствования контроля качества партий зерна в «умном» сельском хозяйстве обеспечения конкурентноспособности на мировом зерновом рынке. Устойчивое развитие, рациональное природопользование. Технологии здоровья. XI Международный Яснополянский форум. Тула, изд-во «Инновационные технологии», 2017. С. 42–45.

16. **Захарян Ю. Г.** Об учете пространственной изменчивости характеристик с/х поля // Научно-технический бюллетень по агрономической физике / АФИ 1983, № 54, С. 39-42.

17. **Захарян Ю. Г.** О количественной оценке влияния пространственной неоднородности сельскохозяйственного поля на урожай // Известия с/х наук, Ереван, 1984, выпуск 12. С. 81-85.

18. **Захарян Ю. Г.** Об учете почвенно-климатической неоднородности территории при планировании агротехнических мероприятий // Сборник научных трудов АРМСХИ, Ереван, 1984, выпуск 62. С. 82-85.

19. **Захарян Ю. Г.** Об учете пространственной неоднородности характеристик сельскохозяйственных полей при планировании агротехнологии // Научно-технический бюллетень по агрономической физике. 1984, № 58. С. 20–24 (в соавт.).

20. **Захарян Ю. Г.** Определение параметров оптимальной влагообеспеченности растений // Известия с/х наук, Ереван, 1985, выпуск 9. С. 57-68 (в соавт.).

21. **Захарян Ю. Г.** О пространственной дифференциации агротехнических решений // Агроклимат и программирование урожая / АФИ, 1986. С. 100–110 (в соавт.) Сб. научн. трудов по агроном. физике.

22. **Захарян Ю. Г.** Оптимальное планирование агротехнологий с учетом пространственной изменчивости почвенно-климатических условий: Тезисы докл. Закавказской научно-практической конференции молодых ученых и специалистов. Ереван, 1986. С. 32–33.

23. **Захарян Ю. Г.** Об эффективности некоторых вариантов разбиения на градации при районировании территории // Научно-технический бюл. по агроном. физике / АФИ, 1987, № 70 (в соавт.).

24. **Захарян Ю. Г.** О планировании агротехнических мероприятий на неоднородных сельскохозяйственных территориях // Научно-технический бюл. по агроном. физике / АФИ, 1987, № 70.

25. **Захарян Ю. Г.** Статистический анализ о пространственной дифференциации агротехнологических решений // Научно-технический бюл. по агроном. физике / АФИ, 1987, № 72.

26. **Захарян Ю. Г.** Методы принятия оптимальных решений на неоднородных по агрометеорологическим условиям сельскохозяйственных территориях РТП.ТИР.ВИР.Зак.1231, М-20054, 11.09.1987, Ленинград, 1987,204 с.

27. **Захарян Ю. Г.** Технолого-экономическое обоснование выделения контуров в ландшафтных системах точного земледелия // Сборник докладов конференции ВНИИЗиЗПЭ, Курск, 2006. С. 147–149.

28. **Захарян Ю. Г.** Пространственная дифференциация агротехнических решений в системе точного земледелия // Современная агрофизика – высоким агротехнологиям. Материалы Международной конференции (Санкт-Петербург, 25–27 сентября 2007), ГНУ АФИ Россельхозакадемии, СПб, 2007. С. 159–161.

29. **Захарян Ю. Г.** Оценка эффективности агротехнологических воздействий с учетом геостатистического анализа неоднородности // Труды научной сессии ГНУ АФИ РАСХН, 2014.

30. **Захарян Ю. Г.,** Азизбекян Л. А. Оптимизация режима орошения в условиях лимитирования ресурсов. Министерство с/х и природопользования Республики Армения. Армянская с/х академия. Научные труды, серия «Технические науки» выпуск 3-4. Ереван, 2001. С. 114-119.

31. **Захарян Ю. Г.,** Ефимов А. Е. Целесообразное выделение контуров полей в технологиях точного земледелия // Сборник докладов IX международной научно-практической конференции, Ч. 2, Углич, Москва, 2006.

32. **Захарян Ю. Г.,** Насонова О. Н. Об эффективности некоторых вариантов разбиения на градации при районировании территории // Научно-техн. бюл. по агроном. физике. Л.: АФИ, 1988. № 70.

33. **Захарян Ю. Г.,** Саноян М. Г., Саркисян Р. А. Задача оптимизации оперативного управления поливом с учетом временного фактора. Армянская с/х академия. Научные труды (посвящается 70-летию Армянской с/х академии). Вып. 3, Ереван, 2001. С. 135–140.

34. **Захарян Ю. Г.,** Саркисян Р. А., Азизбекян Л. А. Теория оптимального планирования оросительных мероприятий. Министерство с/х и природопользования Республики Армения. Армянская с/х академия. Научные труды, вып. 4, Ереван, 2001. С. 169–176.

35. **Захарян Ю. Г.,** Усков И. Б. Теоретические основы деления полей на контура по факторам продуктивности в системах ГИС-Агро / Всероссийский научно-исследовательский институт механизации с/х, машинные технологии производства продукции в системе точного земледелия и животноводства. 3-я научно-практическая конференция. Москва, 2006. С. 131-136.

36. **Захарян Ю. Г.,** Усков И. Б., Ефимов А. Е. Методика выделения технологических контуров полей в системах точного земледелия // Физические химические и климатические факторы продуктивности земель, Сб. научн. тр., СПб: Изд-во ПИЯФ РАН. 2007. С. 295–305.

37. **Усков И. Б.,** **Захарян Ю. Г.,** Николаев В. М., Кононенко О. В. Геостатистическая оценка рискованности земледелия РФ по комплексу метеорологических факторов / Материалы I Всероссийской открытой конференции «Почвенные и земельные ресурсы: состояние, оценка,

использование». М.: Почвенный институт им. В. В. Докучаева, 2014. С. 157–160.

38. Uskov A. O., **Zakharian J. G.** Expedient spatial differentiation of technologies of precise agriculture according to productivity factors/ ИАС 2009 Book of abstracts / Wageningen Academic Publishers / The Netherlands, 2009.

На правах рукописи:

39. Методы принятия оптимальных решений на неоднородных по агрометеорологическим условиям сельскохозяйственным территориям. Диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук. Ленинград, 1987.