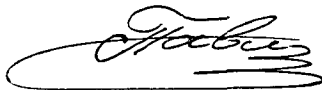


РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ЦЕНТР МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ПРОБЛЕМАМ
ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

На правах рукописи



Павловский Артем Александрович

**СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ
УРОЖАЙНОСТИ ПШЕНИЦЫ И ОЦЕНКИ ЕЕ ИЗМЕНЕНИЙ
ПРИ ГЛОБАЛЬНОМ ПОТЕПЛЕНИИ**

Специальность 25 00 30 — метеорология,
климатология, агрометеорология

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук



Санкт

003 17644 1

2011

Работа выполнена в Центре междисциплинарных исследований по проблемам окружающей среды РАН, г Санкт-Петербург

Научный руководитель профессор, доктор технических наук
Менжулин Геннадий Викторович

Официальные оппоненты профессор, доктор географических наук
Кобышева Нина Владимировна

доцент, кандидат физико-
математических наук
Фролькис Виктор Абрамович

Ведущая организация Российский государственный
гидрометеорологический университет

Защита состоится «12» декабря 2007 г в 14 часов на заседании диссертационного совета Д327 005 01 в государственном учреждении «Главная геофизическая обсерватория им А И Воейкова» по адресу г Санкт-Петербург, 194021, ул Карбышева, д 7

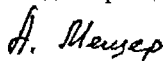
С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке государственного учреждения «Главная геофизическая обсерватория им А И Воейкова»

Отзывы в двух экземплярах, скрепленных гербовой печатью, просим направлять по адресу 194021, Санкт-Петербург, ул Карбышева, 7

Автореферат разослан «9» ноября 2007 г.

Ученый секретарь совета
по защите докторских и кандидатских диссертаций,

доктор географических наук



А В Мещерская

I. Общая характеристика работы

Актуальность исследования

В настоящее время для современной науки о Земле является показательным быстрое развитие дисциплин, целью исследования которых являются изменения окружающей среды. Среди них ведущая роль отводится науке об ожидаемых изменениях компонентов климатической системы нашей планеты — современной климатологии. В решение ее задач вовлечен широкий круг ученых различных направлений. Проблемы современной климатологии привлекают все большее и большее внимание широкой общественности, исследовательских коллективов различных стран, межправительственных организаций, национальных комитетов, симпозиумов и конференций.

Последние десятилетия характеризуются также и тем, что к ранее сформировавшемуся кругу смежных для климатологии дисциплин, проблем, которых традиционно имели к ней непосредственное отношение, следует включить экономику, социологию, политологию и международное право. Общей проблемой, связавшей климатологию с этими науками, является изучение перспектив развивающегося глобального потепления, которое может произойти под влиянием антропогенных факторов, а также оценка их разнообразных экологических, экономических и, в конечном итоге, социально-политических последствий. Несомненным успехом исследований, проведенных в мире за последние три десятилетия, является достаточная доля уверенности, с которой можно говорить о наиболее вероятных сценариях развития изменений основных показателей глобального климата и наиболее принципиальных их последствиях. Важно заметить, что в отношении некоторых из них можно надеяться на достоверность полученных не только качественных, но и количественных оценок. Углубление и расширение дальнейших исследований, и получение более детальных выводов о влиянии ожидаемого глобального потепления на природную среду и экономику, также как и комплексная оценка их последствий, должны обеспечиваться при научном подходе, сочетающем в себе обнаружение и анализ особенностей происходящих региональных изменений климата, построение сценариев их динамики в будущем и, наконец, расчеты влияния на окружающую среду и экономику. Без расширения научных разработок в указанных направлениях будет трудно поддержать выводы о достоверности полученных результатов и использовать их для обоснования стратегии приспособления мирового сообщества к развивающемуся глобальному потеплению и его последствиям. Без этого также малоперспективным представляется достижение согласованных геополитических решений и их обоснованное отражение в международных правовых документах. В связи с этим можно упомянуть о том, как в последние годы изменялось отношение участников крупных международных конференций и правительств ряда стран к вопросу о подписании и ратификации Киотского Протокола об ограничении выбросов парниковых газов.

Важнейшей компонентой исследований современных глобальных изменений климата являются оценки их влияния на экологические процессы и экономику. В числе этих вопросов следует отметить влияние на водный режим и гидрологические процессы на суше, на наземные экосистемы и природную

41

зональность, на энергоресурсы и энергопотребление, на уровень мирового океана, морские и прибрежные экосистемы, на криосферу в целом и на вечную мерзлоту в частности, на транспорт, энергетику, строительство, на финансово-кредитную систему и другие сферы человеческой деятельности и экологические процессы. Однако, по нашему глубокому убеждению, в ряду основных последствий современного глобального потепления одно из первых мест должно занимать влияние изменений климатических факторов на продуктивность сельскохозяйственных культур и инфраструктуру сельского хозяйства в целом. Характерно, что наибольшее количество публикаций, посвященных последствиям изменений климата, приходится именно на эти вопросы. Тем не менее нельзя не отметить, что практически все эти публикации посвящены вопросам изменения среднего уровня продуктивности сельскохозяйственных культур при изменении гидротермического режима и содержания углекислого газа в атмосфере. Другими словами, в этих исследованиях в качестве расчетных методик фигурируют изменения норм метеорологических элементов, а выходными (искомыми) величинами являются изменения уровня продуктивности, то есть показатели урожайности за продолжительные промежутки времени в будущем. Несмотря на то, что вопрос о повторяемости опасных для сельского хозяйства аномальных гидротермических явлений ставился и до настоящего времени, количественно оценить его достаточно надежно не удавалось. Однако согласно мнениям специалистов и решениям международных органов этот вопрос является одним из самых актуальных для современной науки об агроклиматических последствиях изменений климата.

Цели исследования

Основной целью диссертационной работы является разработка методики построения эмпирико-статистических моделей «метеорологические факторы — урожайность» и применение их для оценки повторяемости аномальных для урожайности сельскохозяйственных растений гидротермических явлений до середины XXI века с использованием климатических сценариев, рекомендованных Международной группой экспертов по изменениям климата.

Задачи исследования

- Построить ряды показателей урожайности различных типов пшеницы в областях России, странах бывшего СССР и графствах различных штатов США
- Составить ряды данных по средней месячной, максимальной, минимальной температуре приземного воздуха и атмосферным осадкам для метеостанций на исследуемых территориях бывшего СССР и США
- По данным архивов центра по распространению данных МГЭИК подготовить прогностические ряды метеорологических данных, используя среднемесячные значения температуры и осадков, для сценариев, построенных по моделям общей циркуляции атмосферы и океана, рекомендованным в третьем отчете МГЭИК
- Провести корреляционный анализ сельскохозяйственных и метеорологических рядов данных, подготовленных для построения регрессионных моделей. Построить ансамбли регрессионных моделей

«погодные факторы — урожайность» для областей СССР и графств США Получить оценки их достоверности и значимости

- Проанализировать точность воспроизведения построенными регрессионными моделями исторических рядов урожайности пшеницы на исследуемых территориях
- С использованием прогностических модельных сценариев, рекомендованных МГЭИК, рассчитать динамику показателей урожайности различных типов пшеницы до 2050 года в регионах бывшего СССР и США Оценить согласованность прогностической динамики показателей урожайности пшеницы на исследуемых территориях при глобальном потеплении до 2050 года

Научная новизна

Основная компонента научной новизны состоит в разработке методики нового «ансамблевого» подхода к построению статистических регрессионных моделей показателей аномалий урожайности сельскохозяйственных культур С целью реализации такого подхода в диссертации разработана схема объективного отбора наиболее достоверных и точных регрессий, составляющих конечную статистическую модель Для практической реализации разработанного подхода построена методика анализа статистических критериев, характеризующих каждую модель, как представительницу «ансамбля» регрессий Существенной компонентой новизны является метод прямого выбора наилучшей модели из полного множества возможных регрессий, впервые использованный в агроклиматических исследованиях Впервые в агроклиматических прогностических исследованиях на основе единого методического подхода получены оценки изменений повторяемости аномальных лет в различных регионах бывшего СССР и США по семи модельным сценариям изменений глобального климата до 2050 года

Научная и практическая значимость

При анализе экологических и экономических последствий ожидаемого глобального потепления, оценки его воздействия на сельское хозяйство являются первоочередными Многолетняя статистика, разработки специалистов, и постоянное внимание со стороны международных и национальных организаций показывают, что из всех отраслей экономики, чувствительных к воздействию климатических факторов, сельское хозяйство, в особенности земледелие, наиболее сильно зависит от климатических факторов и от ожидаемых изменений глобального климата

Достоверность и обоснованность результатов

Достоверность и обоснованность полученных результатов обусловлена применением утвердившихся методов математической статистики, обработки и анализа рядов исходной сельскохозяйственной, климатической и метеорологической информации Обоснованность прогностических оценок, выдвигаемых на защиту, доказывается применением в расчетах научных прогностических материалов, полученных в ведущих исследовательских центрах мира при разработке сценариев изменений глобального климата

На защиту выносятся

- Методика построения статистических моделей «погодные факторы — урожайность», базирующаяся на «ансамблевом» подходе
- Методика формирования рядов аномалий урожайности пшеницы, полученных по результатам статистических экспериментов с использованием разных типов трендов
- Прогностические оценки изменений повторяемости аномалий урожайности пшеницы в первой половине XXI века согласно сценариям глобального потепления, рассчитанным по моделям общей циркуляции атмосферы и океана

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы были представлены на следующих отечественных и международных конференциях и совещаниях

- Итоговая сессия ученого совета РГГМУ (25—26 января 2005г),
- Научная конференция «Экология Санкт-Петербурга и его окрестностей» (СПб, 5—7 декабря 2005г),
- Итоговая сессия ученого совета РГГМУ (2—3 февраля 2006г),
- Международная конференция «Влияние изменений окружающей среды на природные ландшафты» (СПб, 2—6 июля 2006г),
- Международная конференция «Погода и биосистемы» (СПб, 11—14 октября 2006г),
- Заседание комиссии экспертов Европейского союза по влиянию изменения климата на сельское хозяйство Европы (Вена, 22—23 октября 2007г)

Публикации

По теме диссертации опубликовано 4 статьи, одна из которых — в рецензируемом отечественном научном журнале «Вестник Санкт-Петербургского государственного университета»

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, результатов, выводов, заключения, списка литературы, списка Интернет сайтов. Общий объем диссертации составляет 199 страниц, включая 51 рисунок, 24 таблицы и 4 карты-схемы. Список литературы содержит 249 наименований, список Интернет сайтов содержит 19 наименований.

2. Содержание диссертации

Введение

Во введении обоснована актуальность исследования, сформулированы его цели и задачи, метод исследования, научная новизна полученных результатов

Глава 1. Влияние изменений климата на сельское хозяйство

В первой главе обсуждается проблема агроклиматических последствий глобального потепления, проводится анализ имеющихся оценок изменений агроклиматических показателей при ожидаемых изменениях климата. Представлены примеры, показывающие важность исследований по проблеме

воздействия изменений климата на продуктивность сельскохозяйственных культур Также проводится анализ экспериментальных исследований по проблеме прямого физиологического влияния роста концентрации CO_2 на продуктивность растительности

Глава 2 Методы агроклиматических исследований и прогнозирования урожайности

Во второй главе анализируются различные эмпирико-статистические методы прогнозирования урожайности и имитационные модели продукционного процесса Обсуждается проблема диагноза и прогноза засух

Из анализа литературных источников можно сделать вывод, что большинство конструкций современных динамических моделей продукционного процесса являются тонкими, настроенными на конкретные культуры и условия окружения Несмотря на то, что они не всегда апеллируют к детальным физиологическим характеристикам жизнедеятельности растений, эти схемы способны обеспечить достаточную точность и заблаговременность агрометеорологических прогнозов

Вместе с тем, следует отметить, что прямая экстраполяция приемов, разработанных для решения задач агрометеорологического прогноза, в методику расчетов агроклиматических последствий современных антропогенных изменений глобального климата затруднительна

Глава 3 Исходная информация и ее обработка

В первом параграфе проводится анализ исходной сельскохозяйственной информации Для целей диссертационного исследования наибольший интерес представляют продолжительные и непрерывные ряды данных по урожайности сельскохозяйственных культур для отдельных территориальных единиц исследуемых регионов Большое значение также имеет и сопутствующая таким рядам информация валовой сбор, посевные и уборочные площади и т д

В качестве источников исходной сельскохозяйственной информации нами были использованы статистические архивы государственных служб и международных организаций в исследуемых нами регионах США и странах бывшего СССР

Информация об урожайности озимой и яровой пшеницы для отдельных административных единиц СССР (области, края, автономные республики) за период с 1945 по 1987 годы, полученная из статистических ежегодников «Народное хозяйство» издания Центрального статистического управления при Совете Министров СССР, лучше всего подходит для целей статистического моделирования Эти ряды достаточно продолжительны и в них мало пропусков Использование рядов урожайности пшеницы в изучаемых регионах бывшего СССР, начиная с 1988 года, затруднено в силу сложности их получения В отношении некоторых небольших современных независимых государств, таких как Латвия, Литва и Эстония этот вопрос решается относительно легко Информацию по урожайности сельскохозяйственных культур в целом по этим странам можно получить из баз данных Международной организации по сельскому хозяйству и продовольствию (ФАО) Применительно к России, Украине и Белоруссии использование этого источника не представляется

возможным, так как в базах данных ФАО отсутствует информация для отдельных территориальных единиц этих крупных стран

Основным источником сельскохозяйственной информации об урожайности озимой и яровой пшеницы для территории США являются архивы Министерства сельского хозяйства США (US DOA), находящиеся в свободном доступе в сети Интернет. В этих архивах имеется информация по производству пшеницы в США за период с 1919 года по настоящее время. Дополнительно нами были использованы данные ежегодных отчетов Министерства сельского хозяйства США. Таблицы архивов сельскохозяйственной информации по производству сельскохозяйственных культур на территории США выгодно отличается наличие в них большого количества сопутствующих данных. Кроме того, информация более дифференцирована по территории — имеются в наличии данные как по всему штату в целом, так и по отдельным округам и графствам.

Анализ качества исходных рядов по урожайности пшеницы в регионах стран СНГ и Балтии позволил сделать следующие выводы. Во-первых, имеющиеся данные обладают достаточной продолжительностью (около сорока лет), что позволяет надеяться на получение устойчивых статистических оценок при построении регрессионных моделей. Во-вторых, внутри рядов практически нет пропусков, что снимает проблему заполнения отсутствующих записей. И, наконец, в-третьих, для большинства областей данные относятся к одному и тому же временному промежутку.

В отличие от российских данных, ограниченных периодом 1945—1987 годы, продолжительность рядов в США сильно варьирует для различных графств. Преимущество американских архивов — наличие в них большой вспомогательной информации — посевные и уборочные площади, данные по валовому сбору и даже по содержанию белка в зерне, что позволяет использовать «дополнительные степени свободы» при обработке исходной информации. В отношении данных по странам СНГ и Балтии такая информация отсутствует. Следует признать, что исходные ряды по урожайности пшеницы на территории США более удобны для построения достоверных статистических моделей «погодные факторы — урожайность».

Осуществляя обзор имеющейся в настоящее время информации об урожайности сельскохозяйственных культур, нельзя не отметить, что за последние 60 с лишним лет сельское хозяйство развитых и некоторых развивающихся стран характеризуется значительным ростом урожайности основных продовольственных культур, в том числе зерновых, включая интересующую нас пшеницу. Однако, несмотря на рост урожайности, ее межгодовая изменчивость, вызванная вариабельностью погодных условий, по-прежнему, остается весьма значительной. Влияние технологического уровня развития сельскохозяйственного производства на урожайность существенно затрудняет исследование эффектов ее погодно-климатической изменчивости.

Исходя из того, что в большинстве случаев при эмпирико-статистическом анализе приходится иметь дело с данными о урожаях, задача исследования показателей роста и изменчивости урожайности становится комплексной, включающей не только агроклиматическую, но и экономическую и технологическую компоненту.

Для построения устойчивых схем агрометеорологического прогноза необходимо получение однородных рядов показателей урожайности. Это очень важный вопрос для исследования влияния погодно-климатических факторов на урожайность.

Не вызывает сомнения, что длительные тенденции в рядах урожайности обусловлены прежде всего влиянием технологических факторов. Однако выявление технологических трендов часто затруднено отсутствием конкретной информации о них. Понятно, что технологические факторы стимулируют рост урожайности, но какой фактор в какой степени часто остается неясным. При построении индивидуальных регрессионных моделей урожайности пшеницы для небольших территориальных единиц получить информацию о динамике отдельных технологических факторов, практически не представляется возможным. Поэтому исследователи, как правило, исходят из использования априорного вида временного тренда урожайности, следуя идее выделения простых трендов, прежде всего, линейного.

Существуют разнообразные приемы выделения трендов, но все они являются априорными, и каждый из них требует дополнительного обоснования своей методики. Использование априорных трендов для выделения трендовой компоненты изменчивости превращает задачу о прогнозировании урожайности в задачу с некоторой неопределенностью в окончательном результате.

На основании сказанного, можно прийти к важному выводу, что априорно невозможно сказать какой из выбираемых для анализа трендов является единственно «правильным». В данном исследовании мы отказались от выделения одного единственного априорного «наилучшего» тренда, и реализовали методику построения ансамбля трендов.

В нашем исследовании «ансамбль» трендов Y_k состоял из восьми полиномов (от линейной функции до полинома 8-ой степени) и восьми экспоненциальных функций, показателями которых были полиномы до восьмой степени. В отдельных контрольных расчетах для ряда выбранных графств США мы пользовались аппроксимацией эволюторными кривыми.

Построенные полиномиальные и экспоненциальные тренды позволили получить различные показатели урожайности, которые были использованы в качестве предиктантов регрессионных моделей. Расчет показателей относительной урожайности η_k производился по формуле

$$\eta_k(i) = [y(i) - Y_k(i)] / Y_k(i), \quad (k=1,2,3, 8,9,10,11-16) \quad (1)$$

где $y(i)$ — урожайность культуры в год i , $Y_k(i)$ значение урожайности в этом же году по тренду k (одному из выбранных 16-ти трендов), $\eta_k(i)$ — относительная урожайность культуры в год i , рассчитанная с использованием тренда k .

В принципиальном смысле технологическими трендами урожайности сельскохозяйственной культуры можно было бы назвать не ранее рассмотренные тренды, а некий тренд значений урожайности, которая могла бы быть достигнута в случае влияния всех технологических факторов при максимально благоприятных погодных условиях в каждый год. Понятно, что такой тренд должен располагаться как выше «межточечного» тренда, так и

выше пилообразной кривой реальных урожаев. Для обоснования методики проведения такого тренда сделаем предположение, что имеющийся в наших расчетах период возделывания культуры содержит такой самый благоприятный год. Анализируя построенные ряды относительных отклонений $\eta_k(i)$ для какого-либо региона, можно найти год, в который относительная урожайность культуры была самой высокой. Можно предположить, что именно в этот год агрометеорологические условия сложились самым благоприятным образом для получения высокой урожайности. Для определения вида кривой технологического тренда примем гипотезу о подобии ранее построенного эмпирического тренда и искомого «истинно» технологического тренда. В таком случае кривая искомого тренда $Y_{max,k}(i)$, рассчитанного по эмпирическому тренду с номером k , будет вычисляться по формуле

$$Y_{max,k}(i) = Y_k(i) [1 + \Delta Y_k(\text{лучший год}) / Y_k(\text{лучший год})] = Y_k(i) [1 + \eta_k(\text{лучший год})], \quad (2)$$

где $Y_{max,k}$ — максимальный тренд урожайности, соответствующий тренду Y_k , $\Delta Y_k(\text{лучший год})$ — положительное максимальное ненормированное отклонение реальной урожайности от тренда (в год самых благоприятных агрометеорологических условий), $\eta_k(\text{лучший год})$ — относительное отклонение реальной урожайности от тренда в единственный год наилучших агрометеорологических условий. Технологический тренд $Y_{max,k}$ представляет ряд потенциальной урожайности при отсутствии «неприятностей» погодного характера. Относительно кривой максимального тренда пилообразная кривая динамики реальной урожайности располагается всегда ниже, то есть каждый год в исследуемом промежутке характеризуется сельскохозяйственными потерями, равными разности значений максимального тренда и реальной урожайности в этот конкретный год.

Расчет относительных потерь λ_k урожайности от максимального тренда производился по формуле

$$\lambda_k(i) = 100\% [Y_{max,k} - y(i)] / Y_{max,k}, \quad (3)$$

где приняты те же обозначения, что и в формулах (1—2). Множитель 100% введен для удобства. Подчеркнем, что расчет относительных потерь урожайности будет проводиться таким образом, что на графиках они всюду будут положительными цифрами. Это не должно смущать читателя, привыкшего воспринимать потери в урожайности как отрицательные величины.

Во втором параграфе проводится анализ исторической метеоинформации и ее обработки. При построении статистических моделей «погода—продуктивность культуры» в качестве предикторов использовались ежемесячные значения температуры приземного воздуха и осадков. В качестве основного источника метеорологической информации привлекались архивы Центра Климатической Информации США (National Climate Data Center, World data Center “A”). Данные по мировой сети метеорологических станций ВМО в этих архивах регулярно обновляются. В некоторых случаях использовался

архив данных по 223 станциям бывшего СССР, подготовленный во Всероссийском научно-исследовательском институте гидрометеорологической информации, Мировом Центре "В", позже переданный в NCDC

При выборе надежного сочетания «территориальная единица—метеорологические данные» была использована компьютерная программа поиска соответствующих метеорологических станций. Применялась разная система отбора станций для территорий США и бывшего СССР, что было связано с большими различиями по площади между областями и республиками бывшего СССР, с одной стороны, и графствами США с другой.

Для США отбор станций осуществлялся по критерию максимальной близости к географическому центру соответствующего графства. Поиск станций производился в радиусе 30 км от центра графства. Для областей и республик бывшего СССР приоритет отдавался станции, расположенной ближе к региону производства пшеницы в конкретной территориальной единице. Все выбранные станции имеют длительные ряды данных, превышающие продолжительность данных по урожайности.

В данной работе, как и в любом классическом агрометеорологическом исследовании, предполагалось, что основными метеорологическими факторами (в дальнейшем будем называть их предикторами), действующими на урожайность пшеницы, являются температура приземного воздуха и атмосферные осадки. Другие факторы в наших расчетах не использовались.

В большинстве случаев использовались ежемесячные значения максимальной и минимальной суточной температуры и атмосферных осадков. В тех случаях, когда продолжительность рядов урожайности была меньше 24 лет, в качестве предикторов использовалась средняя месячная температура и месячная сумма осадков. Помимо этого, такой подход был связан с тем, какие данные предоставляются в архивах Центра Распространения Данных комиссии ИРСС.

При подготовке рядов метеорологических предикторов, как и при подготовке рядов предиктантов, важно было решить вопрос о показателях температуры и осадков, включаемых в регрессионные модели. В данном случае также требовалось решение проблемы выделения длиннопериодной компоненты изменчивости. В первую очередь этого требует логика постановки нашей задачи: предиктанты в наших моделях представляются безразмерными показателями, следовательно, методически корректным было бы и предикторы представить в виде безразмерных величин. Однако более важным обстоятельством принятия такого решения явилось то, что главная цель нашей исследовательской работы состояла в развитии методики оценки изменений повторяемости аномалий урожайности при ожидаемых изменениях климата, то есть отклонений показателей урожайности от их средних, в более общем случае, трендовых величин. Понятно, что в связи с развивающимся глобальным потеплением понятие средних величин за какой-либо промежуток времени в будущем является условным. Справедливым будет и то утверждение, что аналогичная картина имела место и в историческом прошлом, когда применительно к относительно длительным промежуткам времени утверждать об абсолютной устойчивости средних значений метеорологических элементов

не приходится В особенности это справедливо, если иметь в виду динамику региональных метеорологических характеристик

Исходя из этого, потребовалось «очистить» ряды метеорологических величин от длиннопериодной компоненты изменчивости и считать относительные отклонения метеорологических параметров от их трендовых линий показателями влияния метеорологических условий на урожайность Проиллюстрируем это примерами расчетов относительных отклонений для средней $\tau_{mean4,k}$, максимальной $\tau_{max4,k}$, и минимальной $\tau_{min4,k}$, температуры воздуха и осадков $\pi_{4,k}$ в апреле на станции Кострома Эти величины рассчитаны по формулам

$$\begin{aligned}\tau_{mean4,k} &= (T_{mean4} - T_{mean,tr4}) / T_{mean,tr4}, \\ \tau_{max4,k} &= (T_{max4} - T_{max,tr4}) / T_{max,tr4}, \\ \tau_{min4,k} &= (T_{min4} - T_{min,tr4}) / T_{min,tr4}, \\ \pi_{4,k} &= (P_4 - P_{tr4}) / P_{tr4},\end{aligned}\tag{4}$$

в которых T_{mean4} , T_{max4} , T_{min4} — среднесуточная, максимальная и минимальная температура приземного воздуха и π_4 — атмосферные осадки в 4-ый месяц года (апрель)

На основании проведенного анализа, как и в случае с предиктантами, при построении более достоверных статистических моделей было решено не ограничиваться «выделением» из рядов метеорологических предикторов трендов какого-то одного определенного вида Вычисления проводились с использованием широкого набора трендовых линий, а выбор в пользу того или другого тренда проводился на финальном этапе построения моделей В данной работе не использовались априорные гипотезы и предположения о наилучшем тренде для многолетней динамики метеорологических факторов Было решено пойти по пути массовых расчетов, чтобы на финальном этапе построения регрессий сохранить возможность выбора наиболее достоверной модели из «ансамбля» моделей, построенных с использованием большого набора трендовых линий, как для предиктантов, так и для предикторов

Глава 4 Методика построения регрессионных моделей урожайности

В первом параграфе рассматривается один из важнейших этапов диссертационной работы методика построения статистических регрессионных моделей урожайности, предназначенных для расчетов влияния глобального потепления на повторяемость аномальных для урожайности гидротермических явлений Основными задачами настоящего этапа были обоснования методики выбора статистических наиболее достоверных наборов предиктантов — предикторов для искомых регрессий Подчеркнем, что такой выбор для модели урожайности конкретного типа пшеницы для каждого конкретного региона должен проводиться индивидуально Напомним, что в набор предикторов были включены все возможные комбинации из трех показателей термического режима (средняя месячная, средняя максимальная и средняя минимальная температура) и месячной суммы осадков Каждый из упомянутых предикторов представлялся в вариантах их отклонений от трендов, представляемых в виде

полиномов от первой до шестой степени Выбор «наилучшего» предиктанта статистической модели урожайности производился нами двумя способами

Первый способ Этот способ построения регрессионных моделей в практике статистического моделирования называется способом прямого перебора из всех возможных многофакторных регрессий На первом этапе расчеты для каждого региона после выбора предиктора, наиболее высоко коррелированного с конкретным предиктантом, строятся все возможные двухфакторные регрессионные схемы, как с привлечением его в расчеты, так и без привлечения Количество таких схем составит более 72 млн Второй этап построений — это построение для заданного предиктанта всех возможных трехфакторных регрессий, которых будет более 411 млн Следующим этапом должен быть расчет всех возможных четырехфакторных регрессий — это порция из более 3 млрд регрессий Количество пятифакторных моделей составит около 21 млрд регрессий Следующая группа шестифакторных моделей составит приблизительно 112 млрд регрессионных конструкции Если ограничить расчеты на этапе построения шестифакторных моделей всего в сумме будет более 137 млрд регрессий Для всех 318 регионов бывшего СССР и США было построено более 42 триллионов регрессий

Второй способ С использованием введенного нами эмпирического индекса I корреляционной связи, вычисляемого по формуле

$$I_{jkl} = \sqrt{\sum_i [\text{corr}^2(y_{jk}, \tau_{min,il}) + \text{corr}^2(y_{jk}, \tau_{max,il}) + \text{corr}^2(y_{jk}, \pi_{il})]} \quad (4)$$

где $\sqrt{\quad}$ — корень квадратный, corr^2 — коэффициент корреляции в квадрате, y — значения предиктантов η , λ , τ_{min} , τ_{max} (или τ_{mean}), π — значения предикторов, i — номер месяца вегетационного сезона, j — номер региона (67 + 241), k — тип предиктанта, $k = 1-8, 9-16, 17-24, 25-32$, l — тип температурных предикторов, $l = 1,2,3,4,5$, m — тип предиктора осадков, $m = 1,2,3,4,5$

Полученные индексы ранжировались в порядке их убывания Предиктант, занимающий первую строку в рейтинге, выбирался в качестве «наилучшего» и включался в регрессионную модель для конкретного региона Такое построение схемы отбора базируется на феноменологической предпосылке ее статистической справедливости и требует доказательства ее пригодности С этой целью в работе и был применен первый способ отбора сочетания предиктант — предикторы, который в полной мере можно назвать абсолютным

Во втором параграфе проводится сравнительный анализ алгоритмов выбора предиктантов моделей, базирующихся на феноменологическом показателе и анализе всех возможных регрессий Как уже отмечалось, в качестве базового (абсолютного) метода выбора предиктантов регрессионных моделей в нашей работе был использован метод анализа статистических свойств всех возможных регрессий Повышение сложности регрессионной модели (включение в расчет регрессий более высокого порядка) происходит до тех пор, пока продолжает возрастать значение скорректированного (adjusted) коэффициента детерминации R_a^2 , расчет которого производился по формуле

$$R_a^2 = 1 - \left(\frac{n-1}{n-p} \right) (1 - R^2), \quad (5)$$

в которой n — продолжительность ряда наблюдений, p — количество предикторов, включаемых в регрессию, R^2 — коэффициент детерминации

Для реализации данного подхода была составлена специальная компьютерная программа, алгоритм которой позволял проводить расчеты до шестифакторных регрессий включительно. Такое ограничение сверху связано с тем, что для вычисления алгоритма прямого перебора, несмотря на его относительную простоту, требуется продолжительный период времени, который достаточно быстро растет при увеличении количества предикторов, вовлекаемых в расчеты. Поэтому в нашем исследовании мы использовали его только при переборе всех двухфакторных, трехфакторных, четырехфакторных, пятифакторных и шестифакторных моделей урожайности. При этом наша цель состояла в том, чтобы с использованием этого абсолютного метода, показать, что другой, использованный в нашем исследовании метод отбора предиктантов, базирующийся на анализе величин эмпирического индекса I корреляционной связи, является столь же надежным, как и абсолютный метод перебора всех возможных регрессий.

В третьем параграфе анализируются результаты выбора предиктантов моделей урожайности в различных регионах.

В четвертом параграфе проводится анализ корреляционной связи предиктантов и метеопредикторов моделей. Следующим, после этапа обоснования наилучшего предиктанта моделей урожайности для исследуемых нами территорий, стал этап построения непосредственно моделей. Как уже было отмечено, для построения статистических моделей урожайности мы приготовили два набора предикторов: 1) относительные значения максимальной, минимальной температуры воздуха и месячных сумм осадков, 2) относительные значения средней месячной температуры воздуха и месячных сумм осадков.

Для территории США, в зависимости от продолжительности рядов предиктантов и предикторов, применительно к различным узлам климатических моделей, попадающих на территорию определенных графств, может использоваться, как один, так и второй набор предикторов. На территории бывшего СССР в силу меньшей длины рядов урожайности можно было использовать только второй набор предикторов.

Исходя из того, что значения максимальной и минимальной температуры в один и тот же месяц обычно высоко коррелированы, нам необходимо было сделать выбор в отношении включения одного из двух предикторов в отбор. При проведении такого анализа рассчитывались коэффициенты корреляции между значениями минимальной и максимальной температуры в каждый месяц. По указанной причине, ряды максимальной и минимальной температуры подвергались «просеиванию». С этой целью были рассчитаны коэффициенты корреляции между «наилучшими» предиктантами и температурными предикторами. Естественно, что в конечном итоге, приоритет отдавался тому из этих двух предикторов, который теснее коррелирует с предиктантом.

В пятом параграфе приводятся оценки точности и достоверности регрессионных моделей. Во всех расчетах и оценках в качестве основных критериев качества построенных уравнений регрессии мы использовали коэффициент детерминации, скорректированный на количество степеней свободы — R_a^2 , и значения критериев Стьюдента, применительно к каждому из выбираемых предикторов (t -критериев)

При включении дополнительных предикторов в регрессионные модели, вычисления продолжались до момента падения значения R_a^2 . В качестве нижнего предела для регрессий, используемых в целях агроклиматического прогнозирования, выбиралось значение t -критерия Стьюдента для предикторов равное 1,7 (уровень доверительной вероятности 90—95%). В качестве критерия оценки отсутствия в рядах остатков автокорреляционных связей нами использовался критерий Дарбина-Уотсона (d), вычисляемый по формуле

$$d = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (e_{i+1} - e_i)^2}{\sum_{i=1}^n e_i^2}, \quad (6)$$

в которой e_i — ряд остатков

Значение этого критерия, позволяющее сделать вывод об отсутствии автокорреляционных связей, — 1,4. Следует отметить, что во всех расчетах значения критерия Дарбина-Уотсона были выше этого уровня, что дополнительно свидетельствует о достаточной надежности выбранных трендов.

Представлены примеры регрессионных моделей урожайности различных типов пшеницы для исследуемых территорий.

Модели урожайности для графств штата Канзас (основного производителя озимой пшеницы в США) характеризуются значениями скорректированного коэффициента множественной корреляции R_a варьирующими от 0,62 (графство Kingman) до 0,70 (графство Brown). Что касается значений коэффициента R^2 , они изменяются от 0,56 до 0,65. В качестве предикторов моделей урожайности для графств штата Канзас чаще всего выступают атмосферные осадки — 32 случая, нормированная минимальная температура, как предиктор, встречается в моделях 27 раз, максимальная — 22 раза. Если рассматривать каждый из типов предикторов в отдельности, то наиболее часто встречающимися оказались из T_{min} — $T_{min,5}$ (шесть случаев), из T_{max} — $T_{max,0}$ (6 случаев), из π — π_0 и π_H (5 случаев). Говоря о встречаемости предикторов в предыдущий год и в год уборки, можно сделать вывод о том, что в «год посадки» определяющими для конечного урожая являются значения T_{max} и π , в год же уборки — T_{min} и π .

В целом, суммируя информацию обо всех графствах различных штатов-производителей озимой пшеницы в США, можно отметить, что наиболее часто встречающимися метеорологическими предикторами в регрессионных моделях явились относительные осадки, они запрашивались алгоритмом 99 раз, нормированная максимальная температура привлекалась в качестве предиктора

72 раза, минимальная — 58 раз. Чаше других в конечных моделях встречались следующие предикторы из τ_{min} — $\tau_{min,5}$ (11 повторений), из τ_{max} — $\tau_{max,0}$ (13 повторений) и $\tau_{max,3}$ (14 повторений), из π — π_C (12 повторений), π_0 (15 повторений), π_n (10 повторений), π_5 (10 повторений), π_7 (11 повторений). Заметим еще раз, что наиболее часто встречающимися в регрессионных моделях урожайности метеорологическими предикторами являются атмосферные осадки.

Следует сказать, что большинство построенных регрессионных моделей характеризуются высокими значениями коэффициентов множественной корреляции, которые варьируют от 0,76 в графстве Pittsburg (штат Оклахома) до 0,98 в графстве Lassen (штат Калифорния). Характеризующие уровень статистической значимости выбираемых алгоритмом метеорологических предикторов критерии Стьюдента практически во всех случаях соответствуют уровню доверительной вероятности 95—99%.

Глава 5 Прогностические оценки

В первом разделе приводится краткая характеристика различных методик или сценариев предстоящих изменений глобального и регионального климатов: априорные сценарии изменений климата и экспертные опросы, аналоговые сценарии, палеоклиматические сценарии, модельные сценарии. В настоящее время наиболее универсальным методом оценки ожидаемых количественных изменений климата является использование результатов расчета по моделям общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО). Большинство современных исследований, посвященных возможным последствиям изменения климата, основано на этих результатах.

Во втором разделе проводится описание прогностической методики проведения расчетов. При анализе возможных последствий глобального потепления климата, диссертанта, прежде всего, интересовал вопрос о проявлении погодных вариаций термического режима и режима осадков в исследуемых нами регионах, которые могут оказывать влияние на повторяемость аномальных показателей урожайности сельскохозяйственных культур при глобальном потеплении. Поэтому, как и в случае с историческими сельскохозяйственными и метеорологическими данными, встала задача о выделении длиннопериодной компоненты изменчивости из модельных прогностических рядов метеорологических параметров.

Качественный анализ прогностических данных выявил существенные различия в типах тенденций изменений метеорологических элементов в различных территориальных единицах. Поэтому при подготовке рядов относительных величин прогностических предикторов, как и в случае с исторической информацией, было принято решение не ограничиваться использованием какого-то одного априорного тренда, а делать вывод, анализируя особенности трендов из заданного набора.

В качестве набора возможных трендовых линий использовались полиномиальные тренды от нулевой (среднее многолетнее значение) до четвертой степени. Напомним, что для относительных значений метеоэлементов от трендов были введены следующие обозначения τ_k — для

температурных характеристик и π_k — для атмосферных осадков (k — номер тренда)

В качестве инструмента для выбора «наилучшего» тренда изменений метеопараметров в будущем был использован метод интегральных периодограмм. Выбор наилучшей аппроксимирующей линии осуществлялся с использованием критерия Колмогорова и введенного нами эмпирического показателя γ , вычисляемого по формуле

$$\gamma = \min \sum \text{abs}(\sigma_i - \sigma_{wn,i}) \quad (7)$$

где σ_i — доля общей дисперсии, суммарно приходящаяся на колебания с большими частотами i , $\sigma_{wn,i}$ — она же для «белого шума». В проведенных расчетах задавались следующие критерии отбора достоверного тренда для вычисления прогностических значений метеорологических показателей, как нормированных разностей отклонений от тренда (1) интегральная периодограмма метеорологического показателя не должна выходить за пределы 99%-го доверительного интервала, (2) величина γ при изменении степени полиномиального тренда должна быть минимальной.

В третьем параграфе приводятся оценки прогностической динамики урожайности. При проведении прогностических расчетов изменений повторяемости аномальных для урожайности явлений было принято решение не отдавать предпочтения тому или иному климатическому сценарию, а провести расчеты по всем семи сценариям третьего поколения. При анализе рассчитанных прогностических рядов относительной урожайности или относительных потерь урожайности первоочередное внимание уделялось анализу динамики сглаженных прогностических показателей. С этой целью с привлечением рассчитанных рядов ежегодных значений аномалий урожайности пшеницы в областях бывшего СССР и США, вычислялись ряды их 11-ти летних сглаженных значений. Все прогностические оценки относились к периоду 2007—2050 гг. Далее в тексте приводятся некоторые примеры прогностической динамики показателей урожайности для различных территорий России и США. Подробнее остановимся на некоторых из них.

Графики на рис 1 характеризующие прогностическую динамику, относительных потерь урожая яровой пшеницы в графстве Sioux (штат Северная Дакота), рассчитаны по климатическим сценариям ECHAM4 и NCAR-PCM(R30). Можно отметить хорошее согласование в поведении сглаженных кривых — 11-летних скользящих средних. Для данного графства будет характерным небольшое увеличение потерь урожая во вторую половину второго десятилетия текущего столетия и значительное повышение потерь в период с 2030 по 2045 гг. На рис 2 для графства Sioux приводится сравнение исторического и прогностического рядов λ . Следует отметить, что на обоих графиках отмечается согласованность в тенденции на уменьшение относительных потерь урожайности с конца 1990-х годов.



Рис. 1. Сглаженная динамика относительных потерь урожайности, полученная по данным климатических сценариев.



Рис. 2. Пример сравнения исторической и прогностической сглаженной динамики показателей урожайности.

Интересные результаты получены при проведении прогностических расчетов для регионов России. На рис. 3 показана сглаженная прогностическая динамика относительных потерь урожайности озимой пшеницы в республике

Башкортостан, рассчитанная по четырем климатическим сценариям (ECHAM4, NCAR-PCM(R30), HadCM3 и CSIRO(Mk2)), хорошо согласующимся между собой. На этих графиках отмечается период 2020—2030гг, когда могут наблюдаться более частые засушливые явления. Менее частыми они станут в последующие годы.



Рис. 3. Сглаженная динамика относительных потерь урожайности, полученная по данным климатических сценариев.

Представленные примеры показывают, что использование разработанной в диссертации методики в прогностических расчетах изменений повторяемости аномальных для урожайности гидротермических явлений в будущем позволяет выявить важнейшие закономерности влияния глобального потепления на урожайность сельскохозяйственных культур. По мнению диссертанта, факты хорошего согласования оценок будущей динамики показателей урожайности, рассчитанных с использованием разных климатических сценариев, позволяют надеяться, что дальнейшее совершенствование, как сценариев, так и статистических моделей урожайности, существенно расширит возможности получения новых прогностических результатов.

Основные результаты и выводы

- Построены ряды показателей урожайности различных видов пшеницы в 67 областях России, Европейских стран СНГ и Балтии и 3568 графствах различных штатов США
- С использованием данных по средней месячной, максимальной, минимальной температуре приземного воздуха и атмосферным осадкам для 543 метеостанций на исследуемых территориях рассчитаны ряды предикторов статистических моделей аномалий урожайности
- Для выбранных областей бывшего СССР и графств США с использованием различных методик построены многофакторные статистические модели аномалий урожайности. Получены оценки статистической достоверности и значимости построенных моделей. Значения коэффициентов множественной корреляции для большинства построенных моделей превосходят уровень 0,80, величины t -критериев Стьюдента для коэффициентов уравнений регрессий соответствуют уровню доверительной вероятности в 95—99%
- С использованием модельных сценариев изменений климата, рекомендованных МГЭИК, рассчитана динамика аномалий урожайности пшеницы до 2050 года в исследуемых регионах
- Показано, что использование методик моделирования аномалий урожайности, базирующихся на отборе наиболее статистически достоверных из всего набора построенных регрессий, позволяет отказать от априорных предпосылок и гипотез, являющихся источниками неопределенности в прогностических оценках. Точность таких моделей существенно превосходит точность регрессий, базирующихся на априорных предпосылках
- Расчеты динамики аномалий урожайности, проведенные с использованием некоторых модельных сценариев изменений климата третьего поколения, показывают определенную согласованность, поэтому привлечение климатических сценариев, рекомендованных в 4-ом отчете МГЭИК, представляется весьма актуальным

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в следующих работах в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК.

- 1 Павловский АА Изменения климата и повторяемость экстремальных гидротермических явлений // Вестник СПбГУ, 2006 Сер 7 Вып 3 С 88—94

Другие публикации

- 2 Павловский АА, Савватеев СП Методы оценки агроклиматических последствий антропогенного глобального потепления // В сб Труды итоговой сессии Ученого совета Российского государственного гидрометеорологического университета 23—25 января 2005 СПб, 2005а С 66—67

- 3 Павловский А А, Менжулин Г В, Петерсон Г Н Особенности изменений климата Санкт-Петербурга и других крупных городов Европы в историческом прошлом и в настоящее время Материалы научной конференции «Экология Санкт-Петербурга и его окрестностей» 5—7 декабря 2005 г СПб, 2005 С 16—17
- 4 Павловский А А, Менжулин Г В, Петерсон Г Н, Савватеев С П Глобальное потепление и повторяемость экстремальных гидротермических явлений // В сб Погода и биосистемы материалы международной конференции 11—14 октября 2006г СПб Астерион, 2006 С 70—71

Отпечатано с готового оригинал-макета в ЦНИТ «АСТЕРИОН»
Заказ 379 Подписано в печать 06 11 2007 Бумага офсетная
Формат 60×84¹/₁₆ Объем 1,5 п. л Тираж 100 экз
Санкт-Петербург, 191015, а/я 83, тел /факс (812) 275-73-00, 970-35-70
E-mail asterion@asterion.ru