

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
«ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ  
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ МЕТЕОРОЛОГИИ»

*На правах рукописи*

**ПАВЛОВА Вера Николаевна**

**ПРОДУКТИВНОСТЬ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР В РОССИИ  
ПРИ ИЗМЕНЕНИИ АГРОКЛИМАТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ  
В 20–21 ВЕКАХ**

25.00.30 — Метеорология, климатология, агрометеорология

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
доктора географических наук

Москва — 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении «Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной метеорологии» (ФГБУ «ВНИИСХМ») в лаборатории физико-математического моделирования продуктивности агроэкосистем и агроклиматического мониторинга.

Официальные  
оппоненты:

**Ольчев Александр Валентинович,**  
доктор биологических наук, профессор, ведущий научный  
сотрудник Московского государственного университета  
им. М. В. Ломоносова (МГУ им. М. В. Ломоносова), г. Москва

**Переведенцев Юрий Петрович,**  
доктор географических наук, профессор, заведующий кафедрой  
метеорологии, климатологии и экологии атмосферы Института  
экологии и природопользования ФГАОУ ВО «Казанский  
(Приволжский) федеральный университет», г. Казань

**Сухова Мария Геннадьевна,**  
доктор географических наук, доцент, проректор по научной  
и инновационной деятельности, профессор ФГБОУ ВПО «Горно-  
Алтайский государственный университет», г. Горно-Алтайск

Ведущая  
организация:

Институт географии Российской академии наук (ИГРАН),  
г. Москва

Защита диссертации состоится **22 сентября 2021 г. в 15 часов**  
на заседании диссертационного совета по защите докторских и кандидатских  
диссертаций Д 327.003.01 при ФГБУ «Гидрометеорологический научно-  
исследовательский центр Российской Федерации» (ФГБУ «Гидрометцентр России»)  
по адресу: 123242, Россия, г. Москва, Большой Предтеченский переулок, д. 11–13.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБУ «Гидрометцентр  
России» и на сайте <https://meteoinfo.ru/disserboard>.

Автореферат разослан 23 августа 2021 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат физ.-мат. наук



М. В. Шатунова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

Оценка влияния изменений глобальной климатической системы на природно-экономический потенциал, состояние и продуктивность агросферы является одной из приоритетных научных проблем современности.

Климат играет существенную роль в формировании урожая, влияя на уровень, межгодовую изменчивость и пространственную структуру национального и мирового сельскохозяйственного производства.

Пахотное растениеводство уязвимо для целого ряда опасных агрометеорологических явлений (ОЯ): сезонных засух и волн жары, переувлажнения, периодов длительных затяжных дождей, губительных заморозков и др. Эта зависимость от погодных условий делает производство сельскохозяйственной продукции в России неустойчивым (Пасов, 1986; Liefert, 2002; Alcamo et al., 2007; Сиротенко и др., 1996; Вильфанд и Страшная, 2011; OECD, 2013; Клещенко и др., 2016). Отмечается, что наблюдаемые тенденции изменения годовой и сезонной средней температуры воздуха к повышению уже оказали существенное негативное влияние на валовые сборы урожаев зерна (Страшная и др., 2011; Lobell et al., 2011). Наблюдается увеличение засушливости в вегетационный период в большинстве сельскохозяйственных регионов, в том числе в основных регионах производства зерновых культур (Первый и Второй оценочные доклады, 2008, 2014). Ожидается, что тенденция к потеплению и связанные с ней климатические и агроклиматические изменения будут продолжаться и в будущем (IPCC, 2001, 2007, 2013–2014; Груза, Ранькова, 2012; Hansen et al., 2001; Катцов, Школьник и др., 2016, 2017; Переведенцев и др., 2013, 2017; Шерстюков, 2008, 2012; Бардин, 2011; Елисеев и др., 2011).

Актуальность исследований, связанных с оценкой последствий изменений климата для сельского хозяйства России, объясняется несколькими причинами. Во-первых, Россия стала ведущим экспортером на мировом рынке зерна в последние годы (FAO, 2016; USDA-FAS, 2016). Растущие цены на зерно в мире увеличивают доход государства, и ведущие позиции по экспорту пшеницы необходимо сохранить. Во-вторых, основные массивы пахотных земель России (около 60 %) расположены в районах рискованного и критического земледелия. Получение устойчивых урожаев в этой зоне является большой проблемой. Губительные засухи, сильные и продолжительные дожди и другие опасные явления являются основной причиной крупнейшей в мировом масштабе междугодичной изменчивости урожаев зерновых культур в России (Алпатьев, 1954; Дроздов, 1980; Кислов и др., 2008; Вильфанд и др., 2010; Фролов, Страшная,

2011; Золотокрылин и др., 2014; Киселёв и др., 2016; Доклад о климатических рисках ..., 2017; и др.).

Оценки агроклиматических ресурсов в крупных регионах при наблюдаемом и ожидаемом изменении климата представлены в современных исследованиях (Сиротенко, Павлова и др., 1995, 2007; Сиротенко, Грингоф, 2006; Сиптиц, 2005; Кислов и др., 2008; Ольчев и др., 2009, 2015; Сиротенко, Романенков, 2009; Тарасова, Шульгин, 2012; Усков, 2014; Asseng et al., 2013, 2015; Pavlova et al., 2014, 2018; Lioubimtseva et al., 2015; Киселёв и др., 2016; Суркова, 2017; Mueller et al., 2016).

Проблема оценки отклика продуктивности сельскохозяйственных культур на изменение агроклиматических ресурсов не может считаться решённой. Это обусловлено как неопределённостью климатических сценариев, постоянно развивающихся и обновляющихся, так и уровнем сложности и пространственного разрешения моделей продуктивности агроэкосистем. В результате отклики агроклиматической системы на антропогенное воздействие моделируются с большей или меньшей степенью неопределённости.

В данной работе представлена разработанная автором имитационная система Климат-Почва-Урожай, позволяющая оценивать изменения агроклиматических ресурсов и продуктивности зерновых культур в земледельческой зоне России с учётом многообразия её почвенно-климатических условий по данным инструментальных наблюдений (метеорологических, почвенных, агрохимических и др.). На основе разработанных автором методов оцениваются климатические риски при возделывании зерновых культур и адаптационный потенциал зернопроизводящих регионов при изменении климата.

**Объект исследования:** зерновые культуры земледельческой зоны России.

**Предмет исследования:** тенденции изменений продуктивности зерновых культур при изменении агроклиматических ресурсов.

**Цель работы:** оценить тенденции изменений продуктивности зерновых культур при изменении агроклиматических ресурсов земледельческой зоны России с использованием метода имитационного моделирования. Дать прогноз возможной климатически обусловленной урожайности зерновых культур в 21 веке.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Исследовать особенности наблюдаемых изменений гидрометеорологических показателей в 20–21 веках, характеризующих агроклиматические ресурсы земледельческой зоны России, по агрегированным (федеральный округ), региональным (край, область, республика) и точечным оценкам.

2. Выполнить идентификацию и верификацию (проверку адекватности) имитационной системы Климат-Почва-Урожай (КПУ) по данным наблюдений. Обосновать пригодность системы КПУ для комплексной оценки влияния изменений агроклиматических ресурсов на продуктивность зерновых культур.

3. Разработать технологию регулярного агроклиматического мониторинга для оценки текущего состояния агроклиматических ресурсов земледельческой зоны России. Определить тенденции изменения климатически обусловленной урожайности и биоклиматического потенциала (БКП) территории при наблюдаемых изменениях агроклиматических ресурсов.

4. Исследовать и оценить влияние прогнозируемых изменений климата в 21 веке на агроклиматические ресурсы и продуктивность основных зерновых культур с использованием сценариев, полученных на основе современных моделей глобальной циркуляции атмосферы и океана.

5. Разработать технологию вероятностной оценки урожайности зерновых культур при изменении агроклиматических ресурсов в 21 веке методом имитационного моделирования с использованием ансамбля реализаций метеорологических полей по региональной климатической модели (РКМ).

6. Определить современные географические аналоги агроклиматических условий земледельческих регионов к середине 21 века при глобальном потеплении. Сформировать информативную систему показателей для выбора аналогов с использованием имитационной системы КПУ.

7. Разработать и реализовать метод оценки климатических рисков возделывания зерновых культур для ранжирования территорий по уровню рисков крупных неурожаев.

8. Разработать метод оценки адаптационного потенциала зернопроизводящих регионов к изменениям климата. Дать количественную оценку эффективности предлагаемых мер адаптации в региональном масштабе.

9. Разработать средства визуализации системы показателей, характеризующих агроклиматические ресурсы и продуктивность сельскохозяйственных культур с использованием ГИС-технологий.

### **Научная новизна**

Впервые получены статистически значимые количественные оценки изменений продуктивности основных зерновых культур и биоклиматического потенциала на территории России при изменении агроклиматических ресурсов за период глобального потепления.

Впервые даётся прогноз изменений климатически обусловленной урожайности зерновых культур в 21 веке по наиболее вероятным климатическим

проекциям для различных сценариев антропогенных воздействий (эмиссии парниковых газов).

Впервые реализован вероятностный подход к оценке климатически обусловленной урожайности зерновых культур при изменении агроклиматических ресурсов в 21 веке методом имитационного моделирования с использованием ансамбля реализаций метеорологических полей по региональной климатической модели.

Впервые разработан и реализован метод оценки климатических рисков при возделывании зерновых культур с учётом частоты неблагоприятных метеорологических явлений и степени уязвимости территории.

Впервые разработан метод оценки адаптационного потенциала зернового сектора агросферы к изменениям агроклиматических ресурсов, детализированный по субъектам РФ и базирующийся на авторской технологии оценки последствий изменений климата.

Впервые определены пространственные и временные агроклиматические аналоги территорий при изменении климата по совокупности агрометеорологических показателей для оценки возможного изменения биоклиматического потенциала зернопроизводящих регионов в 21 веке.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Имитационная система Климат-Почва-Урожай, реализованная на основе современного поколения динамических моделей продукционного процесса и использующая данные инструментальных наблюдений за климатом, почвами и сельскохозяйственными культурами, воспроизводит современное состояние и изменчивость агроклиматических ресурсов земледельческой зоны России для разных масштабов (федеральный округ, регион, муниципальный район) даёт статистически значимую оценку тенденций их изменений в будущем.

2. Изменения агроклиматических ресурсов на территории земледельческой зоны России связаны с прогнозируемой тенденцией к потеплению в 21 веке. Наиболее чувствительными к изменению климата окажутся основные зернопроизводящие регионы, где следует ожидать снижения продуктивности зерновых культур при сохранении текущего уровня культуры земледелия.

3. Результаты исследований биоклиматического потенциала в земледельческой зоне Европейской части (ЕЧ) России и установленные в ходе численных экспериментов основные факторы его роста — увеличение тепловых ресурсов и рост продолжительности периода вегетации. На фоне прогнозируемого роста засушливости климата биоклиматический потенциал территории растёт в центральных и северо-западных регионах ЕЧ России.

4. Отсутствие роста климатически обусловленной урожайности в основных зернопроизводящих регионах ЕЧ России с 1998 г. по 2017 г. вызвано аридизацией и напряжённостью термического режима вегетационного периода зерновых культур. Положительные тренды фактической урожайности за этот же период обусловлены улучшением агротехнологий возделывания зерновых культур и достижениями отечественной селекции — внедрением высокоурожайных сортов и гибридов.

5. Прогнозные оценки, полученные с помощью ансамблевых расчётов по региональной климатической модели и имитационной системы КПУ, показывают статистически значимое снижение продуктивности зерновых культур относительно современного уровня и рост числа лет с экстремальными гидрометеорологическими условиями к середине 21 века.

### **Научная и практическая значимость работы**

Научная и практическая значимость работы состоит в использовании её результатов при подготовке «Стратегического прогноза ...» (2005), Первого (Росгидромет, 2008) и Второго (Росгидромет, 2014) оценочных докладов об изменении климата и его последствиях на территории РФ, Доклада о климатических рисках (2017), Национального доклада «Глобальный климат и почвенный покров России: оценка рисков и эколого-экономических последствий деградации земель. Адаптивные системы и технологии рационального природопользования» (2018, 2020). Полученные материалы и оценки предоставляются при обновлении национальных оценок воздействия изменения климата (Седьмое Национальное сообщение и Третий двухгодичный доклад РФ — отчётные документы по РКИК ООН и Киотскому протоколу, 2016). Научные положения оценочных Докладов используются при разработке национальных программ развития аграрной отрасли экономики.

Ежегодные комплексные оценки современных тенденций изменения агроклиматических условий в земледельческой зоне России, рассчитанные по разработанной автором технологии, используются в оперативном агрометеорологическом обеспечении Росгидрометом органов власти и управления агропромышленным комплексом, в аналитических материалах и справках, и размещаются в разделе «Агроклиматические условия» в ежегодном «Докладе об особенностях климата на территории РФ» (<http://climatechange.igce.ru/index.php>).

Оценки степени неблагоприятности территорий субъектов РФ по отношению к двум опасным явлениям — «засуха» и «переувлажнение» — в 2016–2020 гг. направлялись в органы управления АПК России.

Получены авторские свидетельства на разработанные программные средства: «Стохастическая модель генерации суточных метеорологических пара-

метров по их среднемесячным значениям» (2015), «Динамическая модель продуктивности яровой пшеницы в степной зоне России и Казахстана» (2016), «Расчёт индексов (показателей) для оценки агроклиматических ресурсов территории при изменении климата» (2017).

### **Достоверность и апробация результатов**

Все опубликованные и представленные в диссертации результаты получены на общедоступном фактическом материале с использованием стандартных методов анализа и могут воспроизводиться другими исследователями. Общим подходом в работе является сравнение результатов модельных расчётов с данными фактических наблюдений и другими опубликованными материалами.

Основные результаты диссертационной работы докладывались на 20 международных, 16 Всероссийских и ведомственных конференциях Росгидромета и РАН в 2003–2019 гг., в том числе:

на Всемирной конференции по изменению климата (Москва, 2003); на международных совещаниях по проекту «Application of Bayesian Inference updating index-based insurance design» Швейцарского Национального Фонда SNF (Алма-Ата, 2010; Цюрих, 2011, 2012, 2013); на Международном семинаре «Математические модели в теоретической экологии и земледелии» (Санкт-Петербург, 2014); на Международной конференции «Сельское хозяйство и климатические изменения в странах с переходной экономикой» (IAMO Forum, Германия, 2015); на научных конференциях с международным участием «Математическое моделирование в экологии» (Пушино, 2009–2016); на 23-й сессии Конференции Сторон Рамочной конвенции ООН об изменении климата (Германия, Бонн, 2017); на Второй Всероссийской конференции «Почвенные и земельные ресурсы: состояние, оценка, использование» (Москва, 2017); в Межведомственном научно-экспертном совете «Глобальный климат и рациональное природопользование: нуль-эмиссия и нуль-деградация почв России» (Москва, 2017); в Российском Зерновом Союзе «Grain Session» (Москва, 2018).

### **Личный вклад автора**

Диссертационная работа является итогом исследований, выполнявшихся автором с 1975 г. во Всероссийском научно-исследовательском институте сельскохозяйственной метеорологии (ВНИИСХМ) в рамках научных программ и планов Росгидромета и Федеральных целевых программ.

Автору принадлежит формулировка цели работы, постановка задач и программы исследований, выполнение численных экспериментов и их интерпретация. В диссертационной работе представлены результаты тех исследований, вклад автора в которые был достаточно важным на этапах от постановки



задачи до её реализации. Участие в создании динамической модели продуктивности агроэкосистем, её идентификации и верификации осуществлялось в ходе совместной работы с проф. О. Д. Сиротенко. Разработка имитационной системы Климат-Почва-Урожай и её программная реализация выполнена автором.

### **Публикации по теме диссертации**

По теме диссертации опубликовано более 130 работ. Из них разделы в 13 коллективных монографиях; 35 статей в рецензируемых научных журналах (из которых 28 — в изданиях ВАК, рекомендуемых для публикации результатов диссертационных работ; 7 — в иностранных изданиях); 29 статей в сборниках и специальных выпусках; более 30 — работы в сборниках тезисов российских и международных конференций. Кроме того, автором получены свидетельства о регистрации 3 объектов интеллектуальной деятельности.

### **Благодарности**

Автор благодарен светлой памяти д. ф.-м. н., профессору Олегу Дмитриевичу Сиротенко и к. г. н. Елене Владимировне Абашиной за многолетнюю и всестороннюю поддержку и сотрудничество. За помощь и поддержку автор выражает искреннюю благодарность д. г. н., профессору А. Д. Клещенко, д. б. н., профессору И. Г. Грингофу, д. б. н. В. А. Романенкову. Автор глубоко признателен д. б. н., профессору И. А. Шульгину, к. г. н. А. И. Страшной и к. г. н. О. К. Устиновой за консультации и обсуждение результатов работы, за сотрудничество и поддержку сотрудникам лаборатории математического моделирования агроэкосистем А. А. Карачёнковой, С. Е. Варчевой и Л. И. Богдановой.

### **Структура и объём диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, 7 глав, выводов, списка литературы, включающего 327 наименования, из которых 118 на иностранных языках. Работа изложена на 271 странице печатного текста, содержит 45 рисунков, 63 таблицы.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ ПО ГЛАВАМ**

Во **Введении** обоснована актуальность исследования, сформулированы его цель и задачи, положения, выносимые на защиту, методы исследования, а также научная новизна полученных результатов.

В **Главе 1** рассматриваются возможности имитационной системы Климат-Почва-Урожай (КПУ) как основного инструмента для оценки и мониторин-

га агроклиматических ресурсов и продуктивности сельскохозяйственных культур в земледельческой зоне России. Обсуждается методическая основа системы, описываются её структура, основные блоки динамической модели Погода-Урожай и информационная база.

В разделе 1.1 приведён обзор работ, связанных с оценкой влияния наблюдаемых изменений глобального климата на агроклиматические ресурсы и продуктивность сельского хозяйства. Значительный вклад в развитие исследований по поиску прямых статистических связей между входными и выходными данными системы среда-растение внесли Ф. Ф. Давитая, А. М. Шульгин, Ю. И. Чирков, Е. С. Уланова, Л. А. Разумова, А. А. Моисейчик, А. П. Федосеев и др. Система агрометеорологического обеспечения сельского хозяйства до сих пор использует зависимости, выявленные в результате этих работ.

В настоящее время разработаны модели важнейших физиологических процессов растений: фотосинтеза, дыхания, роста, развития, минерального питания. Ведутся исследования процессов переноса радиации, тепла, влаги и других субстанций. Постановка и практическое решение задач расчёта (прогноза) водно-теплового режима и продуктивности агроэкосистем стали возможными благодаря работам М. И. Будыко (1956, 1977, 1980, 1987), А. И. Будаговского (1964), И. А. Шульгина (1973), С. О. Сиптица (1974), А. А. Ничипоровича (1977), Ю. К. Росса (1975), Е. П. Галямина (1981), Х. Г. Тооминга (1977), О. Д. Сиротенко (1981), Г. В. Менжулина (1984), Р. А. Полуэктова (1991) и других исследователей.

Исследование влияния ожидаемых в 21 веке изменений климата на продуктивность сельского хозяйства является одной из приоритетных прикладных задач современной агроклиматологии. Первые перспективные оценки изменений климата были построены на базе палеоклиматических сценариев (Будыко и др., 1976, 1979, 1981). Одновременно во ВНИИСХМ были начаты работы по оценке последствий изменений климата — первые оценки изменений продуктивности сельскохозяйственных культур при реализации палеоклиматического сценария были получены нами в соавторстве с О. Д. Сиротенко (НИР, 1992 г.).

Стремление к созданию модели климатической системы привело к разработке ансамблевого подхода — инструмента для сглаживания погрешностей моделирования (Murphy et al., 2004; Shukla et al., 2006; Meehl et al., 2007; Мелешко, Катцов и др., 2008; Shkolnic et al., 2017). В настоящее время динамическое моделирование продукционного процесса является общепринятым методологическим подходом при решении многих прикладных задач в агрометеорологии. Современные исследования (Wechsung et al., 2008; Ortiz-Bobea and Just, 2012) показывают, что динамические модели имеют предпочтение при оценке влияния изменений климата на сельское хозяйство.

Из современных моделей и систем поддержки принятия решений в земледелии отметим: AGROTOOL (Полуэктов и др., 1980, 2006, 2012; Топаж, 2009), управляемую Агропродовольственную систему (Сиптиц, 2005), WOFOST (van Dijen et al., 1989), SIRIUS (Jamieson et al., 1998), DSSAT (Jones et al., 2003; Hoogenboom et al., 2012) и CropSyst (Stöckle et al., 2003).

Основные научные результаты по оценке последствий наблюдаемых и ожидаемых в 21 веке изменений климата для сельского хозяйства России представлены в работах: Сиротенко и Павлова, 1994; Сиротенко, Абашина, Павлова, 1995, 1997; Сиротенко и Романенков, 2007; Кислов и др., 2008; Менжулин, Саватеев, 2010; Оценка макроэкономических последствий ... (под ред. Катцова), 2011; Методы оценки последствий ... (под ред. Семенова), 2012; Lobell and Field, 2007, 2011; Alcamo et al., 2007; Дронин и Кириленко, 2008, 2012; Павлова и Попова, 2014; Tchebakova et al., 2016; Доклад о климатических рисках на территории Российской Федерации (под ред. Катцова и Порфирьева), 2017; Belyaeva and Bokusheva, 2018; Pavlova et al., 2019.

В разделе 1.2 рассматривается динамическая модель Погода-Урожай.

Модель Погода-Урожай включает три взаимосвязанные субмодели, в каждой из которых решается соответствующая система уравнений для расчёта: (1) динамики фитомассы отдельных органов растений как результат моделирования процессов фотосинтеза, дыхания, роста, распада, развития и старения; (2) динамики влагозапасов почвы как результата моделирования процессов инфильтрации, испарения, транспирации и корневого поглощения воды; (3) динамики минерального азота почвы путём моделирования процессов нитрификации, денитрификации, корневого поглощения и вымывания.

В субмодель роста включена оценка прямого воздействия CO<sub>2</sub> и увеличения тропосферного озона на поверхности растений путём регулирования устьичного сопротивления.

Совокупность входных данных, необходимых для одного прогона модели Погода-Урожай в заданной точке (пункте), включает следующие группы:

1. географическая широта и долгота пункта;
2. агрогидрологические свойства почвы (полная влагоёмкость; влажность завядания по 10-сантиметровым слоям до глубины 1 м, мм; относительная влажность на нижней границе расчётного слоя почвы, %);
3. агрохимические свойства почвы (содержание щелочногидролизуемого азота и нитратов в мг/см<sup>2</sup> по слоям 0–20, 20–50 и 50–100 см);
4. фенологическая информация (дата возобновления вегетации или дата перехода температуры воздуха через 5 °С весной; даты колошения и восковой спелости; суммы эффективных температур для межфазных периодов);

5. начальная влажность почвы на дату возобновления вегетации по десятисантиметровым слоям до глубины 1 м, мм;
6. сроки и дозы внесения минеральных и органических удобрений;
7. метеорологические данные: среднесуточная температура воздуха, °С; среднесуточный дефицит влажности воздуха, мб; число часов солнечного сияния за сутки, час; суточная сумма осадков, мм.

Динамическая модель Погода-Урожай позволяет моделировать процесс формирования урожая, задавая метеорологические условия с суточным шагом по времени от всходов до уборки урожая. При этом рассчитываются запасы влаги в почве (по слоям 0–20, 0–50 и 0–100 см), фактическое и потенциальное испарение, дефицит испарения, биометрические показатели посева — площадь листьев, биомасса и высота растений, а также масса растений по органам и урожайность сельскохозяйственной культуры, и другие показатели.

В разделе 1.3 представлена структура имитационной системы КПУ и обсуждаются методические основы оценки влияния изменений климатических и не климатических факторов на продуктивность сельскохозяйственных культур.

Имитационная система КПУ (рис. 1), ориентированная на обслуживание сельского хозяйства, разрабатывалась под руководством проф. О. Д. Сиротенко коллективом авторов (О. Д. Сиротенко, В. Н. Павлова, Е. В. Абашина), начиная с 80-х годов 20 века (Сиротенко, Павлова, 1986, 2012; Павлова, 2009, 2020).

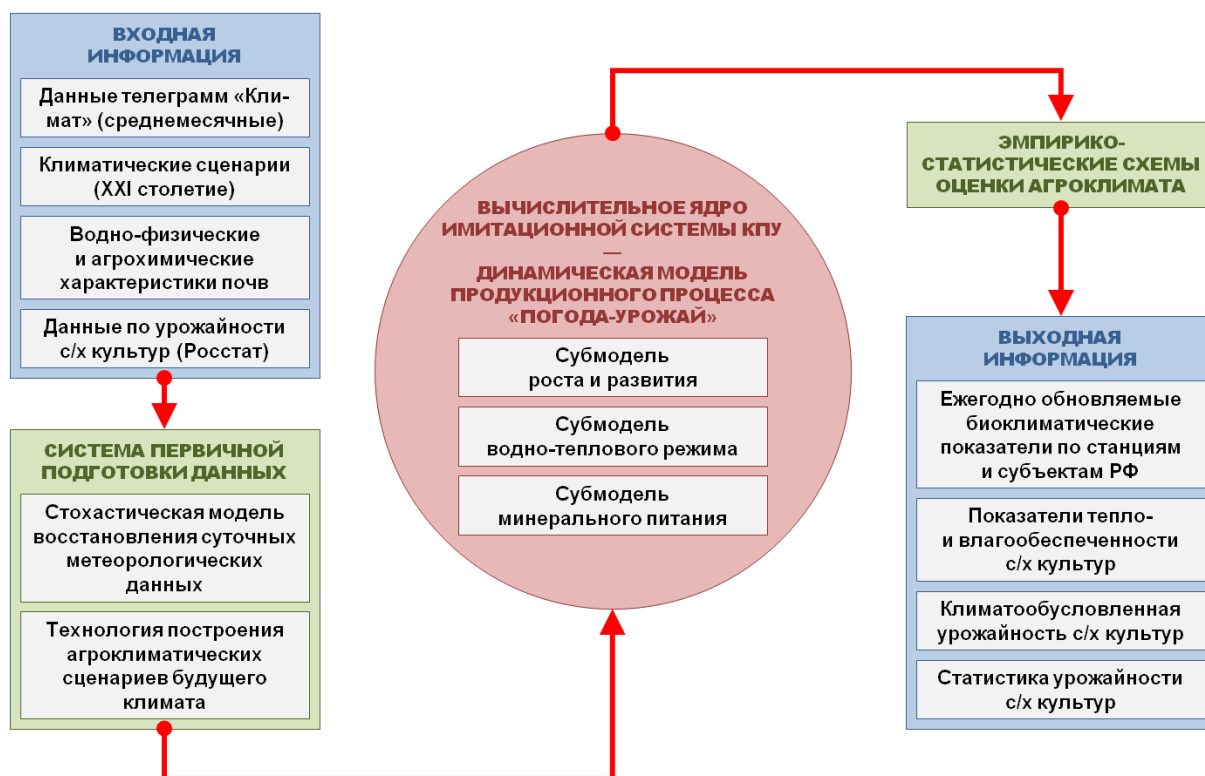


Рисунок 1. Структура имитационной системы Климат-Почва-Урожай

Система КПУ может функционировать в режимах: *ретроспективный* — по фактическим данным наблюдений с начала 50-х годов 20 века до настоящего времени; *оперативный* — по ежедекадным данным; *прогностический* — по ансамблю средне- и долгосрочных сценариев ожидаемых изменений климата с учётом антропогенных воздействий на климатическую систему.

В разделе 1.4 приводится описание разработанной автором стохастической модели генерации суточных рядов метеопараметров как входных данных для модели Погода-Урожай на основе их среднемесячных значений с учётом авто- и кросскорреляционных связей между ними (Сиротенко и Павлова, 1986, 2001; Павлова, 1986).

При расчёте суточных значений климатических норм годового хода метеорологических величин используется аппроксимация тригонометрическим полиномом вида:

$$\varphi(\tau) = A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \left[ A_k \cos\left(\frac{2\pi k}{365} \tau\right) + B_k \sin\left(\frac{2\pi k}{365} \tau\right) \right],$$

где  $\tau=0, 1, 2, \dots, 364$  — порядковый номер суток;  $A_0, A_k, B_k$  — коэффициенты, рассчитываемые на основании среднемесячных значений метеорологических величин.

Процедура распознавания дней с осадками построена на основе соотношения правдоподобия:

$$\lambda = \frac{1 + \frac{N_2}{N_2 + 1} (\bar{x} - x^{(2)})^* C^{-1} (\bar{x} - x^{(2)})}{1 + \frac{N_1}{N_1 + 1} (\bar{x} - x^{(1)})^* C^{-1} (\bar{x} - x^{(1)})},$$

где  $\bar{x}(x_1, x_2, x_3)$  — вектор, компонентами которого являются температура воздуха ( $x_1$ ), дефицит влажности воздуха ( $x_2$ ), число часов солнечного сияния ( $x_3$ );  $N_1$  и  $N_2$  — число дней с осадками и без осадков;  $x^{(1)}$  и  $x^{(2)}$  — векторы средних значений предикторов для дней с осадками и без осадков соответственно;  $C$  — корреляционная матрица вектора  $\bar{x}$ .

Отношение правдоподобия  $\lambda$  интерпретируется как мера выпадения осадков в данные сутки.

В разделе 1.5 описывается параметризованный блок для расчёта оценки влияния парниковых газов на текущие характеристики продукционного процесса, разработанный автором для имитационной системы КПУ. Прямое влияние  $\text{CO}_2$  на суммарный фотосинтез посева в модели Погода-Урожай рассчитывается с помощью модифицированной формулы Шартье. С целью оценки влия-

ния повышенных уровней концентрации  $\text{CO}_2$  на физиологические процессы введена «углекислотная» зависимость для устьичного сопротивления:

$$\frac{1}{r_s} = \frac{1}{r_s^*} \left[ 1 - (1 - ae^{bVPD}) \frac{\bar{C} - \bar{C}^*}{\bar{C}^*} \right],$$

где  $r_s^*$  — устьичное сопротивление при современной концентрации  $\text{CO}_2$ ;  $\bar{C}$ ,  $\bar{C}^*$  — современная и прогнозируемая концентрации  $\text{CO}_2$  соответственно;  $VPD$  — дефицит влажности воздуха;  $a$ ,  $b$  — константы.

Показано, что реакция общей сухой массы растений на увеличение концентрации  $\text{CO}_2$  по расчётным и экспериментальным данным достаточно хорошо согласуются (Павлова, 1986).

В разделе 1.6 обсуждаются вопросы калибровки и результаты валидации (проверки адекватности) системы КПУ. На рис. 2 представлена динамика фактической и моделируемой урожайности яровой пшеницы за последние десять лет (2007–2016 гг.) в трёх основных зернопроизводящих областях Приволжского ФО. Воспроизводится как средний уровень урожайности, так и её межгодовая изменчивость. В экстремально засушливом 2010 г. моделируемая урожайность не превышает 2–4 ц/га.

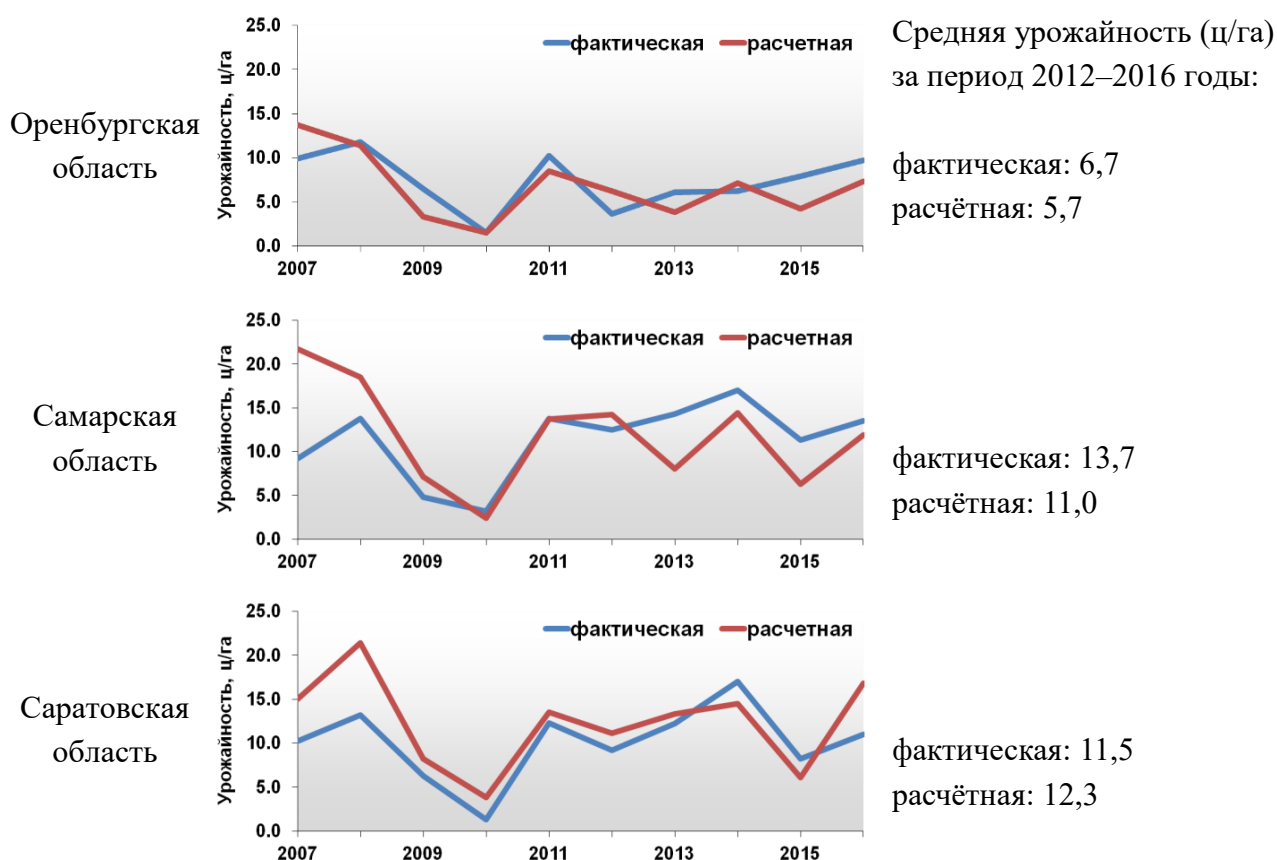


Рисунок 2. Динамика фактической (Росстат) и расчётной (система КПУ) урожайности яровой пшеницы за период 2007–2016 гг.

В **Главе 2** представлена разработанная автором система мониторинга для оценки состояния агроклиматических ресурсов и продуктивности при наблюдаемых изменениях климата на основе системы КПУ.

Раздел 2.1 содержит описание информационной базы системы КПУ.

В состав информационной базы включены данные разного временного масштаба: среднесуточные, среднемесячные, оперативные данные декадных телеграмм (система «Прометей»), климатические сценарии проекта сравнения глобальных климатических моделей CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project) и региональной климатической модели (РКМ).

В информационной базе представлена информация о преобладающих типах почв: показатели водно-физических и агрохимических свойств, фенологическая информация по зерновым культурам (яровая и озимая пшеница, яровой ячмень, озимая рожь), доступная статистика по урожайности и посевным площадям (данные Росстата). Для её поддержки используются разработанные автором программные средства контроля данных, восстановления пропусков в рядах наблюдений, методы интерполяции и др.

В разделе 2.2 представлена разработанная система мониторинга состояния агроклиматических ресурсов и продуктивности сельскохозяйственных культур на основе КПУ. Система мониторинга включает:

– ежегодные оценки тенденций изменения, изменчивости и экстремальности агроклиматических показателей (индексов) и показателей продуктивности в заданных точках на основе данных стационарных наблюдений с последующим картографированием (визуализацией) результатов расчётов.

– оперативный ежедекадный мониторинг условий формирования урожайности сельскохозяйственных культур, включая оценки ожидаемой урожайности и потерь, обусловленных аномальными погодными условиями каждой декады. Количественно оценивается степень аномальности как неблагоприятных, так и благоприятных гидрометеорологических условий для формирования урожая. Формируются оценки весенних и осенних запасов влаги в почве и сельскохозяйственного года в целом.

Ниже представлен перечень основных агроклиматических и биоклиматических показателей, включённых в систему мониторинга состояния и изменения агроклиматических ресурсов территории.

*Показатели термических ресурсов:*

- суммы среднесуточных значений температуры воздуха за период со среднесуточной температурой, превышающей 0, 5 и 10 °С, °С;
- даты устойчивого перехода среднесуточной температуры воздуха через 0, 5 и 10 °С весной и осенью;

- продолжительность периодов календарного года со среднесуточной температурой, превышающей 0, 5 и 10 °С, сутки;
- средняя температура воздуха самого холодного (января) и самого тёплого (июля) месяцев календарного года, °С.

*Показатели ресурсов влаги:*

- фактическое и потенциальное испарение, мм;
- дефицит испарения или разность между испаряемостью и фактическим суммарным испарением за вегетационный период, мм;
- запасы продуктивной влаги в почве по слоям 0–20, 0–50 и 0–100 см от даты всходов до созревания, мм.

Этот набор дополняют классические агрометеорологические показатели: индекс сухости М. И. Будыко (ИС), гидротермический коэффициент Г. Т. Селянинова (ГТК), коэффициент увлажнения Ю. И. Чиркова (КУ) и др.

*Показатели, характеризующие экстремальность гидрометеорологических условий:*

- оценки климатических рисков при производстве сельскохозяйственных культур и оценки уязвимости территории;
- оценки вероятности крупных неурожаев.

*Показатели продуктивности:*

- фактическая урожайность;
- климатически обусловленная урожайность (расчётная урожайность в имитационной системе КПУ);
- биоклиматический потенциал (БКП), характеризующий биологическую продуктивность в условиях данного климата.

Автором реализованы алгоритмы, идентифицирующие временные тренды, скользящие оценки средних, дисперсий, коэффициентов авто- и кросскорреляций и их робастные аналоги для моделируемой системы климатических показателей.

В разделе 2.3 анализируются оценки наблюдаемых изменений тепло- и влагообеспеченности агросферы и биоклиматический потенциал территории земледельческой зоны России, рассчитанные в рамках системы мониторинга.

Представлены результаты расчётов и анализ оценок трендов показателей теплообеспеченности и влагообеспеченности зерновых культур для земледельческой зоны России за период глобального потепления (1976–2017 гг.), последние двадцать лет (1998–2017 гг.) и базовый период (1961–1990 гг.).

Приведём основные результаты. На ЕЧ России скорость роста основного агроклиматического показателя — суммы температуры воздуха за период с



температурой выше 10 °С — за период глобального потепления изменяется от 100 °С/10 лет (Приволжский ФО) до 150 °С/10 лет (Южный ФО). В Сибирском и Дальневосточном ФО соответствующие оценки тренда не превышают 70 °С/10 лет. В среднем для территории России оценка линейной скорости роста сумм активных температур за этот период составляет ~90 °С/10 лет (рис. 3).

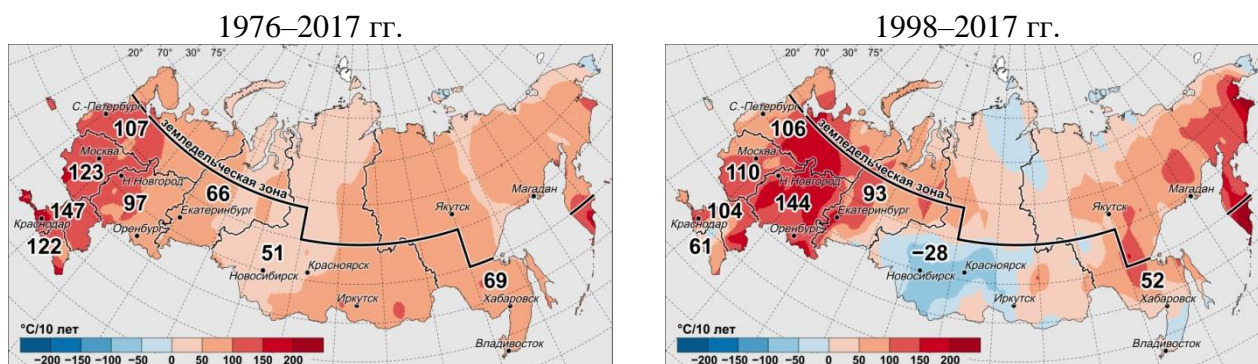


Рисунок 3. Средняя скорость изменения (тренд) сумм температур воздуха выше 10 °С на территории России за периоды 1976–2017 и 1998–2017 гг. (в °С/10 лет)

Оценки линейных трендов температуры января, которая наряду с высотой снежного покрова определяет риски вымерзания озимых зерновых культур, за период 1976–2017 гг. остаются положительными в зернопроизводящих регионах практически повсеместно. За последние двадцать лет (1998–2017 гг.) скорость роста температуры января замедлилась, хотя и незначительно.

Практически на всей территории земледельческой зоны России преобладает положительная тенденция к росту весенних осадков. Тренды летних осадков отрицательны во всех ФО на территории ЕЧ России, за исключением Северо-Западного ФО, и положительны на Азиатской части (АЧ) России: в Уральском, Сибирском и Дальневосточном ФО. За последние двадцать лет на преобладающей части земледельческой зоны степень засушливости растёт во все сезоны, за исключением весны.

На рис. 4 представлено пространственное распределение средних значений гидротермического коэффициента Селянинова (ГТК), рассчитанных за 1996–2005 и 2006–2015 гг., которые также подтверждают этот вывод.

Тенденции запасов влаги в пахотном слое почвы в мае носят разнонаправленный характер в разных природно-климатических зонах. Выделяются территории Северо-Кавказского, Южного и Уральского ФО, где запасы влаги в почве в мае растут. В среднем за вегетационный период на ЕЧ России наблюдаются тенденции к росту засушливости территории — более интенсивные в центральных областях, на востоке и юго-востоке и выраженные слабее на севере и юге.

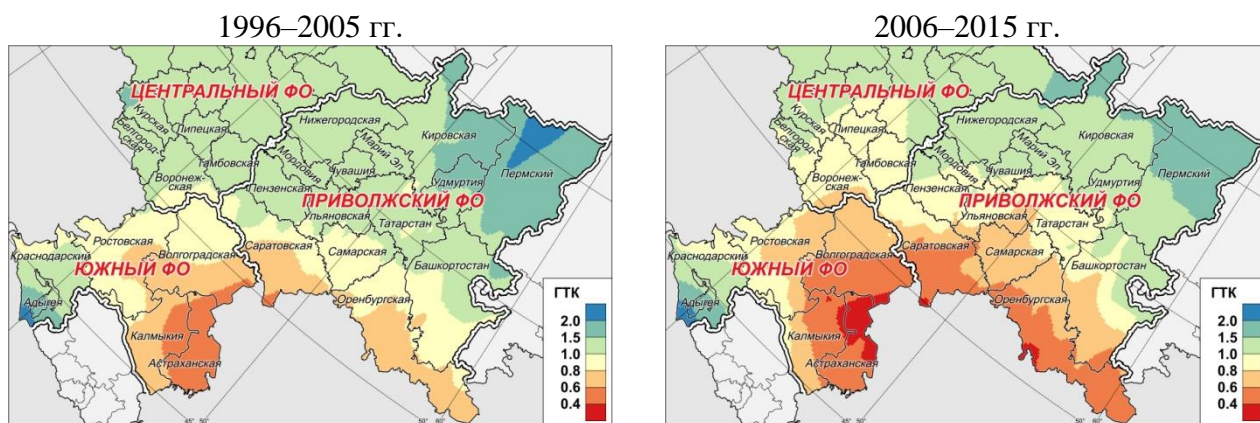


Рисунок 4. Средние значения ГТК за вегетационный период яровой пшеницы за 1996–2005 и 2006–2015 гг. на территории Центрального, Приволжского и Южного федеральных округов

В разделе 2.4 обсуждаются вопросы, связанные с оценкой биоклиматического потенциала (БКП) территории. Методика расчёта БКП по осреднённым данным наблюдений, приписанным к географическому центру области (края, республики), представлена в наших работах (Сиротенко, Павлова и др., 1995, 1997, 2007) и в коллективной монографии (Гордеев и др., 2008, 2012).

Расчёт значений БКП начинается с даты устойчивого перехода температуры воздуха через  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  весной и продолжается до достижения посевом листового индекса ( $LAI$ ), равного 5. Затем посев «скашивается», а рост растений продолжается вплоть до достижения очередного  $LAI=5$ . Процесс нарастания биомассы прекращается при переходе температуры воздуха через  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  осенью. Суммарный урожай за год (выраженный в сухом весе), представляет собой оценку БКП в расчётной точке.

Значения биоклиматического потенциала рассчитываются для четырёх уровней интенсивности земледелия: (1)  $БКП_0$  — при естественном увлажнении почвы и минеральном питании растений; (2)  $БКП_W$  — при достаточном увлажнении почвы; (3)  $БКП_N$  — при достаточном минеральном питании; (4)  $БКП_{WN}$  — при сочетании достаточного увлажнения и минерального питания.

В данной работе представлена усовершенствованная автором схема расчёта БКП, позволяющая проследить его динамику в земледельческих регионах России за разные периоды глобального потепления. Схема включает калибровку и верификацию имитационной системы КПУ и последующую оценку значений БКП территории (в ц/га) зерносеющих регионов России по отдельным точкам сети наблюдений Росгидромета за отдельные годы с последующим осреднением по федеральным округам.

На рис. 5 представлено пространственное распределение значений БКП в зернопроизводящих регионах ЕЧ России, рассчитанных с помощью КПУ.

Приведём основной вывод: биоклиматический потенциал земледельческой зоны России за последние два десятилетия повысился в среднем на 4 % относительно базового периода. Снижение уровня БКП из-за роста степени засушливости отмечается в Южном и Северо-Кавказском ФО (~12 %). В одном из основных зерновых регионов, Приволжском ФО, БКП понизился на 8 %.

Полученные нами результаты свидетельствуют, что уровень использования БКП увеличился до 35 % по данным расчётов за 2008–2017 гг. и значительно превысил оценку, полученную ранее (15 %) (Сиротенко и др., 2010).

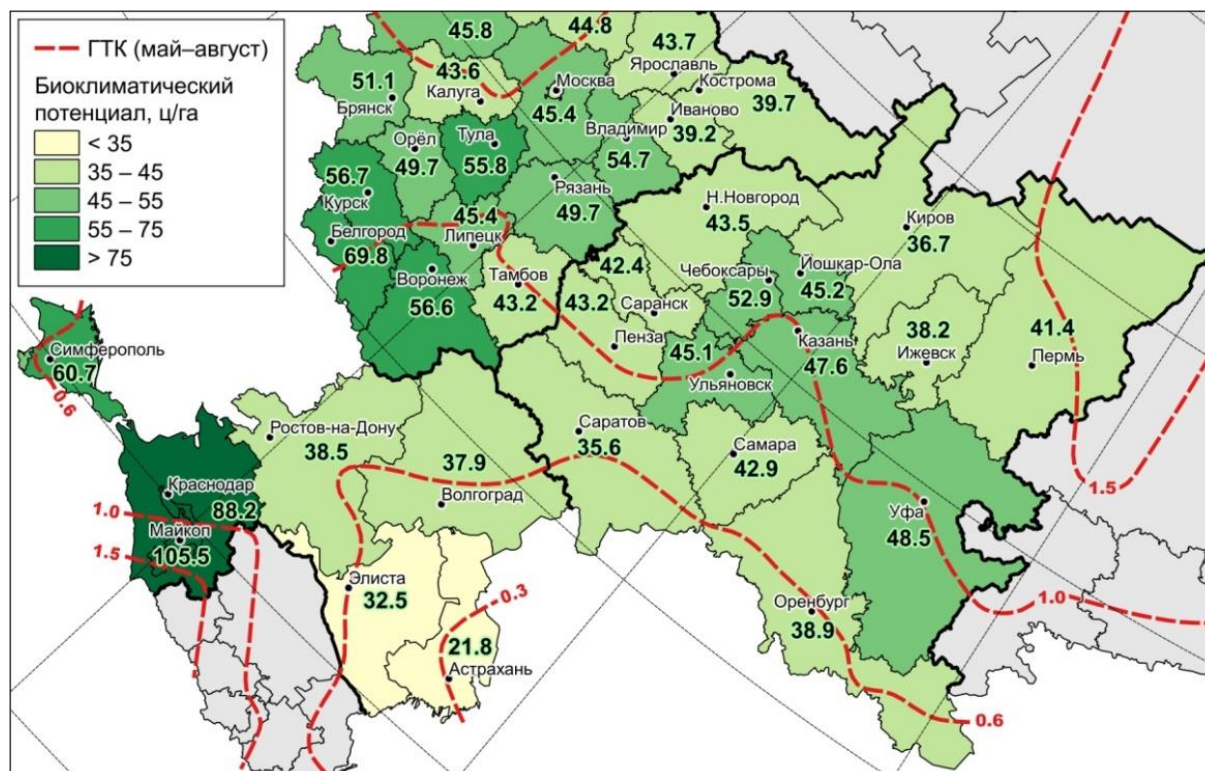


Рисунок 5. Средние значения БКП (ц/га) на территории Центрального, Приволжского и Южного ФО за период 1997–2016 гг.

В разделе 2.5 рассматриваются результаты оперативного агроклиматического мониторинга в 2017 г. (Павлова, раздел «Сельское хозяйство» Доклада об особенностях климата ..., 2017).

На рис. 6 представлены данные ежедекадного мониторинга агроклиматических условий формирования урожайности яровой пшеницы в 2017 г. в основных зернопроизводящих регионах ЕЧ России за период с 1 мая по 20 июля.

Мониторинг осуществляется в оперативном режиме ежедекадно и позволяет отслеживать складывающиеся агрометеорологические условия и оценивать степень аномальности как неблагоприятных, так и благоприятных условий для формирования урожая в течение вегетационного периода.

При значительных отклонениях синоптических процессов от нормы и угрозе возникновения опасных для производства зерновых культур гидроме-

теорологических явлений расчёты проводятся в ежесуточном режиме. Это обеспечивает точную временную привязку диагностируемого ОЯ — позволяет определить даты его начала и окончания.

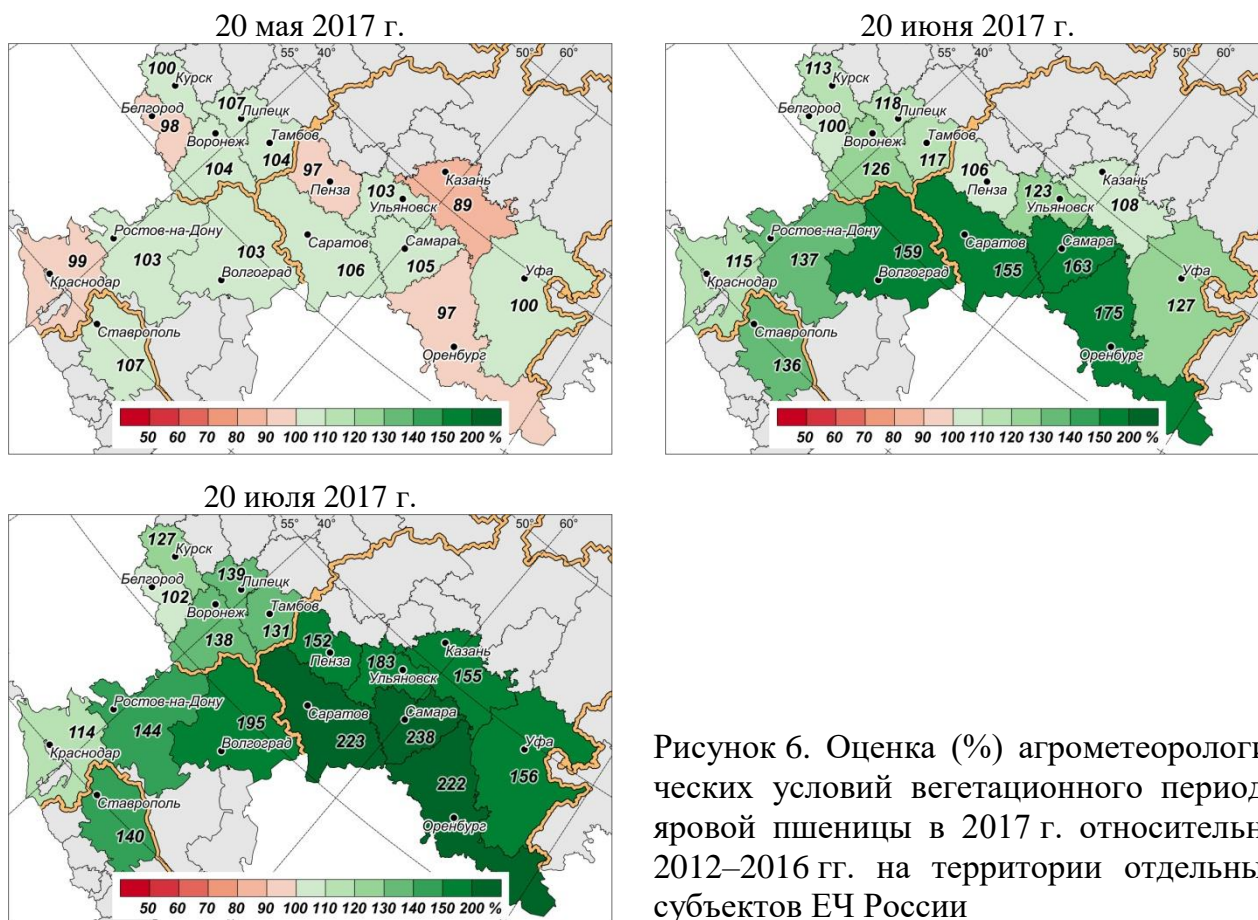


Рисунок 6. Оценка (%) агрометеорологических условий вегетационного периода яровой пшеницы в 2017 г. относительно 2012–2016 гг. на территории отдельных субъектов ЕЧ России

**Глава 3** посвящена оценке изменения продуктивности зерновых культур при наблюдаемых тенденциях изменений агроклиматических условий на территории сельскохозяйственной зоны России.

В разделе 3.1 представлены результаты анализа рядов фактической урожайности зерновых культур по данным Росстата и тенденций их изменений (линейные тренды) в основных зернопроизводящих регионах России.

Анализ рядов фактической урожайности основных зерновых культур за периоды 1976–2017 и 1998–2017 гг. позволяет сделать следующие выводы.

*Яровая пшеница.* Согласно расчётам за период 1998–2017 гг. максимальные положительные тренды урожайности яровой пшеницы наблюдаются в Центральном, Северо-Западном и Южном ФО и изменяются от 6,5 до 7,9 ц/га за 10 лет (табл. 1). Доля дисперсии, объясняемая трендом, достаточно высока и составляет от 51 до 77 %. В регионах с большим яровым клином — в Приволжском, Уральском и Сибирском ФО — знак тренда остаётся положительным, но меньшим по величине — от 2,0 до 3,2 ц/га за 10 лет. Соответствующий вклад

линейного тренда в дисперсию урожайности изменяется от 22 % в Приволжском ФО до 33 % в Сибирском ФО.

За четыре десятилетия (с 1976 г.) в среднем по России оценка линейного тренда урожайности яровой пшеницы ниже, чем за последние двадцать лет и составляет 1,9 ц/га/10 лет. При этом в Приволжском, Уральском и Дальневосточном ФО (38 % посевных площадей) оценки линейного тренда малы и статистически незначимы. В Сибирском ФО (47 % посевных площадей) оценка тренда статистически значима, но не велика (0,9 ц/га/10 лет).

Таблица 1. Статистические характеристики рядов урожайности яровой и озимой пшеницы за периоды 1998–2017 и 1976–2017 гг.

Федеральный округ	Период, гг.									
	1998–2017					1976–2017				
	<i>m</i> , ц/га	$\sigma$ , ц/га	<i>V</i> , %	<i>b</i> , ц/га/10 лет	<i>D</i> , %	<i>m</i> , ц/га	$\sigma$ , ц/га	<i>V</i> , %	<i>b</i> , ц/га/10 лет	<i>D</i> , %
<b>яровая пшеница</b>										
Северо-Западный	17,5	5,3	30	7,8*	77	14,7	4,9	33	2,7*	47
Центральный	18,0	5,9	33	7,9*	63	15,8	5,0	32	2,5*	38
Приволжский	14,1	4,0	28	3,2*	22	13,6	3,4	25	0,8	8
Южный	13,4	5,4	40	6,5*	51	11,8	4,6	39	1,8*	25
Сев.-Кавказский	20,0	6,1	30	8,6*	71	18,0	6,9	38	4,5*	31
Уральский	14,4	3,0	21	2,4*	23	13,7	3,0	22	0,5	5
Сибирский	13,9	2,1	15	2,0*	33	13,1	2,1	16	0,9*	26
Дальневосточный	13,3	3,5	26	4,4*	56	12,2	3,1	25	1,1	18
<b>Россия</b>	<b>15,4</b>	<b>4,3</b>	<b>28</b>	<b>5,3*</b>	<b>51</b>	<b>13,5</b>	<b>4,2</b>	<b>31</b>	<b>1,9*</b>	<b>30</b>
<b>озимая пшеница</b>										
Северо-Западный	22,6	7,7	34	11,2*	75	18,5	6,8	37	4,0*	50
Центральный	23,9	6,0	25	8,2*	66	20,7	5,8	28	3,3*	47
Приволжский	18,9	5,3	28	3,1	12	18,1	5,2	29	1,2	8
Южный	27,5	6,5	24	7,7*	49	25,4	5,8	23	2,1*	20
Сев.-Кавказский	28,1	5,2	19	6,9*	61	26,9	4,9	18	1,7	18
Уральский	16,1	4,6	29	3,6*	21	15,5	4,6	29	0,8	5
Сибирский	17,2	4,8	28	3,8*	21	16,6	4,7	29	0,5	2
Дальневосточный	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
<b>Россия</b>	<b>21,7</b>	<b>5,7</b>	<b>27</b>	<b>6,3</b>	<b>44</b>	<b>20,0</b>	<b>5,3</b>	<b>28</b>	<b>1,9</b>	<b>21</b>

Примечание: \* — 5 % уровень значимости; *m* — средняя урожайность, ц/га;  $\sigma$  — среднее квадратическое отклонение, ц/га; *V* — коэффициент вариации, %; *b* — коэффициент линейного тренда, ц/га/10 лет; *D* — доля дисперсии, обусловленная трендом, %.

*Озимая пшеница.* Наблюдается положительный тренд урожайности озимой пшеницы и озимой ржи в основных регионах их возделывания — Южном,

Приволжском ФО и в чернозёмных областях Центрального ФО — и за весь период глобального потепления (с 1976 г.), и за более короткий период (с 1998 г.) (табл. 1). По расчётам за период 1998–2017 гг. высокие оценки скорости роста отмечаются на территории Центрального и Южного ФО и составляют 8,2 и 7,7 ц/га/10 лет. Вклад линейного тренда в общую дисперсию урожайности здесь высок и составляет 66 и 49 % соответственно.

Из анализа данных по урожайности озимой пшеницы следует, что в период с 1976 по 2017 гг. на большей части территории её возделывания (80 % посевных площадей) в Центральном, Южном и Сибирском ФО урожайность росла, и скорость её роста составляла примерно 2 ц/га/10 лет. В Приволжском ФО (17 % посевных площадей) оценки тренда статистически не значимы.

По агрегированным данным в основных зерновых регионах, Южном и Приволжском ФО, в результате расчётов выявлено, что при общей положительной тенденции к росту урожайности пшеницы в 1998–2017 гг. её уровень стабилизировался после 2005 г.

Отметим, что за последние десятилетия снижение тенденции к росту урожайности зерновых культур наблюдается и во многих регионах мира (Brisson et al., 2010; Lobell et al., 2011; Ray et al., 2012).

В целом, за период с 1976 по 2017 гг. урожайность зерновых и зернобобовых росла со средней скоростью 2,1 ц/га/10 лет. В основном зернопроизводящем регионе, Приволжском ФО (~30 % площадей), оценки тренда статистически не значимы; в Южном и Сибирском ФО (40 % посевных площадей) линейные тренды статистически значимы и составляют 2,6 и 1,0 ц/га/10 лет соответственно.

В разделе 3.2 приведены результаты расчётов климатически обусловленной урожайности зерновых культур (не включающей технологический тренд) и анализируются её тренды за последние двадцать лет с 1998 г. по 2017 г. и за весь период глобального потепления с 1976 г. по 2017 г.

*Период 1998–2017 гг.* Рассчитанные в имитационной системе КПУ оценки показали, что тренды климатически обусловленной урожайности озимой и яровой пшеницы отрицательны в большинстве регионов исследуемой территории. Это свидетельство определенного ухудшения агроклиматических условий за последние двадцать лет. Максимальные отрицательные оценки трендов урожайности озимой и яровой пшеницы наблюдаются на юге Центрального и в Южном ФО, а также в юго-восточных областях Приволжского ФО (рис. 7).

*Период 1976–2017 гг.* Анализ трендов климатически обусловленной урожайности, рассчитанных за более чем 40 лет с 1976 г. по 2017 г. для субъектов РФ с большими посевными площадями (Оренбургская область, Республики Башкортостан и Татарстан, Саратовская и Самарская области), также не выявил

положительной тенденции к росту климатически обусловленной урожайности яровой пшеницы.

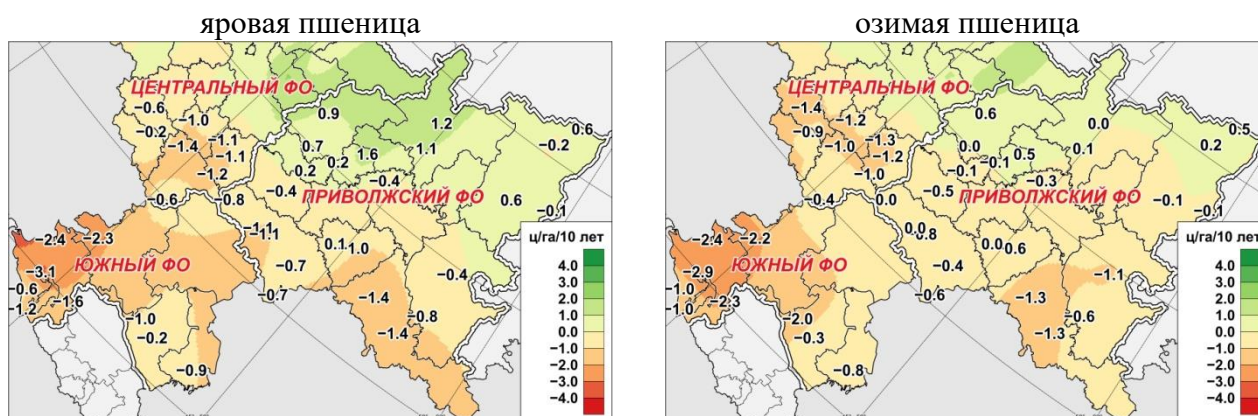


Рисунок 7. Пространственное распределение линейных трендов рядов климатически обусловленной урожайности яровой и озимой пшеницы по данным за период 1998–2017 гг. (в ц/га/10 лет)

Таким образом, есть основание утверждать, что положительные тренды фактической урожайности (данные Росстата) за последние два десятилетия в значительной степени обусловлены адаптацией систем землепользования к изменению климата (использование засухоустойчивых сортов, средств защиты, минеральных удобрений, применение влагосберегающих технологий и др.), а не улучшением агроклиматических условий за этот период.

Оценки трендов климатически обусловленной урожайности могут быть преобразованы в изменение величины валового сбора путём учёта динамики площадей в пределах того или иного интервала времени. Анализ полученных оценок показал, что без технологических достижений и других улучшений производственной практики валовый сбор озимой пшеницы оставался бы примерно постоянным в течение 1998–2017 гг., несмотря на значительное расширение обрабатываемой площади. Что касается яровой пшеницы, то предполагаемое сокращение валового сбора могло бы быть ещё более существенным.

Важный аспект проблемы отклика урожайности на изменение климата — выявление трендов агроклиматических показателей, определяющих те или иные тенденции изменений климатически обусловленной урожайности. Автором определён ряд статистически значимых предикторов (показателей) для отдельных регионов. На рис. 8 представлены агрегированные данные расчётов корреляционной связи трендов климатически обусловленной урожайности с трендами показателей в Центральном (чернозёмные области), Приволжском и Южном ФО за период с 2008 по 2017 гг.

С учётом выявленных взаимосвязей построены уравнения множественной регрессии, связывающие тренды климатически обусловленной урожайности

яровой и озимой пшеницы с трендами агроклиматических показателей для каждого из четырёх регионов.

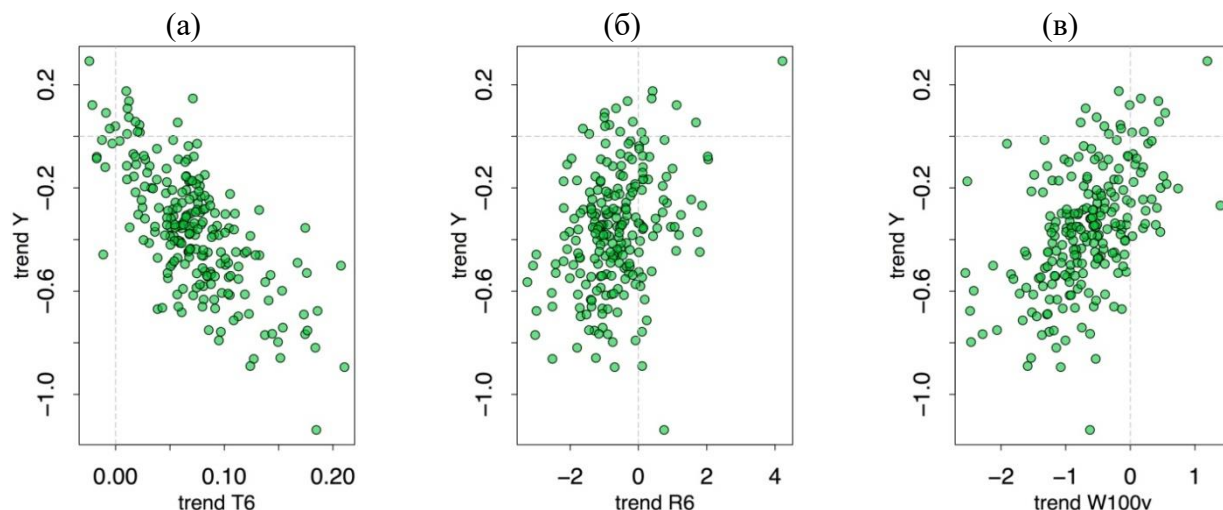


Рисунок 8. Корреляционное поле трендов климатически обусловленной урожайности яровой пшеницы ( $Y$ ) и трендов: (а) температуры июня ( $T6$ ), (б) осадков июня ( $R6$ ) и (в) влажности почвы на начало вегетации ( $W100v$ ). Расчёты по данным за период 2008–2017 гг.

Доля дисперсии, объясняющей тренд климатически обусловленной урожайности уравнением множественной регрессии, достаточно высокая и составляет 75–78 % ( $R^2=0,75–0,78$ ) (Павлова и др., 2020).

Так, на юге Приволжского ФО основной вклад в тренд климатически обусловленной урожайности яровой пшеницы вносят тренды температуры июня  $\tau_{T_6}$  (нормированная оценка  $\beta=-0,58$ ) и осадки вегетационного периода

$\tau_{R_{VEG}}$  ( $\beta=0,46$ ). В то же время, в Южном ФО на тренды климатически обусловленной урожайности озимой пшеницы значимо влияют тренды температуры мая  $\tau_{T_5}$  ( $\beta=-0,50$ ) и влажность почвы на дату возобновления вегетации весной  $\tau_{W_{100}}$  ( $\beta=0,30$ ).

В разделе 3.3 представлены оценки изменений климатически обусловленной урожайности яровой пшеницы с 1976 по 2017 гг. в масштабе десятилетий для всей земледельческой зоны России и по крупным зернопроизводящим регионам. Предложенная схема оценки позволяет уточнить и детализировать полученные ранее оценки на основе расчёта оценок линейного тренда (раздел 3.2).

В последних публикациях МГЭИК отмечается, что для основных сельскохозяйственных культур (пшеницы, риса и кукурузы) изменение климата без адаптации негативно скажется на их производстве при локальном повышении



температуры на 2 °С или более по сравнению с уровнем конца 20 века, хотя отдельные районы могут извлечь выгоду. В будущем изменение климата будет постоянно и негативно влиять на растениеводство в странах с низкими широтами, в то время как изменение климата может иметь положительные или отрицательные последствия в северных широтах (высокая степень достоверности).

Большинство климатических моделей предсказывает, что темпы потепления ближайших десятилетий будут аналогичны предыдущим темпам. В этой связи оценки изменений климатически обусловленной урожайности последних десятилетий имеют практическую значимость для её прогноза на ближайшие десятилетия. Предложенный подход позволяет дополнить и детализировать полученные ранее оценки на основе расчёта климатических трендов.

Анализ результатов моделирования в системе КПУ показал, что рост температуры воздуха за период вегетации яровой пшеницы в среднем за 2006–2015 гг. по сравнению с 1976–1985 гг. составляет от 1,6 до 2,3 °С в северо-западных областях ЕЧ и от 1,0 до 1,3 °С в центральных и южных областях. В Сибири и на Дальнем Востоке изменение температуры периода вегетации сохранялось в пределах её естественной изменчивости  $\sim -0,5...+0,5$  °С. Дефицит доступной влаги был особенно выражен в основных районах выращивания яровой пшеницы в южных и юго-восточных областях на ЕЧ России.

Анализ тенденций изменения климатически обусловленной урожайности яровой пшеницы по десятилетиям указывает на различную реакцию урожайности на изменение агроклиматических ресурсов в северных и южных регионах её произрастания. Оцениваемые воздействия варьируют значительно.

Результатом изменения агроклиматических ресурсов явилось снижение степени благоприятности условий для произрастания яровой пшеницы территорий юга ЕЧ за последнее десятилетие. За период с 2006 по 2015 год климатически обусловленная урожайность понизилась на 25–30 % в юго-восточных областях Приволжского ФО, в Южном ФО и чернозёмных областях Центрального ФО относительно 1961–1990 гг. В северных и северо-западных областях на ЕЧ России значимого снижения климатически обусловленной урожайности за последние три десятилетия не наблюдается (рис. 9).

В Восточной Сибири и на Дальнем Востоке снижение климатически обусловленной урожайности составило примерно 10 % (рис. 9). На Урале и в Западной Сибири тенденция к понижению менее незначительная — от 3 до 5 %. В целом по России, тенденции потепления обусловили снижение климатически обусловленной урожайности яровой пшеницы примерно на 10–12 % с 1976 по 2015 гг., т. е. темпы её снижения составили примерно 3 % за десятилетие (Павлова и др., 2020).

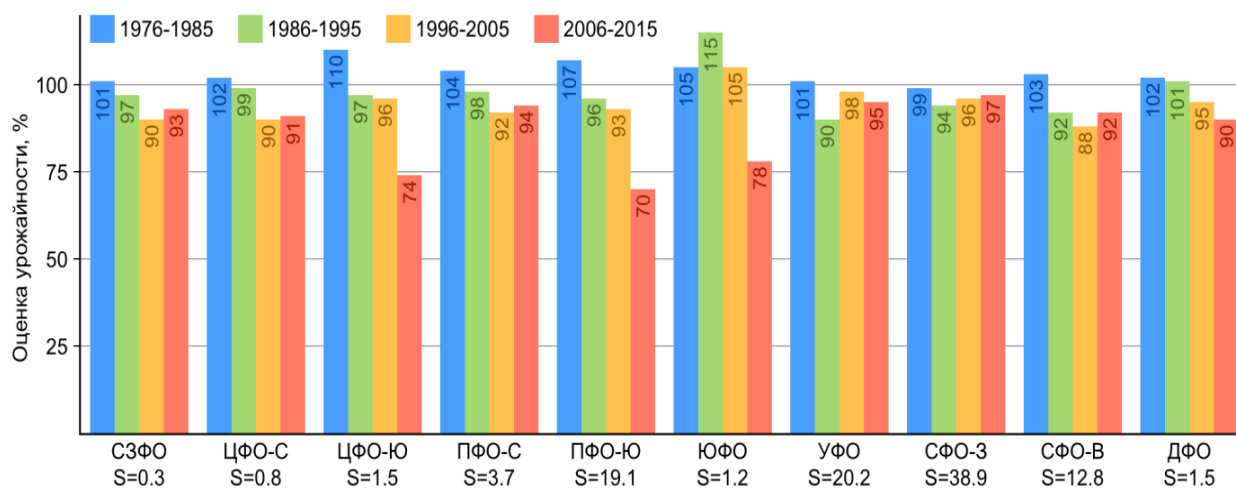


Рисунок 9. Оценка средней климатически обусловленной урожайности яровой пшеницы за периоды 1976–1985, 1986–1995, 1996–2005 и 2006–2015 гг. относительно средних значений за 1961–1990 гг. по отдельным регионам России (S — доля посевной площади в регионе от общей по РФ за 1996–2015 гг., %)

В разделе 3.5 обсуждаются вопросы климатически обусловленных изменений крупномасштабной пространственно-временной структуры урожайности зерновых культур и определяющих её климатических факторов.

В результате глобального потепления произошли существенные изменения в пространственно-временной структуре полей температуры и атмосферных осадков (Груза и Ранькова, 2012; Кислов и др., 2012). Естественно предположить, что крупномасштабные климатические изменения оказали влияние и на пространственно-временную структуру полей урожайности сельскохозяйственных культур.

Расчёты скользящих средних (по 20-летним периодам) элементов корреляционной матрицы температуры воздуха за апрель–август за 1955–2016 гг. выявили существенный рост синхронности колебаний температуры воздуха за тёплый период года на ЕЧ и АЧ России. Асинхронные связи температуры, характеризующиеся отрицательными коэффициентами корреляции в 1955–1980 гг., сменились синхронными в 1992–2016 гг. Выявлено ослабление отрицательной связи температуры тёплого периода года для ЕЧ и АЧ России.

Анализ корреляционных матриц рядов урожайности зерновых культур с исключённым технологическим трендом в разных регионах России выявил индуцированный глобальным потеплением рост синхронности колебаний междугодичной изменчивости этой урожайности по отдельным регионам. Средний коэффициент корреляционной матрицы возрос с 0,28 (1955–1980 гг.) до 0,46 (1992–2016 гг.). Заметно возросла степень синхронности колебаний средней урожайности на ЕЧ и АЧ России.

Расчитанные оценки роста синхронности колебаний позволяют заключить, что наблюдаемые изменения климата ведут к уменьшению взаимной ком-

пенсации связанных с засухами недоборов зерна в географически удалённых районах ЕЧ и АЧ России.

Одним из проявлений климатических изменений является увеличение во многих регионах степени изменчивости и экстремальности климата. Опасные явления, наблюдаемые в течение двух последних десятилетий, оказались более интенсивными и разрушительными, чем когда-либо (Доклад о климатических рисках, 2018). Поэтому необходимо использовать имеющийся объём информации об агроклиматических ресурсах как основу для активизации действий по уменьшению опасности бедствий и адаптации к ним.

В **Главе 4** представлены результаты оценки климатических рисков при производстве зерновых культур и оценки ущербов от опасных явлений (ОЯ) на территории земледельческой зоны России, полученные на основе методов, предложенных автором.

В разделе 4.1 излагается разработанный автором метод оценки уязвимости территории и климатических рисков при возделывании сельскохозяйственных культур.

Применительно к производству сельскохозяйственных культур климатический риск определяется как вероятность ожидаемых потерь урожайности, обусловленных взаимодействием неблагоприятных метеорологических факторов и уязвимостью субъекта.

В соответствии с этим определением формула для расчёта климатического риска ( $R$ ) имеет вид:

$$R = p \cdot V,$$

где  $V = 1 - Y / BCP$  — уязвимость (vulnerability) субъекта, подвергающегося воздействию ОЯ;  $p$  — вероятность ОЯ, %;  $BCP$  — БКП (bioclimatic potential) территории, ц/га;  $Y$  — урожайность зерновой культуры, ц/га.

Оценка климатических рисков для ОЯ «засуха» (РД Росгидромета 52.88.699, 2008) выполняется по величине порогового значения ГТК при засухах ( $ГТК \leq 0,6$ ) за период с мая по август, который охватывает период активной вегетации основных сельскохозяйственных культур.

На рис. 10 представлена картосхема оценок рисков недобора урожаев яровой и озимой пшеницы, рассчитанных для субъектов РФ (республик, краёв, областей), имеющих посевные площади под зерновыми и зернобобовыми культурами не менее 200 тыс. га.

На ЕЧ России зона высоких рисков неурожая яровой пшеницы охватывает большую территорию, чем для озимой пшеницы. Анализ оценок климатических рисков позволяет выделить территории, благоприятные для выращивания яровой и озимой пшеницы. Это Орловская, Тульская и Курская области

(Центральный ФО); Кировская и Нижегородская области, Республики Удмуртия и Чувашия (Приволжский ФО). По мере продвижения к югу риски недобора урожаев возрастают из-за увеличения повторяемости засух.

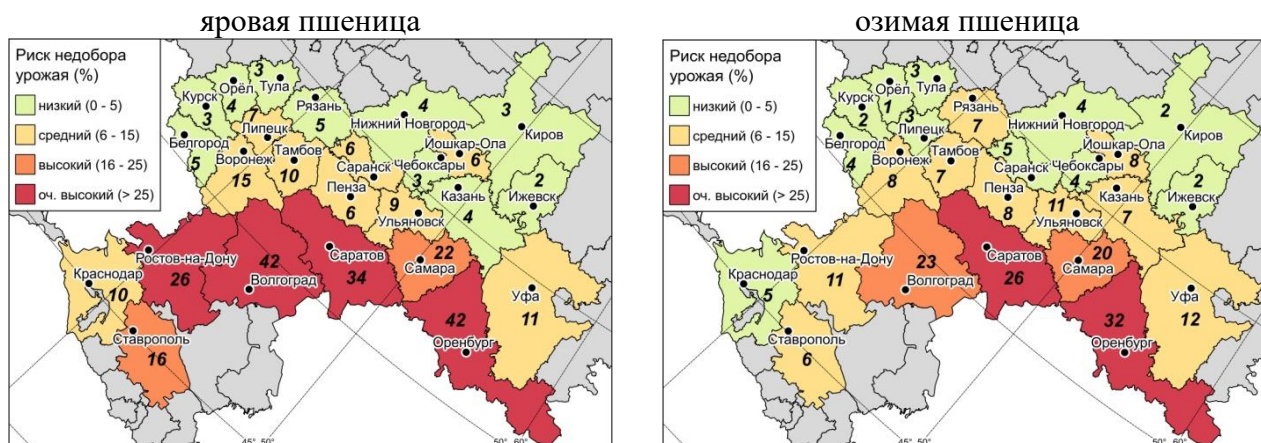


Рисунок 10. Картограмма распределения климатических рисков недобора урожая яровой и озимой пшеницы (по данным за 1994–2013 гг.)

Схема расчётов риска и уязвимости, разработанная автором, включена в систему действующего агроклиматического мониторинга. Полученные количественные оценки рисков неурожая позволяют полнее учитывать природно-экономические условия территории, необходимые для принятия агротехнологических решений в сельскохозяйственной практике, а также в системе агрострахования.

В разделе 4.2 анализируются оценки ущерба от неблагоприятных гидрометеорологических явлений.

Из агрометеорологических ОЯ наибольший ущерб зерновому хозяйству России наносят засухи, т. к. более 60 % всех посевных площадей основных зерновых культур расположено в зонах недостаточного и неустойчивого увлажнения. Сводка сильных обширных засух продолжительностью не менее двух месяцев, охватывающих три крупных региона и более, сформирована за период с 1891 г. по 2010 г. (Страшная и др., 2011).

Показателем устойчивости производства является не только её средняя урожайность, но и её межгодовая изменчивость. С помощью имитационной системы КПУ рассчитано число лет с урожайностью яровой пшеницы ниже некоторого критического уровня ( $N_{cr}$ ).

Сравнительный анализ числа лет с крупными потерями климатически обусловленной урожайности показал, что число неурожайных лет за период 1995–2014 гг. выросло по сравнению с 1961–1980 гг. (табл. 2). В целом за последние двадцать лет практически на всей исследуемой территории (22 субъекта ЕЧ России с посевной площадью яровой пшеницы более 200 тыс. га) частота

повторяемости неурожайных лет с потерями выше 40 % осталась либо практически без изменений, либо увеличилась (табл. 2). Выделены регионы с максимальной частотой неурожайных лет — Оренбургская, Самарская и Саратовская области (20–30 % или 2–3 случая за 10 лет).

Таблица 2. Число случаев со значительным недобором зерна ( $N_{cr}$ ) по градациям потерь за периоды 1961–1980 и 1995–2014 гг. и относительные посевные площади яровой пшеницы

Область, республика	Относительная посевная площадь $S_{95-14}/S_{61-80}$ , %	Число неурожайных лет ( $N_{cr}$ ) за период			
		1961–1980 гг.		1995–2014 гг.	
		градации потерь урожайности			
		20–40 %	>40 %	20–40 %	>40 %
Оренбургская	53	3	2	2	6
Башкортостан	52	1	1	3	2
Татарстан	67	3	2	3	2
Саратовская	24	3	2	4	4
Самарская	27	4	2	1	5
Пензенская	36	4	1	4	2

Посевные площади под яровой пшеницей к настоящему времени значительно сократились по сравнению с базовым периодом (табл. 2). Очевидно, что процесс сокращения площадей связан не только с экономическими причинами, но и в значительной мере объясняется изменением агрометеорологической ситуации в условиях происходящих изменений климата.

Для сравнительной оценки интенсивности засух и ущерба от них выбраны годы с локальными минимумами урожайности, начиная с 1951 г. по 2013 г. (табл. 3). Результаты расчётов показывают, что засуха на ЕЧ России в 2010 г. привела к недобору 50 % урожая яровой пшеницы. Эта величина превышает потери за счёт засух в 1972 и 1981 гг., составивших соответственно 43 и 49 % от уровня урожая 2008 г.

В разделе 4.3 рассматриваются ОЯ «засуха» и «переувлажнение» и приводятся результаты оценки степени неблагоприятности территорий для производства сельскохозяйственных культур.

При непосредственном участии автора создана автоматизированная технология оценки степени неблагоприятности территорий по субъектам РФ. Технология включает сбор, обработку и контроль данных наблюдений за температурой воздуха и осадками по станциям-корреспондентам декадных агрометеорологических телеграмм КН-21 (с 1995 г.), а также расчёт ГТК, выполняемый по данным сетевых наблюдений (~1070 метеостанций сети Гидрометслужбы) в пределах территории 8 ФО и 85 субъектов (краёв, областей и республик) РФ.

Таблица 3. Оценки потерь урожайности яровой пшеницы в засушливые годы в % относительно 2008 г. Расчёты в имитационной системе КПУ.

Федеральный округ	Годы								
	1951	1972	1975	1981	1995	1998	2010	2012	2013
Северо-Западный	1	-40	2	-24	-10	-14	-36	-7	-21
Центральный	-16	-46	-36	-53	-26	-34	-51	-20	-35
Приволжский	-22	-36	-44	-58	-29	-60	-62	-28	-39
Южный	-18	-52	-49	-60	-30	-43	-55	-55	-62
<b>ЕЧ России</b>	<b>-14</b>	<b>-43</b>	<b>-32</b>	<b>-49</b>	<b>-24</b>	<b>-38</b>	<b>-53</b>	<b>-26</b>	<b>-38</b>

Построение картосхем и определение территорий для заданных критериев засушливости и переувлажнения осуществляется в геоинформационной системе QGIS (рис.11). Результаты расчётов передаются в Минсельхоз РФ в оперативном режиме.



Рисунок 11. Картосхема границ районов с неблагоприятными агрометеорологическими условиями: сильными засухам с вероятностью 50 % и более в период май–август и переувлажнением с вероятностью 30 % и более в период август–сентябрь (по данным за 1998–2017 гг.)

Разработанная технология позволяет выявить территории, подверженные тем или иным опасным явлениям по заданным критериям в масштабах муниципальных образований, краёв, областей и республик. Полученные оценки степени неблагоприятности территорий используются при принятии стратегических решений в сфере сельскохозяйственного производства, агрострахования и дру-

гих видов поддержки сельхозпроизводителей, которая осуществляется центральными и местными органами власти.

**Глава 5** посвящена оценке влияния изменений климата на агроклиматические ресурсы и продуктивность сельскохозяйственных культур в 21 веке.

В разделе 5.1 представлены оценки прогнозируемых изменений агроклиматических ресурсов и продуктивности растениеводства в 21 веке по климатическим сценариям моделей общей циркуляции атмосферы и океана — МОЦА(О).

Полной глобальной сводкой результатов исследований по проблеме изменений климата являются Оценочные доклады МГЭИК (2001, 2007, 2014) и Росгидромета (2008, 2014). В многообразии климатических моделей, используемых в настоящее время в исследовании изменений климата, выделяются модели разной степени сложности — от простых климатических моделей до МОЦА(О). Достаточно эффективным инструментом сглаживания погрешностей моделирования является ансамблевый подход (Murphy et al., 2004; Shukla et al., 2006; Мелешко и Катцов, 2010; и др.).

В климатических моделях, участвующих в 5-й фазе Проекта сравнения совместных моделей (CMIP5), используется новый набор 4-х сценариев антропогенных воздействий — репрезентативные траектории концентраций (Representative Concentration Pathways, RCP) (Taylor et al., 2012; Peters, 2012). По оценкам (Clarke et al., 2009; van Vuuren et al., 2011) концентрация парниковых газов к 2100 году достигнет величины 420 ppm (RCP2.6), 570 ppm (RCP4.5), 670 ppm (RCP6.0), и 925 ppm (RCP8.5). Нами приняты к рассмотрению сценарии RCP4.5 («умеренный») и RCP8.5 («жесткий»).

В качестве исходных данных для расчётов в системе КПУ использовались результаты моделирования климата на основе МОЦА(О) из проектов сравнения климатических моделей CMIP3 (Meehl et al., 2007) и CMIP5 (Taylor et al., 2012). Рассматривались сценарии: GFDL CM3 (US, Princeton, Geographical Dynamics Laboratory), HAD CM3 (UK, Hadley Atmospheric Model), ANS 31 (ансамблевый сценарий, полученный усреднением результатов моделирования по 31 МОЦА(О), ГГО им. А. И. Воейкова) для временных срезов 2011–2030 (S2), 2034–2053 (S3, RCP4.5) или 2028–2047 (S3, RCP8.5), 2041–2060 (S4), 2080–2099 гг. (S5).

Для получения значений параметров локального масштаба (температуры воздуха и осадков) в заданных узлах нерегулярной сетки осуществлялся статистический даунскейлинг выходных данных МОЦА(О), а его результаты служили входными данными для системы КПУ.

Согласно сценарию ANS 31 (RCP4.5) температура тёплого периода года в среднем по территории России увеличится на 0,8; 1,3 и 1,9 °С к началу, сере-

дине и концу столетия. Теплообеспеченность сельскохозяйственных культур повысится повсеместно: суммы активных температур в течение столетия возрастут на ~280 °С к 2030 г. и на ~700 °С к 2099 г.; начало вегетационного периода сдвинется на более ранние сроки — от 5 до 11 суток. В целом продолжительность периода вегетации зерновых культур сократится, а тёплого безморозного периода увеличится от 10 (2030 г.) до 25 суток (2099 г.), что улучшит условия проведения сельскохозяйственных работ и уменьшит потери при уборке урожая.

В результате потепления (RCP8.5) границы районов возможного растениеводства продвинулись в России к северу (северная граница зоны растениеводства проходит по изолинии сумм температур 1300 °С за период с температурой  $\geq 5$  °С) и практически вся территория России станет пригодной для пахотного земледелия.

При реализации сценария ANS 31 на территории земледельческой зоны России можно ожидать роста засушливости, сопровождаемого уменьшением ГТК и увеличением потенциального и фактического испарения. Снижение запасов влаги в почве на начало вегетации в пахотном слое и на середину июля в метровом слое практически на всей рассматриваемой территории (за исключением отдельных областей Сибирского ФО) также указывает на относительное ухудшение условий влагообеспеченности посевов.

В разделе 5.1.4 анализируются результаты расчётов изменений продуктивности зерновых культур и биоклиматического потенциала при прогнозируемых изменениях климата в 21 веке.

По данной проблеме опубликовано большое количество работ. На основе модельных оценок рассчитываются агроклиматические индексы, позволяющие оценить связь между климатом и продуктивностью сельскохозяйственных культур (Qian et al., 2010; Trnka et al., 2011; Trnka et al., 2014; Lioubimtseva et al., 2015). С помощью регрессионных моделей достигнут заметный прогресс в оценке влияния изменений климата (Lobell and Burke, 2010; Deschênes and Greenstone, 2007; Schlenker and Roberts, 2009; Ortiz-Bobea and Just, 2012; Tchebakova et al., 2016). Среди подобных моделей можно выделить интегрированную региональную модель (IRMA) (Wechsung et al., 2008) для оценки уязвимости сельскохозяйственного производства в Восточной Германии при изменении климата.

Оценки реакции показателей продуктивности — урожайности зерновых культур и биоклиматического потенциала территории, а также показателей агроклиматических ресурсов при ожидаемых изменениях климата, получены с использованием имитационной системы КПУ. Приведём основной вывод: глобальное потепление при реализации сценариев ANS 31, GFDL и HAD CM3 при



умеренном антропогенном воздействии (RCP4.5) вызовет практически повсеместно рост БКП на всей территории России (табл. 4), за исключением Приволжского ФО, где в начале и середине столетия величина БКП может понизиться на 7–10 %.

Таблица 4. Ожидаемые изменения биоклиматического потенциала и урожайности зерновых культур в 21 веке на территории России по данным трёх климатических сценариев (сценарии эмиссии RCP4.5 и RCP8.5) (Второй оценочный доклад ..., 2014)

Сценарий изменения климата	Изменения, %							
	RCP4.5				RCP8.5			
	S2	S3	S4	S5	S2	S3	S4	S5
<b>биоклиматический потенциал</b>								
ANS 31	8,2	12,3	15,6	25,1	7,7	11,1	10,5	-0,8
GFDL CM3	7,3	10,2	9,0	23,9	3,9	7,2	3,4	-6,6
HAD CM3	10,4	11,0	15,0	15,1	16,9	22,7	24,0	-4,2
<b>урожайность зерновых культур</b>								
ANS 31	3,6	3,0	4,4	8,5	2,2	1,1	-2,4	-17,6
GFDL CM3	3,8	3,4	-0,2	12,0	-0,9	-4,5	-8,4	-16,4
HAD CM3	6,0	-1,1	1,1	-1,7	5,7	4,3	9,2	-19,7

Результаты моделирования в системе КПУ показали, что к середине столетия БКП современной земледельческой зоны при естественном увлажнении и плодородии повысится на 10–12 %. Рост БКП будет более значительным на достаточно увлажнённой территории Дальневосточного и Северо-Западного ФО — от 25 до 40 %. Для земель с высоким уровнем плодородия (Южный ФО) оценки роста продуктивности БКП положительны: ~6 % (ANS 31), ~28 % (GFDL CM3) и ~12 % (HAD CM3).

Наряду с данными, свидетельствующими о положительной реакции БКП на ожидаемые изменения климата, можно ожидать негативных последствий. Важнейшее из них — снижение уровня урожайности зерновых культур в основных зернопроизводящих регионах (в центрально-чернозёмных и степных районах земледельческой зоны) из-за роста степени засушливости климата и ускорения наступления фазы созревания, вызванное повышенным температурным фоном вегетационного периода. Ожидаемое снижение продуктивности зерновых к концу столетия может достигнуть величины 16–20 % по сценариям ANS 31, GFDL и HAD CM3 (RCP8.5) (табл. 4).

Полученные результаты свидетельствуют, что сельское хозяйство России в силу разнообразия почвенно-климатических условий при своевременно принятых мерах адаптации располагает агроклиматическим резервом повышения продуктивности сельскохозяйственных культур. Отрицательный эффект влия-

ния изменений климата на зерновое хозяйство России может быть перекрыт, например, путём сокращения посевов зерновых в тех регионах, где ожидается уменьшение урожайности, и увеличением посевных площадей там, где ожидается её рост.

В разделе 5.2 представлены оценки показателей, характеризующих изменения агроклиматических ресурсов в земледельческой зоне, полученные в системе КПУ по данным региональной климатической модели (РКМ, ГГО).

РКМ имеет разрешение 25 км и охватывает всю территорию северо-восточной Евразии. Оценки изменений регионального климата на основе беспрецедентно большого ансамбля допускают вероятностную интерпретацию мезомасштабных климатических воздействий на сельское хозяйство (Shkolnik et al., 2017). Используются результаты 50 численных экспериментов при разных начальных условиях в атмосфере и на подстилающей поверхности суши для периодов: 2030–2039, 2050–2059 и 2090–2099 гг.

Разработанный автором комплекс программ преобразует модельные расчёты РКМ во входной поток имитационной системы КПУ. Для каждого элемента ансамбля РКМ (3 периода  $\times$  500 реализаций = 1500) рассчитываются начальные условия: фенологические даты (всходов, колошения, созревания), начала и окончания вегетационного периода, запасы влаги в почве по 10-см почвенным слоям на дату возобновления вегетации и дату всходов зерновых культур и др.

Согласно полученным оценкам в ближайшей перспективе в весенний период ожидается увеличение осадков на 10–15 % по сравнению с базовым периодом. В летний период вероятно их снижение — на 7–10 % в Центральном и Приволжском ФО. К середине и концу столетия эти тенденции сохранятся: увеличение осадков в весенний период и уменьшение в летний.

Размер ансамбля реализаций РКМ (1500 реализаций) позволяет получить вероятностные оценки изменений показателей гидротермического режима региона с высокой степенью статистической обеспеченности и оценить множество возможных вариаций климата, включая экстремальные.

Ожидаемые изменения агроклиматических показателей на ЕЧ России на 2030–2039, 2050–2059 и 2090–2099 гг. рассчитаны с использованием КПУ для средней по ансамблю реализаций и для двух модельных реализаций — самой влажной (гумидной) и самой засушливой (аридной).

Анализ показывает, что при реализации этого сценария процесс аридизации будет наблюдаться в Центральном и Приволжском ФО. Рост испаряемости приведёт к значительному увеличению дефицита испарения, что будет сопровождаться уменьшением запасов влаги в почве.

На рис. 12 представлено пространственное распределение значений агроклиматических показателей на середину 21 века. Разброс оценок для гумидной и аридной модельных реализаций указывает на значительный вклад естественной изменчивости климата в ошибку предсказания ансамблем будущих изменений агроклиматических показателей.

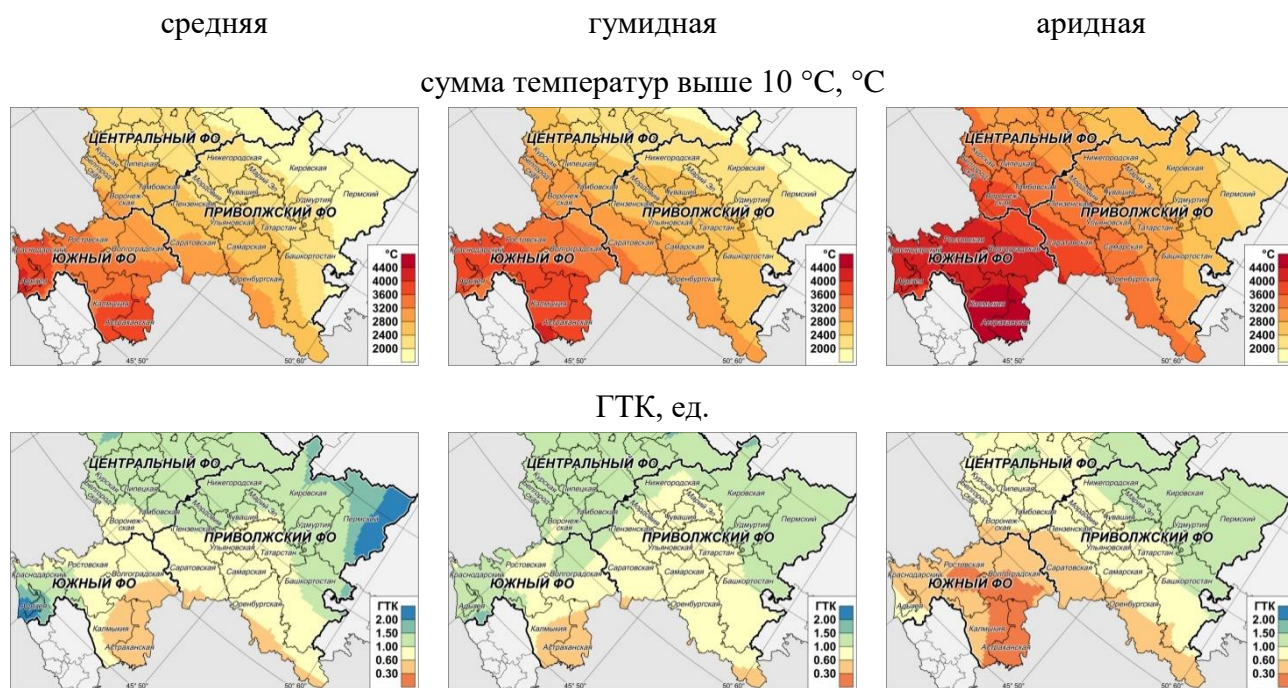


Рисунок 12. Сумма температур выше 10 °C за тёплый период года ( $T > 5$  °C) и ГТК за вегетационный период яровой пшеницы на 2050–2059 гг. при трёх рассчитанных по РКМ реализациях: средней, гумидной и аридной

Полученные результаты указывают на усиление в 21 веке неблагоприятных погодно-климатических условий для выращивания зерновых. Основная причина этого — ожидаемый рост аридности климата на фоне роста температуры и прогнозируемого усиления дефицита влаги из-за тенденции к уменьшению, либо незначительному изменению осадков.

К середине 21 века потепление на территории России может привести к снижению продуктивности зерновых культур на  $10,3 \pm 3,2$  % по сравнению с базовым периодом (табл. 5).

В тот же период наибольшие потери продуктивности могут составить  $-15,8 \pm 5,1$  % в чернозёмных областях Центрального ФО, наименьшие ( $-6,7 \pm 3,0$  %) — в Приволжском ФО. К концу века урожайность зерновых здесь может сократиться на треть при отсутствии адаптационных мер (Pavlova et al., 2019).

Таблица 5. Средние (из 50 реализаций) оценки изменения урожайности яровой пшеницы и 95 % доверительные интервалы ( $Y \pm \Delta Y$ , %) на территории Центрального (чернозёмные области), Приволжского и Южного ФО

Федеральный округ	Среднее изменение по ансамблю, $Y \pm \Delta Y$ , %		
	2030–2039 гг.	2050–2059 гг.	2090–2099 гг.
Центральный	-11,7±3,0	-15,8±5,1	-32,9±3,4
Приволжский	-5,7±2,4	-6,7±3,0	-21,5±3,1
Южный	-9,9±2,3	-8,2±3,0	-2,6±0,4
<b>Вся территория</b>	<b>-9,1±2,3</b>	<b>-10,3±3,2</b>	<b>-18,9±2,8</b>

В **Главе 6** рассматривается метод пространственно-временных аналогов для оценки отклика продуктивности сельскохозяйственных культур на прогнозируемые изменения климата.

Этот метод ранее успешно использовался для определения территорий со сходными условиями климата с целью заимствования и акклиматизации сельскохозяйственных культур (Селянинов, 1966; и др.).

Новизна предлагаемого подхода заключается в использовании климатических проекций будущего и комплекса климатических показателей, позволяющих выявить возможное смещение агроклиматических зон при ожидаемых климатических изменениях (Сиротенко и Павлова, 2003, 2010, 2012).

Расчитанные оценки приращений БКП (сценарий HAD CM3) свидетельствуют об улучшении агроклиматических условий для ведения сельского хозяйства и подтверждают вывод о положительном влиянии «западного переноса» воздушных масс на продуктивность сельскохозяйственных культур.

Метод пространственно-временных аналогов может служить эффективным средством прогнозирования откликов сельского хозяйства на изменения климата и применяться наряду с математическими моделями, дополнять и уточнять модельные эксперименты.

**Глава 7** посвящена вопросам адаптации сельского хозяйства к наблюдаемым и ожидаемым изменениям климата. Современное сельское хозяйство использует разнообразные способы адаптации к изменению климата. Эффективная адаптация предполагает сочетание различных систем земледелия, развитые ирригационные технологии, сохранение высокого уровня плодородия почв, использование высоко продуктивных и стресс-толерантных сортов сельскохозяйственных культур и новых сельскохозяйственных технологий и гибкую систему принятия решений. При этом стратегия адаптивной интенсификации сельского хозяйства должна быть «встроена» в естественные процессы саморегуляции биосферы.

Последствия отдельных перечисленных стратегий адаптации могут быть проанализированы с помощью имитационной системы КПУ в форме количественных оценок интегральных показателей продуктивности.

В разделе 7.1 анализируются оценки приращения климатически обусловленной урожайности яровой пшеницы при мерах адаптации, обеспечивающих достаточный уровень увлажнённости (влагозадержание, поливы и др.) и достаточный уровень минерального питания (внесение минеральных и органических удобрений) (рис. 13).

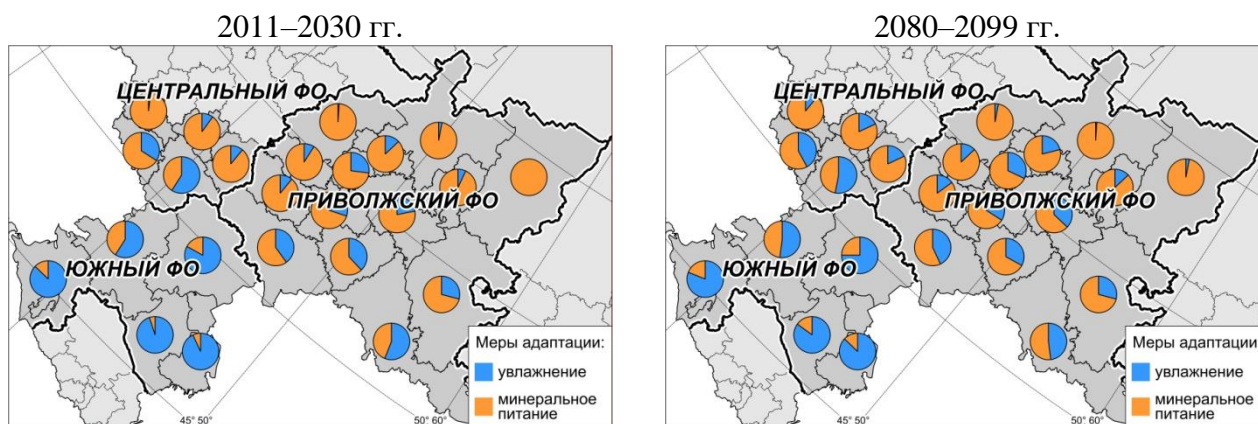


Рисунок 13. Нормированные оценки мер адаптации производства зерновых культур к ожидаемым изменениям климата на территории Центрального (чернозёмные области), Приволжского и Южного ФО за периоды 2011–2030 и 2080–2099 гг. (сценарий GFDL CM3, RCP4.5)

При применении влагосберегающих технологий к 2030–2039 гг. в засушливых регионах (Южный ФО и юго-восток Приволжского ФО) приращение урожайности яровой пшеницы может составить от 5 до 14 ц/га. В нечернозёмной зоне на менее плодородных почвах (север Приволжского ФО) урожайность может увеличиться на 13–20 ц/га за счёт достаточного минерального питания.

Меры адаптации должны учитывать наблюдаемые тенденции, прогнозы изменений климата, а также ожидаемые последствия этих изменений для производства зерновых культур. Отметим в общем виде основные направления адаптации сельского хозяйства России к наблюдаемым и ожидаемым изменениям климата:

- *Адаптация к увеличению тепловых ресурсов вегетационного периода.* Меры по адаптации: увеличение посевных площадей теплолюбивых высокоинтенсивных сельскохозяйственных культур, таких как кукуруза, подсолнечник, сахарная свёкла, соя и др.; увеличение посевов пожнивных и энергетических культур.
- *Адаптация к изменению условий холодного периода года.* Меры по адаптации: увеличение площадей озимых зерновых культур (пшеницы, ржи и

ячменя) как более урожайных; расширение площадей садовых насаждений и виноградников.

- *Адаптация к изменению условий увлажнения.* Меры по адаптации: более широкое внедрение влагосберегающих технологий; расширение посевов более засухоустойчивых культур; расширение посевов озимых культур; развитие орошаемого земледелия.

Одно из направлений адаптации, связанное с управлением землепользования, в частности, с корректировкой посевных площадей, представлено в следующем разделе.

В разделе 7.2 рассматриваются агрометеорологические методы оптимизации использования земельных ресурсов, и излагается методика ежегодной корректировки посевных площадей на основе прогноза урожайности до сева (Сиротенко и Павлова, 2001, 2004).

Адаптация к последствиям изменения климата, как отмечено в Климатической Доктрине РФ (2009), будет эффективной, если она носит упреждающий характер. Таким образом, предложения и оценки по мерам адаптации должны базироваться, с одной стороны, на современных сценариях изменения климата на перспективу вплоть до 2100 г., детализированных по субъектам РФ, и, с другой стороны, на современных технологиях оценки последствий изменений климата для сельского хозяйства. Одна из таких технологий представлена в диссертационной работе.

Анализируются оценки эффективности ежегодной корректировки посевных площадей для трёх уровней оправдываемости долгосрочных прогнозов урожайности: высокой ( $r_{yy} = 0,9$ ), средней ( $r_{yy} = 0,7$ ) и низкой ( $r_{yy} = 0,5$ ). Показано, что ежегодная корректировка посевных площадей экономически достаточно эффективна в степной и лесостепной зоне России, а прирост среднесрочного валового сбора может составить от 12 до 20 %. Анализируется эффект от перераспределения посевных площадей по степени их коррелированности с урожайностью.

## **ВЫВОДЫ**

Результатом исследования является вклад в решение фундаментальной научной проблемы исследования и прогнозирования изменений глобальной климатической системы и влияния этих изменений на природно-экономический потенциал, состояние и продуктивность био(агро)сферы. Разработана не имеющая аналогов система численного мониторинга агроклиматических ресурсов на основе имитационной системы энергомассообмена и продуктивности агро-

экосистем. Все представленные в работе оценки влияния наблюдаемых и ожидаемых изменений климата на агроклиматические ресурсы, биоклиматический потенциал и продуктивность зерновых культур России являются новыми.

В результате выполненных исследований впервые:

1. Разработана имитационная система Климат-Почва-Урожай на основе современного поколения динамических моделей продукционного процесса, позволяющая получать комплекс климатических и агроклиматических показателей в земледельческой зоне России для разных масштабов пространственного разрешения (федеральный округ, регион, муниципальный район) по данным инструментальных наблюдений за климатом, почвами и зерновыми культурами и данным климатических сценариев.

2. Разработана система ежегодных оценок тенденций изменения, изменчивости и экстремальности агроклиматических показателей тепло- и влагообеспеченности и продуктивности зерновых по субъектам в земледельческой зоне России с 1976 г. по настоящее время. Полученные оценки используются для принятия решений на различных уровнях — от Министерства сельского хозяйства РФ до непосредственного производителя.

3. Рассчитаны комплексные оценки изменений агроклиматических ресурсов и продуктивности зерновых культур в земледельческой зоне России на основе следующих сценариев изменения климата: GFDL CM3, HAD CM3 и ANS 31 на начало, середину и конец 21 века по сценариям эмиссии парниковых газов RCP4.5 и RCP8.5.

4. Рассчитаны вероятностные оценки влияния изменений климата на продуктивность зерновых культур и агроклиматические ресурсы в 21 веке на основании прогноза региональной климатической модели (РКМ). Проведённые численные эксперименты указывают на усиление неблагоприятных погодноклиматических факторов для возделывания зерновых культур в 21 веке на фоне прогнозируемого роста засушливости климата. К середине 21 века можно ожидать снижения климатически обусловленной урожайности зерновых на  $10,3 \pm 3,2$  % по сравнению с базовым периодом. Использование ансамбля реализаций высокоразрешающей модели РКМ позволило снизить неопределённость отклика продуктивности зерновых на прогнозируемое изменение агроклиматических ресурсов в 21 веке.

5. Выявлены разнонаправленные тенденции изменений биоклиматического потенциала и климатически обусловленной урожайности зерновых культур. Установлено отсутствие роста климатически обусловленной урожайности вследствие аридизации и роста напряжённости термического режима в период вегетации в основных зерновых регионах ЕЧ России с 1998 г. по 2017 г. Рост

биоклиматического потенциала за этот же период обусловлен увеличением термических ресурсов и продолжительности вегетационного периода.

6. Разработан и реализован метод оценки климатических рисков при возделывании зерновых культур с учётом частоты неблагоприятных метеорологических явлений и степени уязвимости территории. Средние по России климатические риски недобора урожая яровой и озимой пшеницы, рассчитанные с учётом посевных площадей, составляют 12,5 и 10,6 % соответственно. Максимальные риски получения низких урожаев яровой пшеницы при засухах определены для Южного (37,9 %) и Приволжского (23,0 %) ФО.

7. Определены современные географические аналоги агроклиматических условий к середине 21 века при глобальном потеплении. Агроклиматические аналоги центральных и северных областей ЕЧ России по выбранному набору показателей к середине столетия могут быть найдены в лесостепной зоне на юго-западе ЕЧ России. Среднее увеличение биоклиматического потенциала в центральных областях ЕЧ может составить от 15 до 20 % к середине 21 века.

8. Предложен метод адаптации производства зерновых культур к изменениям/колебаниям климата путём ежегодной корректировки посевных площадей по данным агрометеорологических прогнозов урожайности до сева, а также путём их пространственного перераспределения в многолетней перспективе и оценена его эффективность. Приращение среднесезонного валового сбора яровых зерновых за счёт ежегодной корректировки посевных площадей может составлять в Приволжском и Центральном ФО — 5–9 %, в Северо-Западном ФО — 7–12 % и в Южном ФО — 6–16 %. Соответствующие оценки адаптационного потенциала для озимой пшеницы в Центральном, Приволжском и Южном ФО составляют от 4 до 6 %.

9. Разработан метод оценки адаптационного потенциала зернового сектора к изменениям климата, детализированный по субъектам РФ и базирующийся на оценке управляющих воздействий (достаточный уровень минерального питания и увлажнённости, сроков сева и других) с использованием имитационной системы Климат-Почва-Урожай и современных климатических сценариев. В нечернозёмной зоне урожайность яровой пшеницы к 2050–2059 гг. может увеличиться на 11–18 ц/га за счёт достаточного минерального питания; при достаточном увлажнении почвы приращение урожайности в засушливых регионах ЕЧ может составить от 7 до 16 ц/га.



**Публикации в журналах, рекомендованных ВАК**

1. **Павлова В. Н.**, Карачёноква А. А. Продуктивность зерновых культур на территории Европейской России при изменении климата за последние десятилетия // *Метеорология и гидрология*. 2020. № 1. С. 78–94.
2. **Павлова В. Н.**, Богданович А. Ю., Семёнов С. М. Об оценке степени благоприятности климата для культивирования зерновых, исходя из частоты сильных засух // *Метеорология и гидрология*. 2020. № 12. С. 95–101.
3. **Павлова В. Н.**, Карачёноква А. А. Оценка изменений климатически обусловленной урожайности яровой пшеницы в земледельческой зоне России // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2020. № 4. С. 70–91.
4. **Pavlova V.**, Shkolnik I., Pikaleva A., Efimov S., Karachenkova A., Kattsov V. Future changes in spring wheat yield in the European Russia as inferred from a large ensemble of high-resolution climate projections // *Environ. Res. Lett.* 2019. Volume 14. Issue 3.
5. Романенков В. А., **Павлова В. Н.**, Беличенко М. В. Оценка климатических рисков при возделывании зерновых культур на основе региональных данных и результатов длительных опытов геосети // *Агрохимия*. 2018. № 1. С. 77–86.
6. Байшоланов С. С., **Павлова В. Н.**, Клещенко А. Д., Муқанов Е. Н., Чернов Д. А., Жакиева А. Р. Оценка агроклиматических ресурсов Костанайской области Республики Казахстан // *Метеорология и гидрология*. 2018. № 3. С. 82–91.
7. Байшоланов С. С., **Павлова В. Н.**, Жакиева А. Р., Чернов Д. А., Габбасова М. С. Агроклиматические ресурсы Северного Казахстана // *Гидрометеорологические исследования и прогнозы*. 2018. № 1 (367). С. 168–184.
8. **Павлова В. Н.**, Варчева С. Е. Оценки степени уязвимости территории и климатического риска крупных неурожаев зерновых культур в зерносеющих регионах России // *Метеорология и гидрология*. 2017. № 8. С. 39–49. (**Pavlova V. N.**, Varcheva S. E. Estimating the level of territory vulnerability and climate-related risk of significant grain crop failure in grain-producing regions of Russia // *Russian Meteorology and Hydrology*. August 2017. Volume 42. Issue 8. P. 510–517).
9. **Павлова В. Н.**, Варчева С. Е. Оценка климатических рисков при производстве зерновых культур в Приволжском федеральном округе // *Агрофизика*. 2017. № 2. С. 1–8.
10. **Павлова В. Н.**, Варчева С. Е. Оценка климатических рисков потерь урожая в региональных системах земледелия // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2017. Том 3. С. 122–132.
11. **Павлова В. Н.**, Карачёноква А. А. Наблюдаемые изменения климата и динамика агроклиматических ресурсов в XX–XXI столетиях на территории Приволжского федерального округа // *Труды ГГО им. А. И. Воейкова*. 2016. Вып. 583. С. 112–128.
12. **Pavlova V. N.**, Varcheva S. E., Bokusheva R., Calanca P. Modeling the effects of climate variability on spring wheat productivity in the steppe zone of Russia and Kazakhstan // *J. Ecological Modeling*. 2014. Vol. 277. P. 57–67.
13. **Павлова В. Н.** Агроклиматические ресурсы и продуктивность сельского хозяйства России при реализации новых климатических сценариев в XXI-ом веке // *Труды ГГО им. А. И. Воейкова*. 2013. Вып. 569. С. 20–37.

14. Сиротенко О. Д., **Павлова В. Н.** Наблюдаемые изменения климата и динамика продуктивности сельского хозяйства России // Труды ГГО им. А. И. Воейкова. 2012. Вып. 565. С. 132–151.
15. Романенков В. А., Беличенко М. В., Листова М. П., **Павлова В. Н.** Изучение географических закономерностей действия удобрений на продуктивность зерновых культур с учетом агрометеорологических условий на территории // Агрохимия. 2012. № 4. С. 21–29.
16. Сиротенко О. Д., Клещенко А. Д., Абашина Е. В., **Павлова В. Н.**, Семендяев А. К. Мониторинг изменений климата и оценка последствий глобального потепления для сельского хозяйства // Агрофизика. 2011. С. 31–39.
17. Сиротенко О. Д., **Павлова В. Н.** Новый подход к идентификации функционалов ПОГОДА–УРОЖАЙ для оценки последствий изменения климата // Метеорология и гидрология. 2010. № 2. С. 92–100.
18. **Павлова В. Н.** Проблема оценки влияния изменений климата на продуктивность агросферы России: методология, модели, результаты расчетов // Известия Самарского научного центра РАН. 2009. Т. 11. № 1 (7). С. 1559–1565.
19. Романенков В. А., Сиротенко О. Д., Беличенко М. В., **Павлова В. Н.** Расчет урожайности зерновых культур и эффективности минеральных удобрений в условиях одновременного изменения климатических условий и плодородия почвы // Известия Самарского научного центра РАН. 2009. Т. 11. № 1 (7). С. 1569–1573.
20. Сиротенко О. Д., Романенков В. А., Листова М. П., **Павлова В. Н.** Оценка и прогноз эффективности минеральных удобрений в условиях изменяющегося климата // Агрохимия. 2009. № 7. С. 26–33.
21. Сиротенко О. Д., Груза Г. В., Ранькова Э. Я., Абашина Е. В., **Павлова В. Н.** Современные климатические изменения теплообеспеченности, увлажненности и продуктивности агросферы России // Метеорология и гидрология. 2007. № 8. С. 90–103.
22. Сиротенко О. Д., **Павлова В. Н.** Оценка влияния изменений климата на сельское хозяйство методом пространственно-временных аналогов // Метеорология и гидрология. 2003. № 8. С. 89–99.
23. Сиротенко О. Д., **Павлова В. Н.** Агрометеорологические аспекты оптимизации использования земельных ресурсов // Метеорология и гидрология. 2001. № 12. С. 84–95.
24. Sirotenko O. D., Abashina E. V., **Pavlova V. N.** Sensitivity of the Russian agriculture in climate, CO<sub>2</sub> and tropospheric ozone concentrations and soil fertility // Climatic change. 1997. 36. P. 217–234.
25. Сиротенко О. Д., **Павлова В. Н.** Чувствительность сельского хозяйства России к изменениям климата, химического состава атмосферы и плодородия почв // Метеорология и гидрология. 1995. № 4. С. 107–114.
26. Сиротенко О. Д., **Павлова В. Н.** Парниковый эффект и продовольственная проблема России // Метеорология и гидрология. 1994. № 7. С. 5–16.
27. Сиротенко О. Д., **Павлова В. Н.** Стохастическая модель климата для расчета продуктивности экосистем // Метеорология и гидрология. 1988. № 7. С. 105–114.
28. Сиротенко О. Д., Абашина Е. В., **Павлова В. Н.** Оценка влияния возможных колебаний и изменений климата на продуктивность сельского хозяйства // Известия АН. Физика атмосферы и океана. 1984. № 11. С. 1104–1110.

## Публикации в монографиях

29. **Pavlova V. N.**, Karachenkova A. A., Varcheva S. E., Sinitsyn N. M. Assessment approach of the spatial wheat cultivation risk for the main cereal cropping regions of Russia. In: Landscape Modelling and Decision Support. Ed(s): Wilfried Mirschel, Vitaly V. Terleev and Karl-Otto Wenkel. Springer Nature. 2020.

30. **Павлова В. Н.** и соавт. Раздел 1.2. «Современное состояние климата и прогнозные сценарии его изменений» // Национальный доклад «Глобальный климат и почвенный покров России: оценка рисков и эколого-экономических последствий деградации земель. Адаптивные системы и технологии рационального природопользования (сельское и лесное хозяйство)». Под ред. А. И. Бедрицкого. М.: Почвенный институт им. В. В. Докучаева, ГЕОС. 2018. 357 с. URL: <http://esoil.ru/publications/books/news26032018.html> (дата обращения: 10.01.2020).

31. **Павлова В. Н.** Раздел Доклада о научно-методических основах для разработки стратегии адаптации к изменениям климата в Российской Федерации (в области компетенции Росгидромета). Под ред. В. М. Катцова и Б. Н. Порфирьева. Санкт-Петербург. 2020. С. 93–107.

32. **Павлова В. Н.**, Караченкова А. А. Раздел «Агроклиматические условия» // Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2016 год. Москва. 2017. 70 с. URL: [http://www.meteorf.ru/upload/pdf\\_download/Доклад2016.pdf](http://www.meteorf.ru/upload/pdf_download/Доклад2016.pdf) (дата обращения: 10.01.2020).

33. **Павлова В. Н.** Раздел 3.3 «Сельское хозяйство» // Доклад о климатических рисках на территории Российской Федерации. Под ред. д-ра физ.-мат. наук В. М. Катцова. Санкт-Петербург. 2017. 106 с.

34. **Павлова В. Н.** Глава 6.7 «Сельское хозяйство» // Второй оценочный доклад Росгидромета о последствиях изменения климата для аграрного сектора экономики и землепользования. Техническое резюме. 2014. 93 с.

35. **Павлова В. Н.** Влияние изменений климата на экосистемы, агросферу и сельскохозяйственное производство // Основы сельскохозяйственной метеорологии. Учебное пособие. Том 3. Часть II. Обнинск. 2013. С. 243–369.

36. Сиротенко О. Д., **Павлова В. Н.** Раздел «Сельское хозяйство» // Оценка макроэкономических последствий изменений климата на территории Российской Федерации на период до 2030 года и дальнейшую перспективу. Москва. 2011. С. 89–98.

37. **Павлова В. Н.** Анализ и оценка влияния климатических условий последних десятилетий на урожайность зерновых культур в земледельческой зоне России // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Т. XXIII. М., ИГКЭ. 2010. С. 215–230.

38. Сиротенко О. Д., **Павлова В. Н.** Влияние изменений климата на сельское хозяйство // Развитие сельскохозяйственной метеорологии в России. Издание 2-е. Обнинск. 2009. С. 168–190.

39. Сиротенко О. Д., Абашина Е. В., **Павлова В. Н.** Раздел «Сельское хозяйство» // Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Том II. Последствия изменений климата. М.: Росгидромет. 2008. С. 61–71. С. 223–230.

40. Pitovranov S. E., Maximov A. D., Sirotenko O. D., Abashina E. V., **Pavlova V. N.**, Carter T. R. The effect of climatic variations on agriculture in the semi-arid zone of the European USSR // International Institute for Applied Systems Analysis. Laxemburg. Austria. 1987. 77 p.

## Статьи в сборниках, тезисы докладов и другие публикации

41. **Павлова В. Н.** Оценка агроклиматических ресурсов и климатических рисков при производстве зерновых культур при современном изменении климата на ЕТ России // Тезисы докладов Второй Всероссийской открытой конференции к 90-летию Почвенного института им. В. В. Докучаева «Почвенные и земельные ресурсы: состояние, оценка, использование». 2017. С. 53–55. URL: <http://www.esoil.ru/news/news15112017.html> (дата обращения: 10.01.2020).

42. **Павлова В. Н.** Программа для ЭВМ «Расчет индексов (показателей) для оценки агроклиматических ресурсов территории при изменении климата» // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017663536 от 07.12.2017. Москва.

43. **Павлова В. Н.,** Варчева С. Е. Динамическая модель продуктивности яровой пшеницы в степной зоне России и Казахстана // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016660261 от 09.09.2016. Москва.

44. **Павлова В. Н.,** Варчева С. Е. Анализ и оценка уязвимости и риска производства зерновых культур при современных изменениях климата в Калужском регионе // Труды регионального конкурса проектов фундаментальных научных исследований. Калужский государственный институт развития образования. 2016. Вып. 21. С. 246–251.

45. **Павлова В. Н.,** Долгий-Трач В. А., Караченкова А. А. Региональные изменения климата: агроклиматические оценки для производства сельскохозяйственных культур и землепользования // Метеоспектр. 2015. № 4. С. 121–128.

46. **Pavlova V. N.,** Karachenkova A. A. Agroclimatic monitoring of the climate change and comparative evaluations of bioclimatic potential and crop productivity 2013–2014 // Potential of idle agricultural lands of the post-soviet area to mitigate the climate changes and improve an environment. Book of Extended Abstracts. 2015. P. 37–39.

47. **Pavlova V.** Regional agroclimatic monitoring and evaluation of climate change impact on Russia's agriculture // Forum «Agriculture and climate change in transition economies», 17–19 June 2015, Halle (Saale), Germany.

48. **Павлова В. Н.** Стохастическая модель генерации суточных метеорологических параметров по их среднемесячным значениям // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. № 2015660183 от 24.09.2015. Москва.

49. **Павлова В. Н.** Наблюдаемые региональные изменения климата и оценка адаптационного потенциала озимых зерновых культур // Девятая сессия Северо-Евразийского климатического форума стран СНГ по сезонным прогнозам (СЕАКОФ-9). Гидрометцентр России. Москва. 2015.

50. **Павлова В. Н.,** Варчева С. Е. Динамическая модель продуктивности яровой пшеницы для оценки влияния наблюдаемых и ожидаемых изменений климата в степной зоне России и Казахстана // Материалы Международного семинара «Математические модели в теоретической экологии и землепользовании» (Полуэктвовские чтения). СПб.: АФИ. 2014. С. 19–23. URL: <http://agrotool.ru/content/files/Materials.pdf> (дата обращения: 10.01.2020).

51. Сиротенко О. Д., **Павлова В. Н.,** Абашина Е. В., Методика оценки агроклиматических условий для мониторинга изменений современного климата на территории Российской Федерации. 2013. URL: <http://method.meteorf.ru> (дата обращения: 10.01.2020).

52. Сиротенко О. Д., **Павлова В. Н.** Аналоговый прогноз урожайности зерновых культур и основные направления оптимизации размещения сельскохозяйственно-

го производства с учетом изменений климата // Труды ГУ «ВНИИСХМ». 2010. Вып. 37. С. 22–41.

53. Сиротенко О. Д., **Павлова В. Н.** Сколько стоит прогноз урожайности // Метеоспектр. Вопросы специализированного гидрометеорологического обеспечения. М.: 2004. № 1(17). С. 73–77.

54. **Павлова В. Н.**, Сиротенко О. Д., Абашина Е. В. Разработка математической модели для прогнозирования урожайности и численного мониторинга состояния сельскохозяйственных культур для Калужской области // Труды Регионального конкурса научных проектов в области естественных наук. Калуга. 2004. Вып. 7. С. 155–163.

55. Sirotenko O. D., Abashina E. V., **Pavlova V. N.**, Varcheva S. E. Sensitivity of Russian agriculture to climate change, atmospheric pollution and soil degradation // International symposium on applied agrometeorology and agroclimatology. European. Volos. Greece. 1996. Communities. 1998. P. 87–92.

56. Бойко А. П., **Павлова В. Н.** Восстановление профиля запасов продуктивной влаги с использованием аппарата сплайн-интерполяции // Труды ВНИИСХМ «Математическое моделирование в агрометеорологии». 1986. Вып. 21. С. 103–109.

57. **Павлова В. Н.** Развертка информации о возможных изменениях климата для расчетов по динамическим моделям формирования урожая // Труды ВНИИСХМ «Математическое моделирование в агрометеорологии». 1986. Вып. 21. С. 84–91.

58. Сиротенко О. Д., **Павлова В. Н.** Стохастическое моделирование суточных климатических данных для расчетов по динамическим моделям «погода–урожай» // Труды ВНИИСХМ «Математическое моделирование в агрометеорологии». 1986. Вып. 21. С. 75–83.

59. **Павлова В. Н.**, Сиротенко О. Д. Об использовании динамических моделей для оценки влияния возможных изменений и колебаний климата на урожайность сельскохозяйственных культур // Труды ВНИИСХМ. 1985. Вып. 10. С. 81–90.