

Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации
Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу
окружающей среды

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ МЕТЕОРОЛОГИИ»
(ФГБУ «ВНИИСХМ»)

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

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание учёной степени
доктора географических наук

Москва — 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. Имитационная система Климат-Почва-Урожай для оценки влияния агроклиматических ресурсов на продуктивность сельскохозяйственных культур	13
1.1 Физико-математические методы в агрометеорологии	13
1.2 Динамическая модель Погода-Урожай	15
1.3 Структура имитационной системы Климат-Почва-Урожай	24
1.4 Стохастическая модель суточных метеорологических данных	28
1.5 Прямое воздействие роста концентрации CO ₂ на растения	35
1.6 Идентификация и верификация (проверка адекватности) системы Климат-Почва-Урожай	36
ГЛАВА 2. Агроклиматические ресурсы земледельческой зоны России при наблюдаемых изменениях климата	47
2.1 Информационная база метеорологических и агрометеорологических данных наблюдений	47
2.2 Система климатических и агроклиматических показателей	50
2.3 Оценка наблюдаемых изменений показателей тепло- и влагообеспеченности	55
2.4 Оценка изменений биоклиматического потенциала	70
2.5 Реализация агроклиматического мониторинга на территории земледельческой зоны России	81
ГЛАВА 3. Оценка изменений продуктивности зерновых культур при изменении агроклиматических ресурсов	89
3.1 Анализ и оценка тенденций изменения урожайности зерновых культур	89
3.1.1 Яровые зерновые культуры	92
3.1.2 Озимая пшеница	94
3.1.3 Зерновые и зернобобовые культуры	96
3.1.4 Региональные оценки трендов урожайности зерновых культур в Приволжском федеральном округе	97
3.2 Климатически обусловленная урожайность зерновых культур	99
3.2.1 Оценка тенденций изменений агроклиматических показателей ...	101
3.2.2 Оценка тенденций изменения климатически обусловленной урожайности	106
3.2.3 Статистическая модель для оценки связи тенденций изменения климатически обусловленной урожайности и агроклиматических показателей	110
3.3 Оценка изменений климатически обусловленной урожайности яровой пшеницы с 1976 г. в масштабе десятилетий	113
3.4 Построение и идентификация физико-статистических функционалов Погода-Урожай	125

3.5 Климатически обусловленные изменения крупномасштабной пространственно-временной структуры урожайности	132
ГЛАВА 4. Климатические риски при возделывании сельскохозяйственных культур	137
4.1 Климатические риски возделывания зерновых культур и оценка уязвимости территории	137
4.2 Оценка ущерба от неблагоприятных природных явлений	149
4.3 Оценка степени неблагоприятности территорий для производства сельскохозяйственных культур	156
ГЛАВА 5. Оценка влияния изменений агроклиматических ресурсов на продуктивность зерновых культур и биоклиматический потенциал России в 21 веке	162
5.1 Оценка изменений агроклиматических ресурсов и продуктивности растениеводства на основе сценариев моделей общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦА(О)).....	162
5.1.1 Сценарии изменения климата на основе МОЦА(О) в 21 веке для территории России.....	162
5.1.2 Изменение теплообеспеченности.....	173
5.1.3 Изменение влагообеспеченности	179
5.1.4 Изменение продуктивности зерновых культур и биоклиматического потенциала	186
5.2 Оценка изменений агроклиматических ресурсов и продуктивности зерновых культур на основе региональной климатической модели	197
5.2.1 Региональная модель изменения климата для вероятностной оценки последствий изменений климата.....	197
5.2.2 Прогнозируемые изменения температуры воздуха и осадков	201
5.2.3 Оценка изменений тепло- и влагообеспеченности.....	202
5.2.4 Вероятностная оценка изменений продуктивности зерновых культур	208
ГЛАВА 6. Метод пространственно-временных аналогов для оценки последствий изменений климата на продуктивность растениеводства	213
6.1 Пространственные аналоги будущих агроклиматических условий	213
6.2 Временные аналоги будущих агроклиматических условий.....	221
ГЛАВА 7. Адаптация, оптимизация и размещение сельскохозяйственного производства при наблюдаемых и ожидаемых изменениях климата	224
7.1 Адаптация сельскохозяйственного производства к ожидаемым изменениям климата	224
7.2 Метод корректировки посевных площадей зерновых культур при адаптации к изменению климата.....	231
7.2.1 Оптимизация временного распределения посевных площадей	231
7.2.2 Корректировка пространственного распределения площадей.....	240
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	246
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	249

ВВЕДЕНИЕ

Исследование и прогнозирование изменений глобальной климатической системы для оценки их влияния на природно-экономический потенциал, состояние и продуктивность био(агро)сферы является одной из приоритетных научных проблем современности.

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

Зависимость от погодных условий делает производство сельскохозяйственной продукции страны 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 (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 экспортёром 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. Частые и обширные засухи 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).

Оценки агроклиматических ресурсов в крупных регионах при наблюдаемом и прогнозируемом изменении климата представлены в целом ряде современных исследований (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).

К последним научным обобщениям по рассматриваемой проблеме относятся коллективные монографии «Специальный доклад о климатических рисках на территории РФ» (2017), Национальный доклад «Глобальный климат и почвенный покров России ...» (2018, 2020) и Доклад о научно-методических основах для разработки стратегий адаптации ... (2020).

Современные исследования (Wechsung et al., 2008; Ortiz-Bobea and Just, 2012; Landscape Modelling and Decision Support, 2020) показывают, что динамические модели формирования урожая имеют предпочтение при оценке влияния изменений климата на сельское хозяйство. Сложились основные школы моделирования, основанные на единой методологии, такие как AGROTOOL (Полуэктов, Топаж и др., 2006, 2011), модели WOFOST, разработанные в Центре по изучению мировых проблем питания в Вагенингене (van Dripen et al., 2001) и модели американской школы CERES (Hanks, Ritchie et al., 1991).

Появление климатических моделей нового поколения, результаты расчётов по которым являются входными данными для динамических моделей продуктивности, требует как постоянного обновления оценок последствий изменений климата на сельское хозяйство, так и совершенствования технологии их получения. Актуальны постановки специальных численных экспериментов в ансамблевой форме для оценки будущих изменений характеристик климатической системы и определение на их основе вероятных границ изменений агроклиматических характеристик, что позволит снизить долю неопределённости полученных оценок. Растущее число исследований в данном направлении свидетельствует, что проблема изменений климата и их последствий для сельского хозяйства остаётся актуальной.

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

В представленной работе реализован комплексный подход к оценке агроклиматических ресурсов территории и оценке реакции сельскохозяйственных культур на изменения климатических и неклиматических факторов (содержания CO₂, приземного озона, деградации и/или повышения плодородия почв) при глобальном потеплении. Разработана мощная интерпретирующая система Климат-Почва-Урожай (КПУ), которая позволяет получать количественные оценки различных стратегий адаптации сельского хозяйства к ожидаемым изменениям климата (перераспределение посевных площадей, внедрение новых культур (сортов),

развитие влагосберегающих технологий, обоснование целесообразности водной и химической мелиорации земель и др.). На основе разработанного автором метода оцениваются климатические риски при возделывании сельскохозяйственных культур, а также адаптационный потенциал при изменении климата как отдельных регионов, так и России в целом.

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.

В соответствии с целью исследования 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 КПУ по данным инструментальных 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 изменений 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 возможностей 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 при изменении климата. Дать количественную оценку эффективности предлагаемых мер адаптации к изменениям климата 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.

Основные защищаемые положения

1. Имитационная система КПУ, 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 БКП 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 БКП 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.

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 (сельское и лесное хозяйство)» (2018). Полученная информация предоставляется в процессе обновления национальных оценок воздействия изменения климата (см. Седьмое Национальное сообщение и Третий двухгодичный доклад РФ — национальные отчётные документы по РКИК ООН и Киотскому протоколу, 2016). Научные положения оценочных Докладов используются при разработке национальных программ развития аграрной отрасли экономики.

Ежегодные 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, а также размещаются в разделе «Агроклиматические условия» ежегодного «Доклада 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» — оперативно представлялись в 2016–2020 гг. в органы власти и управления АПК России для сравнительной оценки возможной продуктивности растениеводства по регионам России.

Получены авторские свидетельства на разработанные программные средства: «Стохастическая модель генерации суточных метеорологических параметров 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).

Организация исследований и 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, 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, в её идентификации и верификации осуществлялось в ходе совместной работы с проф. Олегом Дмитриевичем Сиротенко. Разработка имитационной системы КПУ и её программная реализация выполнена автором.

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 А. А. Карачёнковой, С. Е. Варчевой и Л. И. Богдановой.

ГЛАВА 1. Имитационная система Климат-Почва-Урожай для оценки влияния агроклиматических ресурсов на продуктивность сельскохозяйственных культур

1.1 Физико-математические методы в агрометеорологии

Изучение причинно-следственных связей между гидрометеорологическими условиями среды и продуктивностью сельскохозяйственных культур — одна из важнейших задач агрометеорологии. На первом классическом этапе развития агрометеорологии преобладал *описательный* подход. Связи между погодными (климатическими) условиями, ростом, развитием и продуктивностью растений объяснялись на качественном уровне — на основании обобщений в области физики приземного слоя атмосферы, агрономии, почвоведения, физиологии растений и других научных дисциплин.

На рубеже 50–60-х годов 20 века произошла смена парадигм — качественный описательный подход сменился *эмпирико-статистическим* — основное внимание стали уделять поиску прямых эмпирических связей между входом и выходом системы Погода-Урожай. Этот подход позволил выявить целый ряд зависимостей, которые успешно используются в практике агрометеорологического обслуживания сельского хозяйства. Были получены уравнения регрессии для прогнозирования осреднённой по территории урожайности важнейших сельскохозяйственных культур в основных районах их возделывания. Анализ этого направления агрометеорологических исследований был посвящён ряд монографий и обзоров (Уланова, Сиротенко, 1968; Константинов, 1974; Уланова, 1975; Дмитренко, 1978; Уланова, Забелин, 1990; и др.).

Прогресс в области вычислительной техники и развитие информационных технологий создали необходимую базу для третьего этапа развития математического моделирования в агрометеорологии, который можно назвать *динамическим*. В середине 1950–1960-х годов М. Монси и

Т. Сазки, А. И. Будаговский, А. А. Ничипорович, Ю. К. Росс, М. И. Будыко и др. опубликовали ряд работ, формулирующих ключевые положения фотосинтетической теории продуктивности растительных сообществ (Ничипорович, 1961; Будаговский и др., 1964). Эти работы длительное время воспринимались агрометеорологами лишь как теоретические построения, поскольку выдвинутые перспективные идеи не были подкреплены соответствующими прикладными разработками.

Первые модели продукционного процесса растительных сообществ учитывали на должном теоретическом уровне лишь два фактора внешней среды — солнечную радиацию и концентрацию углекислоты в атмосфере. В отношении же водного и теплового режимов, минерального питания и других факторов указывалось, что они поддерживаются на «оптимальном» уровне.

В 1982 г. в Голландии вышла в свет коллективная монография «Simulation of plant growth and crop production». Её основными авторами выступили К. Т. де Вит, Ф. В. Т. Пеннинг де Фриз, Т. Дж. Феррари и др. По инициативе О. Д. Сиротенко эта монография «Моделирование роста и продуктивности сельскохозяйственных культур» была переведена на русский язык и опубликована «Гидрометеоиздатом» в 1986 г. (Моделирование роста и продуктивности ..., 1986). Разработанная первая динамическая модель продуктивности агроценоза ELCROS послужила прототипом для создания современных динамических моделей формирования урожая.

Динамический подход рассматривает «формирование» урожая как развивающийся во времени процесс, для описания которого используется соответствующий математический аппарат — дифференциальные уравнения или их разностные аналоги. Продуктивность агроэкосистемы определяется интенсивностью и направленностью процессов обмена веществом и энергией между посевом и окружающими его средами — приземным слоем воздуха и почвой (Сиротенко, 1981).

Основу новой теоретической базы агрометеорологии представляют монографии И. А. Шульгина (1973), Х. Г. Томинга (1977), О. Д. Сиротенко

(1981), Е. П. Галямина (1981), Э. Г. Палагина (1981), Р. А. Полуэктова (1991), А. П. Бойко (1993), Г. В. Менжулина (1984) и многих других исследователей. Каждая из этих работ посвящена развитию того или иного аспекта количественной теории продуктивности агроэкосистем. Теоретические представления привели к практическим результатам — созданы прикладные динамические модели формирования урожая, которые существенно расширили возможности современной агрометеорологии.

Различные аспекты фундаментальной для агрометеорологии и экологии задачи обсуждаются в монографии (Simulation of plant growth and crop ..., 1986).

1.2 Динамическая модель Погода-Урожай

Динамическая модель Погода-Урожай основана на учёте базовых физиологических процессов (фотосинтез, дыхание, транспирация), происходящих в растениях в течение всего вегетационного периода под влиянием метеорологических факторов, и позволяет количественно оценить динамику накопления биомассы посевов в целом и отдельно — хозяйственно-полезной её части (урожая). Основное отличие динамических моделей от эмпирико-статистических и их преимущество при математическом описании связей между условиями среды и продуктивностью растений состоит в том, что формирование урожая рассматривается как протекающий во времени процесс (Сиротенко, 1981). Для построения динамических моделей используется большой объём априорной информации о действующих механизмах физиологических и физических процессов. Модели такого уровня дают возможность количественно оценить влияние текущих медленных изменений климатических параметров и, что особенно важно, экстремальных внешних условий, нередко возникающих в процессе возделывания сельскохозяйственных культур.

В прикладной динамической модели Погода-Урожай (Сиротенко, 1981; Абашина и Сиротенко, 1986; Сиротенко, Павлова, 1994) рассматривается

взаимосвязь трёх групп факторов, представляющих соответственно гидрометеорологические условия, состояние почвы и состояние посева сельскохозяйственной культуры.

Модель включает три взаимосвязанных блока:

- блок роста и развития растений (ростовой),
- блок водного режима (влажностный),
- блок моделирования минерального питания (азотный).

В каждом из блоков решается соответствующая подсистема уравнений:

– в ростовом блоке рассчитывается динамика фитомассы отдельных органов растений в результате моделирования процессов фотосинтеза, дыхания, роста, развития, распада и старения;

– во влажностном блоке рассчитывается динамика влагозапасов почвы при моделировании процессов инфильтрации, испарения, транспирации и корневого поглощения воды;

– в азотном блоке рассчитывается динамика минерального азота почвы при моделировании процессов нитрификации, денитрификации, корневого поглощения и вымывания.

Ниже представлено описание ростового блока модели и схематичное описание влажностного и азотного блоков.

Моделирование роста и развития растений

Для расчёта динамики биомассы посевов сельскохозяйственных культур используются системы обыкновенных дифференциальных уравнений, которые для зерновых культур можно представить в следующем виде (Сиротенко, 1981; Абашина, Сиротенко, 1986; Sirotenko et al., 1997):

$$\begin{aligned}
 \frac{dm_p}{dt} &= G_p - D_p - q_p - P_p, \\
 \frac{dW_i}{dt} &= q_{i-1} - q_i - TR_i - \delta_i E, \\
 \frac{dN_k}{dt} &= H_k + \delta_k U_N - h_k + V_{k-1} - V_k - A_k,
 \end{aligned}
 \tag{1.1}$$

где m_p — масса p -го органа растения, мг/см², $p \in l, s, ls, r, k, z$; t — время, сут.; G_p, D_p, q_p, P_p — скорости роста, дыхания, распада и опада тканей растений, мг/(см²·сут.); W_i — запасы влаги i -го слоя почвы ($i=1, 15$), мм; q_{i-1}, q_i — потоки воды через верхнюю и нижнюю границы i -го слоя, мм/сут., для 1-го слоя ($i=1$) поток через верхнюю границу (q_0) равен эффективным осадкам; TR_i — затраты воды на транспирацию из i -го слоя почвы, мм/сут.; δ_i — логическая переменная, равная 1 при $i=1$ и 0 во всех остальных случаях; E — испарение с поверхности почвы, мм/сут.; N_k — содержание нитратов в k -ом слое почвы ($k=1, 3$), мг/см²; H_k — скорость минерализации легкогидролизуемого органического азота, мг/(см²·сут.); δ_k — логическая переменная, принимающая значение $\delta_k=1$ для первого слоя почвы в день внесения удобрений и $\delta_k=0$ во всех остальных случаях; U_N — количество минеральных удобрений с учётом их иммобилизации (поглощением микроорганизмами), мг/(см²·сут.); h_k — скорость денитрификации минерального азота, мг/(см²·сут.); V_{k-1}, V_k — потоки минерального азота с водой через верхнюю и нижнюю границы k -го слоя ($V_0=0$), мг/(см²·сут.); A_k — поглощение азота растениями из k -го слоя почвы, мг/(см²·сут.).

Под ростом в данной модели понимается формирование структурной массы. Рост осуществляется за счёт фонда углеводов, формирующегося из продуктов суточного суммарного фотосинтеза (F) и продуктов распада структурных тканей (Q_s) за те же сутки. С целью существенного упрощения модели и, учитывая, что шаг модели — сутки, сделано допущение, что весь сформировавшийся за сутки фонд углеводов ($m_{cym.}$) преобразуется в структурную массу в процессе роста:

$$G_p = \alpha_p m_{cym.} = \alpha_p (F + Q_s), \quad (1.2)$$

где α_p — ростовые функции, показывающие, какая доля фонда углеводов идёт на рост p -го органа; Q_s — сумма распада всех органов растений.

Принято, что энергетические затраты растения (дыхание) отождествляются, во-первых, с ростом и, во-вторых, с поддержанием в активном состоянии уже закончивших рост органов растений (дыхание роста и дыхание поддержания). Дыхание роста p -го органа прямо пропорционально скорости роста, а дыхание поддержания определяется значением уже сформированной массы органа и температурой среды:

$$D_p = R_G G_p + R_p^o m_p \phi_Q, \quad (1.3)$$

где R_G — коэффициент дыхания роста; R_p^o — коэффициенты дыхания поддержания; ϕ_Q — температурная функция дыхания.

Суммарный фотосинтез посева за сутки рассчитывается по формуле Шартье:

$$F = \frac{\varepsilon \tau \phi_F LG \overline{SW}}{2(r_s - r_c)} \{CO_2 + \alpha r_s - [(\alpha r_s + CO_2)^2 + 4r_c I \alpha CO_2]^{0.5}\}, \quad (1.4)$$

где ε — коэффициент газообмена (константа); τ — продолжительность дня, с; ϕ_F — температурная функция фотосинтеза; LG — фотосинтезирующая поверхность посева, $см^2/см^2$; \overline{SW} — средневзвешенный коэффициент переувлажнения; $r_s = r_c + r_{mes} + r_{stc}$ — общее устьичное сопротивление, с/см; r_c — фотохимическое сопротивление фотосинтеза, с/см; r_{mes} — сопротивление мезофила (константа), с/см; r_{stc} — устьично-кутикулярное сопротивление потоку CO_2 , с/см; CO_2 — объёмная концентрация CO_2 в посеве, $мг/см^3$; α — угол наклона световой кривой фотосинтеза, $мг(CO_2) дж^{-1}$; I — средняя интенсивность фотосинтетически активной радиации (ФАР), поглощённая листом внутри посева, $дж/(см^2 \cdot с)$.

Влияние режима влажности на образование новых тканей растения осуществляется в модели через два канала: при недостатке почвенной влаги через r_{stc} , при избытке — через коэффициент переувлажнения SW_i .

При записи выражения для r_{stc} принята схема параллельного включения устьичного r_{st} и кутикулярного r_{cut} сопротивления листа.

В модели значение кутикулярного сопротивления — константа, зависящая от засухоустойчивости культуры, устьичное же сопротивление определяется видом культуры и зависит от влажности почвы следующим образом:

$$r_{st} = r_{\min} \exp(a_r \bar{\Psi}_s), \quad (1.5)$$

где r_{\min} — минимально возможное устьичное сопротивление, с/см; $\bar{\Psi}_s$ — средневзвешенный потенциал почвенной влаги, бар; a_r — константа.

Коэффициент, учитывающий влияние переувлажнения на фотосинтез SW_i ($0 \leq SW_i \leq 1$), рассчитывается для каждого i -го слоя почвы, а затем осредняется с учётом доли корней в слое μ_i .

Азотный режим влияет на фотосинтез и рост через фотохимическое сопротивление фотосинтеза:

$$r_c = r_{c\min} \exp[C_V (S_N - 1)^2], \quad (1.6)$$

где $r_{c\min}$ — минимальное фотохимическое сопротивление; C_V — параметр, зависящий от недостатка азота в растениях.

При записи выражения для расчёта скорости распада q_p (1.1), связанного со старением тканей, учитывалось следующее:

1. при прочих равных условиях скорость распада q_p должна возрастать по мере старения органа;
2. старение ускоряется при неблагоприятных условиях увлажнения и с ростом температуры;
3. величина q_p , так же, как и дыхание поддержания, пропорциональна уже сформированной массе органа.

Для расчёта суточного прироста площади зелёных листьев, стеблей и колосьев растения используется соотношение:

$$\frac{\Delta(LG_p)}{\Delta t} = S_p (G_p - D_{RP}), \quad (1.7)$$

где S_p — коэффициент перехода от вновь образованной структурной массы к площади p -го органа, $p \in l, ls, k$, $S_l = S_{ls}$; D_{RP} — дыхание роста.

Для моделирования процессов пожелтения и опада у листьев и листовой части стеблей (принято, что колосья желтеют после наступления восковой спелости и не опадают) используется достаточно сложная процедура, учитывающая влияние метеорологических условий на этот процесс в течение всего вегетационного периода. В результате — пожелтение и частичный опад массы органа может наблюдаться в любой момент вегетационного периода (даже непосредственно после всходов), в зависимости от напряжённости внешних условий. По мере старения органов темпы пожелтения и опада увеличиваются в связи с возрастанием скорости распада.

Фотосинтезирующая площадь поверхности растений складывается из зелёной площади листьев, стеблей и колосьев. Эффективная площадь поверхности растений находится с учётом различия в геометрии органов растения.

Формирование вегетативной массы и конечного урожая растений (m_z) определяется динамикой состояния атмосферной и почвенной сред обитания растений. С целью упрощения расчётной схемы в модели принято, что содержание CO_2 в приземном слое воздуха постоянно в течение вегетационного периода, а температура тканей растений равна температуре воздуха, ежедневные значения которой вводятся по данным метеорологических станций. Интенсивность фотосинтетически активной радиации рассчитывается для каждых суток на основании информации о числе часов солнечного сияния.

Моделирование водного режима

Расчёт влажности почвы всегда рассматривался как специальная задача, решение которой необходимо для эффективного агрометеорологического обслуживания сельского хозяйства (Вериги, Разумова, 1963). Определение ежесуточной динамики влажности почвы в модели имеет большую практическую ценность. Для расчёта динамики влагозапасов почвы решается подсистема уравнений (1.1), описывающая процессы инфильтрации, испарения, транспирации и корневого поглощения воды. При построении расчётной схемы принята послойная модель: толщина слоя — 10 см, число слоёв — 15 (Бойко, Павлова, 1986).

Моделирование минерального питания растений

Для определения обеспеченности растений азотом используется субмодель азотного питания. Расчёт динамики минерального азота почвы осуществляется путём моделирования процессов нитрификации, денитрификации, корневого поглощения и вымывания. Разработан упрощённый азотный блок, в котором используется стандартная информация — средние по области данные о проценте содержания гумуса, типах почв, объёмном весе, типовых кривых распределения азота по глубине, соотношении гуминовых и фульвокислот по типам почв и уровне окультуренности почв, определяемый по среднему за последние пять лет количеству внесённых органических удобрений (Абашина, 1979).

Входные данные модели Погода-Урожай

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

1. Географическая широта и долгота пункта.
2. Агрогидрологические свойства почвы (полная влагоёмкость, влажность завядания, мм, по 10-сантиметровым слоям до глубины 1 м и

относительная влажность на нижней границе расчётного слоя почвы, %) (Справочник агрогидрологических свойств ..., 1962).

3. Агрохимические свойства почвы (содержание щелочногидролизуемого азота и нитратов в мг/см² и нитрификационная способность почвы по слоям 0–20, 20–50 и 50–100 см). Указанные величины задаются на дату возобновления вегетации.

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 «всходы — колошение» и «колошение — восковая спелость»).

5. Начальная влажность почвы (мм) на дату возобновления вегетации по десятисантиметровым слоям до глубины 1 м.

6. Сроки и дозы внесения минеральных и органических удобрений.

7. Метеорологические данные:

T — среднесуточная температура воздуха, °С;

D — среднесуточный дефицит влажности воздуха, мб;

S — число часов солнечного сияния за сутки, час;

R — суточная сумма осадков, мм.

Почвенная и агрономическая информация для расчётов в системе Климат-Почва-Урожай была получена нами из материалов агрометеорологических ежегодников и агрогидрологических справочников (Агрометеорологический ежегодник, 1968; Агроклиматические ресурсы. Справочник, 1971–1978; Процеров, 1953; Соколов и др., 1974; Дрыгина, Справочник агрогидрологических ..., под ред. Долгова, 1962) и других источников.

Динамическая модель Погода-Урожай имеет ряд преимуществ по сравнению с другими существующими моделями продукционного процесса. Выделим основные моменты.

По полноте описания процессов, определяющих продуктивность сельскохозяйственных культур, она не уступает развитым динамическим

моделям таким как (Assang et al., 2013), SAMPT(Wieland et al., 2006, 2015), LandCaRe-DSS (Wenkel et al., 2013), SEQALESS (van Ittersum et al., 2008) и другие.

В динамической модели Погода-Урожай детально описаны процессы обмена теплом, влагой, углекислым газом и элементами минерального питания между растением и окружающей средой.

Субмодель роста и развития растений связана со специально разработанной моделью минерального питания, параметры которой определены путём последовательной идентификации в составе всей модели Погода-Урожай. Наличие блока минерального (азотного) питания ослабляет «эмпиризм» модели и позволяет без дополнительной настройки параметров выполнять расчёты для широкого диапазона почв земледельческой зоны. Важно отметить, что повышение точности расчёта хозяйственной урожайности являлось основным критерием при разработке и оценке работоспособности этого блока.

Расчёт динамики влажности почвы, суммарного испарения и других составляющих водного баланса выполняется с достаточной точностью. Модель «остро» реагирует на отсутствие влаги, что важно для оценки засух и засушливых явлений.

В настройку модели входит достаточно большое число параметров, но при переходе к расчётам по всей территории земледельческой зоны необходимо идентифицировать два-три параметра. Далее (раздел 1.6) этот вопрос рассматривается более подробно.

Ещё один аргумент в пользу модели Погода-Урожай — входные данные модели включают только стандартную метеорологическую и агрометеорологическую информацию, что важно при остром дефиците данных для оптимизации и настройки параметров модели и дальнейших агроклиматических расчётов.

Таким образом, динамическая модель Погода-Урожай позволяет решать целый комплекс задач — оценка тенденций изменения агроклиматических

ресурсов и продуктивности сельскохозяйственных культур при современном климате и его прогнозируемых изменениях, диагностика текущих метеорологических условий, оценка управляющих воздействий, агротехнических мероприятий, сортосмены и другие задачи.

1.3 Структура имитационной системы Климат-Почва-Урожай

Разработка имитационных систем для оценки влияния колебаний и изменений климата на сельское хозяйство стала возможной благодаря развитию существующих моделей энергомассообмена и продуктивности агроэкосистем, с одной стороны, и прогрессу в сфере компьютерных технологий, с другой. Имитационная система Климат-Почва-Урожай (КПУ), ориентированная на обслуживание сельского хозяйства, разрабатывалась под руководством проф. О. Д. Сиротенко (Сиротенко, 1981, 1991; Сиротенко и др., 1984, 1995, 1998, 2006, 2011, 2012; Павлова, 1986, 2009, 2010, 2013, 2014, 2017, 2018, 2019; и др.) начиная с 80-х годов прошлого столетия.

В настоящее время динамическое моделирование продукционного процесса является общепринятым методологическим подходом при решении многих прикладных задач в агрометеорологии и смежных с ней науках (экологии, биологии, геоэкологии и др.). Перечень известных динамических моделей насчитывает десятки наименований (Менжулин, Саватеев, 1981, 2010; Менжулин, 1984; Галямин, 1981; Полуэктов, 1991; Полуэктов и др., 2006, 2012) и др. В России известна система имитационного моделирования AGROTOOL, представляющая собой компьютерную динамическую модель продукционного процесса сельскохозяйственного посева (Полуэктов, Жуковский, 1980; Полуэктов и др., 2006; Полуэктов, Топаж и др., 2012; Mirschel, Topazh et al., 2016). Эта модель может использоваться для решения практических задач агрономического мониторинга, таких как прогноз урожайности, оценка темпов фенологического развития, исследование и выбор наилучших агротехнических решений, и является альтернативой натурному полевому эксперименту. Система представляет собой инструмент

научного исследования в агро- и геоэкологии и позволяет решать задачи теоретического и практического характера, в том числе прогнозирования реакции агроэкосистем на климатические изменения столетия.

Из зарубежных широко используемых моделей и систем поддержки принятия решений (DSS) следует выделить WOFOST (van Diepen et al., 1989), Sirius (Jamieson et al., 1998), DSSAT (Jones et al., 2003; Hoogenboom et al., 2012), CropSyst (Stöckle et al., 2003). На основе модели промежуточной сложности REMICs (Wenkel et al., 2008) разработана региональная система для принятия решений Land Care-DSS (Mirschel et al., 2016), работающая в режиме реального времени.

Основу имитационной системы КПУ составляют следующие компоненты (Сиротенко, Павлова, 1994, 1995, 2011, 2012; и др.):

- имитационная динамическая модель Погода-Урожай;
- информационная база;
- комплекс программ численного анализа (стохастические модели, генерирующие годовой ход метеорологических элементов с учётом корреляционных связей между ними; комплекс программ, реализующих построение сценариев изменения климата с суточным разрешением; программы статистического анализа выходных данных системы и др.);
- средства визуализации входных и выходных параметров системы.

Схема связей имитационной системы КПУ представлена на рис. 1.1.

В базе данных имитационной системы КПУ содержатся данные о современных климатических условиях России по отдельным областям, краям и республикам в форме средних величин и в виде временных рядов среднемесячных или декадных значений метеорологических элементов за тот или иной период времени (максимальный период — с 1891 года по настоящее время). Присутствует необходимая для имитационного моделирования информация о преобладающих почвах: водно-физические и агрохимические свойства, содержание гумуса и другие характеристики. В базе данных также хранится фенологическая информация по зерновым и техническим культурам,

посевные площади этих культур и доступная урожайная статистика (данные Росстата по урожайности).

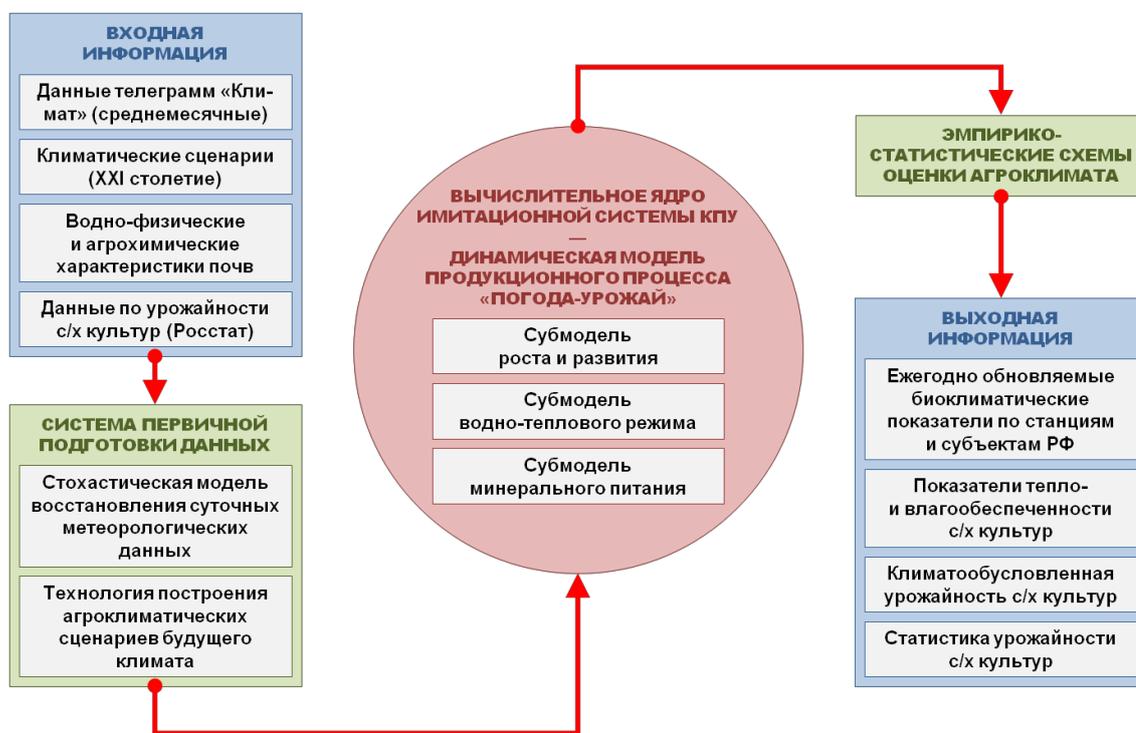


Рисунок 1.1 — Схема связей в имитационной системе КПУ

Система КПУ позволяет исследовать различные сценарии изменения природной среды. Для этого используются результаты расчётов по моделям глобальной циркуляции атмосферы, рекомендованные Межправительственной группой экспертов по изменению климата (IPCC), или сценарии, полученные в рамках международных проектов сравнения климатических моделей (Taylor et al., 2012), или сценарии, предложенные отдельными исследователями. Помимо изменения климатических параметров задаются изменения следующих не климатических величин:

- содержание CO₂ в атмосфере;
- содержание озона в приземном слое;
- содержание гумуса в пахотном слое почвы.

Система КПУ позволяет выбрать сельскохозяйственную культуру (в настоящее время это основные зерновые культуры и многолетние травы), определить дату сева и режим выращивания растений (сроки сева, орошение,

удобрения и дозы их внесения). Блок первичной подготовки данных включает стохастическую модель воспроизведения суточных метеорологических данных и технологию построения агроклиматических сценариев будущего климата.

Расчёты выполняются с суточным шагом по времени на протяжении всего вегетационного периода конкретной культуры. Наиболее значимые интегральные величины: конечная урожайность (иногда по отдельным органам растений), динамика надземной биомассы, площади листьев, а также суммарные затраты воды на транспирацию, динамика запасов воды в почве (по слоям 0–20, 20–50 и 50–100 см), фенологические даты и другие параметры.

Система КПУ предназначена, прежде всего, для агроклиматического мониторинга текущих и прогнозируемых агрометеорологических условий формирования сельскохозяйственных культур. В режимы работы системы включены: *ретроспективный* — по фактическим данным от начала 50-х годов 20 века до настоящего времени; *оперативный* — по ежедекадным данным (в реальном масштабе времени); *прогностический* — по ансамблю средне- и долгосрочных сценариев ожидаемых изменений климата с учётом антропогенных воздействий на климатическую систему.

Разработка имитационной системы КПУ осуществлялась автором диссертационной работы в рамках научно-исследовательских работ, при поддержке РФФИ и РНФ, а также международных научных фондов (INTAS, ETH, ERA-NET). Непосредственное участие в работе над моделью Погода-Урожай и имитационной системой КПУ начиналось от идентификации параметров модели до создания автоматизированной технологии агроклиматического мониторинга. Ссылки на публикации отражают процесс создания и развития имитационной системы КПУ (Сиротенко, Павлова и др., 1984, 1994, 1995, 2007, 2008, 2009, 2011; Павлова, 2009, 2013, 2014, 2016; Павлова и др., 2019).

1.4 Стохастическая модель суточных метеорологических данных

Расчёт агроклиматических индексов и проведение численных экспериментов в системе КПУ возможны при наличии суточных метеорологических данных. Переход от среднемесячных значений температуры воздуха и сумм осадков к суточным данным (температура и дефицит влажности воздуха, сумма осадков и число часов солнечного сияния) осуществляется с помощью разработанной автором стохастической модели. Перейдём к её рассмотрению.

Надёжный прогноз на 1–3 месяца суточных величин температуры, влажности воздуха, солнечной радиации и осадков вряд ли станет возможным в ближайшем будущем, если это вообще разрешимая задача (закон Лоренца). Основным источником информации для рационального задания будущих метеорологических условий являются, таким образом, климатические данные, которые необходимы и при использовании долгосрочных метеорологических прогнозов для «развёртывания» содержащейся в них чрезвычайно обобщённой информации (например, средних месячных значений температуры и осадков). На первый взгляд, задача построения «суточного» климатического сценария тривиальна. Действительно, аппроксимируя годовой ход тех или иных метеорологических элементов, заданных средними месячными или средними декадными значениями, аналитическими выражениями, мы получаем основу для расчёта средних суточных величин.

Эффекты влияния статистической структуры метеорологических параметров на продуктивность (Сиротенко, Павлова, 1986) представляются достаточно интересными, а их численные эксперименты на модели Погода-Урожай подтвердили наличие прямого отрицательного влияния на урожай роста дисперсии σ^2 метеорологических элементов, прежде всего, температуры. Так, возрастание величины σ средних суточных значений температуры от 0 до 2, 4, 6 и 8 °С сопровождалось снижением продуктивности соответственно на 2, 9, 18 и 31 %.

К настоящему времени известно достаточно много моделей, позволяющих генерировать суточные метеорологические данные для тех или иных целей. Так, Брух и Фрай (Bruhn et al., 1980) для расчётов потерь урожайности, связанных с фитофторой картофеля, разработали модель, основанную на использовании метода Монте-Карло, для имитации осадков, максимальной и минимальной температуры, относительной влажности воздуха и солнечной радиации. Последовательность дат выпадения осадков моделировалась простой цепью Маркова, а их величина — гамма-распределением. Максимальная и минимальная температура текущих суток вместе с максимальной температурой предшествующих суток моделировались с помощью трёхмерного нормального распределения, включающего параметры, зависящие от наличия или отсутствия осадков в предшествующие сутки. Подобным образом одномерными нормальными распределениями аппроксимировались минимальная влажность воздуха и число часов солнечного сияния. Распределение влажности ставилось в зависимость от осадков текущих и предшествующих суток, а радиации — лишь от осадков текущих суток. Близкую в целом модель для агрономических задач разработали Ларсен и Пенс (Larsen et al., 1982). Отметим модель Никса и Хара (Nicks and Harp, 1980) для имитации температуры и солнечной радиации. В ней для расчёта максимальной и минимальной температуры используется соотношение:

$$T_i = \bar{T} + r_T(T_{i-1} - \bar{T}) + t\sigma_T(1 - r_T^2)^{\frac{1}{2}}, \quad (1.8)$$

где T_i , T_{i-1} — температура за текущие и предшествующие сутки соответственно; \bar{T} — средняя температура; r_T — коэффициент автокорреляции для температуры; t — стандартизованная нормально распределённая случайная величина; σ_T — среднее квадратическое отклонение.

Параметры \bar{T} , σ_T и r_T оценивались отдельно для следующих четырёх классов случаев: $d-d$, $d-w$, $w-d$ и $w-w$ (d — день без осадков, w —

день с осадками). Последовательность «сухих» и «влажных» дней задавалась цепью Маркова.

В заключение этого краткого обзора упомянем стохастический генератор погоды LARS-WG (Racsko et al., 1991; Semenov, Barrow, 1997). Для генерации стохастических временных рядов ежедневных данных в LARS-WG при расчётах по климатическим сценариям SRES применялись метеорологические данные за период 1961–1990 гг. (Sommer et al., 2013).

Автором разработана модель генератора погоды для комплекса суточных климатических данных, включающего в себя случайные величины: температуру воздуха на высоте метеорологической будки ($^{\circ}\text{C}$), дефицит влажности воздуха (мбар), число часов солнечного сияния по гелиографу (час), суточную сумму осадков (мм). Для построения вероятностной модели, описывающей комплекс случайных величин, привлекается гипотеза их нормального распределения, которая в действительности лишь приближённо описывает их совместное распределение, но является достаточной для решения поставленной задачи.

В табл. 1.1 приведены оценки первых десяти значений автокорреляционных функций для трёх элементов: температуры воздуха (x_1), дефицита влажности воздуха (x_2), числа часов солнечного сияния (x_3). Расчёты выполнены нами по данным агрометстанции (А) Ершов Саратовской области.

Таблица 1.1 — Оценки первых десяти значений автокорреляционных функций по данным А Ершов

Предиктор	Временной сдвиг, τ									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
x_1	1,00	0,82	0,58	0,40	0,27	0,20	0,10	0,10	0,08	0,06
x_2	1,00	0,79	0,60	0,46	0,36	0,31	0,26	0,24	0,21	0,20
x_3	1,00	0,36	0,20	0,14	0,10	0,07	0,00	-0,03	-0,02	-0,01

Полученные результаты показывают, что при моделировании влияния метеорологических условий на продукционный процесс

сельскохозяйственных культур достаточно учитывать авто- и кросс-корреляции входных метеорологических данных до временных сдвигов $\tau = 5$ суткам.

Для метеостанций, расположенных в разных агроклиматических зонах, получены близкие по значениям элементы кросскорреляционной матрицы, что, в первом приближении, может служить основанием для предположения о пространственной стационарности моделируемого процесса. Матрица коэффициентов корреляции соответствующего 15-тимерного случайного вектора, построенная по данным А Ершов для июня, представлена в табл. 1.2.

Таблица 1.2 — Матрица коэффициентов корреляции моделируемой системы случайных величин

τ	x_1					x_2					x_3				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
1	1,00	0,82	0,58	0,40	0,27	0,27	0,25	0,21	0,15	0,11	0,84	0,71	0,53	0,38	0,28
2		1,00	0,82	0,58	0,40	0,25	0,27	0,25	0,21	0,15	0,71	0,84	0,71	0,53	0,38
3			1,00	0,82	0,58	0,21	0,25	0,27	0,25	0,21	0,53	0,71	0,84	0,71	0,53
4				1,00	0,82	0,15	0,21	0,25	0,27	0,25	0,38	0,53	0,71	0,84	0,71
5					1,00	0,11	0,15	0,21	0,25	0,27	0,28	0,38	0,53	0,71	0,84
6						1,00	0,36	0,20	0,14	0,10	0,38	0,29	0,22	0,17	0,14
7							1,00	0,36	0,20	0,14	0,29	0,38	0,29	0,22	0,17
8								1,00	0,36	0,20	0,22	0,29	0,38	0,29	0,22
9									1,00	0,36	0,17	0,22	0,29	0,38	0,29
10										1,00	0,14	0,17	0,22	0,29	0,38
11											1,00	0,79	0,60	0,46	0,36
12												1,00	0,79	0,60	0,46
13													1,00	0,79	0,60
14														1,00	0,79
15															1,00

Из данных, приведённых в табл. 1.2 можно заключить, что для суточных значений рассматриваемых параметров значимыми являются не только автокорреляционные, но и кросскорреляционные связи при $\tau = 1, 2, 3, 4$ и даже $\tau = 5$. Высокая степень значимости характерна для кросскорреляционных связей между температурой и влажностью воздуха. Соответствующие коэффициенты корреляции равны 0,84; 0,71; 0,53; 0,38; 0,28.

Многомерное нормальное распределение в стандартизованном масштабе определяется корреляционной матрицей (K). Известно, что вектор $\xi^* = (\xi_1, \xi_2, \xi_3, \dots, \xi_n)$ с заданным распределением можно получить специальным линейным преобразованием вектора $\eta^* = (\eta_1, \eta_2, \eta_3, \dots, \eta_n)$, компоненты которого суть независимые нормально распределённые случайные величины с единичной дисперсией и нулевым математическим ожиданием. Следовательно, можно записать:

$$\xi = A^* \eta, \quad (1.9)$$

где A^* — треугольная матрица, полученная в результате факторизации корреляционной матрицы K (факторизация — представление матрицы в виде произведения двух транспонированных матриц $A^* A = K$).

Таким образом, технология моделирования многомерного нормального распределения сводится к многократному матричному умножению ранее вычисленной треугольной матрицы коэффициентов A на реализации случайного вектора η , для расчёта которых может использоваться одна из стандартных программ генерирования нормально распределённых псевдослучайных величин.

Для получения 30-дневных (месячных) реализаций из множества векторов $\xi_1, \xi_2, \xi_3, \dots, \xi_n$ ($n=1000$ — объем выборки) формируются сочетания по 6 пентад, из которых выбирались варианты, удовлетворяющие условию:

$$\frac{1}{m} \sum_{ij} |r_{ij} - r_{ij}^*| \leq \varepsilon, \quad (1.10)$$

где r_{ij}, r_{ij}^* — элементы рассчитанной и исходной матриц соответственно;
 m — число сопоставляемых коэффициентов корреляции;
 ε — заданная точность.

Технология моделирования суточного хода осадков коренным образом отличается от вышеизложенного ввиду дискретного характера распределения этой случайной величины — суточной суммы осадков. Очевидно, что даты выпадения осадков и их величина должны быть увязаны с колебаниями

остальных метеорологических элементов комплекса — температурой и дефицитом влажности воздуха и радиационным режимом. Нами использован аппарат дискриминантного анализа. Процедуру распознавания дней с осадками строим на основании соотношения правдоподобия (Андерсон, 1963):

$$\lambda = \frac{1 + \frac{N_2}{N_2 + 1} (\bar{x} - x^{(2)})^* C^{-1} (\bar{x} - x^{(2)})}{1 + \frac{N_1}{N_1 + 1} (\bar{x} - x^{(1)})^* C^{-1} (\bar{x} - x^{(1)})}, \quad (1.11)$$

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 λ будем интерпретировать как вероятность выпадения осадков в данные сутки. Оценки вероятности (P) правильной классификации дат осадков, вычисленных при разных пороговых значениях $\lambda(\lambda_o)$, представлены в табл. 1.3.

Таблица 1.3 — Оценка вероятности (P) правильной классификации дней с осадками (май–июль, А Ершов, Саратовская область)

Предиктор	Оценка вероятности (P)					
	Пороговые значения (λ)					
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
x_1, x_2, x_3	0,395	0,743	0,786	0,764	0,723	0,721
x_1, x_3	0,500	0,739	0,769	0,760	0,725	0,721
x_1, x_2	0,360	0,687	0,765	0,757	0,721	0,721
x_2, x_3	0,512	0,755	0,779	0,782	0,755	0,722

Приведённые данные свидетельствуют, что вероятность правильной классификации дней с осадками ($\lambda \geq \lambda_o$) при использовании информации о температуре, дефиците влажности воздуха и радиации, достаточно высока и составляет 78 % для летних месяцев. Заметим, что размерность вектора-

предиктора можно сократить за счёт температуры воздуха, исключив её без существенной потери точности.

Таким образом, построение стохастической модели суточных климатических данных включает в себя следующие этапы:

1. Построение вектора отклонений от нормы $\Delta(\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3)$ с помощью табл. 1.2.

2. Формирование вектора отклонений ежемесячных реализаций из набора пентад, полученных в п. 1.

3. Расчёт суточных значений вектора метеорологических параметров $x(x_1, x_2, x_3)$ в абсолютных единицах согласно формуле:

$$\tilde{x}_i^j = \Delta x_i^j \sigma_{x_i} + \bar{x}_i^j, \quad (1.12)$$

где $i=1, 2, 3$; $j=1, 30$; σ_{x_i} — средние квадратические отклонения соответствующих метеорологических параметров: $i=1$ — температура воздуха, $i=2$ — дефицит влажности воздуха, $i=3$ — число часов солнечного сияния.

4. Расчёт суточных значений климатических норм путём аппроксимации годового хода метеорологических величин тригонометрическим полиномом вида:

$$\varphi(\tau) = A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \left[A_k \cos\left(\frac{2\pi k}{365} \tau\right) + B_k \sin\left(\frac{2\pi k}{365} \tau\right) \right], \quad (1.13)$$

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

5. Расчёт коэффициента правдоподобия λ (1.11) и формирование массива суточных значений осадков по их месячным суммам.

Технология стохастического моделирования суточных климатических данных реализована в виде комплекса программ на языке FORTRAN и включена в структуру системы КПУ. Автором получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Стохастическая модель

генерации суточных метеорологических параметров по их среднемесячным значениям» (№ 2015660183) (Павлова, 2015).

1.5 Прямое воздействие роста концентрации CO₂ на растения

Прогнозы изменений климата по наиболее вероятным сценариям, полученным с помощью моделей общей циркуляции атмосферы и океана, будут рассматриваться в последующих главах.

Перейдём к анализу прямого воздействия увеличения содержания CO₂ на растения. Для широко распространённых в умеренных широтах растений типа C₃, к которым относятся такие культуры, как пшеница, ячмень, овёс, сахарная свёкла, картофель и др., характерен значительный отклик продуктивности на рост концентрации CO₂. Для растений типа C₄ (кукуруза, сорго, сахарный тростник) такой отклик менее значителен. Прямое влияние CO₂ на суммарный фотосинтез посева учитывается через модифицированную формулу Шартье (1.4). Для более полного учёта воздействия повышенных уровней концентрации CO₂ на физиологические процессы в состав модели введена «углекислотная» зависимость для устьичного сопротивления:

$$\frac{1}{r_s} = \frac{1}{r_s^*} \left[1 - (1 - ae^{bVPD}) \frac{\bar{C} - \bar{C}^*}{\bar{C}^*} \right], \quad (1.14)$$

где r_s^* — устьичное сопротивление при современной концентрации CO₂; \bar{C} , \bar{C}^* — современная и прогнозируемая концентрации CO₂ соответственно; VPD — дефицит влажности воздуха; a , b — константы.

Учёт прямого влияния CO₂ на устьичную проводимость позволяет охватить высокие иерархические уровни воздействия — всего растения и посева в целом. В качестве примера приведём результаты расчётов по яровой пшенице, которая выращивалась от всходов до созревания при различных концентрациях CO₂. Реакция общей сухой массы растений на увеличение концентрации CO₂ по экспериментальным данным (Sionit, 1976) и по результатам расчётов показана в табл. 1.4. Лучшего совпадения фактических

и расчётных данных вряд ли можно ожидать, поскольку не все условия этого эксперимента известны.

Таблица 1.4 — Реакция общей сухой массы растений на увеличение концентрации CO₂ по экспериментальным данным (Sionit, 1976) и по результатам расчётов

CO ₂ млн ⁻¹	Общая сухая масса, %	
	эксперимент	КПУ
350	100	100
675	160	150
1000	162	173

Важно проверить реакцию модифицированной модели на рост содержания CO₂ при недостатке почвенной влаги. В работе (Gifford, 1977, 1979) приведены результаты опыта с яровой пшеницей в условиях сильной засухи, когда увеличение концентрации CO₂ от 340 до 590 ppm привело к росту урожайности в 2 раза. Расчёты при параметрах, имитирующих условия этого опыта в системе КПУ, показали рост урожайности в 1,9 раза.

Результаты расчётов для 10-летнего ряда наблюдений в Ершове с использованием приведённой выше схемы показали адекватную реакцию урожайности на удвоение концентрации CO₂ при вариации условий увлажнения. Отмечено, что в годы с сильной засухой (1972 и 1975 гг.) абсолютные приращения урожайности малы (1–2 ц/га), но относительные отклонения достигают 200 %. При благоприятных условиях увлажнения (1974, 1987 гг.) абсолютный прирост урожайности может достигать в данном регионе 10 ц/га, хотя относительные величины лишь приближаются к 30–50 % диапазону.

1.6 Идентификация и верификация (проверка адекватности) системы Климат-Почва-Урожай

Динамическая модель Погода-Урожай включает широкий спектр параметров. В их число входят простые биометрические характеристики

растений, параметры биологических функций и достаточно сложно интерпретируемые параметры фотосинтеза и дыхания. Вопросы поэтапной и полной идентификации параметров данной математической модели были рассмотрены ранее в работах (Сиротенко, 1981; Сиротенко, Абашина, Павлова, 1984, 1995; Бойко, Павлова, 1986). Идентификация параметров модели осуществлялась на начальном этапе по данным специальных полевых экспериментов, а затем их уточнением путём оптимизации в процессе численных экспериментов на модели Погода-Урожай.

В настоящей работе рассмотрены прикладные аспекты этого вопроса, касающиеся идентификации и верификации модели (проверки адекватности) и её применимости для агроклиматических расчётов при разном пространственном разрешении — от федеральных округов (ФО), отдельных субъектов (краёв, областей и республик) до административных районов области. В качестве входных данных для верификации модели использовались ряды фактической урожайности сельскохозяйственных культур (данные Росстата).

Идентификация параметров модели

С учётом целей и задач представляемой работы автором осуществлена идентификация параметров, контролирующих непосредственно интенсивность продукционного процесса растений. Это, прежде всего, параметры в составе формулы Шартье для расчёта фотосинтеза:

α — угол наклона световой кривой фотосинтеза (1.4);

r_c — фотохимическое сопротивление фотосинтеза;

a_r — параметр в формуле расчёта устьичного сопротивления.

Целевая функция имеет следующий вид:

$$F(\alpha, r_c, a_r) = \sum_{j=1, N} (Y_m - Y_f)^2, \quad (1.15)$$

где Y_m — урожайность, рассчитанная по модели Погода-Урожай; Y_f — фактическая урожайность (Росстат); N — длина ряда наблюдений.

Исследование ошибок динамики фитомассы показало, что самым значимым параметром, от которого в большой степени зависит общий уровень фитомассы агроценоза, является параметр α [$\text{мг}(\text{CO}_2) \cdot \text{с} \cdot \text{см}^2 / \text{дж}$] — угол наклона световой кривой фотосинтеза в формуле Шартье.

Параметр a_r характеризует степень реакции модели на водный дефицит. Для его определения необходимы данные по динамике биомассы или урожайности в контрастные по условиям увлажнения годы. В отличие от параметра α параметры a_r и r_c оказывают слабое влияние на динамику накопления биомассы, поэтому их оценки остаются постоянными, определенными на начальном этапе идентификации модели Погода-Урожай.

Многолетний опыт работы с динамической моделью Погода-Урожай позволил разработать алгоритм идентификации её основных параметров. Процесс идентификации (настройки, калибровки) параметров динамической модели Погода-Урожай, выполненный на основе данных наблюдений за период глобального потепления (1976–2017 гг.), технологически сложен и трудоёмок, поэтому считаем целесообразным опустить рассмотрение технических деталей и перейти к результатам проверки адекватности модели.

Результаты проверки адекватности

Ниже (рис. 1.2) иллюстрируются результаты проверки адекватности модели Погода-Урожай по данным наблюдений за запасами влаги в почве под яровой пшеницей на 4 наблюдательных пунктах (НП) Приволжского ФО.

Таким образом, динамическая модель Погода-Урожай позволяет моделировать процесс формирования урожая, задавая те или иные метеорологические условия с суточным шагом по времени от всходов растений до уборки урожая. При этом рассчитывается динамика суточных величин следующих гидрометеорологических показателей: влагозапасов почвы (по слоям 0–20, 0–50 и 0–100 см), фактического и потенциального испарения, дефицита испарения, гидротермического коэффициента,

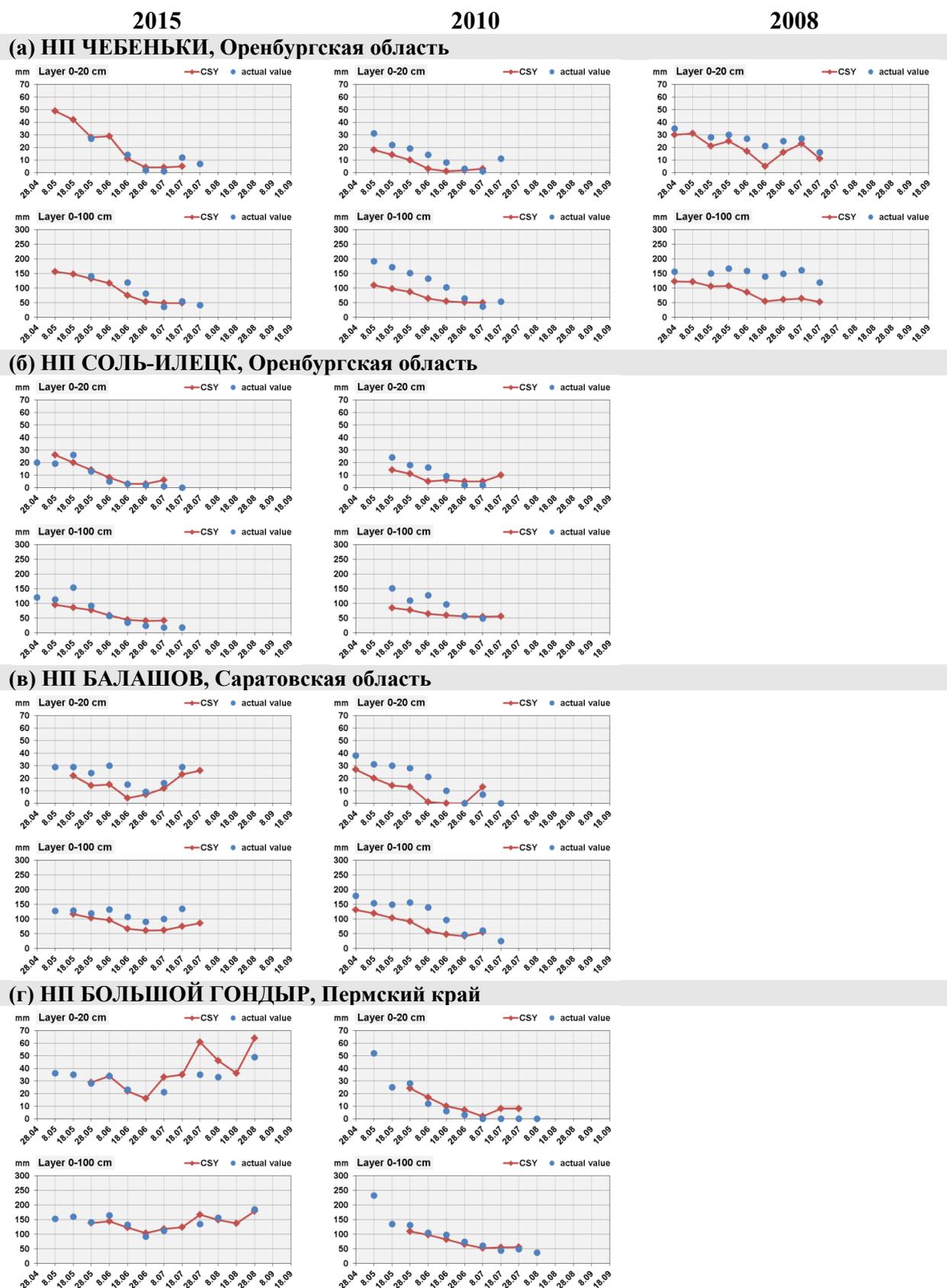


Рисунок 1.2 — Запасы влаги в пахотном (0–20 см) и метровом (0–100 см) слоях почвы в 2015, 2010 и 2008 гг. под яровой пшеницей по отдельным НП в Приволжском ФО: измеренные данные (синий цвет) и данные расчётов в системе КПУ (красный цвет)

определяются даты перехода температуры воздуха через 0, 5, и 10 °С весной и осенью, суммы температур за период с температурой выше 0, 5, и 10 °С и другие показатели. Вместе с тем рассчитывается динамика биометрических показателей посевов — площади листьев, биомассы и высоты растений и др.

Результаты проверки адекватности по отдельным субъектам (краям, областям, республикам)

Рассмотрим результаты проверки адекватности модели по фактическим данным урожайности сельскохозяйственных культур (данные Росстата) по отдельным субъектам России (краям, областям, республикам). В отдельных случаях возможна верификация параметров модели для выбранных контуров (административный район, агроклиматический район и др.) при наличии данных по фактической урожайности.

В качестве входных данных использовались метеорологические и агрометеорологические наблюдения на сети станций и постов Росгидромета и данные Росстата по динамике урожайности зерновых культур за 2007–2016 гг.

Выбор этого периода обусловлен двумя причинами:

(1) Относительной стабилизацией посевных площадей. В последние десятилетия из севооборота во многих зернопроизводящих регионах выведены почвы с низкой продуктивностью, что повлияло на урожайную статистику.

(2) Подъёмом уровня агротехники, начиная с середины 90-х годов 20 века. В последние годы агротехнические предпосевные мероприятия, внесение более высоких доз минеральных удобрений, введение севооборотов, качественный сортовой семенной материал и др. позволили получать и на государственных предприятиях, и в фермерских хозяйствах более высокие урожаи.

При таких изменениях в сельском хозяйстве России без локальной калибровки модели нельзя получить хорошую сходимость рассчитанных и

фактических урожаев. Поэтому выбор периода длиной в десятилетие для проверки адекватности представляется нам достаточным.

Критерием пригодности системы КПУ для оценки будущих изменений продуктивности сельскохозяйственных культур в первую очередь является степень согласованности рассчитанных по модели и фактических урожаев на территории отдельных субъектов (областей, краёв, республик) как в среднем за длительный период, так и в конкретные годы. Проведённая настройка внутренних параметров системы КПУ позволяет воспроизводить наблюдаемые ряды урожайности за последние десятилетия.

Рассмотрим результаты расчётов урожайности яровой и озимой пшеницы в Республиках Башкортостан, Татарстан и Оренбургской области Приволжского ФО за 2007–2016 гг. (рис. 1.3).

Представленные на рис. 1.3 данные свидетельствуют о согласованности фактической и моделируемой урожайности в основных зерновых регионах Приволжского ФО.

Средняя рассчитанная в системе КПУ урожайность яровой пшеницы в Республиках Башкортостан, Татарстан и Оренбургской области составляет 14,6; 19,7 и 6,7 ц/га при фактических значениях 15,1; 20,5 и 7,3 ц/га. Относительная ошибка расчётов составляет от 5 до 10 %.

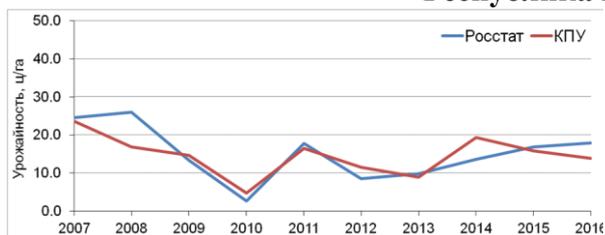
В целом удовлетворительно воспроизводится динамика урожайности на указанных территориях, включая экстремальные гидрометеорологические условия в 2010 г., когда отмечались исключительно засушливые условия, и сравнительно благоприятные агрометеорологические условия в 2007, 2008, 2011 и 2016 гг.

Результаты, иллюстрирующие степень согласованности моделируемой и фактической урожайности, представлены на рис. 1.4. Соответствующие коэффициенты корреляции моделируемой и фактической урожайности яровой пшеницы за периоды с 2007 по 2016 гг. и с 2012 по 2016 гг. составляют 0,85 и 0,90.

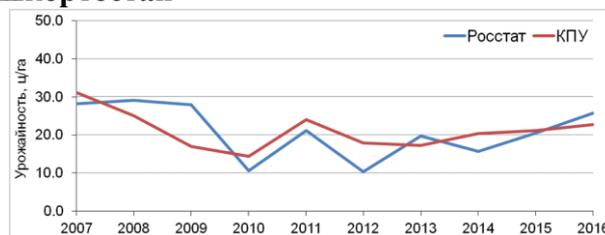
(а) Яровая пшеница

(б) Озимая пшеница

Республика Башкортостан

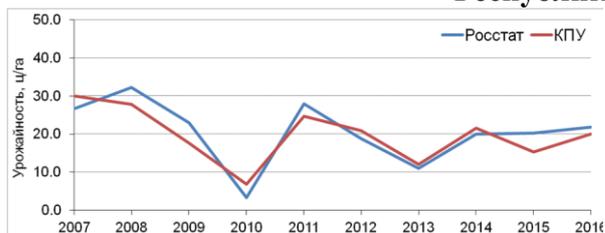


Средняя урожайность (ц/га):
Росстат — 15,1; КПУ — 14,6

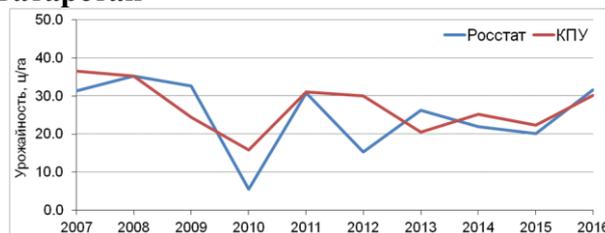


Средняя урожайность (ц/га):
Росстат — 20,9; КПУ — 21,1

Республика Татарстан

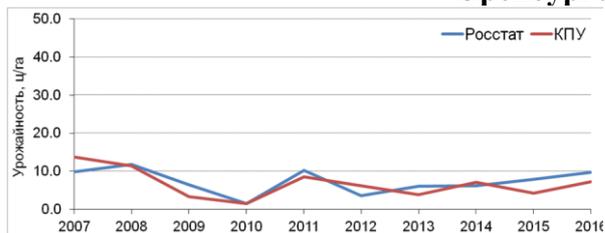


Средняя урожайность (ц/га):
Росстат — 20,5; КПУ — 19,7

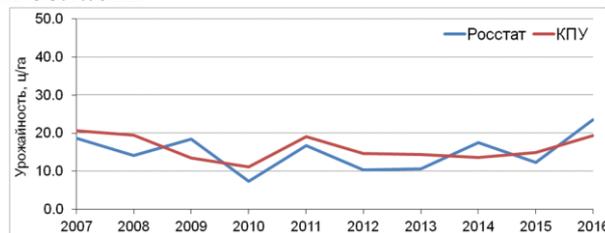


Средняя урожайность (ц/га):
Росстат — 25,1; КПУ — 27,1

Оренбургская область



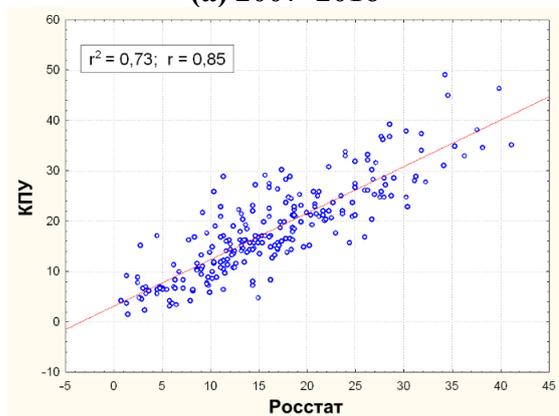
Средняя урожайность (ц/га):
Росстат — 7,3; КПУ — 6,7



Средняя урожайность (ц/га):
Росстат — 15,0; КПУ — 16,1

Рисунок 1.3 — Фактическая (Росстат, синяя линия) и расчётная (КПУ, красная линия) урожайность (а) яровой и (б) озимой пшеницы для Республик Башкортостан и Татарстан и Оренбургской области за период 2007–2016 гг.

(а) 2007–2016



(б) 2012–2016

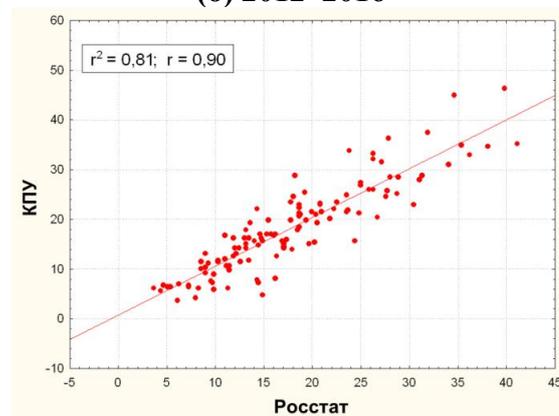


Рисунок 1.4 — Фактическая (Росстат) и моделируемая (система КПУ) урожайность яровой пшеницы (ц/га) за периоды (а) 2007–2016 (б) 2012–2016 гг. в Приволжском, Центральном (чернозёмные области) и Южном ФО

Для получения полной пространственной картины урожайности рассчитаны статистические метрики рядов урожайности яровой пшеницы — моделируемой (*sim*) и фактической (*obs*) — за период 2007–2016 гг. по 24 субъектам трёх ФО (табл. 1.5). В этой же таблице приведены относительные доли посевных площадей яровой пшеницы (%).

В качестве статистических метрик рассматривались следующие (Кендалл и Стюарт, 1976):

Среднее отклонение:

$$MD = 1/n \sum_{i=1}^n (Y_i^{sim} - Y_i^{obs}); \quad (1.16)$$

Стандартное отклонение (Standard deviation):

$$SD = \sqrt{1/n \sum_{i=1}^n (Y_i^{sim} - \bar{Y}^{obs})^2}; \quad (1.17)$$

Нормированное стандартное отклонение:

$$NSD = SD / \bar{Y}^{obs}; \quad (1.18)$$

Среднеквадратическое отклонение (Root-mean-square deviation):

$$RMSD = \sqrt{1/n \sum_{i=1}^n (Y_i^{sim} - Y_i^{obs})^2}; \quad (1.19)$$

Нормированное среднеквадратическое отклонение:

$$NRMSD = RMSD / \bar{Y}^{obs}. \quad (1.20)$$

Таблица 1.5 — Статистические метрики (среднее отклонение, MD; среднеквадратическое отклонение, SD; Root-mean-square deviation, RMSD) и их нормированные значения по результатам расчёта урожайности яровой пшеницы в системе КПУ в Приволжском, Южном и Центральном (чернозёмные области) ФО за 2007–2016 гг.

Регион: ФО, область, край, республика	MD, ц/га	SD _{obs} ц/га	NSD _{obs} [-]	SD _{sim} ц/га	NSD _{sim} [-]	RMSD ц/га	NRMSD [-]	Площадь, %
Центральный	5,4	8,10	0,34	6,28	0,22	8,32	0,35	6,0
Белгородская	4,1	10,60	0,42	5,53	0,19	7,93	0,31	0,1
Воронежская	3,9	7,46	0,36	7,12	0,29	6,69	0,33	0,9
Курская	3,5	7,55	0,29	5,13	0,17	6,05	0,23	1,3
Липецкая	9,7	7,93	0,32	7,18	0,21	12,26	0,50	1,3
Тамбовская	5,6	6,97	0,32	6,44	0,24	8,67	0,40	2,4
Приволжский	1,2	4,68	0,33	4,83	0,33	3,82	0,28	91
Кировская	3,0	3,05	0,21	3,84	0,22	4,25	0,29	2,0
Нижегородская	2,3	4,08	0,24	3,78	0,19	3,65	0,21	3,1
Оренбургская	-0,6	3,20	0,44	3,78	0,56	2,45	0,34	33,6
Пензенская	3,0	6,56	0,39	6,03	0,31	7,33	0,44	2,5
Пермский	1,7	1,75	0,15	2,62	0,20	2,44	0,21	2,9
Башкортостан	-0,5	7,13	0,47	5,30	0,36	3,89	0,26	15,7
Марий Эл	1,4	3,78	0,30	3,42	0,24	3,14	0,25	1,0
Мордовия	1,8	6,02	0,30	7,13	0,32	5,59	0,28	1,1
Татарстан	-0,8	8,35	0,41	7,07	0,36	3,43	0,17	12,3
Самарская	0,5	4,38	0,39	5,91	0,50	5,11	0,45	3,2
Саратовская	2,2	4,26	0,42	5,23	0,43	3,88	0,38	6,4
Удмуртская	0,9	3,30	0,27	3,42	0,26	1,87	0,15	2,1
Ульяновская	-0,2	4,41	0,33	4,93	0,37	3,65	0,27	1,8
Чувашская	1,5	5,22	0,29	5,18	0,27	2,83	0,16	3,4
Южный	1,5	5,58	0,53	6,22	0,45	5,15	0,49	3,0
Астраханская	3,1	7,58	0,85	7,32	0,61	8,31	0,93	0,01
Волгоградская	2,4	4,67	0,64	4,06	0,42	4,38	0,60	2,5
Краснодарский	1,8	4,95	0,16	9,39	0,29	5,86	0,19	0,1
Калмыкия	-0,1	5,24	0,62	4,65	0,55	4,47	0,53	0,1
Ростовская	0,3	5,47	0,37	5,68	0,38	2,73	0,18	0,3
								100,0

Анализ табл. 1.5 показывает, что межгодовая изменчивость урожайности в рассматриваемых регионах оказывается высокой. Нормированное стандартное отклонение (NSD_{obs}) фактической урожайности

яровой пшеницы в Центральном, Приволжском и Южном ФО составляет 0,34; 0,33 и 0,53 соответственно. Для сравнения — изменчивость урожайности яровой пшеницы в США в основных районах её производства по данным (Пасов, 1986; Раунер, 1981) составляет 0,18–0,20.

Самые большие значения показателя изменчивости (NSD_{obs}) получены в Астраханской (0,85), Волгоградской (0,64) областях и Республике Калмыкии (0,62). В Приволжском ФО наибольшая изменчивость наблюдается в Республиках Башкортостан и Татарстан (0,47 и 0,41 соответственно), а также в Оренбургской и Саратовской областях (0,44 и 0,42). Нормализованная межгодовая фактическая (NSD_{obs}) и моделируемая (NSD_{sim}) изменчивость урожайности в среднем по ФО воспроизводится удовлетворительно, а по отдельным субъектам хорошо, учитывая её значительную межгодовую изменчивость.

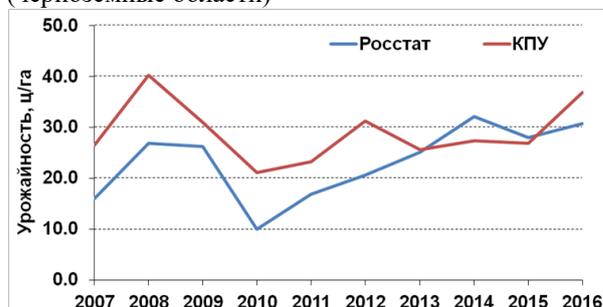
Отметим, что лучшие результаты по адекватности системы КПУ получены на территориях с большими посевными площадями. Относительные посевные площади (нормированные на общую посевную площадь рассматриваемого региона) яровой пшеницы в Приволжском, Центральном и Южном ФО составляют 91, 6, и 3 % соответственно (табл. 1.5). В Приволжском ФО значения NRMSD изменяются в интервале от 0,15 (Республика Удмуртия) до 0,45 (Самарская область), что свидетельствует о хорошей сходимости моделируемой урожайности и фактической. Плотность сети станций в Приволжском ФО для модельных расчётов значительно выше, чем в других регионах, что позволяет повышать точность расчётов в системе КПУ.

Результаты проверки адекватности по отдельным федеральным округам

Результаты проверки адекватности модели по фактическим данным урожайности зерновых культур (данные Росстата) по отдельным федеральным округам показывают, что получены согласованные оценки фактической и

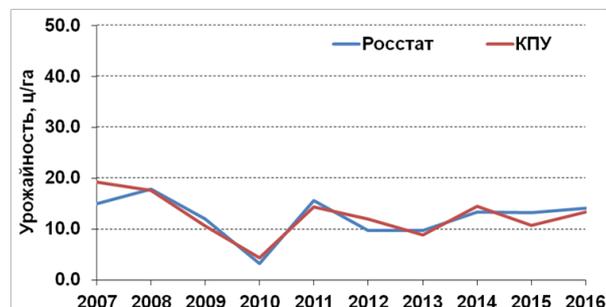
расчётной (КПУ) урожайности яровой пшеницы и их межгодовой изменчивости за период 2007–2016 гг. (рис. 1.5).

Центральный ФО (чернозёмные области)



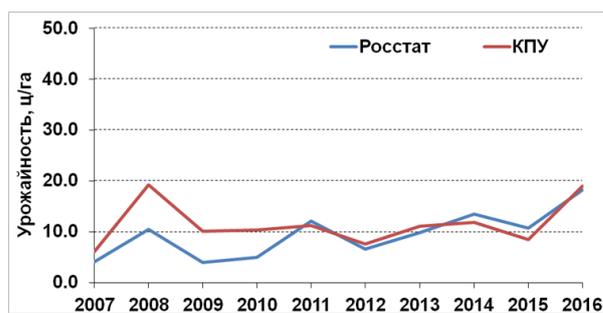
Средняя урожайность (ц/га):
Росстат — 23,2; КПУ — 29,0

Приволжский ФО



Средняя урожайность (ц/га):
Росстат — 12,3; КПУ — 12,5

Южный ФО



Средняя урожайность (ц/га):
Росстат — 9,4; КПУ — 11,5

Рисунок 1.5 — Динамика фактической (Росстат) и расчётной (КПУ) урожайности яровой пшеницы за период 2007–2016 гг. (осреднение по ФО выполнено с учётом посевных площадей)

ГЛАВА 2. Агроклиматические ресурсы земледельческой зоны России при наблюдаемых изменениях климата

2.1 Информационная база метеорологических и агрометеорологических данных наблюдений

Одним из основных блоков системы КПУ является база данных (БД), содержащая метеорологическую и агрометеорологическую информацию — ретроспективную, текущую и прогностическую. База включает архив климатических и агроклиматических данных, с данными наблюдений, временные ряды расчётных индексов, почвенные и агротехнические показатели, характеризующие агроклиматические ресурсы по регионам земледельческой зоны России. Актуальность БД поддерживается разработанной технологией поддержки архива, его пополнения текущей информацией и контроля данных.

Рассмотрим содержание и назначение основных элементов базы данных — рядов наблюдений метеорологических и агрометеорологических параметров.

1. Среднесуточные метеорологические данные — температура воздуха, сумма осадков, число часов солнечного сияния и дефицит влажности воздуха. Эти данные имеются для отдельных реперных точек за тот или иной период протяжённостью от 20 до 30 лет и используются для настройки модели на этапе моделирования и при разработке и включении новых блоков в систему КПУ — например, данные наблюдений агрометеорологических станций (А) Ершов, Чердынь; метеорологических станций (МС) Саратов, Липецк, Ростов, Малоярославец и Суходрев (Калужская область) и целого ряда МС Приволжского ФО.

2. Временные ряды наблюдений — среднемесячные данные по температуре воздуха и месячным суммам осадков за период с 1891 по 2017 гг. («столетние ряды») по 104 МС и метеорологическим постам (МП) на территории земледельческой зоны России. Эти данные позволяют проводить

глубокий ретроспективный тематический анализ климатической и экономической (прежде всего, сельскохозяйственной) предыстории России. Работа с данными в этом режиме необходима и для поиска лет-аналогов с целью интерпретации климатических аномалий текущих лет и прогнозируемых сценариев изменения климата. На их основе возможно «реконструировать» условия лет с катастрофическими засухами, суровыми зимами или, напротив, с рекордными урожаями и т. д.

3. Временные ряды наблюдений — среднемесячные данные по температуре воздуха и атмосферным осадкам по 455 МС и МП на территории России, Казахстана, Белоруссии и Молдавии за период с 1951 по 2017 гг. Эти данные представляют собой подмножество базы данных «Климат», созданной в Институте глобального климата и экологии Росгидромета и РАН. База данных «Климат» используется в Росгидромете в рамках действующего мониторинга приземного климата России (Груза, Ранькова, 1980, 2012; Груза и др., 2016).

4. Данные декадных телеграмм, поступающих по каналам связи (в настоящее время по системе «Прометей») из региональных гидрометеорологических управлений Гидрометслужбы России 1, 11 и 21-го числа каждого месяца.

Эти данные содержат временные ряды основных метеорологических параметров (температура воздуха, атмосферные осадки, дефицит влажности воздуха и др.) и агрометеорологических (фенологические даты, измеренные запасы влаги в почве по слоям, температура почвы на глубине узла кущения, глубина промерзания почвы, оценка состояния посевов сельскохозяйственных культур и др.) за период с 1992 по 2017 гг.

Данные поступают оперативно и служат основой ежегодного агроклиматического мониторинга с помощью системы КПУ. Сеть наблюдений охватывает 767 станций, расположенных на территории 78 субъектов РФ. На рис. 2.1 представлена картосхема размещения станций-корреспондентов оперативных агрометеорологических данных на

территории основных зерновых регионов на Европейской части (ЕЧ) России — центрально-чернозёмных областей, Южного и Приволжского ФО.

5. Метеорологические данные, осреднённые за базовый период 1961–1990 гг. (климатическая норма), а также за более поздние периоды 1981–2000, 1976–2017 и 1998–2017 гг. (последнее двадцатилетие).

6. Данные климатических сценариев по изменению среднемесячной температуры воздуха и месячных сумм осадков за 12 календарных месяцев по отношению к базовому периоду, полученные на пятом этапе работы над проектом сравнения глобальных климатических моделей CMIP5 — Coupled Model Intercomparison Project (Diffenbaugh, Field, 2013).

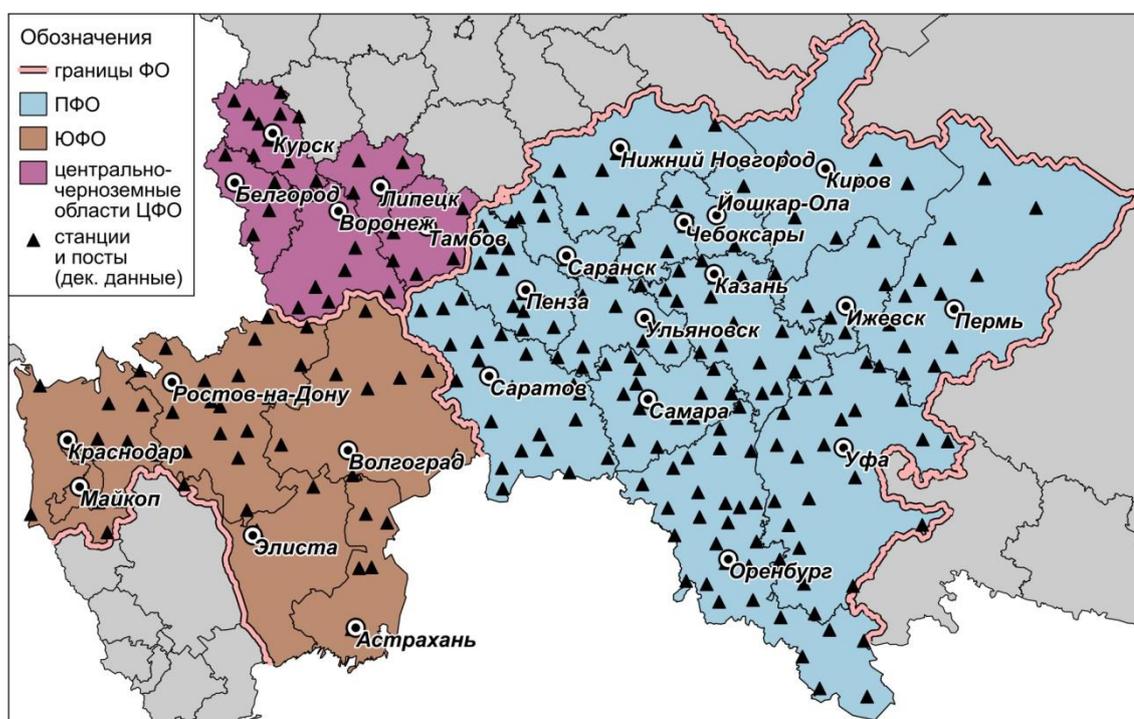


Рисунок 2.1 — Картосхема метеорологических и агрометеорологических станций и постов на территории чернозёмных областей Центрального ФО (ЦФО), Южного (ЮФО) и Приволжского (ПФО) ФО

Разработан алгоритм преобразования данных климатических сценариев, представленных для территории России и стран ближнего зарубежья в узлах регулярной сетки ($1,0^\circ$ с. ш. \times $1,0^\circ$ в. д.), во входной поток данных для расчётов в системе КПУ. Для этой цели автором разработан

комплекс программ, позволяющих интерполировать эти данные в сеть станций на территории земледельческой зоны России.

Анализируемые временные ряды содержали пропуски, составляющие примерно 7% от общего числа наблюдений. Автором предложен и реализован алгоритм восстановления пропусков по индивидуальным для каждого случая уравнениям регрессии, параметры которых оценивались по наблюдениям данной и ближайшей станции, где коэффициент корреляции между соответствующими временными рядами превышал заданный пороговый уровень (Павлова, 2012).

2.2 Система климатических и агроклиматических показателей

Для оценки агроклиматических ресурсов в рамках системы агроклиматического мониторинга условий формирования и развития сельскохозяйственных культур, как по отдельным областям, так и для страны в целом, разработан комплекс агроклиматических и биоклиматических показателей, которые определяются, прежде всего, на основе имитационной системы КПУ (Сиротенко, 2007; Сиротенко, Павлова, 2013). Назначение предлагаемого комплекса показателей — всесторонняя оценка влияния наблюдаемых и будущих прогнозируемых изменений климата на сельское хозяйство и сельскохозяйственное землепользование. Для включения агроклиматических показателей в процесс мониторинга анализировались методики Г. Т. Селянинова (1958, 1966), Ф. Ф. Давитая (1958), Д. И. Шашко (1967, 1985), С. А. Сапожниковой (1958, 1963), Ю. И. Чиркова (1986), а также М. И. Будыко (1956) и А. И. Будаговского (1964).

Нами разработана технология мониторинга состояния агросферы с включением блока оценки аномальности и экстремальности агроклиматических показателей (индексов) в заданных точках с их последующим картографированием (визуализацией) результатов расчётов в системе КПУ на основе данных стационарных наблюдений.

Разработаны и реализованы алгоритмы идентификации временных трендов, определения скользящих оценок средних, дисперсий, коэффициентов авто- и кросс-корреляций и их робастных аналогов для моделируемой системы климатических показателей (Павлова и др., 2013). Получено Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Расчёт индексов (показателей) для оценки агроклиматических ресурсов территории при изменении климата» (№ 2015660183) (Павлова, 2017).

Анализ влияния процессов глобального потепления на агроклиматические ресурсы земледельческой зоны проводился на основе системы показателей (табл. 2.1). Перейдём к их рассмотрению.

Термические ресурсы

Сведения о термических (тепловых) ресурсах вегетационного периода растений используются для решения разнообразных вопросов сельскохозяйственного производства: определения сроков сева и созревания, оптимизации сортового и видового состава возделываемых сельскохозяйственных культур, оценки вероятности повреждения растений высокими и низкими температурами и т. д.

Доступные для растений термические ресурсы определяются годовым ходом температуры воздуха и почвы. Наблюдаемое в настоящее время потепление климата отнюдь не сводится к простому смещению вверх кривой годового хода среднесуточной температуры воздуха. Современное потепление помимо роста средней температуры сопровождается изменением её годовой и суточной амплитуды, что имеет как положительные, так и отрицательные последствия. Так, увеличение продолжительности безморозного периода, безусловно, положительный фактор, но сокращение периода налива зерна и более раннее созревание при повышении температуры часто ведёт к снижению урожая. Для адекватной оценки влияния изменений климата на термические ресурсы недостаточно какого-

либо одного показателя. Необходимо использовать систему показателей — климатических индексов — для оценки термических ресурсов, применяемых в агроклиматологии.

Таблица 2.1 — Перечень агроклиматических показателей (индексов) и показателей продуктивности и экстремальных погодных условий для мониторинга изменений климата в имитационной системе КПУ

Показатель, размерность	Обозначение	Метка
Характеристики термического режима		
Сумма температур за период с температурой выше 5, 10 °С, °С	$\Sigma T_5, \Sigma T_{10}$	—
Продолжительность вегетационного периода, сут.	N_5, N_{10}	—
Даты перехода через 5, 10 °С весной и осенью, ДД.ММ	d_5, d_{10}	—
Средняя температура января и июля, °С	T_1, T_7	—
Континентальность климата, °С	$A_T, T_7 - T_1$	—
Характеристики режима увлажнения		
Сумма осадков за период с температурой выше 5, 10 °С, мм	R_5, R_{10}	—
Суммарное испарение за вегетационный период, мм	E	*
Испаряемость за вегетационный период, мм	E_0	*
Влагозапасы почвы в слое 0–20 и 0–100 см за тёплый период, мм	W_{20}, W_{100i}	*
Гидротермический коэффициент Г. Т. Селянинова	ГТК	—
Индекс сухости М. И. Будыко	ИС	—
Коэффициент увлажнения Ю. И. Чиркова	КУ	—
Дефицит испарения А. И. Будаговского, мм	ΔE	*
Биоклиматический потенциал (БКП), т·га⁻¹		
БКП при низкочувствительном земледелии	$БКП_0$	*
БКП при оптимальном увлажнении	$БКП_W$	*
БКП при оптимальном минеральном питании	$БКП_N$	*
БКП при оптимальном увлажнении и минеральном питании	$БКП_{WN}$	*
Климатообусловленная урожайность (КУ), т·га⁻¹		
КУ при низкочувствительном земледелии	Y_0	*
КУ при оптимальном увлажнении	Y_W	*
КУ при оптимальном минеральном питании	Y_N	*
КУ при оптимальном увлажнении минеральном питании	Y_{WN}	*
Экстремальные погодные условия		
Климатические риски при производстве сельскохозяйственных культур, %	R	*
Уязвимость территории, ед.	V	*
Вероятность крупных неурожаев, %	P	*
Условия перезимовки		
Минимальная температура воздуха, °С	T_{min}	—
Температура почвы на глубине узла кущения, °С	T_k	—
Высота снежного покрова, см	H_s	—

Обозначение: * — показатель определяется с помощью системы КПУ

Система показателей, характеризующих *термический режим* территории (табл. 2.1), включает:

- средняя температура воздуха по календарным сезонам года, °С;
- средняя температура воздуха самого холодного месяца (января) как интегральный показатель условий перезимовки сельскохозяйственных культур, °С;
- средняя температура воздуха наиболее тёплого месяца (июля) как показатель напряжённости термического режима, °С;
- характеристики континентальности климата, определяемые разностью температур воздуха наиболее тёплого и холодного месяцев года (амплитуда годового хода температуры), °С;
- суммы активных температур за период с температурой воздуха выше 10 и 5 °С, °С;
- продолжительность периода вегетации (число дней с температурой воздуха выше 10 или 5 °С), сут.;
- дата возобновления вегетации весной;
- дата прекращения вегетации осенью;
- средняя температура воздуха за вегетационный период, °С.

Ресурсы влаги

Для характеристики увлажнённости используется множество показателей в виде тех или иных функций от суммы осадков и максимально возможного испарения (т. е. испаряемости). Мы используем три таких показателя: индекс сухости М. И. Будыко (ИС), гидротермический коэффициент Г. Т. Селянинова (ГТК) и коэффициент увлажнения Ю. И. Чиркова (КУ):

$$ИС = \frac{0,18 \sum T_{T > 10^{\circ}C}}{R_{I-XII}}, \quad (2.1)$$

$$ГТК = \frac{R_{VI-VIII}}{0,1 \sum T_{VI-VIII}}, \quad (2.2)$$

$$КУ = \frac{0,5R_{X-III} + R_{IV-VIII}}{0,18\Sigma T_{IV-VIII}}. \quad (2.3)$$

Здесь T — среднесуточная температура ($^{\circ}\text{C}$), а R — сумма осадков (мм); в нижнем индексе указан период года, за который производится суммирование.

Показатели увлажнения ГТК и КУ представляют собой безразмерные величины (мм/мм), характеризующие отношение приходной части водного баланса — осадков — к максимально возможной величине его расходной части — испаряемости. При этом испаряемость оценивается как $0,1\Sigma T_{VI-VIII}$ и $0,18\Sigma T_{IV-VIII}$ соответственно.

Индекс сухости имеет противоположный смысл. Это отношение испаряемости к годовой сумме осадков. Испаряемость при расчёте ИС определяется по сумме среднесуточных температур воздуха за период с температурой выше 10°C как $0,18\Sigma T_{T>10^{\circ}\text{C}}$, что представляется возможным благодаря тесной связи сумм температур с энергетической характеристикой испаряемости — радиационным балансом.

ИС — интегральный годовой показатель увлажнения, а коэффициенты увлажнения КУ и ГТК — более специальные показатели, характеризующие влагообеспеченность агроэкосистем при естественном увлажнении. При этом КУ характеризует увлажнённость почвы с учётом осадков холодного периода года, а ГТК — увлажнённость тёплого периода года.

Согласно А. И. Будаговскому (Будаговский, 1964) наилучшим критерием для оценки увлажнения и, следовательно, для мониторинга засух является дефицит испарения ΔE :

$$\Delta E = E_0 - E, \quad (2.4)$$

где E_0 — испаряемость (максимально возможное испарение), E — испарение. В системе КПУ величины E_0 и E определяются при фактическом и оптимальном увлажнении.

Основные показатели *режима увлажнённости* территории рассматривались с привлечением следующих характеристик.

Классические агрометеорологические показатели:

- суммы осадков календарной зимы, весны, лета, осени, мм;
- ГТК, ед.;
- ИС, ед.;
- КУ, ед.

Показатели, рассчитанные в системе КПУ:

- суммарное испарение за период вегетации (E), мм;
- испаряемость за период вегетации (E_0), мм;
- коэффициент обеспеченности влагой (E / E_0), ед.;
- число дней с запасами влаги в слое почвы 0–20 см, не превышающими заданный пороговый уровень ($\leq 20, \leq 10, \leq 5$ мм), сут.

2.3 Оценка наблюдаемых изменений показателей тепло- и влагообеспеченности

Оценка скорости изменения (трендов) показателей теплообеспеченности сельскохозяйственных культур

Перейдём к анализу и обсуждению оценок наблюдаемых изменений показателей тепло- и влагообеспеченности, характеризующих агроклиматические ресурсы земледельческой зоны на территории России за период глобального потепления (с 1976 г.).

Рассчитаны линейных тренды (тенденции) показателей тепло- и влагообеспеченности на территории земледельческой зоны России. Рассмотрены три временных среза: 1961–1990 гг. (базовый период), 1976–2017 гг. (период глобального потепления) и 1998–2017 гг. (последнее двадцатилетие).

Основные результаты расчётов представлены в табл. 2.2–2.6 и на рис. 2.2–2.8.

Таблица 2.2 — Оценки линейного тренда (ед./10 лет) средней температуры воздуха по календарным сезонам и за январь и июль по ФО на территории земледельческой зоны России

Федеральный округ	Средняя температура воздуха, °С/10 лет						Амплитуда годового хода температуры, °С/10 лет
	зима	весна	лето	осень	январь	июль	
1976–2017							
Северо-Западный	0,8	0,4	0,5	0,5	0,6	0,6	0,0
Центральный	0,6	0,5	0,6	0,5	0,4	0,8	0,4
Приволжский	0,4	0,5	0,5	0,6	0,2	0,5	0,2
Южный	0,3	0,4	0,7	0,5	0,3	0,7	0,4
Северо-Кавказский	0,2	0,4	0,5	0,4	0,2	0,4	0,2
Уральский	0,1	0,5	0,2	0,5	–0,2	0,0	0,2
Сибирский	0,1	0,7	0,3	0,1	–0,1	0,2	0,3
Дальневосточный	0,4	0,3	0,3	0,3	0,7	0,2	–0,5
Россия	0,4	0,5	0,4	0,4	0,3	0,4	0,1
1998–2017							
Северо-Западный	0,9	0,8	0,0	0,6	–1,2	–0,6	0,7
Центральный	0,2	0,8	0,3	0,7	–1,9	–0,4	1,5
Приволжский	–0,4	0,9	0,4	0,6	–2,1	–0,7	1,4
Южный	0,0	0,5	0,7	0,4	–0,3	0,1	0,4
Северо-Кавказский	–0,1	0,4	0,6	0,1	–0,2	0,4	0,6
Уральский	–0,6	0,9	0,1	0,4	–1,8	–1,1	0,7
Сибирский	0,1	1,0	0,1	0,2	0,6	–0,1	–0,7
Дальневосточный	0,7	0,5	0,3	0,1	0,3	0,5	0,1
Россия	0,2	0,8	0,3	0,4	–0,6	–0,2	0,4
1961–1990							
Северо-Западный	0,2	0,7	0,1	–0,3	0,4	0,2	–0,3
Центральный	0,5	0,4	0,0	–0,4	1,2	–0,1	–1,3
Приволжский	0,5	0,2	0,2	–0,3	0,9	0,1	–0,8
Южный	–0,1	–0,1	–0,2	–0,4	0,6	–0,2	–0,7
Северо-Кавказский	–0,1	–0,1	0,0	–0,2	0,4	0,1	–0,3
Уральский	0,4	0,1	0,5	–0,1	0,5	0,2	–0,4
Сибирский	0,6	0,2	0,0	0,5	0,0	–0,2	–0,3
Дальневосточный	0,2	0,2	0,3	0,1	–0,4	0,2	0,7
Россия	0,4	0,2	0,2	0,0	0,3	0,0	–0,3

Анализ оценок линейных трендов средней температуры воздуха по календарным сезонам года (зима, весна, лето, осень) показывает, что за весь период глобального потепления (с 1976 г.) по настоящее время (2017 г.) положительная тенденция этих показателей наблюдается на территории всех

ФО в пределах земледельческой зоны (табл. 2.2). В среднем по России полученные оценки скорости роста средних сезонных температур колеблются в интервале от 0,4 до 0,5 °С/10 лет.

Таблица 2.3 — Оценки линейного тренда (ед./10 лет) показателей теплообеспеченности вегетационного периода по ФО на территории земледельческой зоны России

Федеральный округ	Сумма температур воздуха, °С/10 лет		Продолжительность периода, сут./10 лет		Дата перехода через 5 °С, сут./10 лет		Средняя температура воздуха за вег. период (T > 5 °С), °С/10 лет
	>10 °С	>5 °С	T >10 °С	T >5 °С	весной	осенью	
1976–2017							
Северо-Западный	107	97	5,1	4,0	-1,8	2,2	0,3
Центральный	123	124	4,1	4,4	-1,6	2,8	0,3
Приволжский	97	100	3,0	3,6	-1,2	2,4	0,3
Южный	147	164	3,6	5,4	-3,6	1,8	0,3
Северо-Кавказский	122	133	3,0	4,8	-3,0	1,9	0,3
Уральский	66	59	3,4	2,5	-1,4	1,1	0,1
Сибирский	51	61	2,0	3,3	-2,6	0,7	0,1
Дальневосточный	69	60	3,4	2,3	-1,3	1,0	0,2
Россия	87	87	3,4	3,5	-2,0	1,5	0,2
1998–2017							
Северо-Западный	106	29	7,3	-1,9	0,0	-1,9	0,3
Центральный	110	83	0,8	-1,2	0,9	-0,3	0,5
Приволжский	144	97	4,4	-0,7	-0,7	-1,4	0,5
Южный	104	175	-0,6	7,9	-4,0	3,9	0,2
Северо-Кавказский	61	108	-4,0	2,4	1,2	3,6	0,2
Уральский	93	33	6,5	-0,3	-3,6	-3,8	0,1
Сибирский	-28	2	-1,8	2,6	-3,5	-1,0	-0,2
Дальневосточный	52	34	1,8	-0,3	-0,8	-1,0	0,2
Россия	72	57	2,4	0,9	-1,7	-0,8	0,2
1961–1990							
Северо-Западный	0	13	-0,9	1,0	-2,2	-1,2	0,0
Центральный	-25	-14	-1,3	0,0	-2,0	-1,9	-0,1
Приволжский	7	13	-0,6	0,0	-0,6	-0,6	0,1
Южный	-59	-73	-2,4	-3,9	0,6	-3,3	0,0
Северо-Кавказский	-6	-24	0,2	-2,5	-0,4	-2,9	0,0
Уральский	13	34	-2,6	0,4	0,2	0,6	0,2
Сибирский	12	17	1,3	1,9	-0,5	1,4	-0,1
Дальневосточный	51	34	1,9	-0,2	0,3	0,1	0,1
Россия	9	10	-0,1	0,1	-0,5	-0,4	0,0

Термические ресурсы территории, характеризуемые суммами температур воздуха выше 5 °С, как показали расчёты, имеют устойчивую положительную тенденцию к росту на всей рассматриваемой территории. На ЕЧ России скорость роста сумм температур воздуха за вегетационный период изменяется от 97 (Северо-Западный ФО) до 164 °С/10 лет (Южный ФО) за период 1976–2017 гг. На территории Сибири и Дальнего Востока тренд положительный, но оценки тренда ниже — не превышают 61 °С/10 лет. В среднем для территории России оценка линейной скорости роста сумм температур воздуха выше 5 °С за этот период составляет 87 °С/10 лет (табл. 2.3).

Оценки линейных трендов продолжительности вегетационного периода (периода с температурой воздуха выше 5 °С) за 1976–2017 гг. имеют положительный знак и для ЕЧ и для АЧ России. Диапазон их изменения от 2,3 сут./10 лет (Дальневосточный ФО) до 5,4 сут./10 лет (Южный ФО). Эти оценки согласуются с данными (Brown et al., 2012), где показано, что почти на четверти общемировых площадей (27 %), занятых под сельскохозяйственное производство, наблюдается существенное изменение продолжительности вегетационного периода основных зерновых культур за 26 лет, начиная с 1981 г., причём для большинства из них продолжительность увеличивалась в среднем на 2–3 дня.

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. Слабые отрицательные тенденции в рядах январской температуры воздуха выявлены в Уральском (–0,2 °С/10 лет) и Сибирском (–0,1 °С/10 лет) ФО (табл. 2.2).

Рост теплообеспеченности сельскохозяйственных культур в течение вегетации и повышение средней температуры января и холодного периода года в целом являются благоприятными факторами, которые могут способствовать повышению продуктивности сельского хозяйства. Но следует

отметить, что тренд температуры января и июля сменился на отрицательный на ЕЧ России и на Урале по данным за последние 20 лет, 1998–2017 гг. (табл. 2.2).

По существующим оценкам, вследствие повышения температуры воздуха в сентябре–октябре в 1980–2009 гг. на территории Приволжского ФО период осенней вегетации озимых культур увеличился на 6–8 дней по сравнению с периодом 1970–1975 гг. (Страшная и др., 2011).

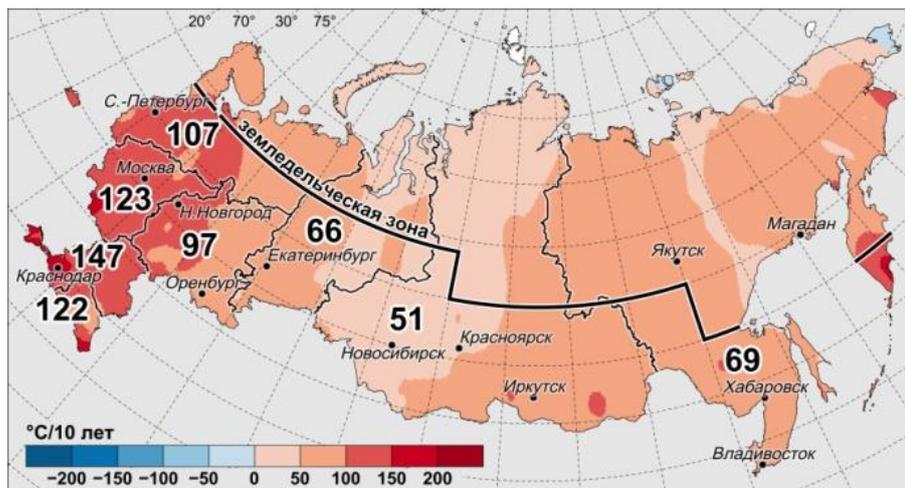
Анализ аномалий показателей теплообеспеченности за 1998–2017 гг. относительно базового периода показал, что увеличение сумм температур за вегетационный период достаточно велико и составляет ~260 и ~180 °С на ЕЧ и АЧ России, а продолжительность вегетационного периода увеличилась на 10 и 7 сут. соответственно. Таким образом, рост термических ресурсов на ЕЧ происходит с большей скоростью, чем на АЧ России (табл. 2.4).

Таблица 2.4 — Отклонения средних значений показателей теплообеспеченности сельскохозяйственных культур за период 1998–2017 гг. от средних значений за базовый климатический период 1961–1990 гг.

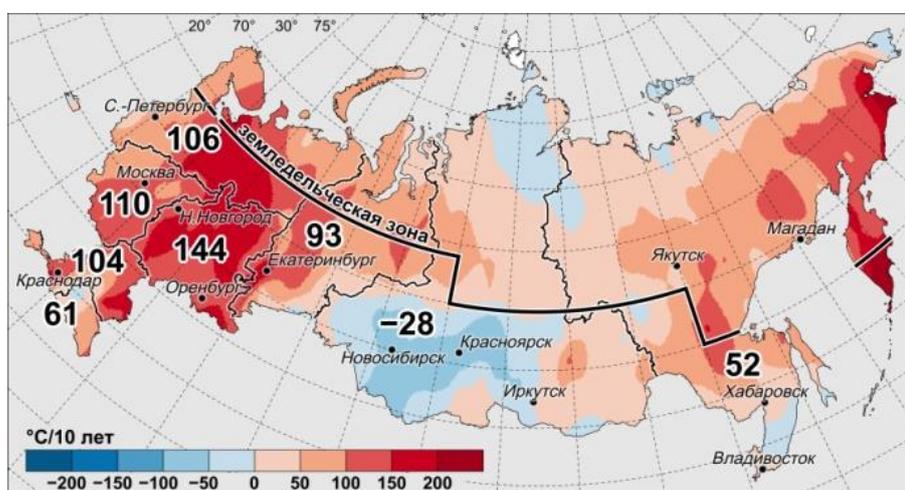
Федеральный округ	Сумма температур воздуха, °С		Продолжительность периода, сут.		Дата перехода через 10 °С, сут.		Дата перехода через 5 °С, сут.	
	>10 °С	>5 °С	T >10 °С	T >5 °С	весной	осенью	весной	осенью
Северо-Западный	223	228	10	11	-5	5	-6	5
Центральный	239	248	8	10	-4	4	-5	5
Приволжский	202	219	6	9	-2	4	-3	6
Южный	287	317	7	10	-2	5	-9	2
Северо-Кавказский	248	282	6	11	-2	4	-10	2
Уральский	176	174	8	7	-5	3	-3	5
Сибирский	181	190	8	9	-6	2	-6	3
Дальневосточный	199	165	10	5	0	10	-3	2
ЕЧ России	240	259	7	10	-3	4	-7	4
АЧ России	185	176	9	7	-4	5	-4	3
Россия	209	211	8	9	-4	5	-5	4

На рис. 2.2–2.5 приведены пространственные распределения скоростей изменения (трендов) за 10 лет следующих показателей: суммы активных температур воздуха (выше 10 °С), числа дней с температурой воздуха выше 10 °С, средней температуры января и июля.

1976–2017



1998–2017



1961–1990

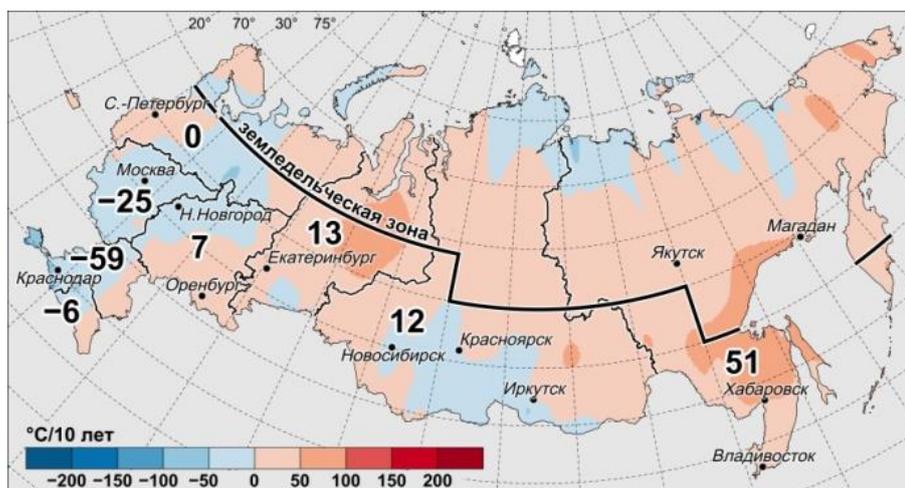
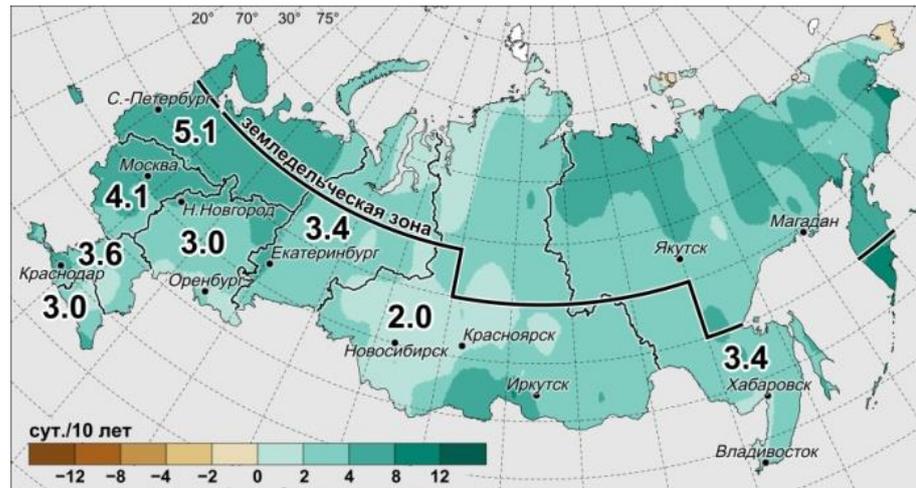
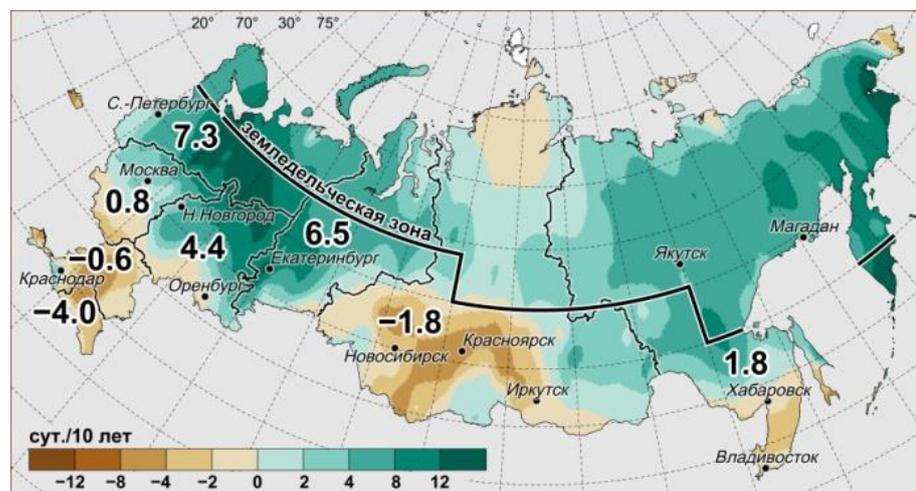


Рисунок 2.2 — Средняя скорость изменения (тренд) сумм температур воздуха выше 10 °С на территории России за периоды 1976–2017, 1998–2017 и 1961–1990 гг. (в °С/10 лет)

1976–2017



1998–2017



1961–1990

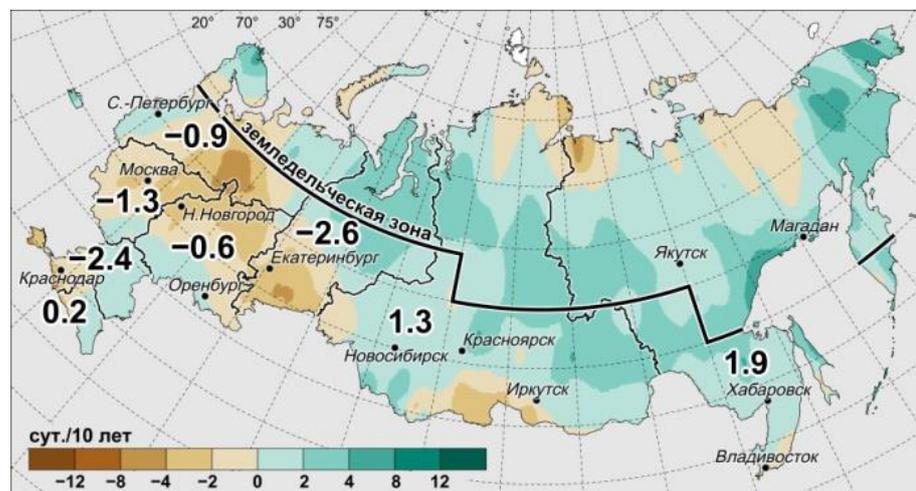
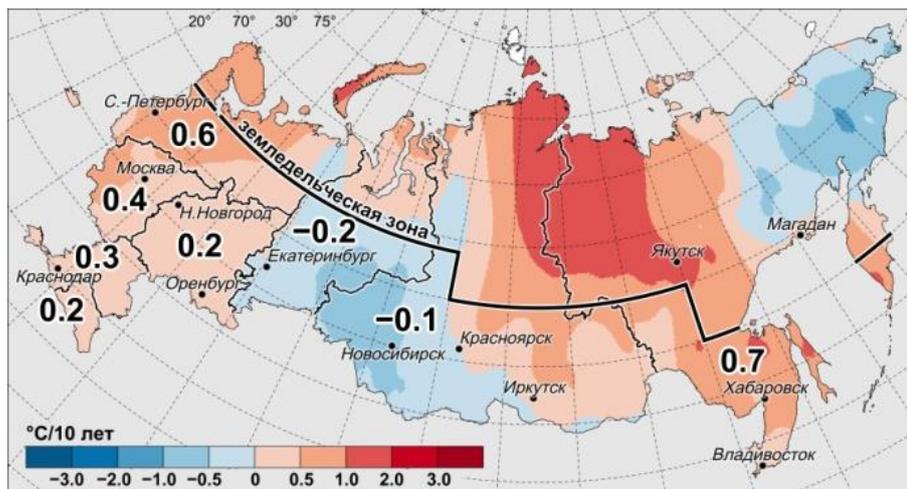
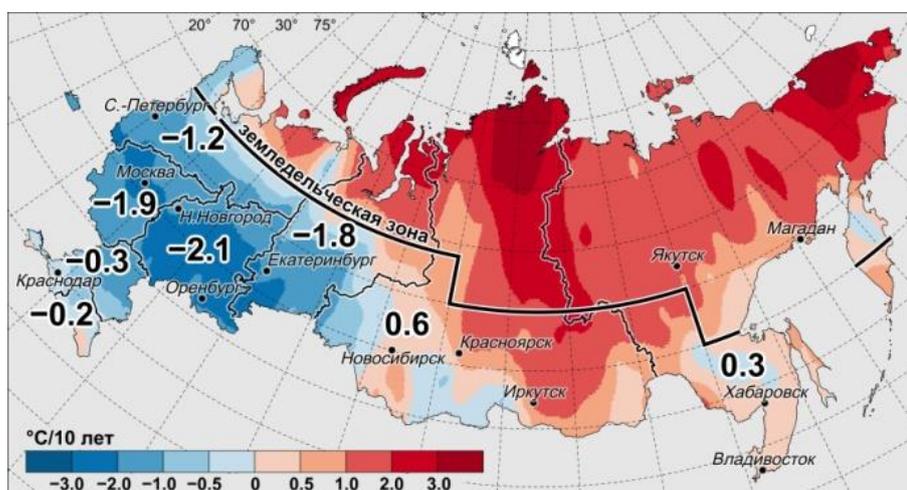


Рисунок 2.3 — Средняя скорость изменения (тренд) числа дней с температурой воздуха выше 10 °С на территории России за периоды 1976–2017, 1998–2017 и 1961–1990 гг. (в сут./10 лет)

1976–2017



1998–2017



1961–1990

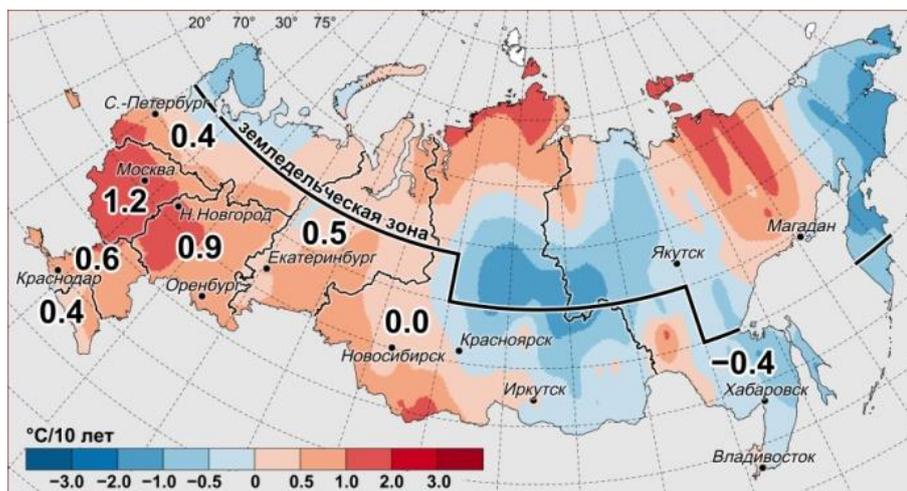
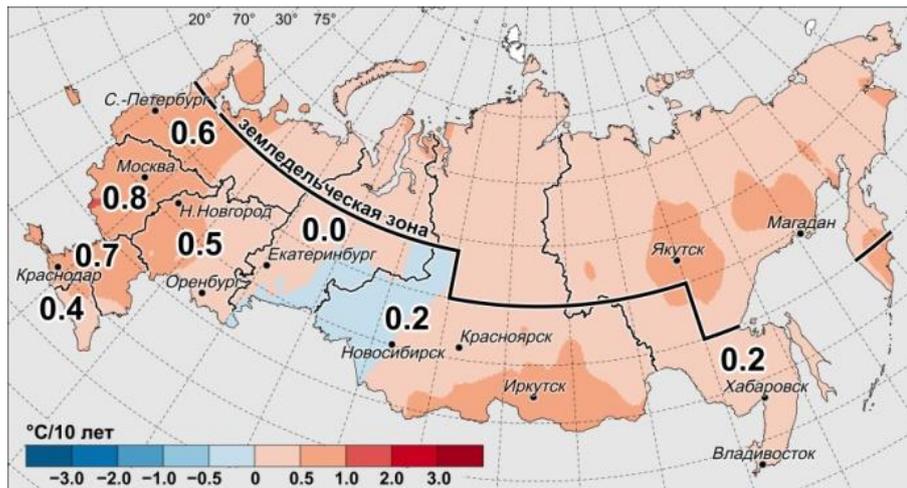
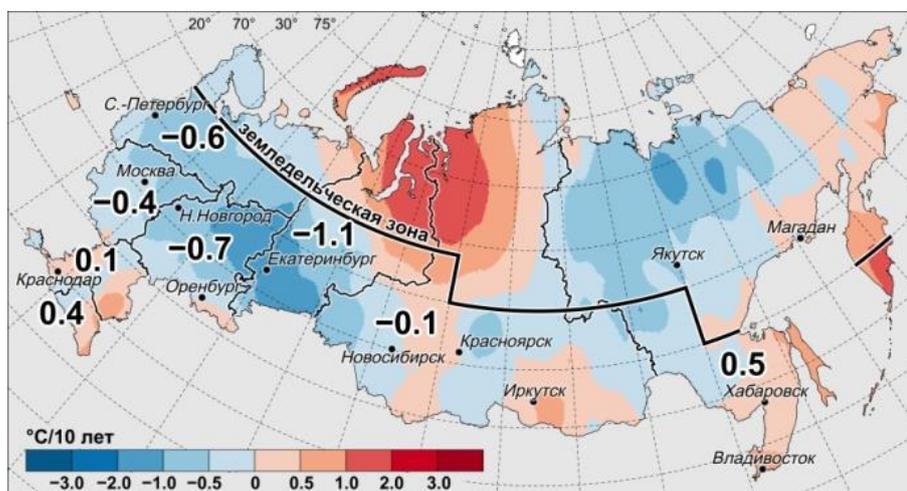


Рисунок 2.4 — Средняя скорость изменения (тренд) средней температуры воздуха за январь на территории России за периоды 1976–2017, 1998–2017 и 1961–1990 гг. (в °C/10 лет)

1976–2017



1998–2017



1961–1990

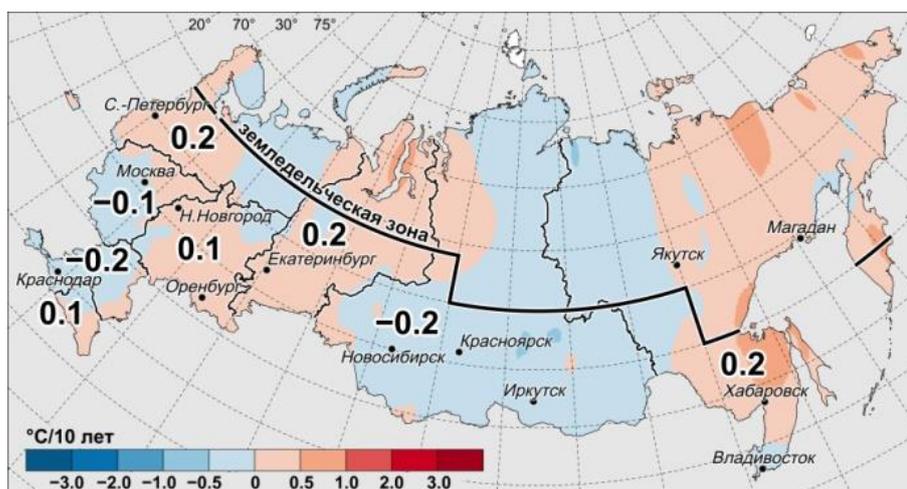


Рисунок 2.5 — Средняя скорость изменения (тренд) средней температуры воздуха за июль на территории России за периоды 1976–2017, 1998–2017 и 1961–1990 гг. (в °C/10 лет)

**Оценка скорости изменения (трендов) показателей
благообеспеченности сельскохозяйственных культур**

Наблюдаемые тенденции (1976–2017 гг.) в изменении сезонных сумм атмосферных осадков представлены в табл. 2.5.

Таблица 2.5 — Оценки линейного тренда (ед./10 лет) сумм атмосферных осадков по сезонам года и показателей режима увлажнения по ФО на территории земледельческой зоны России

Федеральный округ	Сумма осадков, мм/10 лет					ГТК за май–авг., ед./10 лет	ИС, ед./10 лет	КУ, ед./10 лет
	зима	весна	лето	осень	год			
1976–2017								
Северо-Западный	5,0	3,7	1,7	–0,6	9,9	–0,02	0,02	–0,03
Центральный	0,0	3,1	–8,4	–2,0	–7,3	–0,08	0,05	–0,05
Приволжский	1,9	5,1	–8,1	–1,1	–2,2	–0,07	0,05	–0,04
Южный	–3,6	7,0	–7,2	4,0	0,2	–0,03	0,04	–0,02
Северо-Кавказский	7,7	4,9	–2,5	5,9	16,0	–0,01	–0,02	0,00
Уральский	0,1	7,0	0,7	–0,3	7,5	–0,01	0,01	–0,01
Сибирский	1,7	4,3	3,3	1,4	10,7	0,00	0,01	–0,01
Дальневосточный	7,8	8,2	7,4	–2,8	20,6	0,02	0,01	0,01
Россия	2,5	5,5	–0,4	0,1	7,8	–0,03	0,02	–0,02
1998–2017								
Северо-Западный	3,9	3,1	8,3	15,7	30,9	0,00	0,01	0,02
Центральный	3,0	9,0	–9,1	–0,2	2,7	–0,07	0,05	–0,04
Приволжский	–6,1	1,9	–1,8	2,9	–3,1	–0,05	0,07	–0,03
Южный	–4,9	13,1	–23,8	–17,9	–33,6	–0,07	0,13	–0,06
Северо-Кавказский	9,3	8,6	–4,0	–13,3	0,6	–0,02	0,04	0,01
Уральский	–9,5	0,9	4,5	–12,5	–16,6	–0,03	0,07	–0,03
Сибирский	–2,1	5,6	–4,4	–2,5	–3,4	0,02	0,02	–0,02
Дальневосточный	13,4	5,0	22,3	2,4	43,2	0,05	–0,02	0,03
Россия	0,9	5,3	1,6	–0,7	7,0	–0,01	0,04	–0,02
1961–1990								
Северо-Западный	9,2	–8,4	15,2	4,6	20,6	0,05	–0,02	0,02
Центральный	4,3	–7,9	20,2	12,4	28,9	0,08	–0,04	0,04
Приволжский	3,7	–3,8	9,8	11,6	21,4	0,03	–0,03	0,02
Южный	–2,8	–3,2	8,7	6,7	9,3	0,04	–0,04	0,02
Северо-Кавказский	1,8	–5,6	–7,7	2,0	–9,5	–0,03	0,06	–0,02
Уральский	0,1	1,7	–11,8	13,0	3,0	–0,08	0,00	–0,04
Сибирский	0,7	2,0	–4,6	1,2	–0,7	–0,02	0,01	–0,01
Дальневосточный	–8,0	–9,0	–12,4	–2,6	–31,9	–0,20	0,03	–0,16
Россия	0,9	–3,6	1,3	5,2	3,8	–0,03	–0,01	–0,03

Можно видеть, что преобладает положительная тенденция к росту весенних осадков практически на территории всей земледельческой зоны России. Тренды летних осадков отрицательны во всех ФО на территории ЕЧ России, за исключением Северо-Западного ФО, и положительны на АЧ России: в Уральском, Сибирском и Дальневосточном ФО. Здесь соответствующие оценки скорости роста составляют 0,7; 3,3 и 7,4 мм/10 лет соответственно. К положительным факторам климатических изменений можно отнести наблюдаемую динамику в рядах осенних осадков в Южном и Северо-Кавказском ФО. Скорость роста осадков осенью на этой территории составляет 4,0–5,9 мм/10 лет за период 1976–2017 гг. (табл. 2.5). Данные расчётов за период 1998–2017 гг. свидетельствуют, что степень засушливости на преобладающей части земледельческой зоны растёт во все сезоны, за исключением весны.

В табл. 2.6 представлены рассчитанные показатели влагообеспеченности за вегетационный период, включая суммарное испарение (E) и испаряемость (E_0) по отдельным ФО. Оценки линейного тренда коэффициента обеспеченности влагой (E/E_0) за период 1976–2017 гг. отрицательны практически для всей ЕЧ и АЧ России.

Оценки линейного тренда запасов влаги в пахотном слое почвы в мае и июне за период с 1976 по 2017 гг. носят разнонаправленный характер в разных природно-климатических зонах, но выделяются три ФО: Северо-Кавказский, Южный и Уральский ФО — где запасы влаги в почве в мае растут. Очевидно, что сохранение тенденции к улучшению условий увлажнённости весенне-летнего периода вегетации окажут благоприятное влияние на рост и развитие сельскохозяйственных культур на указанной территории.

Таблица 2.6 — Оценки линейного тренда (ед./10 лет) показателей влагообеспеченности вегетационного периода по ФО на территории земледельческой зоны России. Расчёты выполнены в системе КПУ

Федеральный округ	Вегетационный период ($T > 5 \text{ }^\circ\text{C}$)						
	Сумма осадков, мм/10 лет	Суммарное испарение (E), мм/10 лет	Испаряемость (E_0), мм/10 лет	E/E_0 , ед./10 лет	Число дней с запасами влаги в слое почвы 0–20 см, сут./10 лет		
					≤ 20 мм	≤ 10 мм	≤ 5 мм
1976–2017							
Северо-Западный	5,7	14,9	26,4	-0,01	2,5	0,7	0,3
Центральный	-2,7	-1,9	24,1	-0,03	8,2	3,6	0,8
Приволжский	-3,9	-3,6	14,5	-0,02	5,4	4,1	1,3
Южный	10,0	-3,9	3,0	-0,01	1,6	0,8	-0,7
Северо-Кавказский	12,6	3,8	9,7	0,00	1,1	-2,3	-3,7
Уральский	4,0	6,1	15,6	-0,01	1,9	0,7	0,2
Сибирский	6,8	7,7	18,8	-0,01	2,3	0,6	0,1
Дальневосточный	10,5	8,0	12,7	0,00	0,5	0,2	0,1
Россия	3,7	3,3	16,7	-0,01	3,5	1,7	0,3
1998–2017							
Северо-Западный	15,3	2,6	-7,5	0,02	-2,4	-2,5	-0,7
Центральный	0,8	3,7	10,5	0,00	1,1	1,3	-0,1
Приволжский	7,2	-6,2	1,2	-0,01	0,8	2,8	0,9
Южный	-13,1	-11,4	3,4	-0,01	5,7	3,4	-3,0
Северо-Кавказский	11,1	4,3	9,5	0,00	2,6	-5,9	-7,2
Уральский	-5,8	-9,0	5,5	-0,02	4,1	4,1	2,0
Сибирский	8,8	4,5	2,4	0,01	-1,1	-1,1	-0,8
Дальневосточный	51,8	12,5	-11,5	0,04	-9,3	-3,4	-0,6
Россия	7,2	-0,5	2,2	0,00	0,3	0,8	-0,3
1961–1990							
Северо-Западный	24,1	5,5	0,4	0,01	-2,4	-0,1	-0,1
Центральный	27,2	15,6	-4,8	0,03	-8,9	-5,3	-1,2
Приволжский	17,6	8,7	-0,2	0,01	-4,9	-3,8	-1,3
Южный	1,5	4,2	-7,6	0,01	-4,6	-3,2	-1,8
Северо-Кавказский	-12,4	-6,8	-9,6	0,00	0,9	-1,0	1,2
Уральский	1,8	-6,8	6,7	-0,02	1,4	2,8	1,5
Сибирский	3,7	3,0	5,2	0,00	0,7	0,6	0,3
Дальневосточный	-7,3	1,2	11,6	-0,02	2,7	1,0	0,2
Россия	9,5	4,6	1,5	0,00	-2,3	-1,2	-0,3

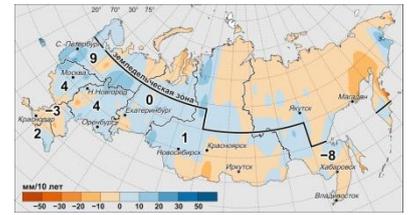
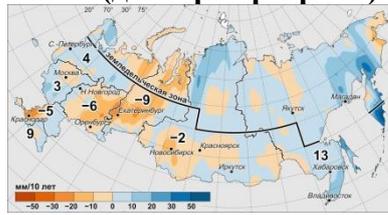
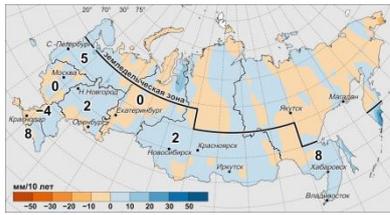
На рис. 2.6–2.8 приведены пространственные распределения скоростей изменения (трендов) за 10 лет следующих показателей: сезонных и годовой сумм осадков, ГТК за май–август и ИС.

1976–2017

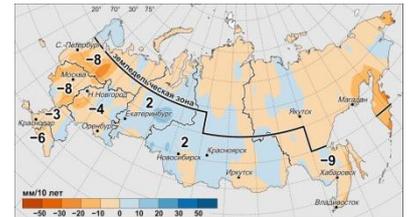
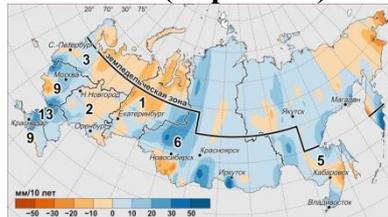
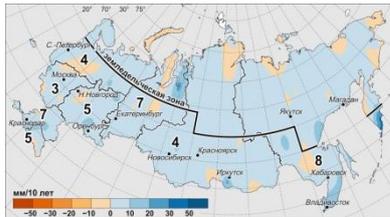
1998–2017

1961–1990

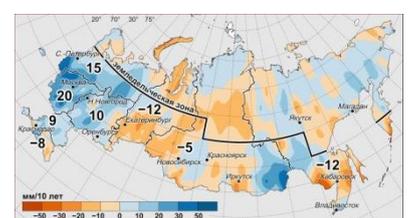
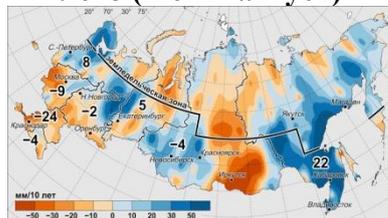
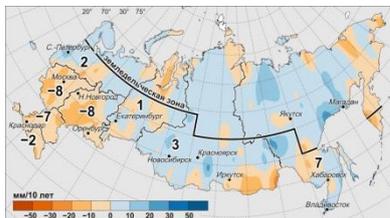
зима (декабрь–февраль)



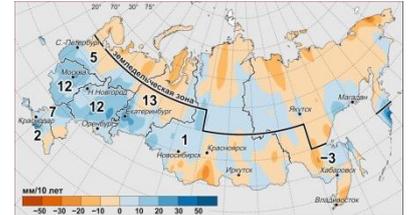
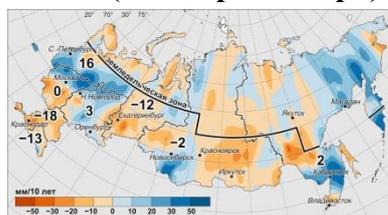
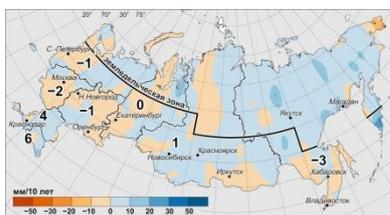
весна (март–май)



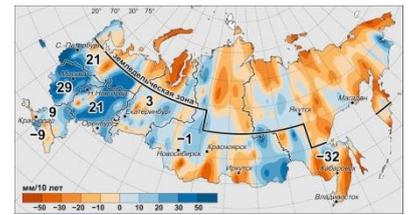
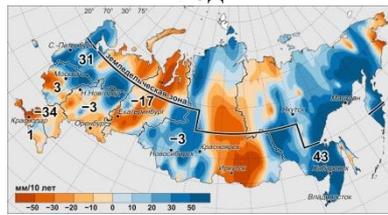
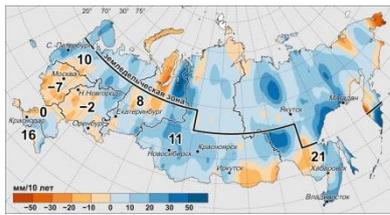
лето (июнь–август)



осень (сентябрь–ноябрь)



год



мм/10 лет

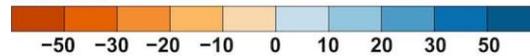


Рисунок 2.6 — Средняя скорость изменения (тренд) сезонных и годовой сумм осадков на территории России за периоды 1976–2017, 1998–2017 и 1961–1990 гг. (в мм/10 лет)

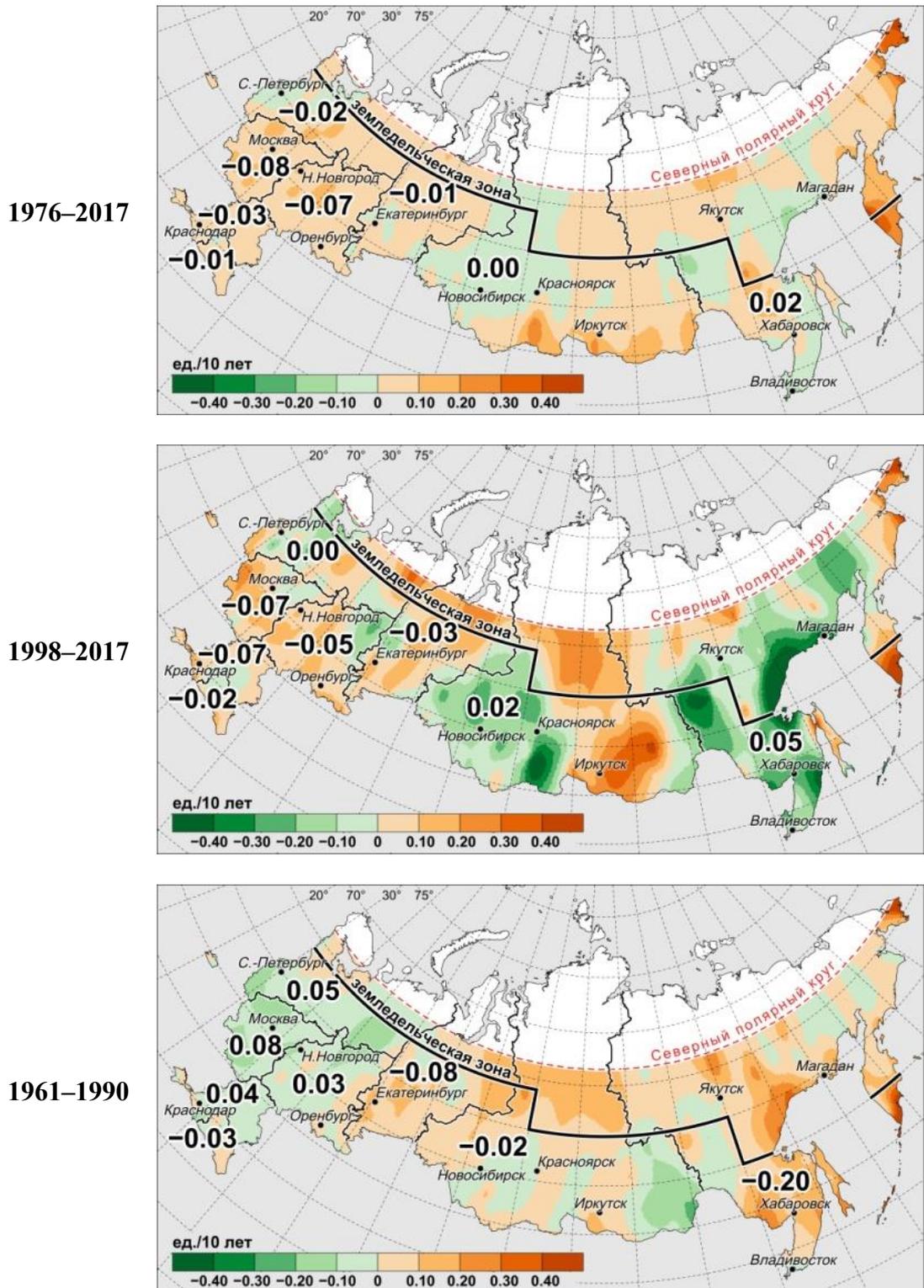


Рисунок 2.7 — Средняя скорость изменения (тренд) гидротермического коэффициента Г. Т. Селянинова (ГТК) за май–август на территории России за периоды 1976–2017, 1998–2017 и 1961–1990 гг. (в ед./10 лет)

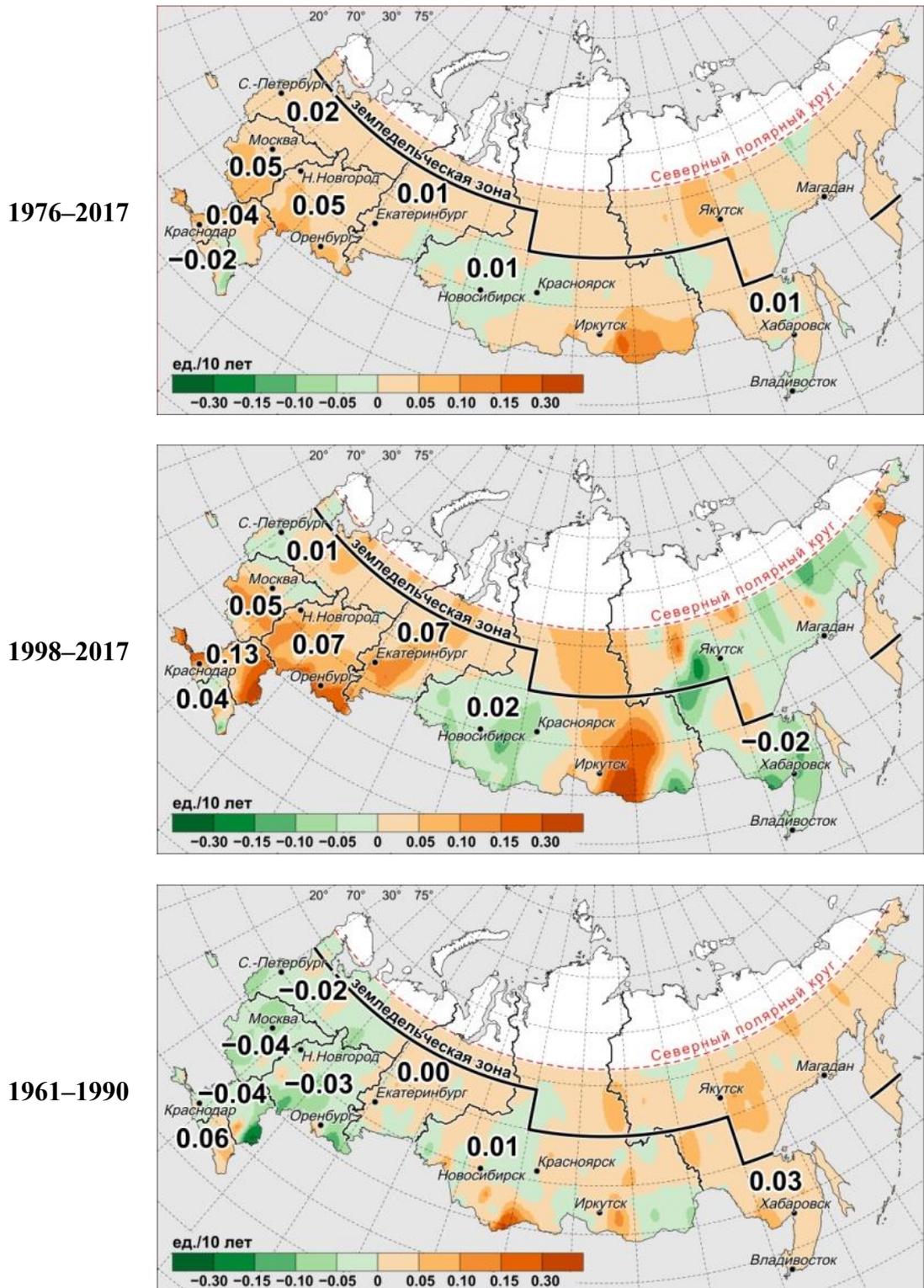


Рисунок 2.8 — Средняя скорость изменения (тренд) индекса сухости М. И. Будыко (ИС) на территории России за периоды 1976–2017, 1998–2017 и 1961–1990 гг. (в ед./10 лет)

Приведённые данные позволяют сделать следующие выводы:

Рост тепловых ресурсов продолжается практически на территории всей земледельческой зоны. Исключение составляют отдельные области Дальнего Востока и Восточной Сибири. За последние двадцать лет скорость роста таких показателей как температура января (важно для оценки условий перезимовки сельскохозяйственных культур) замедлилась, хотя и незначительно. Сохраняется отрицательная тенденция (ЕЧ России) к снижению сумм атмосферных осадков за летний период года. В то же время тренды летних осадков за 1976–2017 гг. положительны на АЧ России и также сохраняется положительная тенденция к росту весенних осадков на всей территории земледельческой зоны РФ. Все полученные результаты могут быть предоставлены потенциальным потребителям в масштабе любой заданной территории (федеральный округ, республика, край, область, муниципальный район, агроклиматическая зона в пределах региона и др.).

2.4 Оценка изменений биоклиматического потенциала

Биоклиматический потенциал (БКП) — расчётный показатель, характеризующий сельскохозяйственную продуктивность в условиях данного климата. Понятие о БКП в научную теорию и практику было введено П. И. Колосковым (Колосков, 1953, 1971). По его определению БКП — комплексная величина, характеризующая общую потенциальную продуктивность земли и учитывающая влияние таких основных факторов климата, как температура, влага и свет.

Определение БКП по Д. И. Шашко используется чаще других. Его подход к оценке сельскохозяйственной продуктивности климата изложен в работах (Шашко, 1967, 1985) и заключается в сравнительной оценке производительности земель на основе относительных значений БКП. Разработана методика (Шашко, 1983) сравнительной оценки земель в межрегиональном разрезе, основанная на объективных показателях биологической продуктивности — относительных значениях БКП,

синтезирующих влияние на биологическую продуктивность растений тепла, влаги и самой почвы (зональных типов) при сопоставимых уровнях интенсивности земледелия.

Биологическая продуктивность растительных организмов изменяется количеством биомассы (т/га), производимой в единицу времени на единице площади (обычно за вегетационный период) и рассчитываются по следующей формуле:

$$\text{БКП} = K_p \frac{\Sigma T_{>10^\circ\text{C}}}{\Sigma T_{>10^\circ\text{C}, \text{база}}}. \quad (2.5)$$

Здесь T — среднесуточная температура за период $T > 10^\circ\text{C}$, $^\circ\text{C}$; K_p — определяется влагообеспеченностью. Заметим, что северной границе земледелия соответствует величина $\Sigma T_{>10^\circ\text{C}, \text{база}} = 1000$.

С. А. Сапожникова (1958) предложила характеристику бонитета климата (при естественном увлажнении) рассчитывать по формуле:

$$B_K = \varepsilon \Sigma T_{>10^\circ\text{C}}, \quad (2.6)$$

где B_K — бонитировочный балл климата, количественно равный условному урожаю яровых зерновых культур при данном сочетании тепла и влаги; ε — бонитировочный балл увлажнения, количественно равный осреднённой урожайности тех же культур (в ц/га), приходящейся на единицу обеспеченного теплом периода ($\Sigma T = 100^\circ\text{C}$) при данном увлажнении; $\Sigma T_{>10^\circ\text{C}}$ — сумма температур в сотнях градусов за период со среднесуточной температурой выше 10°C .

Анализ классических методов оценки агроклиматических ресурсов показывает, что эти методы могут быть модернизированы на базе рассмотренной выше количественной теории энергомассообмена и продуктивности агроэкосистем.

В чём состоят принципиальные недостатки классических методов оценки агроклиматических ресурсов и БКП? Основной недостаток — невозможность прямой проверки степени адекватности применяемых

эмпирических, по существу, показателей. Эти показатели не связаны непосредственно с продуктивностью сельскохозяйственных культур. Наличие таких связей с продуктивностью агроэкосистем декларируется, но практически никогда не проверялось. Степень надёжности выводов, основанных на использовании этих показателей, остаётся неизвестной. В состав важнейших биоклиматических показателей, как правило, не включается фотосинтетически активная радиация, т. е. не учитывается наиболее фундаментальный фактор, определяющий продуктивность агроэкосистем. Из четырёх наиболее значимых метеорологических факторов (солнечная радиация, температура и влажность воздуха, осадки) учитываются обычно лишь два параметра — температура воздуха и осадки. В результате важные прямые и обратные связи в системе почва-растение-атмосфера, определяющие интенсивность энергомассообмена (включая такие ключевые процессы углекислотного газообмена, как фотосинтез и дыхание растений), адекватно не учитываются.

Имитационная система КПУ позволила впервые соединить возможности моделей энергомассообмена агроэкосистем и продуктивности сельскохозяйственных культур с базой гидрометеорологической, почвенной и агрономической информации. Моделирование продукционного процесса с помощью КПУ позволяет воспроизвести основные особенности формирования урожаев сельскохозяйственных культур на территории земледельческой зоны ежегодно с 1891 г. по текущий год. При этом с суточным шагом по времени имитируются процессы накопления и расходования почвенной влаги, динамика доступных форм азота в почве, рост и развитие растений.

Имитационный подход позволяет проводить оценку почвенно-климатических ресурсов (БКП) в единицах продуктивности (урожайности), рассчитанных с учётом моделируемой совокупности связей в составе системы почва-растение-атмосфера. Снижение продуктивности от возможного максимума, обусловленного величиной фотосинтетически

активной радиации, связано обычно не с одним, а с несколькими факторами. Следовательно, одной величины для характеристики БКП недостаточно.

Чтобы выявить главные причинно-следственные связи, объясняющие снижение продуктивности сельскохозяйственных культур в данных почвенно-климатических условиях, необходим набор характеристик продуктивности. Почвенно-климатические условия или биоклиматический потенциал предлагается характеризовать вектором $X^1 = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, составляющие которого x_1, x_2, \dots, x_n — суть значения продуктивности (урожайности) агроэкосистемы, рассчитанные как по фактическим данным, так и при условии фиксации одного или нескольких изучаемых факторов среды (Сиротенко, Абашина, Павлова, 1995).

В принципе динамические модели позволяют изучать влияние на продуктивность значительного числа факторов (n), т. е. n может быть достаточно большим, однако, исходя из практических соображений в задачах макромасштабного районирования ограничимся следующей четырёхфакторной системой показателей:

$x_1 = БКП_0$ — при естественном увлажнении почвы и минеральном питании растений (низкозатратное земледелие);

$x_2 = БКП_W$ — при достаточном увлажнении почвы;

$x_3 = БКП_N$ — при достаточном минеральном питании;

$x_4 = БКП_{WN}$ — при сочетании достаточного увлажнения и минерального питания.

Аналогичная четырёхфакторная система показателей урожайности рассчитывается для отдельных конкретных сельскохозяйственных культур (пшеницы, ячменя и др.).

БКП рассчитывается в системе КПУ и представляет собой суммарную урожайность агроэкосистемы за тёплый период года. При расчёте БКП имитируется рост травяного фитоценоза, способного к многократному отрастанию после скашивания. Предполагается, что рост посева трав

возобновляется при переходе температуры через 5 °С весной и при достижении посевом стандартного состояния (листового индекса, равного 5) он «скашивается». Затем на следующие сутки рост биомассы возобновляется и продолжается, вплоть до достижения нового стандартного состояния или перехода температуры через 5 °С осенью. Суммарная биомасса, собранная за все «укосы» вместе с остаточной биомассой на дату прекращения вегетации, и составляет величину БКП.

Рассмотрим результаты расчётов БКП для Псковской, Калужской, Саратовской и Воронежской областей, расположенных в условиях различных по увлажнению и уровню плодородия почвы. БКП Краснодарского края, почвенно-климатические условия рассматриваем в качестве эталонных. Оценки БКП для четырёх уровней интенсивности земледелия, а также их приращения $\Delta_1 = БКП_W - БКП_0$, $\Delta_2 = БКП_N - БКП_0$ и $\Delta_3 = БКП_{WN} - БКП_0$, представлены в табл. 2.7.

Таблица 2.7 — Оценки БКП и его возможных приращений за счёт оптимизации водного режима и минерального питания (ц·га⁻¹·год⁻¹ сухой биомассы)

Область, край	БКП, ц/га				Приращение БКП, ц/га		
	БКП ₀	БКП _W	БКП _N	БКП _{WN}	Δ ₁	Δ ₂	Δ ₃
Псковская	47,6	47,7	125,7	126,1	0,1	78,1	78,5
Калужская	47,3	48,6	135,8	137,7	0,9	88,5	90,4
Воронежская	69,5	109,3	116,5	153,1	39,9	47,0	83,6
Саратовская	41,3	95,3	75,6	147,1	54,0	34,3	105,8
Краснодарский	101,0	158,8	118,8	183,4	57,8	17,8	82,4

Обозначения: $\Delta_1 = БКП_W - БКП_0$, $\Delta_2 = БКП_N - БКП_0$, $\Delta_3 = БКП_{WN} - БКП_0$

Калужская и Воронежская области существенно отличаются по значению БКП при оптимальном увлажнении и оптимальном минеральном питании. Различная структура составляющих БКП этих областей свидетельствует о том, что продуктивность сельскохозяйственных культур на территории Калужской и Псковской областей лимитируется уровнем

плодородия почв, а Воронежской области — условиями увлажнения (табл. 2.7).

Территория Краснодарского края характеризуется значительно более высокими величинами БКП для первого, второго и четвёртого уровней продуктивности, что представляется вполне закономерным, принимая во внимание естественное плодородие предкавказских чернозёмов, которое оценивается как самое высокое на Русской равнине.

Сравнительная оценка агроклиматических условий Краснодарского края, Калужской, Воронежской, Саратовской и Псковской областей представлена в табл. 2.8.

Таблица 2.8 — Агроклиматические характеристики вегетационного периода года (периода с температурой воздуха выше 5 °С) по отдельным областям ЕЧ России за 1961–1990 гг.

Область, край	Показатели вегетационного периода					
	продолжительность периода, сут.	сумма осадков, мм	средняя температура воздуха, °С	сумма температур выше 5 °С, °С	ГТК, ед.	среднее число часов солнечного сияния, час
Псковская	181	395	12,8	2298	1,70	6,9
Калужская	181	382	13,4	2419	1,55	7,1
Воронежская	194	309	15,4	2965	1,03	8,5
Саратовская	187	228	15,8	2962	0,77	9,2
Краснодарский	235	443	15,9	3737	1,19	9,6

Продолжительность вегетационного периода в Краснодарском крае на 1,5 месяца больше, чем в Калужской и Воронежской областях. Это и обуславливает высокие значения BKP_0 , BKP_w , BKP_{wN} . Однако, территория Краснодарского края в среднем менее увлажнённая, чем территория Калужской области. Значения ГТК для Краснодарского края и Калужской области равны соответственно 1,19 и 1,55. Из-за недостаточной увлажнённости BKP_N территории края оказывается ниже соответствующей составляющей БКП для Калужской области (118,8 и 135,8 ц/га соответственно) (табл. 2.7). Таким образом, почвенно-климатические условия

Краснодарского края нельзя признать абсолютным эталоном для территории России. При естественном увлажнении продуктивность 1 га пашни в Калужской области при достижении современного западноевропейского уровня земледелия может оказаться более высокой, чем продуктивность 1 га пашни Краснодарского края. Этот результат свидетельствует, что почвенно-климатические условия России невозможно достаточно полно охарактеризовать одним показателем — продуктивностью (урожайностью) при каком-либо одном фиксированном уровне интенсификации земледелия.

Анализ полученных результатов моделирования показывает, что предложенная четырёхфакторная система оценки БКП эффективный инструмент макромасштабного районирования почвенно-климатических условий сельскохозяйственных территорий. Размерность обусловлена числом регулируемых факторов (в данном случае влажностью почвы и минеральным питанием растений).

Круг решаемых задач может быть расширен. Пусть, например, необходимо оценить БКП пашни при дополнительном условии — возможности проведения весенних влагозарядковых поливов. В этом случае система оценок БКП станет пятимерной — число оцениваемых показателей возрастёт, пополнится величиной урожайности, рассчитанной при максимальном увлажнении почвы весной.

Какие величины БКП характеризуют современные климатические и почвенные условия территории России? Рассчитанные значения БКП для четырёх составляющих при современном климате за период 1998–2017 гг. (ц/га сухой биомассы) представлены в табл. 2.9.

Самый низкий уровень $БКП_0$ отмечается для территории Приволжского ФО (41,1 ц/га), самый высокий — в Южном ФО (62,4 ц/га). В Северо-Западном, Центральном, Уральском и Сибирском ФО уровень БКП составляет ~50 ц/га. Отметим, что несмотря на близость величин БКП, почвенно-климатические условия этих регионов кардинально отличаются друг от друга (Шашко др., 1983).

Таблица 2.9 — Современные оценки биоклиматического потенциала (БКП) на территории земледельческой зоны России, осреднённые по ФО за период 1998–2017 гг. (ц/га сухой биомассы)

Федеральный округ	Уровень БКП, ц/га			
	БКП ₀	БКП _W	БКП _N	БКП _{WN}
Северо-Западный	50,8	54,4	128,3	131,5
Калининградская обл.	56,9	61,0	155,2	158,4
Центральный	49,2	68,4	119,6	144,6
Приволжский	41,1	73,2	90,2	137,0
Южный	62,4	133,4	83,2	182,2
Северо-Кавказский	58,7	117,8	85,9	164,8
Уральский	49,2	69,1	99,9	120,2
Сибирский	50,2	67,4	103,5	118,3
Дальневосточный	53,0	62,3	123,8	132,1
Россия	50,0	75,0	104,4	135,5

При достаточном увлажнении (например, в результате орошения) $БКП_W$ Северо-Западного ФО практически изменится незначительно (54,4 ц/га), а $БКП_W$ для Поволжья, Урала и Сибири повысится до примерно 70 ц/га, т. е. в 1,4 раза. Оптимизация минерального питания, напротив, более эффективна на территориях с более низким уровнем плодородия (Северо-Западный ФО), чем в плодородных — Южном и Северо-Кавказском ФО. В первом случае $БКП_N$ возрастает в 2,5, а во втором — в 1,5 раза. Тем не менее, величины $БКП_{WN}$ для южных территорий ЕЧ России превышают аналогичные значения $БКП_{WN}$ для Северного экономического района в 1,4 раза, что свидетельствует о значительных потенциальных возможностях интенсификации сельского хозяйства на юге с его бóльшим приходом фотосинтетически активной радиации, чем на севере России.

Подчеркнём, что оценки БКП, определяют первичную биоклиматическую продуктивность территории и принципиально отличаются от другой характеристики продуктивности — урожайности конкретных сельскохозяйственных культур.

Например, необходимо оценить изменение биоклиматической продуктивности некоторой территории при потеплении. При этом известно, что влагообеспеченность этой территории была и останется достаточно высокой. Тогда при потеплении величины БКП возрастут за счёт увеличения продолжительности вегетационного периода, а урожайность зерновых культур (например, яровой пшеницы) уменьшится при прочих равных условиях из-за более раннего созревания при более высоких температурах. Реализация преимуществ более тёплого климата при выращивании пшеницы возможна при замене существующих сортов на более позднеспелые и, как правило, более урожайные, т. е. необходимо адаптировать систему земледелия к новым климатическим условиям. Величины БКП в отличие от расчётной урожайности зерновых культур «автоматически» учитывают необходимую адаптацию, но, естественно, в определенных пределах. Предложенная автором методика уже применяется и для оценки агроклиматических условий стран бывшего СССР — Белоруссии и Казахстана (Байшаланов, Павлова и др., 2018).

Методика расчёта величин БКП согласно приведённому определению по точкам, приписанным к географическому центру области, края, республики была разработана в 2000–2007 гг. в рамках НИР Роскомгидромета и представлена в наших работах (Сиротенко, Павлова и др., 1984, 1994, 2007) и в коллективной монографии (Гордеев и др., 2008).

Автором предлагается новая схема расчёта БКП, позволяющая проследить динамику БКП сельскохозяйственных регионов России за период с 1976 г.

Для проведения расчётов по определению величины БКП по каждому субъекту РФ используется следующая информация:

1. Метеорологическая информация (среднемесячная температура воздуха и месячные суммы осадков с января по декабрь) за последние несколько десятилетий (например, с 1998 по 2017 гг.).

2. Показатели уровня плодородия (содержание гумуса, объёмный вес почвы, кислотность почвы) по отдельным природно-сельскохозяйственным зонам на территории краёв, областей и республик РФ.

Осреднённые по федеральным округам оценки БКП за 1976–2017 гг., 1998–2017 гг., засушливый 2010 г., благоприятный по агроклиматическим условиям 2017 г. и базовый период 1961–1990 гг. представлены в табл. 2.10. Можно видеть, что пространственная изменчивость величины БКП, рассчитанной за весь период глобального потепления, достаточно высока — от 43,3 ц/га в Приволжском ФО до 68,0 ц/га в Южном ФО.

Таблица 2.10 — Биоклиматический потенциал (ц/га) по ФО на территории земледельческой зоны России по отдельным временным периодам. Расчёты выполнены в имитационной системе КПУ

Федеральный округ	Биоклиматический потенциал, ц/га				
	годы				
	1976–2017	1998–2017	2010	2017	1961–1990
Северо-Западный	50,9	50,8	43,7	49,0	50,0
Центральный	51,8	49,2	33,6	54,3	53,2
Приволжский	43,3	42,3	26,8	46,5	44,0
Южный	68,0	64,4	47,5	59,9	71,3
Северо-Кавказский	62,7	58,7	46,4	57,1	66,3
Уральский	48,7	51,2	36,6	52,3	50,0
Сибирский	50,2	51,2	51,1	50,5	49,9
Дальневосточный	53,0	53,0	51,2	53,4	52,3
Россия	51,3	50,0	41,1	51,8	49,3

За последние два десятилетия на северо-западе ЕЧ России, в Сибири, на Урале и на Дальнем Востоке БКП повысился, а в центральных районах и на юге ЕЧ остался на уровне базового периода. Очевидно, что изменение агроклиматических ресурсов за тёплый период года в этом регионе слабо повлияло на величину комплексного показателя продуктивности — БКП. В то же время, оценки БКП понизились в Южном и Северо-Кавказском ФО на 9,6 % (с 71,3 до 64,4 ц/га) и 11,5 % (с 66,3 до 58,7 ц/га) соответственно. В Приволжском ФО снижение за период 1998–2017 гг. составило 3,9 % (с 44,0

до 42,3 ц/га) (табл. 2.10). В среднем по России рост БКП составляет 4 %, что свидетельствует об устойчивости этого показателя из-за наличия разных природно-климатических зон и типов климата в обширной земледельческой зоне России.

Рассчитанные оценки изменений БКП территории не противоречат и хорошо согласуются с полученными ранее оценками трендов показателей тепло- и влагообеспеченности. В сильно засушливом 2010 г. увеличивается пространственная изменчивость БКП по ФО: от 26,8 ц/га (Приволжский) до 51,2 ц/га (Дальневосточный). В благоприятном по условиям тепло- и влагообеспеченности 2017 г. величины БКП были сопоставимы с соответствующими их оценками для базового периода (51,8 и 52,1 ц/га, соответственно) (табл. 2.10).

Для задач расчёта климатических рисков при производстве сельскохозяйственных культур (см. гл. 5), расчёта субсидий сельхозпроизводителям и других задач, связанных с агроклиматическим обслуживанием сельского хозяйства введём показатель уровня использования БКП, равный отношению урожайности сельскохозяйственной культуры к БКП. Рассчитанные нами ранее (Сиротенко, Павлова, 2010) средние значения уровня использования БКП (15 % в среднем по России) уточнены и представлены в табл. 2.11. Сравнивались значения БКП (система КПУ), осреднённые по ФО, и фактической урожайности ярового ячменя (данные Росстата), как зерновой культуры, имеющей распространение практически по всей земледельческой зоне. Полученные результаты свидетельствуют, что уровень использования БКП составил 33 % в 1998–2017 гг. и 38 % в 2008–2017 гг. и, следовательно, значительно превысил полученную ранее оценку (15 %).

Таблица 2.11 — Уровень использования биоклиматического потенциала по федеральным округам на территории земледельческой зоны России по отдельным временным периодам

Федеральный округ	Уровень использования биоклиматического потенциала, %				
	годы				
	1976–2017	1998–2017	2008–2017	2010	2017
Яровой ячмень					
Северо-Западный	30	37	46	45	44
Центральный	34	40	49	43	54
Приволжский	35	38	42	22	48
Южный	22	25	32	27	39
Северо-Кавказский	26	30	34	33	46
Уральский	31	32	35	34	40
Сибирский	26	29	32	31	36
Дальневосточный	23	25	27	12	35
Россия	29	33	38	31	44
Зерновые и зернобобовые культуры					
Северо-Западный	31	38	48	42	45
Центральный	33	40	50	41	57
Приволжский	33	37	42	25	50
Южный	33	40	50	52	62
Северо-Кавказский	42	49	61	65	78
Уральский	29	30	33	31	38
Сибирский	25	28	30	29	33
Дальневосточный	24	27	34	22	45
Россия	33	38	46	40	53

2.5 Реализация агроклиматического мониторинга на территории земледельческой зоны России

Оценка изменений агроклиматических условий в земледельческой зоне осуществляется при ежегодном агроклиматическом мониторинге с помощью имитационной системы КПУ. Мониторинг агроклиматической составляющей климата осуществляется (с 2010 г.) на основании станционных данных по температуре и осадкам месячного разрешения для 455 МС на территории СНГ за период с 1951 г. по настоящее время, содержащихся в базе данных «Климат», созданной в ИГКЭ (Павлова, Карачёнова, Доклад об особенностях климата, 2014–2018).

Реализованная система агроклиматического мониторинга поддерживает однородность исследуемых рядов агроклиматических показателей и регулярность функционирования с соблюдением установленного регламента (по составу информационных материалов, сроков их подготовки и распространения).

Цели мониторинга агроклиматической составляющей климата:

- слежение за состоянием агроклиматической системы, включающее регулярную оценку степени аномальности текущего состояния и выявление экстремальных агроклиматических аномалий;
- оценка влияния наблюдаемых тенденций изменения климата на агроклиматические ресурсы и продуктивность зерновых культур;
- статистический анализ текущих значений выбранных параметров на фоне их многолетних временных рядов для оценки аномальности текущего состояния агроклиматических ресурсов.

Перечень агроклиматических показателей для комплексной оценки влияния изменений климата на сельское хозяйство и землепользование представлен в табл. 2.1. Рассмотрим результаты практической реализации технологии мониторинга агроклиматических условий на территории основных зерновых регионов России.

Подготовка материалов мониторинга

1. Расчёт агроклиматических показателей (примерно 30) для полного списка станций (455 МС) и земледельческой зоны (198 МС). Результаты расчётов хранятся в архиве данных виде таблиц.

2. Расчёт статистических характеристик агроклиматических показателей (среднее значение, среднеквадратическое отклонение, оценка линейных трендов a и b ($X(t) = at + b$) и др.) за 1951–1975, 1961–1990 гг., с 1976 г. по текущий год и за последние 20 лет — 1998–2017 гг.

3. Оценки агроклиматических показателей с заданным пространственным масштабом осреднения (субъект РФ, ФО РФ).

4. Интеграция результатов в виде картосхем. Построение карт с использованием графического пакета SURFER и ГИС QGIS (карты пространственного распределения агрометеорологических показателей и их рассчитанных трендов, карты полей аномалий).

При подготовке сложных рисунков используются готовые шаблоны и макросы, обеспечивающие достаточный уровень автоматизации.

Состав материалов ежегодного Доклада об особенностях климата на территории РФ

Раздел «Агрометеорологические условия» Доклада об особенностях климата содержит описание агрометеорологических условий текущего года и их сравнительной характеристики с агрометеорологическими условиями самого благоприятного года за последнее десятилетие (2008), самого засушливого года (2010) и года со средними величинами за предшествующее пятилетие. Иллюстративный материал включает таблицы и карты пространственного распределения температуры воздуха и сумм осадков для календарной весны и лета; ГТК вегетационного периода (от 5 °С весной до 5 °С осенью), за май–июнь и май–август; распределения запасов продуктивной влаги в пахотном и метровом слоях почвы в июне и июле; отклонений климатообусловленной урожайности яровых зерновых культур и БКП в текущем году от уровня среднего за 2012–2016, 2010 и 2008 гг.

Анализируются тенденции изменений агроклиматических характеристик за период с 1976 г. по текущий год.

Влагообеспеченность сельскохозяйственных культур в 2017 г.

Аномалии показателей влажностного режима при возделывании сельскохозяйственных культур в 2017 г., осреднённые по федеральным округам в пределах условной земледельческой зоны южнее 66.5° с. ш. (до 90° в. д.), 60° с. ш. (до 130° в. д.) и 55° с. ш., представлены в табл. 2.12.

Таблица 2.12 — Аномалии показателей влажностного режима в 2017 г. относительно средних значений за 1997–2016 гг.

Федеральный округ	Сумма осадков, %				$\Sigma R_{\text{БКП}}$, %	$\Sigma R_{\text{зерн.}}$, %	ГТК _{май-авг.} , ед.	ИС, ед.
	зима	весна	лето	осень				
Северо-Западный	-5	9	23	25	18	57	0,42	-0,16
Центральный	-10	4	6	16	-1	23	0,19	-0,13
Приволжский	-3	19	20	-6	12	50	0,37	-0,15
Южный	12	20	-22	-22	-3	19	-0,05	0,10
Северо-Кавказский	-14	6	-16	-33	6	32	0,03	0,44
Уральский	17	-10	13	-21	4	18	0,23	-0,09
Сибирский	9	3	0	7	11	3	-0,01	-0,02
Дальневосточный	-17	-14	3	-12	10	8	-0,14	0,03
Россия	-1	4	6	-1	7	23	0,12	-0,04

Анализ данных, приведённых в табл. 2.12, показывает, что сумма осадков за период роста и развития яровых зерновых ($\Sigma R_{\text{зерн.}}$) в 2017 г. на территории всех земледельческих регионов была выше соответствующей средней величины за предшествующие два десятилетия. На ЕЧ России осадков выпало на 19–57 % больше, чем в среднем за предшествующие десять лет. В Приволжском ФО суммарное количество осадков вегетационного периода превысило средний уровень на 50 %. Практически на четверть выше нормы выпало осадков в Центральном ФО (23 %), где основные сельскохозяйственные площади заняты под яровыми культурами.

Аномалии индекса увлажнённости всего тёплого периода года ($\Sigma R_{\text{БКП}}$) положительны как для ЕЧ, так и для АЧ России, за исключением незначительных отрицательных аномалий в Южном (-3 %) и Центральном (-1 %) федеральных округах, и составляют в среднем 7 % относительно 1997–2016 гг.

На ЕЧ России аномалии весенних осадков в 2017 г. положительны. Отрицательные аномалии наблюдались в Уральском (-10 %) и Дальневосточном (-14 %) ФО. В Приволжском и Южном ФО весной выпало осадков на 19 и 20 % выше нормы, соответственно, что, вероятно, положительно сказалось на урожайности зерновых в этих регионах. В

среднем по земледельческой зоне величина аномалии составляет 4 % от уровня 1997–2016 гг.

Аномалии летних осадков практически на всей территории положительны, за исключением отрицательных аномалий на юге ЕЧ России в Южном (–22 %) и Северо-Кавказском (–16 %) ФО. В среднем по федеральным округам летние осадки превысили соответствующие средние величины на 6 %.

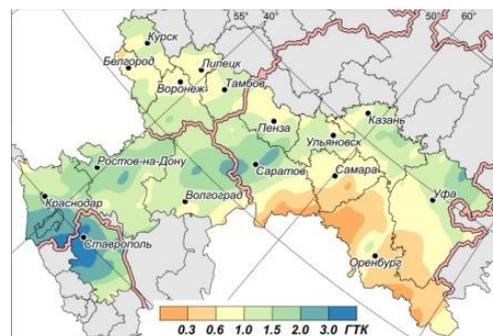
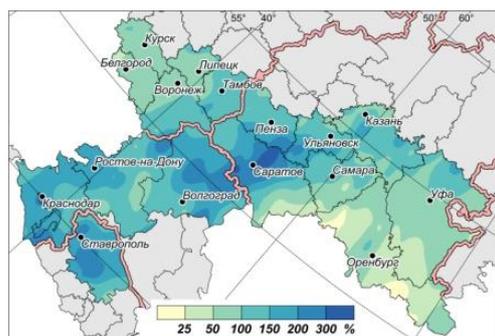
Величины ГТК, рассчитанные за период с мая по август, свидетельствуют о том, что уровень увлажнённости сельскохозяйственных угодий в 2017 г. был значительно выше, чем в среднем за 1997–2016 гг. на территории всех федеральных округов, за исключением Дальневосточного. Например, в Центральном и Приволжском ФО величина ГТК превышала норму на 0,19 и 0,37 соответственно (табл. 2.12). На территории Южного, Сибирского и Дальневосточного ФО отмечались незначительные отрицательные аномалии ГТК. Индекс сухости, рассчитанный по данным 2017 г., в среднем по земледельческим регионам России ниже, чем за предыдущие два десятилетия.

На рис. 2.9 представлено пространственное распределение сумм атмосферных осадков (в % от средних значений за 2007–2016 гг.) и ГТК в 2017 г. для трёх периодов: с 1 мая по 20 мая, с 1 мая по 20 июня и с 1 мая по 20 июля. Расчёты выполнены для территории 16 субъектов (республик, краёв, областей) Центрального, Приволжского, Южного и Северо-Кавказского ФО.

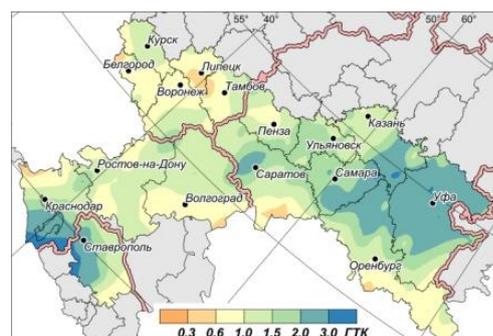
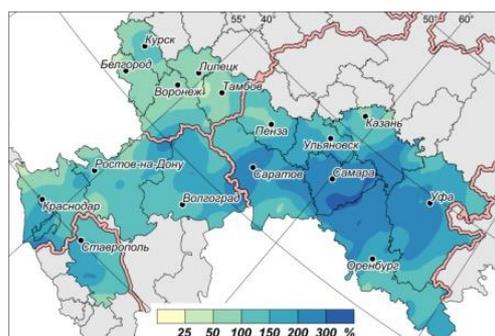
Сумма осадков в % от средних значений за 2006–2015 гг.

**Гидротермический коэффициент
Г. Т. Селянинова, ед.**

01.05–20.05



01.05–20.06



01.05–20.07

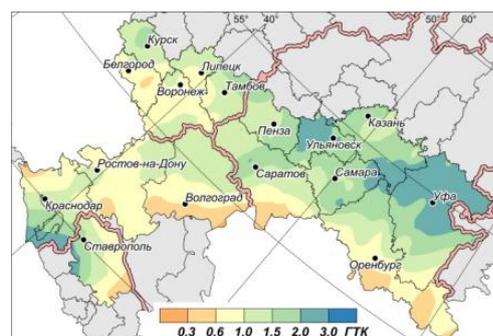
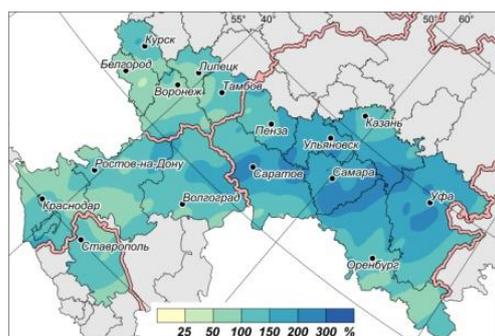
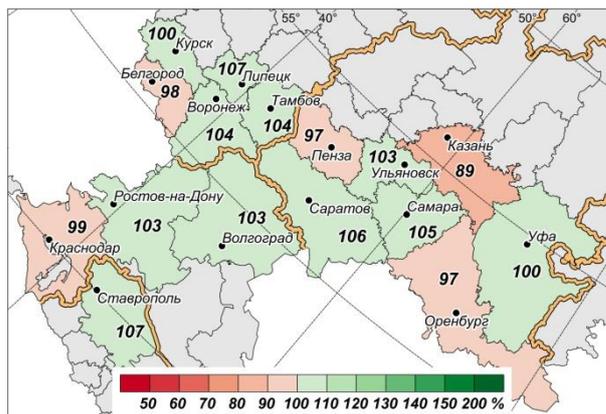


Рисунок 2.9 — Мониторинг условий увлажнённости вегетационного периода 2017 г.: сумма осадков в % относительно средних значений за 2006–2015 гг. и гидротермический коэффициент Г. Т. Селянинова на 20 мая, 20 июня и 20 июля 2017 г.

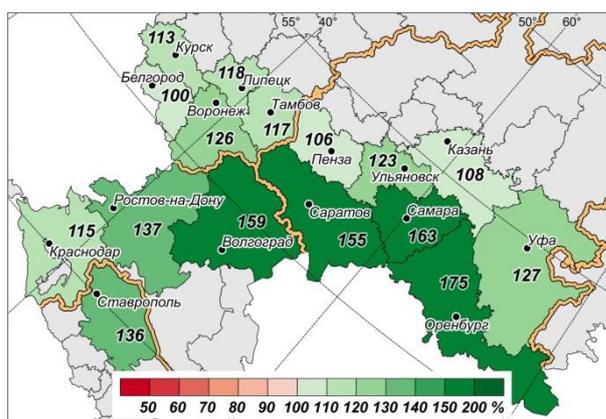
Продуктивность сельскохозяйственных культур

Данные ежедекадного мониторинга агроклиматических условий формирования урожайности зерновых культур получены для территории 16 субъектов (республик, краёв, областей) Центрального, Приволжского, Южного и Северо-Кавказского ФО с 1 мая по 20 июля 2017 г. (рис. 2.10). Анализ результатов расчётов показывает, что агроклиматические условия 2017 г. на этой территории способствовали формированию более высокого уровня урожайности по сравнению с предшествующим десятилетием.

(а) 20 мая 2017



(б) 20 июня 2017



(в) 20 июля 2017

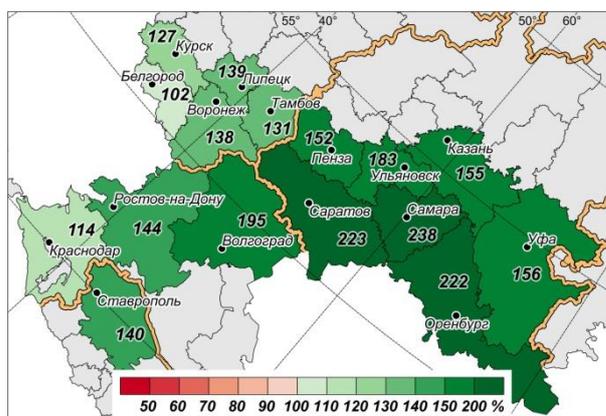


Рисунок 2.10 — Оценка (%) агрометеорологических условий вегетационного периода яровой пшеницы в 2017 г. на территории отдельных субъектов ЕЧ России относительно 2012–2016 гг. на даты: (а) 20 мая, (б) 20 июня и (в) 20 июля

Пространственное распределение оценок ожидаемой в 2017 г. урожайности яровой пшеницы на основные прогностические даты — 20 мая, 20 июня и 20 июля представлено на рис. 2.10. В 2017 г. в целом по рассматриваемой территории следует ожидать значительного увеличения валового сбора яровой пшеницы: в десяти регионах из шестнадцати (63 %)

урожайность более чем на 40 % превышает среднемноголетний уровень. В Саратовской, Самарской и Оренбургской областях агрометеорологические условия в 2017 г. были благоприятными для производства яровой пшеницы. Оценки ожидаемой урожайности превысили среднемноголетний уровень (норму) в 2,2–2,4 раза.

Оценки увлажнённости сельскохозяйственных полей в предпосевной и осенний периоды показывают, что для озимых культур урожая 2018 года на территории Южного и юго-восточных областей Приволжского ФО наблюдалась достаточная влагообеспеченность (рис. 2.11).

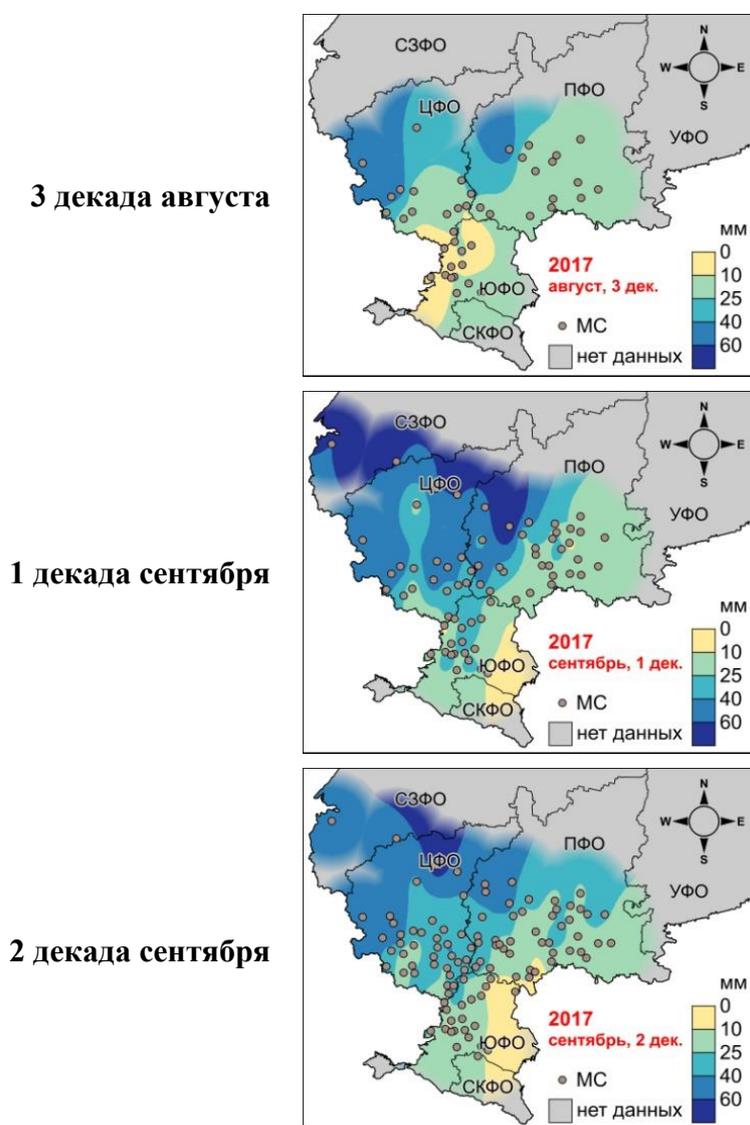


Рисунок 2.11 — Запасы продуктивной влаги в пахотном слое почвы (0–20 см) под озимыми культурами на третью декаду августа и первую и вторую декады сентября 2017 г.

ГЛАВА 3. Оценка изменений продуктивности зерновых культур при изменении агроклиматических ресурсов

3.1 Анализ и оценка тенденций изменения урожайности зерновых культур

В настоящее время данные об урожайности востребованы научным сообществом не менее чем данные о погоде и климате. Сбором, обработкой и анализом данных об урожайности занимаются многие научные коллективы (Манелля, 1997, 1999; Вильфанд и др., 2011, 2016; Клещенко, 2010; Страшная и др., 2013; Золотокрылин и др., 2014, 2016; Русакова и др., 2010; Дронин, Кириленко, 2012; Нефедова, 2017; Lobell et al., 2007; Brisson et al., 2010; Ray et al., 2012, 2014; Alcamo et al., 2007; Dronin, Kirilenko, 2008; Florian et al., 2014; Weshung et al., 2016; Bokusheva et al., 2012; Schierhorn et al., 2014; Iizumi et al., 2016; Bokusheva et al., 2018).

Так, в работе (Растянников и др., 2009) на основе этих данных проанализировано состояние зерновой проблемы в России на протяжении двух веков. По мнению авторов, в конце 20 — начале 21 века начался новый, первый в 21 веке, большой цикл урожайности, показателем которого является 45 %-ый скачок продуктивности зерновых в России (с 11,8 до 17,1 ц/га за период с 1998–2000 по 2001–2003 гг.). Этот скачок «вытянул» вверх волну динамики урожайности до 2006 г. включительно. По аналогии с циклами урожайности в 19 и 20 вв. авторы монографии полагают, что фаза подъёма этого цикла может длиться, по меньшей мере, до середины 20-х годов 21 века.

В монографии Ю. Л. Раунера (Раунер, 1981) рассматривается воздействие неблагоприятных погодно-климатических условий на многолетний режим продуктивности растительного покрова и урожайность сельскохозяйственных культур. Приводятся данные за 19 и 20 вв. по СССР, США, Канаде, Западной Европе, Японии и анализируется временная

динамика засушливых явлений в указанных странах за соответствующий период.

В табл. 3.1 представлены относительные посевные площади (%) по основным зерновым культурам по федеральным округам на территории земледельческой зоны России, рассчитанные по данным Росстата за период 1999–2017 гг. Основная доля посевов яровой пшеницы приходится на Сибирский (~47 %), Приволжский (~30 %) и Уральский (~16 %) ФО. Озимая пшеница является преобладающей культурой в Южном (~41 %), Центральном (~23 %) и Приволжском (~19 %) ФО. В целом же самые большие площади зерновых и зернобобовых культур сосредоточены в Приволжском (~29 %), Сибирском (~22 %), Южном (~18 %) и Центральном (~16 %) ФО.

Таблица 3.1 — Относительная доля посевных площадей (%) по основным зерновым культурам, осреднённая по федеральным округам за период 1999–2017 гг.

Федеральный округ	Доля посевных площадей, %			
	ячмень	озимая пшеница	яровая пшеница	зерновые и зернобобовые
Северо-Западный	1,3	0,5	0,3	0,7
Центральный	25,4	22,6	3,5	15,7
Приволжский	36,2	19,3	30,2	29,2
Южный	14,7	40,8	1,3	18,3
Северо-Кавказский	1,2	16,3	0,04	6,3
Уральский	7,6	0,1	16,3	7,5
Сибирский	12,7	0,5	47,3	21,5
Дальневосточный	0,9	0,01	1,0	0,8
Россия	100,0	100,0	100,0	100,0

Примечание: жирным шрифтом выделены первые три значения по рангу в ряду убывающих посевных площадей под культурой.

Рассмотрим оценки изменений средней урожайности основных зерновых культур (данные Росстата) за период глобального потепления (с 1976 г.) на территории земледельческой зоны России с учётом принятого административного деления по ФО.

В табл. 3.2 представлены статистические характеристики рядов урожайности основных зерновых культур: яровой пшеницы, ярового ячменя, озимой пшеницы и зерновых и зернобобовых культур в целом (среднее, m ; среднее квадратическое отклонение, σ ; коэффициент вариации, V ; коэффициент линейного тренда, b ; доля дисперсии, объясняемая трендом, D) по отдельным федеральным округам за периоды 1998–2017 и 1976–2017 гг.

Таблица 3.2 — Статистические характеристики рядов урожайности зерновых культур и оценки линейного тренда по данным за 1998–2017 и 1976–2017 гг. (m — среднее, ц/га; σ — среднее квадратическое отклонение, ц/га; V — коэффициент вариации, %; b — коэффициент линейного тренда, ц/га/10 лет; D — доля дисперсии, объясняемая линейным трендом)

Федеральный округ	Период, гг.									
	1998–2017					1976–2017				
	m , ц/га	σ , ц/га	V , %	b , ц/га/10 лет	D , %	m , ц/га	σ , ц/га	V , %	b , ц/га/10 лет	D , %
(а) яровая пшеница										
Северо-Западный	17,5	5,3	30,3	7,8*	77	14,7	4,9	33,1	2,7*	47
Центральный	18,0	5,9	32,6	7,9*	63	15,8	5,0	31,6	2,5*	38
Приволжский	14,1	4,0	28,3	3,2*	21	13,6	3,4	25,3	0,8	8
Южный	13,4	5,4	40,1	6,5*	51	11,8	4,6	38,6	1,8*	25
Сев.-Кавказский	20,0	6,1	30,3	8,6*	71	18,0	6,9	38,2	4,5*	31
Уральский	14,4	3,0	20,6	2,4*	23	13,7	3,0	21,6	0,5	5
Сибирский	13,9	2,1	15,2	2,0*	33	13,1	2,1	16,0	0,9*	26
Дальневосточный	13,3	3,5	26,0	4,4*	56	12,2	3,1	25,1	1,1	18
Россия	15,4	4,3	27,8	5,3*	51	13,5	4,2	31,1	1,9*	30
(б) яровой ячмень										
Северо-Западный	18,6	5,8	31,2	8,9*	82	15,4	5,3	34,7	3,2*	54
Центральный	19,8	5,7	28,9	7,6*	61	17,5	5,3	30,0	2,6*	37
Приволжский	15,6	4,4	28,1	3,1*	18	15,1	3,9	25,7	0,8	7
Южный	15,4	5,1	33,3	6,0*	47	15,1	4,3	28,5	0,8	5
Сев.-Кавказский	18,0	4,1	22,9	4,3*	38	17,8	4,7	26,4	0,7	4
Уральский	15,9	3,1	19,4	2,7*	26	15,0	3,4	22,8	0,6	5
Сибирский	14,8	2,3	15,7	2,5*	39	13,1	2,6	19,8	1,5*	53
Дальневосточный	13,0	3,3	25,2	3,1*	31	12,3	3,1	25,4	0,7	8
Россия	16,3	4,2	25,7	4,8*	44	15,0	4,0	26,6	1,4*	23
(в) озимая пшеница										
Северо-Западный	22,6	7,7	33,9	11,2*	75	18,5	6,8	37,0	4,0*	50
Центральный	23,9	6,0	25,1	8,2*	66	20,7	5,8	28,2	3,3*	47
Приволжский	18,9	5,3	28,2	3,1	11	18,1	5,2	28,7	1,2	8
Южный	27,5	6,5	23,7	7,7*	49	25,4	5,8	22,7	2,1*	20
Сев.-Кавказский	28,1	5,2	18,5	6,9*	61	26,9	4,9	18,2	1,7*	18
Уральский	16,1	4,6	28,9	3,6*	21	15,5	4,6	29,4	0,8	5
Сибирский	17,2	4,8	28,2	3,8*	21	16,6	4,7	28,6	0,5	2
Дальневосточный	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Россия	21,7	5,7	26,7	6,3*	44	20,0	5,3	27,5	1,9*	21

Продолжение таблицы 3.2

Федеральный округ	Период, гг.									
	1998–2017					1976–2017				
	m, ц/га	σ, ц/га	V, %	b, ц/га/10 лет	D, %	m, ц/га	σ, ц/га	V, %	b, ц/га/10 лет	D, %
(г) зерновые и зернобобовые										
Северо-Западный	19,2	6,2	32,5	9,6*	83	15,8	5,6	35,2	3,4*	56
Центральный	19,8	5,8	29,5	8,6*	75	17,2	5,2	30,4	2,9*	48
Приволжский	15,4	4,0	25,9	3,5*	27	14,4	3,5	24,3	1,2	19
Южный	24,8	6,5	26,3	9,2*	70	22,4	5,6	25,2	2,6*	31
Сев.-Кавказский	31,3	9,8	31,5	10,7*	89	28,5	7,6	26,8	3,5	32
Уральский	14,8	2,9	19,9	2,4*	24	14,0	3,0	21,1	0,6	6
Сибирский	13,9	2,2	15,6	2,2*	37	12,8	2,1	16,4	1,0*	36
Дальневосточный	14,5	4,7	32,4	6,9*	74	12,9	3,9	30,2	1,7*	28
Россия	18,9	5,1	26,6	7,1*	60	17,0	4,5	26,1	2,1*	32

Обозначение: * — 5 % уровень значимости.

3.1.1 Яровые зерновые культуры

Яровая пшеница

Среди зерновых продовольственных культур яровая пшеница занимает одно из ведущих мест. Северная граница возделывания скороспелых сортов мягкой яровой пшеницы проходит по изолинии 1200–1250 °С, а сортов твёрдой пшеницы — 1600–1700 °С. Наиболее широкое распространение эта культура получила в засушливых районах юго-востока ЕЧ России и в степных районах Сибири. Континентальный сухой климат этих районов благоприятствует получению зерна с высоким содержанием белка и высококачественной клейковины, хотя урожайность по мере увеличения засушливости климата снижается. Высокобелковым является товарное зерно Волгоградской, Саратовской, Самарской, Оренбургской, Омской областей и Алтайского края (Бараев и др., 1978). Основные посевные площади яровой пшеницы, как упоминалось выше, сосредоточены в Сибирском (47 %), Приволжском (33 %) и Уральском (16 %) ФО.

Анализ показывает, что максимальные положительные тренды (*b*) урожайности яровой пшеницы, рассчитанные по данным Росстата за период 1998–2017 гг. наблюдаются в Центральном, Северо-Западном, Южном и

Северо-Кавказском ФО на ЕЧ России и составляют от 6,5 до 8,6 ц/га/10 лет (табл. 3.2 а). Доля дисперсии (D), объясняемая линейным трендом, для этих ФО 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 до 33 % в Сибирском ФО.

Коэффициент вариации (V), характеризующий изменчивость рядов урожайности, различается значительно по федеральным округам: минимальный коэффициент вариации в Сибирском ФО (~15 %), максимальный — в Южном ФО (~40 %). В среднем по всей земледельческой зоне России тренды урожайности яровой пшеницы (b) за период 1998–2017 гг. значительно превышают соответствующие величины за весь период глобального потепления с 1976 по 2017 гг. и составляют 5,3 и 1,9 ц/га/10 лет соответственно (табл. 3.2). Практически все оценки линейного тренда (b) значимы на 5 % уровне (обозначение — *).

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).

Яровой ячмень

Многообразие сортов ячменя позволяет возделывать эту культуру почти везде, где возможно земледелие. Отличаясь сравнительно коротким вегетационным периодом, ячмень рано освобождает поле для подготовки почвы под следующую культуру (Борисоник, 1974). Яровой ячмень часто используется в качестве страховой культуры в отдельные годы, когда

пересевают погибшую озимь, и тогда площади его заметно возрастают. Выращиванию крупяных сортов ячменя благоприятствуют почвенно-климатические условия Поволжья, центрально-чернозёмной зоны и Северного Кавказа. Самые большие посевные площади ячменя сосредоточены в Приволжском (36 %) и Центральном (25 %) ФО.

Данные, представленные в табл. 3.2 б, свидетельствуют, что тренды урожайности (*b*) ярового ячменя в среднем по России, рассчитанные за период 1998–2017 гг., составляют 4,8 ц/га/10 лет. При этом вклад линейного тренда (*D*) в дисперсию урожайности составляет 44 %. В среднем по земледельческой зоне России тренды урожайности (*b*) за 1998–2017 гг. значительно превышают соответствующие величины за весь период глобального потепления (1976–2017 гг.). Межгодовая изменчивость (*V*) урожайности ярового ячменя в Центральном, Приволжском и Южном ФО (75 % посевных площадей) достаточна высокая и составляет от 28 до 33 %. На АЧ России, в Сибирском и Уральском ФО (20 % посевных площадей), изменчивость (*V*) почти в два раза ниже — от 16 до 19 % (табл. 3.2 б).

Анализ данных по урожайности показывает, в среднем по России оценка линейного тренда урожайности ярового ячменя за 1976–2017 гг. составляет 1,4 ц/га/10 лет. В Северо-Западном, Центральном и Сибирском ФО (~40 % посевных площадей) оценка тренда статистически значима и составляет в среднем 2,2 ц/га/10 лет, а соответствующий коэффициент детерминации — 26 %. В остальной части территории земледельческой зоны (~60 % посевных площадей) оценки линейного тренда малы (<0,8 ц/га/10 лет) и статистически незначимы.

3.1.2 Озимая пшеница

Озимая пшеница во многих регионах является главной зерновой культурой. Она возделывается на плодородных землях Северного Кавказа, в центрально-чернозёмной зоне и в Нижнем Поволжье, где сосредоточено более 80 % её посевных площадей. Доля посевных площадей составляет в

Южном, Центральном и Приволжском ФО 41, 23 и 19 % соответственно. В среднем озимая пшеница даёт более высокие урожаи, чем яровые зерновые. Урожайность озимой пшеницы значительно повысилась, когда основные посевные площади стали занимать высокопродуктивные сорта отечественной селекции.

За весь период глобального потепления (с 1976 г.) и за более короткий период (с 1998 г.) наблюдается положительный тренд урожайности озимой пшеницы в основных регионах её возделывания — Южном, Приволжском и центрально-чернозёмных областях (табл. 3.2 в). Высокие оценки скорости роста урожайности (b) озимой пшеницы отмечаются на территории Центрального и Южного ФО и составляют 8,2 и 7,7 ц/га/10 лет. Положительные тренды урожайности (b), но менее значительные ~3,1 ц/га/10 лет, выявлены в Приволжском ФО (табл. 3.2 в). Оценки тренда урожайности в Центральном, Приволжском и Южном ФО изменились от 3,3; 1,2 и 2,1 ц/га/10 лет до 8,2; 3,1 и 7,7 ц/га/10 лет в 1976–2017 и 1998–2017 гг. соответственно (табл. 3.2 в). Коэффициент вариации (V) рядов урожайности озимой пшеницы практически не изменился и остался на уровне 27 %.

Итак, для озимой пшеницы характерны максимальные тренды урожайности (b), особенно в основных регионах её возделывания — в Южном ФО и на юге Центрального ФО. Вклад линейного тренда в общую дисперсию урожайности (D) здесь достаточно высокий и составляет 49 и 66 % соответственно (табл. 3.2 в).

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.

3.1.3 Зерновые и зернобобовые культуры

Средняя урожайность зерновых и зернобобовых культур по земледельческой зоне за период 1976–2017 гг. составила 17,0 ц/га. Средний уровень урожайности за последние 20 лет (1998–2017 гг.) оценивается величиной 18,9 ц/га или на 1,9 ц/га выше, чем за весь период глобального потепления. Изменчивость рядов урожайности для двух рассматриваемых периодов, оцениваемая среднеквадратическим отклонением (σ) и коэффициентом вариации (V), сравнима по величине и составляет ~5,0 ц/га и ~26 % соответственно (табл. 3.2 г).

По зерновым и зернобобовым культурам в целом оценки линейного тренда (b) за весь период глобального потепления значимы на 5 % уровне на территории всех ФО, за исключением Приволжского и Уральского, а вклад в дисперсию (D) составляет от 28 до 56 % (табл. 3.2 г).

Скорость роста урожайности (b) зерновых и зернобобовых культур за последние 20 лет увеличилась значительно по сравнению с периодом глобального потепления (с 1976 г.) и составляет 7,1 ц/га/10 лет. Самые высокие тренды урожайности (b) характерны для Северо-Западного (9,6 ц/га), Южного, Северо-Кавказского (9,2 и 10,7 ц/га) и Центрального ФО (8,6 ц/га) (табл. 3.2 г).

В целом, за период с 1976 по 2017 гг. урожайность зерновых и зернобобовых росла со средней скоростью 2,1 ц/га/10 лет. В основных зернопроизводящих регионах Южном и Сибирском линейные тренды статистически значимы и составляют 2,6 и 1,0 ц/га/10 лет соответственно. В то же время, в Приволжском ФО (~30,0 % площадей) соответствующие оценки линейного тренда статистически не значимы.

Обобщение результатов: оценки трендов урожайности зерновых культур

Снижение тенденций к росту продуктивности пшеницы за последнее десятилетие или два наблюдалось во многих регионах мира и обсуждалось,

например, в работах (Brisson et al., 2010; Ray et al., 2012). Признавая тот факт, что в рядах урожайности смешиваются факторы, связанные, например, с введением новых культурных сортов растений, изменений в агротехнике, изменений в сельскохозяйственной политике и т. п., Brisson et al. (2010), тем не менее, пришёл к заключению, что одной из причин застоя урожая Франции стали более неблагоприятные климатические условия. Это согласуется с результатами (Lobell et al., 2010, 2011), где проанализированы возможные воздействия потепления и изменений в режиме осадков на тенденцию урожаев главных зерновых культур в глобальном масштабе, и сделан вывод, что эти воздействия были по большей части отрицательными.

В то же время, проведённые автором исследования наблюдаемых тенденций в рядах урожайности зерновых культур на территории земледельческой зоны России показали:

- скорость роста (тренд) урожайности озимой и яровой пшеницы, ярового ячменя, а также зерновых и зернобобовых *положительна* на территории всей земледельческой зоны за весь период глобального потепления 1976–2017 гг. и за последние двадцать лет в 1998–2017 гг.

- по агрегированным данным в масштабе федеральных округов выявлено, что при общей положительной тенденции к росту в 1998–2017 гг. в основных зерновых регионах Южного и Приволжского ФО уровень урожайности пшеницы стабилизировался после 2005 г.

3.1.4 Региональные оценки трендов урожайности зерновых культур в Приволжском федеральном округе

Разнообразие природных и климатических условий земледельческой зоны России требует дополнить агрегированные по федеральным округам оценки (см. табл. 3.2) анализом трендов урожайности по отдельным субъектам (краям, областям, республикам). Как пример рассмотрим Приволжский ФО.

Приволжский ФО, занимающий одно из лидирующих положений по производству зерновых культур, может служить «базовым регионом» для выявления и анализа тенденций показателей продуктивности растениеводства, наблюдаемых за последние десятилетия. Для территории 14 субъектов, входящих в округ, были рассчитаны оценки линейных трендов рядов урожайности четырёх основных зерновых культур: яровой и озимой пшеницы, ярового ячменя, озимой ржи, а также зерновых и зернобобовых культур в целом за период с 1998 по 2017 гг. (табл. 3.3).

Таблица 3.3 — Оценки линейных трендов b (ц/га/10 лет) урожайности зерновых культур и доля дисперсии, объясняемая трендом, D (%), в Приволжском ФО за 1998–2017 гг.

Субъект РФ: край, область, республика	Яровая пшеница		Озимая пшеница		Яровой ячмень		Зерновые и зернобобовые		Посевная площадь зерновых и зернобобовых, %
	b	D , %	b	D , %	b	D , %	b	D , %	
Оренбургская	0,8	2	3,0	10	0,6	1	1,3	6	20,8
Саратовская	2,9	17	4,7	17	1,9	6	4,0*	24	17,4
Башкортостан	0,4	0	1,2	1	-0,1	0,0	0,2	0,0	12,6
Татарстан	-0,3	0	0,7	0,2	-0,2	0,0	0,3	0,1	11,4
Самарская	4,4*	29	5,4*	21	3,4	18	4,2*	28	8,3
Пензенская	9,1*	52	8,8*	39	8,2*	50	8,8*	60	5,2
Нижегородская	3,4*	23	3,0	10	3,8*	22	4,4*	36	4,3
Кировская	4,3*	50	2,6	8	5,0*	44	4,9*	60	3,4
Ульяновская	3,0	15	3,5	9	3,6	15	4,2*	24	4,2
Пермский	1,6*	21	1,0	3	1,9	18	2,0*	28	2,8
Удмуртская	1,5	6	3,4	11	2,5	13	2,5	17	3,2
Мордовия	7,7*	46	2,9	6	6,0*	26	6,7*	37	3,2
Чувашия	3,3	16	0,3	0,1	3,3	15	3,1	15	1,9
Марий Эл	2,6	17	3,0	13	3,5*	26	2,9*	25	1,3
Приволжский ФО	3,2*	21	3,1	11	3,1	18	3,5*	27	100,0

Примечание: красным выделены значения b на 5 % уровне значимости (*), жирным шрифтом — посевная площадь на территории субъектов, где отмечены значимые линейные тренды.

Список субъектов ранжирован по доле посевных площадей всех зерновых и зернобобовых культур (табл. 3.3). При анализе использовались данные по урожайности Росстата (http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_main/rosstat/ru/statistics/enterprise/economy/).

Анализ данных (табл. 3.3) позволяет сделать вывод о положительной тенденции в рядах урожайности яровой и озимой пшеницы, зерновых и зернобобовых культур в целом по Приволжскому ФО. При этом в ~40 % случаев оценки линейного тренда статистически значимы на 5 % уровне. Выделяется Пензенская область, где оценки линейного тренда, полученные для всех трёх основных зерновых культур, а также зерновых и зернобобовых культур в целом, положительны и статистически значимы. Значимые положительные оценки линейных трендов получены по яровой пшенице в Самарской области, где её посевы занимают значительные площади (табл. 3.3).

Высокие тренды по зерновым и зернобобовым культурам (выше 4 ц/га/10 лет) наблюдаются в Саратовской, Самарской, Пензенской, Нижегородской, Кировской, Ульяновской областях и Республике Мордовия.

В Приволжском ФО за период 1998–2017 гг. практически на половине посевных площадей (49,3 % — последний столбец табл. 3.3) отмечается значимая положительная тенденция к росту урожайности зерновых и зернобобовых культур в целом. Вклад дисперсии в оценку линейного тренда значительно колеблется по территории, а его максимальные значения в отдельных случаях достигают 50–60 %.

Таким образом, детализированные оценки по субъектам в пределах одного федерального округа дополняют и уточняют общую картину наблюдаемых тенденций изменения урожайности зерновых культур в целом по земледельческой зоне.

3.2 Климатически обусловленная урожайность зерновых культур

Все многообразие факторов, влияющих на урожайность сельскохозяйственных культур, обычно делят на два больших кластера: первый, обусловленный уровнем культуры земледелия, и второй, обусловленный метеорологическими факторами. Соответственно, при

анализе временной динамики урожайности сельскохозяйственных культур выделяют две составляющие: технологическую и климатическую.

К технологической составляющей относят особенности применяемой системы земледелия, способы обработки почвы, уровень использования удобрений, способы борьбы с вредителями и болезнями, возможная сортосмена, энерговооруженность сельскохозяйственного производства, мелиорация микроклимата почвы и др. К климатической составляющей — межгодовую изменчивость метеорологических условий.

Предполагается, что влияние факторов, связанных с ростом культуры земледелия, приводит к плавному (от года к году) изменению урожайности.

Выделение технологического тренда является сложной задачей и не всегда успешно решаемой. Вопросы подбора вида кривой тренда подробно обсуждаются в работе (Пасов, 1986), где сделан вывод, что изменение урожайности зерновых культур во времени, связанное с факторами не метеорологического происхождения, в первом приближении может быть представлено в виде прямой или параболы второго порядка.

Сложно выделить и климатически обусловленную составляющую урожайности (Раунер, 1981). Задача усложняется в условиях наблюдаемых изменений климата последних десятилетий, когда выявлены тренды показателей метеорологических условий (см. гл. 2), и климатически обусловленную урожайность уже нельзя рассматривать как стационарную случайную величину — она также имеет тренд.

Для решения задачи выделения (определения) климатически обусловленного тренда рядов урожайности нами впервые выбран метод с использованием имитационного моделирования на основе системы КПУ.

В разработанной и действующей системе агроклиматического мониторинга для оценки продуктивности используется показатель — климатически обусловленная урожайность (Y). Эта урожайность моделируется (рассчитывается) в системе КПУ при заданном уровне агротехники и почвенного плодородия при текущих метеорологических

условиях, отражая, таким образом, влияние на урожайность только климатических факторов.

В предыдущем разделе проведён анализ трендов рядов фактически наблюдаемой урожайности зерновых культур по данным Росстата, включающих технологическую и климатическую составляющие. Теперь перейдём к анализу климатически обусловленной компоненты урожайности, моделируемой в системе КПУ.

Оценку климатически обусловленных трендов в рядах урожайности зерновых культур рассмотрим для территории южных областей ЕЧ России, включающей Приволжский и Южный ФО, а также чернозёмные области Центрального ФО.

Прежде чем перейти к анализу результатов расчётов климатически обусловленной урожайности и оценки её трендов представим рассчитанные оценки показателей, характеризующих агроклиматические ресурсы зерновых регионов юга России.

3.2.1 Оценка тенденций изменений агроклиматических показателей

Для оценки влияния последних климатических тенденций на урожайность пшеницы, с помощью имитационной системы КПУ проведён ретроспективный анализ агроклиматических условий за период с 1996 г. по 2015 г. Основные районы возделывания яровой пшеницы расположены на юге ЕЧ России (южная часть Центрального ФО и в целом Южный и Приволжский ФО). Здесь сосредоточено примерно 75 % площадей от общей посевной площади под этой культурой в России (ROSSTAT, 2016).

Для оценки влияния климата на урожайность последних десятилетий, все параметры, связанные с агрономией и управлением производством сельскохозяйственных культур, сохранялись фиксированными и были настроены в соответствии с современной сельскохозяйственной технологией. Параметры культур, начальные и граничные условия были взяты из

функционирующей оперативной версии системы КПУ. Специальной калибровки КПУ для этого конкретного исследования не проводилось. Как показано выше (см. гл. 1), в отношении последнего десятилетия (2006–2015 гг.) результаты моделирования в имитационной системе КПУ можно считать удовлетворительными.

Перейдём к рассмотрению тенденций изменения основных агроклиматических показателей за этот период.

Продолжительность периода вегетации и сумма эффективных температур

Проведённые расчёты показали, что в течение 1996–2015 гг. средняя продолжительность вегетационного периода составляла от 85 до 125 дней у озимой пшеницы (рис. 3.1 а) и от 75 до 120 дней у яровой пшеницы (рис. 3.1 б), что соответствует оценкам, приведённым в «Интерактивном сельскохозяйственном экологическом атласе России и соседних стран» (Афонин и др., 2008).

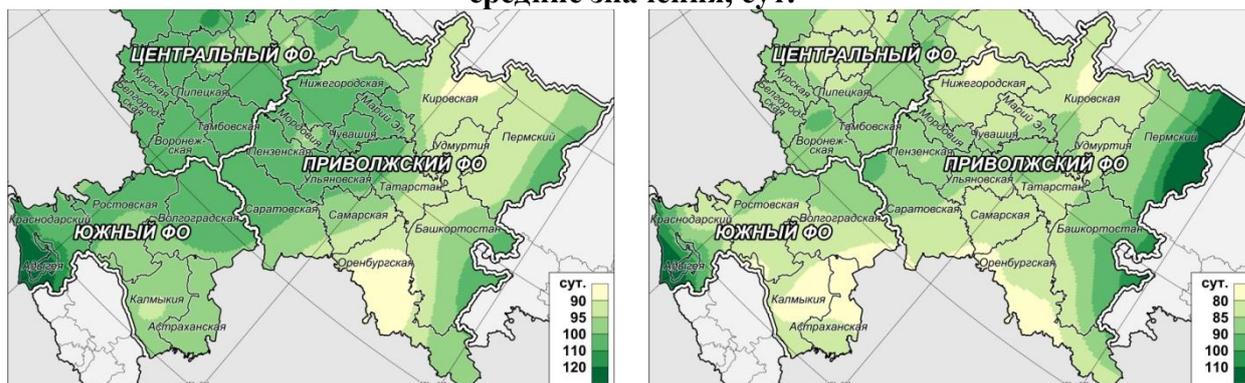
Отчётливо прослеживаются региональные различия продолжительности периода вегетации, как для яровой, так и для озимой пшеницы с минимальным значением (~80 дней) в центре Приволжского ФО (Республики Удмуртия и Татарстан, Самарская и Оренбургская области) и в западной части Южного ФО (Калмыкия, Астраханская область).

Пространственное распределение коэффициентов линейных трендов продолжительности вегетационного периода указывает на его сокращение примерно на 10 дней в Центральном ФО и вдоль границы между Приволжским и Южным ФО. Сравнение этого показателя со средней продолжительностью вегетационного периода для этой территории свидетельствует, что, условно говоря, общее сокращение за 1996–2015 гг. превысило 10 % (рис. 3.1).

а) Озимая пшеница

б) Яровая пшеница

средние значения, сут.



линейный тренд, сут./10 лет

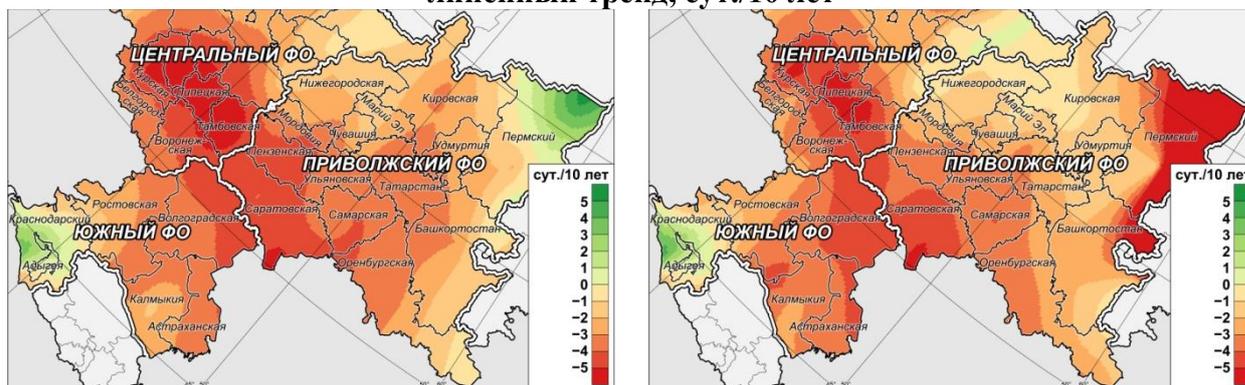


Рисунок 3.1 — Средние значения (сут.) и оценки линейного тренда (сут./10 лет) продолжительности вегетационного периода по озимой (а) и яровой пшенице (б) за период 1996–2015 гг.

В отличие от продолжительности вегетационного периода, было обнаружено, что пространственное распределение суммы эффективных температур (рис. 3.2 а, б) более точно отражает меридиональный тепловой градиент, демонстрируя двукратное увеличение с 1600 до 2000 °С на севере до ~4000 °С на юге. Пространственные изменения соответствующих трендов направлены на общий рост с юго-востока на северо-запад.

Во всех случаях этот тренд был положительным, что свидетельствует о том, что недавнее глобальное потепление помогло уменьшить различия в термических условиях между регионами производства пшеницы на юге РФ. Численно этот тренд эквивалентен увеличению суммы эффективных температур примерно на 300 °С за 20 лет между 1996 и 2015 гг. на большей

части Южного ФО и южной части Приволжского ФО, но более чем на 500 °С в Центральном ФО и северной части Приволжского ФО.

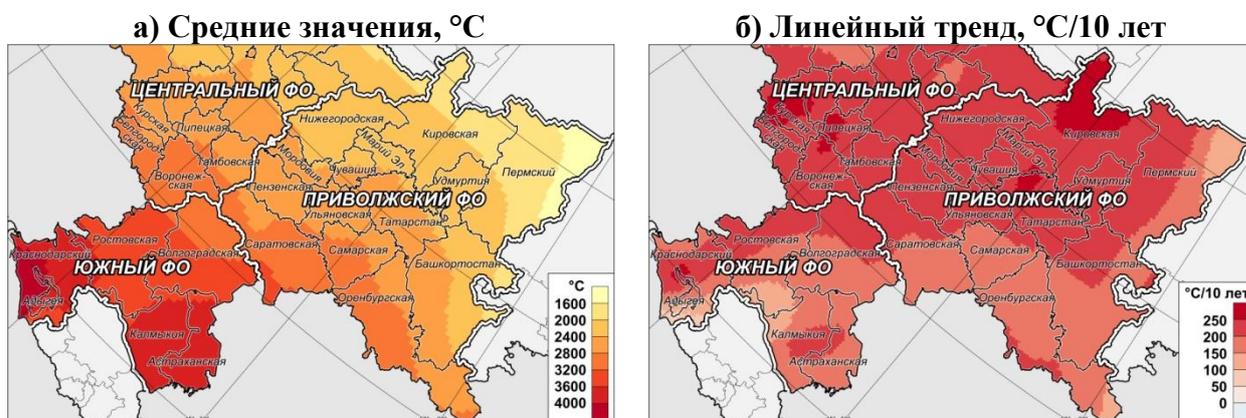


Рисунок 3.2 — Средние значения (а) и линейный тренд (б) суммы температур воздуха выше 10 °С за период 1996–2015 гг.

Осадки вегетационного периода и ГТК Селянинова

Общее количество осадков в течение периода активной вегетации ($T > 10\text{ °C}$) (рис. 3.3 а и б) также очерчивается чёткими географическими контурами, которые хорошо объясняются основными климатическими градиентами на рассматриваемой территории. В среднем с 1996 по 2015 гг. общее количество осадков колебалось примерно от 200 мм на северо-востоке исследуемого региона до менее 75 мм в Астраханской области.

Во всех случаях это было значительно меньше, чем потребность для оптимального роста, которая может быть оценена в интервале от 400 до 500 мм (Bouwer and Heibloem, 1986), принимая длину вегетационного периода примерно за 100 дней (рис. 3.1) и среднюю суточную суммарную эвапотранспирацию культуры от 4 до 5 мм.

С учётом распределения посевных площадей (табл. 3.1) дефицит влаги был особенно выражен в районах выращивания яровой пшеницы в южной части Приволжского ФО (Саратовская и Оренбургская области) и в районах возделывания озимой пшеницы на границе между Приволжским и Южным ФО (Саратовская и Волгоградская область).

Согласно данным, приведённым на картосхеме (рис. 3.3), практически все области на юге ЕЧ России столкнулись с уменьшением количества осадков в течение вегетационного периода в 1996–2015 гг. При этом, наиболее выраженные тренды (в широтном поясе) простираются от Курской и Липецкой областей до Самарской и Оренбургской. В этом поясе количество осадков уменьшилось на 40–100 мм за 20 лет, что является существенной величиной, учитывая, что в среднем здесь выпадало только от 100 до 200 мм.

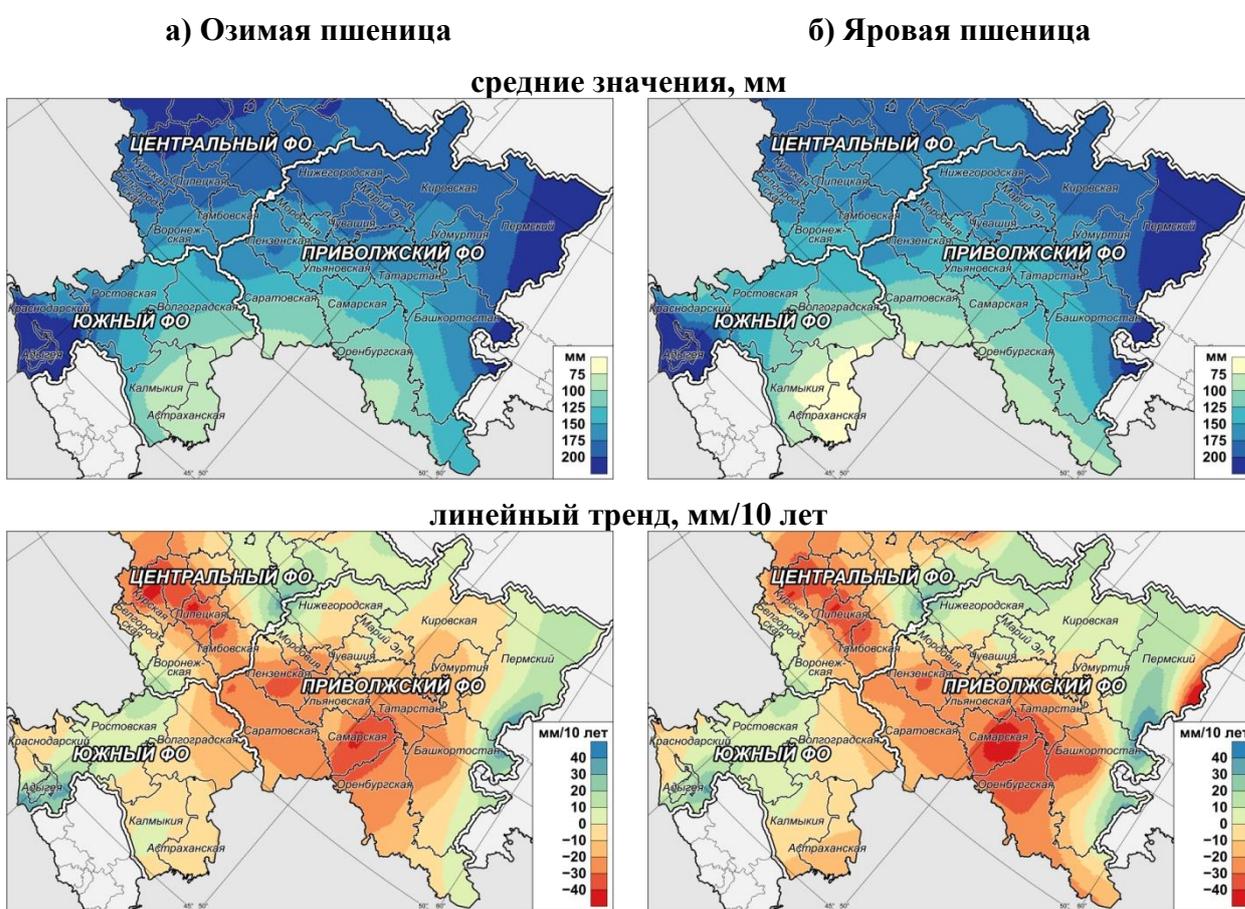


Рисунок 3.3 — Средние значения и оценки линейного тренда суммы осадков за вегетационный период озимой (а) и яровой пшеницы (б) за период 1996–2015 гг.

Результаты анализа количества осадков, выпавших в вегетационный период, подтверждаются картосхемами пространственного распределения ГТК Селянинова и оценками его линейного тренда (рис. 3.4 а и б). Значения

ГТК ниже 0,6–0,7, пороговые, указывающие на очень сухое состояние (Селянинов, 1958), как правило, наблюдаются в районах, характеризующемся количеством осадков в вегетационный период менее 150 мм (Астраханская, Волгоградская, Саратовская, Самарская, Оренбургская области, Республика Калмыкия). Для большей части площади (до 55° с. ш.) значения ГТК < 1,3, что свидетельствует о недостаточной влагообеспеченности во многих регионах Центрального и Приволжского ФО.

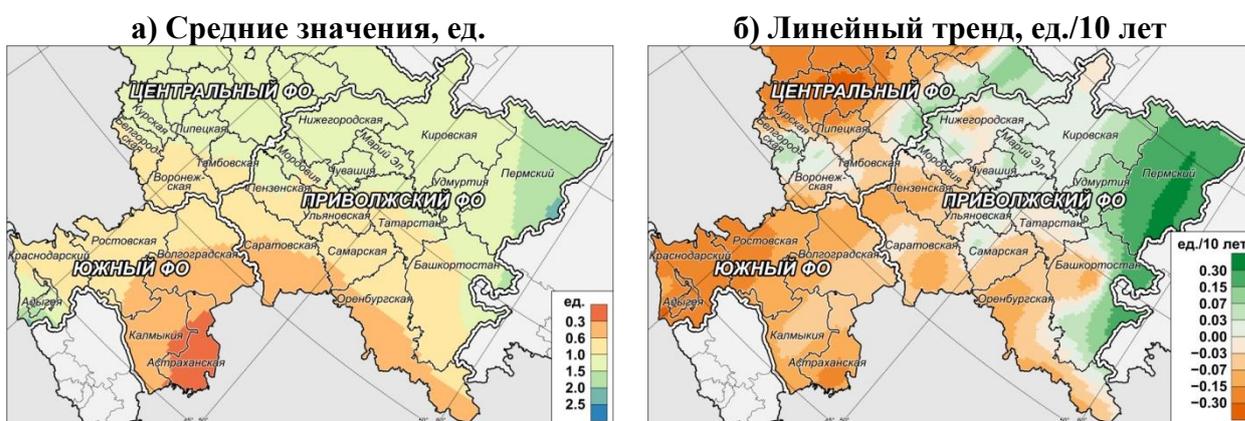


Рисунок 3.4 — Средние значения и оценки линейного тренда ГТК за июнь–август за период 1996–2015 гг.

Тренды ГТК (рис. 3.4 б) указывают на закономерности, отличные от тех, что прослеживаются на картосхемах, приведённых на рис. 3.3. Это объяснимо, потому что ГТК Селянинова является показателем соотношения между количеством осадков и суммарным испарением, и, следовательно, также учитывает изменения в тепловом режиме. Данные картосхем (рис. 3.4 б) показывают, что на большей части исследуемой территории гидротермические ресурсы сократились в течение последних двух десятилетий.

3.2.2 Оценка тенденций изменения климатически обусловленной урожайности

Пространственное распределение моделируемых в системе КПУ климатически обусловленных (моделируемых) урожаев зерновых культур

представлено в виде картосхем на рис. 3.5. Данные картосхем отражают, в первую очередь, более высокую урожайность озимой пшеницы (~25 ц/га), по сравнению с яровой (~18 ц/га). Кроме того, картосхемы иллюстрируют, что моделируемая урожайность в западных областях Южного ФО и в чернозёмном центре имеют одинаково высокий уровень (~30 ц/га) и примерно в два раза превышают среднюю моделируемую урожайность в восточных регионах Приволжского ФО.

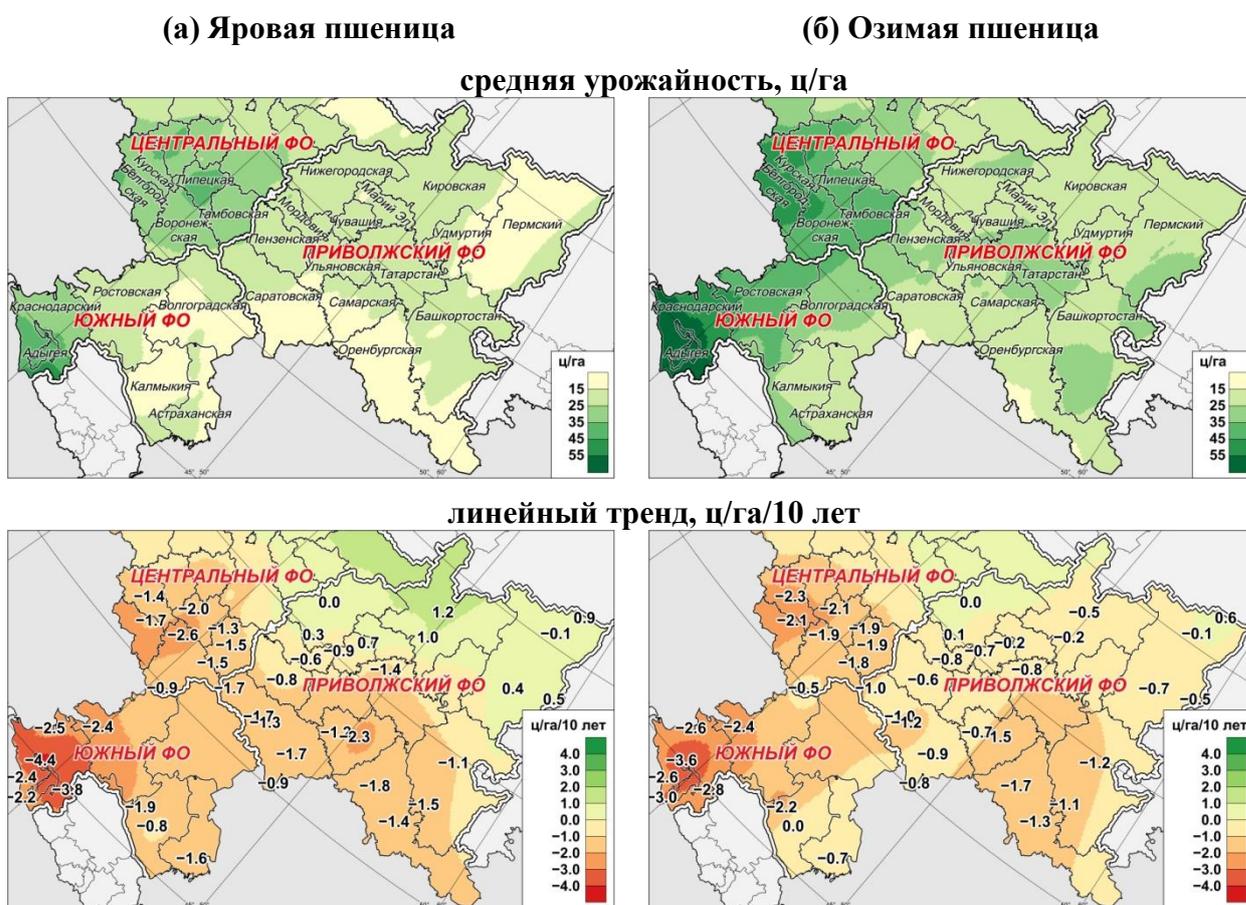


Рисунок 3.5 — Пространственное распределение средней по области климатически обусловленной урожайности яровой (а) и озимой пшеницы (б) и соответствующих линейных трендов за 1996–2015 гг. Расчёты в системе КПУ

Фактически, моделируемые средние урожаи колеблются от 40–50 ц/га по озимой пшенице на западной границе Южного и Центрального ФО до 12–15 ц/га по яровой пшенице в Оренбургской области и Пермском крае. Это отмеченное различие не только отражает агроклиматический фон (см.

рис. 3.1–3.4), но также и региональные различия в уровне плодородия почвы (наиболее плодородные почвы в Краснодарском крае и чернозёмном центре) и параметрах настройки системы КПУ, отражающих уровень агротехники региона.

Различия между трендами яровой и озимой пшеницы, рассчитанные по фактической урожайности, почти исчезают, если рассматривать моделируемую урожайность (рис. 3.5 б). За редким исключением (яровая пшеница в Республике Марий Эл, Нижегородской и Кировской областях и на севере Пермского края) по картам можно проследить отрицательную тенденцию, эквивалентную относительно уменьшению ~20 % за 20 лет.

Это довольно существенно, но в целом согласуется с наблюдаемыми изменениями агроклиматических ресурсов, характеризуемых показателями тепло- и влагообеспеченности (ГТК Селянинова, осадки, температура вегетационного периода и др., см. рис. 3.1–3.4).

В отличие от трендов рядов климатически обусловленной урожайности яровой пшеницы (с 1995 г. по настоящее время), ряды её фактической урожайности на большей части рассматриваемой территории имеют положительную тенденцию к росту (табл. 3.3).

Основная причина такого различия, по нашему мнению, определяется двумя факторами. Во-первых, за последние десятилетия из севооборота выведены площади с низкой продуктивностью почвы, что влечёт изменения в урожайной статистике. Во-вторых, уровень агротехники в хозяйствах медленно, но повышается (агротехнические предпосевные мероприятия, введение севооборотов, сортовой семенной материал и др.).

На фоне межгодовой изменчивости технологическая составляющая может превалировать в тех или иных регионах, что влияет на оценку тенденций рядов наблюдаемой урожайности. В то же время, как указывалось выше, ряды климатически обусловленной (моделируемой) урожайности при текущих гидрометеорологических условиях и при фиксированном уровне агротехники, содержат только климатическую составляющую.

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы.

1. Тренды климатически обусловленной урожайности озимой и яровой пшеницы отрицательны на большей части территории юга ЕЧ России. Это свидетельствует об определенном ухудшении агроклиматических условий в 1996–2015 гг. Максимальные отрицательные тренды урожайности озимой и яровой пшеницы наблюдаются в южной части Центрального, Южного ФО и в центральной и восточной областях Приволжского ФО. Следует отметить, что оценки трендов моделируемых (расчётных) рядов урожаев яровой и озимой пшеницы не всегда статистически значимы из-за сравнительно короткого ряда (20 лет).

Тренды моделируемой урожайности, оцениваемые по её величине в системе КПУ, могут быть преобразованы в изменение величины валового сбора путём учёта динамики площадей в пределах того или иного временного интервала.

2. Современное изменение агроклиматических условий оказало негативное влияние на урожайность, главным образом, в Южном ФО и южной части Центрального и Приволжского ФО. Поэтому увеличение доли обрабатываемой площади в северных районах исследуемого региона, где наблюдается улучшение условий увлажнения (см. гл. 2, рис. 2.7 и 2.8), будет способствовать поддержанию зернового производства.

3. Без совершенствования агротехнологий и других улучшений в сфере производства зерновых культур валовый сбор озимой пшеницы оставался бы примерно постоянным в течение 1996–2015 гг., несмотря на значительное расширение обрабатываемой площади. Что касается яровой пшеницы, то предполагаемое сокращение валового сбора было бы ещё более существенным.

3.2.3 Статистическая модель для оценки связи тенденций изменения климатически обусловленной урожайности и агроклиматических показателей

Важный аспект проблемы отклика урожайности на изменение климата — выявление трендов основных агроклиматических показателей, влияющих, в первую очередь, на тренды климатически обусловленной урожайности. Чтобы решить эту задачу, мы использовали оценки трендов урожайности яровой и озимой пшеницы по данным расчётов в отдельных точках и соответствующие им тренды инструментально наблюдаемых гидрометеорологических параметров (температура воздуха и осадки за тот или иной период вегетации, запасы влаги в почве и др.). На рис. 3.6 представлены агрегированные данные расчётов соответствующих трендов в Приволжском и Южном ФО и центрально-чернозёмных областях.

Как показало проведённое исследование, на рассматриваемой территории наиболее тесные корреляционные связи наблюдаются между трендом моделируемой урожайности и трендами запасов влаги в метровом слое почвы (W_{100v}), температуры июня (T_6), осадков июня (R_6) и длиной периода вегетации (N) (рис. 3.6 б, в, д, е).

На основе выявленных взаимосвязей построены уравнения множественной регрессии, описывающие тренды климатически обусловленной урожайности яровой и озимой пшеницы в зависимости от трендов предикторов (агроклиматических показателей) для территории 4-х регионов — Центрального, Приволжского (север и юг) и Южного ФО. Соответствующие предикторы, коэффициенты уравнений и множественные коэффициенты корреляции представлены в табл. 3.4.

Так, для тренда климатически обусловленной урожайности яровой пшеницы по данным наблюдений в южных областях Приволжского ФО построено следующее уравнение регрессии:

$$\tau_Y = -3,01\tau_{T_6} + 0,07\tau_{R_{VEG}} - 0,10\tau_N + C, \quad (3.1)$$

где τ_Y — тренд климатически обусловленной урожайности яровой пшеницы; τ_{T_6} , $\tau_{R_{VEG}}$, τ_N — тренды температуры июня, суммарных осадков и длины вегетационного периода.

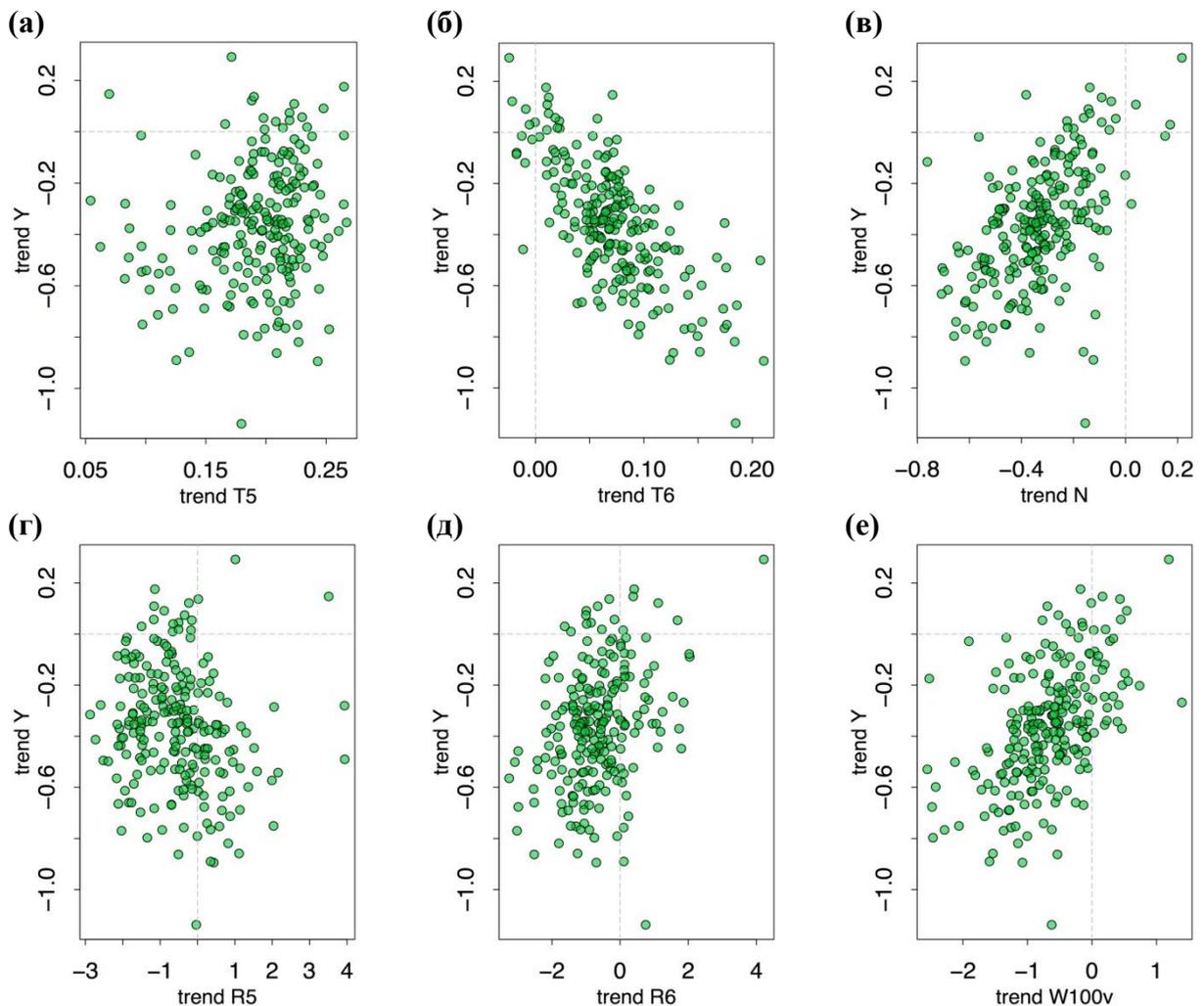


Рисунок 3.6 — Корреляционное поле трендов климатически обусловленной урожайности яровой пшеницы и трендов: (а), (б) температуры мая (Т5) и июня (Т6); (в) продолжительности вегетационного периода (N); (г), (д) осадков мая (R5) и июня (R6) и (е) влажности почвы на дату возобновления вегетации (W100v). По данным наблюдений в Приволжском, Южном ФО и ЦЧО за 1996–2015 гг.

Доля дисперсии, объясняющей тренд урожайности уравнением множественной регрессии (3.1), достаточно высока и составляет 78 % ($R^2=0,78$). Таким образом, на юге Приволжского ФО основной вклад в тренд климатически обусловленной урожайности яровой пшеницы вносят тренды

температуры июня τ_{T_6} (нормированная оценка $\beta=-0,58$) и осадки вегетационного периода $\tau_{R_{VEG}}$ ($\beta=0,46$). В Южном ФО на тренды климатически обусловленной урожайности озимой пшеницы значимо влияют тренды температуры мая τ_{T_5} ($\beta=-0,50$) и влажность почвы на дату возобновления вегетации весной $\tau_{W_{100}}$ ($\beta=0,30$) (табл. 3.4).

Таблица 3.4 — Коэффициенты корреляции, коэффициенты уравнения множественной регрессии и их нормированная оценка (β -коэффициент). Расчёт за 1996–2015 гг.

Федеральный округ	Коэффициент корреляции		Коэффициент уравнения регрессии (β -коэффициент)					
	R^2	R^2_{adj}	τ_N	τ_{T_5}	τ_{T_6}	τ_{R_6}	$\tau_{R_{VEG}}$	$\tau_{W_{100}}$
яровая пшеница								
Центральный**	0,67*	0,42	0,62 (0,50)	—	-3,48 (-0,34)	—	—	—
Приволжский, север	0,79*	0,62	-0,08 (-0,43)	—	-3,19 (-0,53)	—	0,03 (0,36)	—
Приволжский, юг	0,78*	0,61	-0,10 (-0,14)	—	-3,01 (-0,58)	—	0,07 (0,46)	—
Южный	0,56*	0,31	—	—	-2,01 (-0,30)	—	—	0,12 (0,37)
озимая пшеница								
Центральный**	0,74*	0,51	0,55 (0,48)	—	-5,12 (-0,48)	-0,03 (-0,14)	—	—
Приволжский, север	0,86*	0,74	—	-0,86 (-0,26)	-1,52 (-0,38)	—	0,029 (0,50)	—
Приволжский, юг	0,67*	0,46	0,14 (0,16)	—	-2,19 (-0,40)	0,11 (0,42)	—	—
Южный	0,68*	0,42	—	-3,82 (-0,50)	—	—	—	0,10 (0,30)

Обозначения: * — значимость на 5 % уровне; R^2 — коэффициент корреляции; R^2_{adj} — скорректированный коэффициент корреляции; коэффициенты трендов: τ_N — продолжительности вегетационного периода пшеницы; τ_{T_5} , τ_{T_6} — средней температуры воздуха за май, июнь; τ_{R_6} , $\tau_{R_{VEG}}$ — суммы осадков за июнь и вегетационный период пшеницы, мм; $\tau_{W_{100}}$ — запасов влаги в слое почвы 0–100 см на момент всходов. ** — только ЦЧО.

Исследование показало, что отрицательные тренды климатически обусловленной урожайности в основных зерновых районах ЕЧ России на фоне продолжающегося потепления, вызваны аридизацией и напряжённостью термического режима вегетационного периода зерновых культур.

Вывод: наблюдаемая за последние десятилетия тенденция к росту фактической урожайности зерновых культур в центрально-чернозёмных областях, Приволжском и Южном ФО в значительной степени обусловлена технологической составляющей урожайности — совершенствованием применяемой системы земледелия, современными способами обработки почвы, уровнем использования удобрений, сортосменной, мелиорацией земель и др.

3.3 Оценка изменений климатически обусловленной урожайности яровой пшеницы с 1976 г. в масштабе десятилетий

Большинство климатических моделей предсказывает, что темпы потепления ближайших десятилетий будут аналогичны средним наблюдаемым темпам с 1980 года, составляющим примерно 0,3 °C за десятилетие. Можно ожидать, что оценки реакции зерновых культур на изменения агроклиматических условий последних десятилетий, с определенной степенью достоверности могут быть экстраполированы на ближайшее десятилетие.

В последних публикациях МГЭИК отмечается, что «... для основных сельскохозяйственных культур (пшеницы, риса и кукурузы) в тропических и умеренных регионах изменение климата без адаптации негативно скажется на их производстве при локальном повышении температуры на 2 °C 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). Прогнозируемые воздействия варьируются в зависимости от сельскохозяйственной культуры, региона и сценария адаптации: около 10 % прогнозов на период 2030–2049 годов показывают прирост урожайности

более чем на 10 % и около 10 % прогнозов показывают потери урожайности более чем на 25 % по сравнению с концом 20 века».

Возникает вопрос, насколько приведённые выше прогнозные глобально осреднённые оценки МГЭИК отличаются от соответствующих оценок, полученных для территории земледельческой зоны России с её огромной протяжённостью и разнообразием природно-климатических зон.

Для ответа на этот вопрос нами была решена следующая задача: Оценить изменения климатически обусловленной урожайности яровой пшеницы и показателей агроклиматических ресурсов за весь период глобального потепления с 1976 г. по десятилетиям в масштабе всей земледельческой зоны и её отдельных регионов и дать вероятную оценку ожидаемых изменений продуктивности яровой пшеницы при повышении температуры в северных и южных областях на ближайшее десятилетие.

Перейдём к рассмотрению полученных результатов.

Изменение показателей агроклиматических ресурсов по десятилетиям

Показатели, характеризующие изменения агроклиматических ресурсов и климатически обусловленной урожайности, рассчитывались по ежегодным данным наблюдений отдельных метеорологических станций за период потепления с 1976 года с последующим осреднением по территории крупных регионов (табл. 3.5) за отдельные десятилетия: 1976–1985, 1986–1995, 1996–2005 и 2006–2015 гг. (далее по тексту: 1, 2, 3 и 4-е десятилетие).

Расчётная схема оценок изменения показателей агроклиматических ресурсов и продуктивности яровой пшеницы в масштабе десятилетий была апробирована в шести реперных точках на территории областей с большими посевными площадями яровой пшеницы. Критерий отбора реперных точек определялся географическим месторасположением точки – северные и южные регионы ЕЧ и АЧ России, относящиеся к разным природно-климатическим зонам (лесостепная, степная, сухостепная).

Таблица 3.5 — Перечень федеральных округов (ФО) и крупных регионов в границах ФО

№	Регион	Сокращение	Природно-климатические зоны ¹⁾
1	Северо-Западный ФО	СЗФО	южно-таёжная лесная
2	Центральный ФО, север	ЦФО-С	южно-таёжная лесная и лесостепная
3	Центральный ФО, юг (чернозёмные области)	ЦФО-Ю	лесостепная и степная
4	Приволжский ФО, север	ПФО-С	южно-таёжная лесная и лесостепная
5	Приволжский ФО, юг	ПФО-Ю	лесостепная, степная и сухостепная
6	Южный ФО	ЮФО	степная и сухостепная
7	Уральский ФО	УФО	южно-таёжная лесная, лесостепная и степная
8	Сибирский ФО, запад	СФО-З	лесостепная, степная и сухостепная
9	Сибирский ФО, восток	СФО-В	южно-таёжная лесная, лесостепная и степная
10	Дальневосточный ФО	ДФО	южно-таёжная лесная и степная

Примечание:

¹⁾ классификация приведена по «Природно-сельскохозяйственное районирование ...» (1983)

По данным наблюдений на юге Приволжского ФО (НП Сорочинск, Мелеуз и Балашов) температура вегетационного периода монотонно повышалась в среднем по десятилетиям (с 1976 г.) и её рост от первого к последнему десятилетию составляет от 0,9 до 1,3 °С (табл. 3.6).

В то же время, в северных районах этого ФО, по данным наблюдений НП Чердынь, температура росла более быстрыми темпами и повысилась к 2006–2015 гг. на ~2,0 °С. На территории Алтайского края и Новосибирской области (НП Барнаул и Купино) температура не повышалась, и даже понизилась на ~0,5 °С в 2006–2015 гг. относительно 1976–1985 гг.

Продолжительность вегетационного периода яровой пшеницы (определяемая здесь как период между всходами и восковой спелостью) для исследуемого региона составляет ~85–110 сут. (табл. 3.6), что соответствует оценкам, приведённым в монографии (Бараев и др., 1978). Прослеживаются региональные различия, с минимальным значением 85 суток (НП Сорочинск, Мелеуз) и максимальным — 110 суток (НП Чердынь).

Таблица 3.6 — Изменение показателей агроклиматических ресурсов и климатически обусловленной урожайности яровой пшеницы в 1976–2015 гг. по десятилетиям в реперных точках. Расчёты выполнены в имитационной системе КПУ

Период, гг.	Y_{sim} , %	D_{beg} , ДД.ММ	D_{end} , ДД.ММ	N, сут.	T, °C	R, мм	ГТК	E/E_0
НП Сорочинск (Оренбургская область, ПФО-Ю)								
1976–1985	100	07.05	29.07	85	18,6	117	0,74	0,35
1986–1995	94	04.05	27.07	85	18,5	107	0,68	0,36
1996–2005	96	07.05	29.07	84	18,9	141	0,89	0,40
2006–2015	61	03.05	21.07	80	19,6	88	0,56	0,31
НП Мелеуз (Республика Башкортостан, ПФО-Ю)								
1976–1985	100	10.05	03.08	86	17,9	135	0,88	0,45
1986–1995	95	08.05	02.08	86	17,9	130	0,84	0,43
1996–2005	90	11.05	01.08	83	18,3	124	0,82	0,43
2006–2015	73	06.05	25.07	81	18,8	116	0,76	0,40
НП Балашов (Саратовская область, ПФО-Ю)								
1976–1985	100	30.04	04.08	97	17,6	179	1,05	0,46
1986–1995	84	26.04	30.07	95	17,7	160	0,95	0,44
1996–2005	86	27.04	30.07	95	17,9	179	1,05	0,47
2006–2015	56	26.04	23.07	89	18,8	142	0,85	0,39
НП Чердынь (Пермский край, ПФО-С)								
1976–1985	100	05.06	20.09	108	13,5	286	2,22	0,82
1986–1995	98	04.06	09.09	98	14,9	263	2,07	0,79
1996–2005	108	02.06	07.09	97	14,7	218	1,61	0,80
2006–2015	108	29.05	25.08	89	15,6	243	1,76	0,84
НП Барнаул (Алтайский край, СФО-З)								
1976–1985	100	21.05	11.08	83	17,8	144	0,97	0,51
1986–1995	102	18.05	08.08	83	17,8	149	1,00	0,54
1996–2005	101	16.05	04.08	82	18,1	146	0,98	0,52
2006–2015	94	11.05	03.08	85	17,4	142	0,96	0,49
НП Купино (Новосибирская область, СФО-З)								
1976–1985	100	20.05	12.08	86	17,9	113	0,73	0,44
1986–1995	101	17.05	09.08	85	18,0	115	0,75	0,46
1996–2005	103	16.05	07.08	84	18,1	113	0,74	0,46
2006–2015	112	11.05	08.08	90	17,4	152	0,97	0,50

Примечание. Условные обозначения:

Y_{sim} – оценка средней климатически обусловленной урожайности относительно средних значений за 1976–1985 гг., %

D_{beg} – дата всходов, ДД.ММ

D_{end} – дата восковой спелости, ДД.ММ

N – продолжительность вегетационного периода, сут.

T – средняя температура воздуха за вегетационный период, °C

R – сумма осадков за вегетационный период, мм

ГТК – гидротермический коэффициент Селянинова за вегетационный период, ед.

E/E_0 – коэффициент увлажнения за вегетационный период, ед.

Общее количество осадков, ГТК Селянинова и коэффициент увлажнения, представленные в табл. 3.6, имеют тенденцию к снижению от 1976–1985 к 2006–2015 гг. на ЕЧ России. Так, по расчётным данным в Сорочинске, Мелеузе и Балашове количество выпавших осадков понизилось на ~25 % и составляет в последнее десятилетие ~90–140 мм. В динамике ГТК по десятилетиям также прослеживаются отрицательные тенденции. Так, в Сорочинске, средняя за последнее десятилетие величина ГТК (0,56) ниже границы критерия засухи ($ГТК < 0,6$). В промежуточные периоды 1986–1995 и 1996–2005 гг. ГТК и общие за вегетацию осадки колеблются разнонаправленно, а минимальные их значения отмечаются в последнее десятилетие.

Пространственное распределение средних значений показателей агроклиматических ресурсов (дата всходов, средняя температура периода вегетации, сумма осадков и ГТК Селянинова) за период вегетации яровой пшеницы за 1976–1985 гг. и 2006–2015 гг. для территории России представлено на рис. 3.7–3.10.

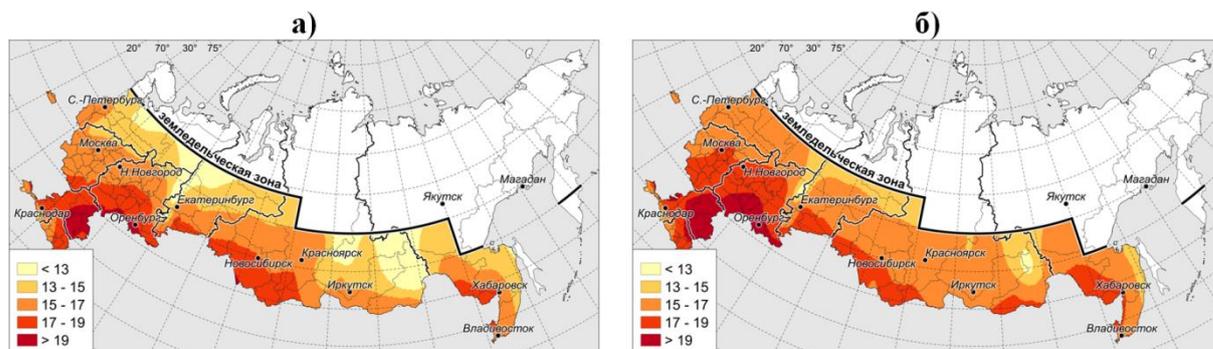


Рисунок 3.7 — Средние значения ($^{\circ}\text{C}$) температуры воздуха периода вегетации яровой пшеницы за 1976–1985 гг. (а) и 2006–2015 гг. (б)

Отмеченные выше тенденции изменений температуры вегетационного периода, как пространственные, так и временные, сохраняются для большей части земледельческой зоны (рис. 3.7). Диапазон колебаний средней за вегетацию температуры в северо-западных областях ЕЧ составляет от 1,6 до

2,3 °С, достигая 3,0 °С в некоторых локальных точках; в центральных и южных областях — от 1,0 до 1,3 °С.

В Западной и Восточной Сибири и на Дальнем Востоке изменения наблюдались в пределах её естественной изменчивости $\sim -0,5...+0,5$ °С. Вегетационный период сократился на 5–10 суток или остался на уровне 1976–1985 гг. (рис. 3.8).

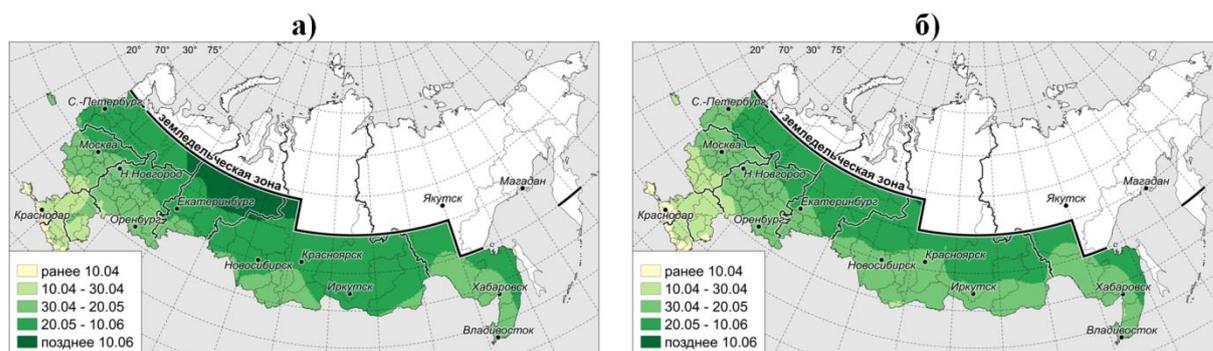


Рисунок 3.8 — Средние значения (ДД.ММ) даты всходов яровой пшеницы за 1976–1985 гг. (а) и 2006–2015 гг. (б)

Общее количество осадков в течение периода вегетации также имеет чёткую географическую структуру, которая хорошо объясняется основными климатическими градиентами на территории земледельческой зоны. Согласно полученным расчётным данным, практически на всей территории возделывания яровой пшеницы на юге ЕЧ России наблюдается дефицит доступной влаги при уменьшении количества осадков в течение вегетационного периода в 2006–2015 гг. по сравнению с тремя предшествующими десятилетиями (рис. 3.9–3.10). Прослеживается достаточно выраженное снижение количества осадков за период вегетации в широтном поясе от Курской и Липецкой областей до Самарской и Оренбургской. На этой широте количество осадков уменьшилось примерно на 50–80 мм за 40 лет, что является существенной величиной, учитывая, что в среднем выпадало только от 100 до 250 мм осадков. Во многих случаях это было меньше, чем потребность в воде для оптимального роста, которая может быть оценена величиной порядка 400 мм, принимая длину

вегетационного периода ~100 дней и среднюю суточную суммарную эвапотранспирацию культуры, примерно, от 4 до 5 мм (Бараев и др., 1978).

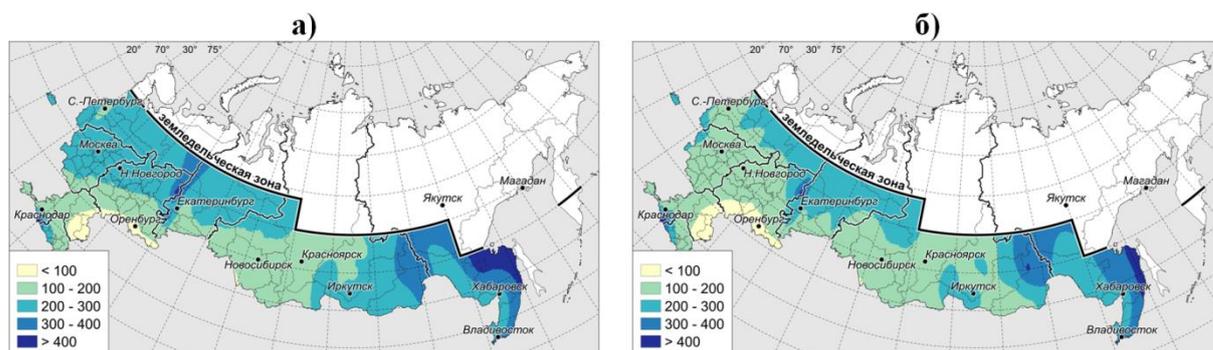


Рисунок 3.9 — Средние значения (мм) суммы осадков за вегетационный период яровой пшеницы за 1976–1985 гг. (а) и 2006–2015 гг. (б)

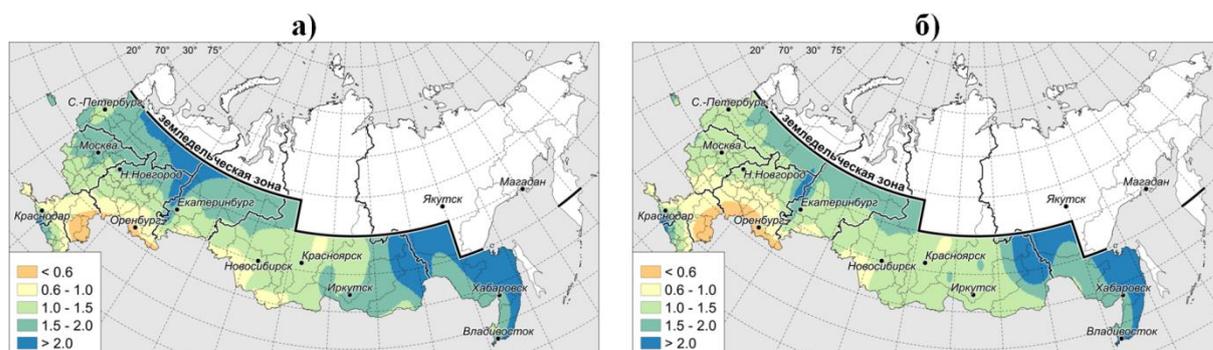


Рисунок 3.10 — Средние значения (ед.) гидротермического коэффициента Селянинова (ГТК) за вегетационный период яровой пшеницы за 1976–1985 гг. (а) и 2006–2015 гг. (б)

Оценки изменений климатически обусловленной урожайности яровой пшеницы по отдельным десятилетиям, представленные в табл. 3.6, указывают на значительное снижение её уровня в районе расположения НП Сорочинск, Мелеуз и Балашов (юг Приволжского ФО). Соответствующие оценки последнего десятилетия относительно первого (1976–1985 гг.) составляют 61, 73, и 56 %. В то же время, по данным наблюдений НП Барнаул и Купино (Западная Сибирь), климатически обусловленная урожайность повысилась, примерно, на 10 %.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что для получения достоверных оценок изменения климатически обусловленной урожайности в

условиях России требуется региональная детализация, особенно в различающихся по агроклиматическим условиям районах, относящихся к умеренной зоне (в трактовке МГЭИК). Поэтому наша задача — дать ответ на вопрос — как изменится продуктивность зерновых культур при повышении температуры на ~ 2 °С в основных сельскохозяйственных регионах России — от северных и северо-западных до южных районов РФ, где тепловой и влажностный режим формирования урожайности зерновых существенно различаются.

Изменение климатически обусловленной урожайности яровой пшеницы по крупным регионам

Для оценки изменений климатически обусловленной урожайности яровой пшеницы при изменении агроклиматических ресурсов за весь период потепления (с 1976 г.) выполнен ретроспективный анализ её рядов по десятилетиям за период с 1976 по 2015 гг. для территории земледельческой зоны.

На рис. 3.11 представлены результаты расчётов климатически обусловленной урожайности яровой пшеницы (%) по десятилетиям 1976–1985, 1986–1995, 1996–2005 и 2006–2015 гг. относительно базового периода 1961–1990 гг. по крупным регионам в земледельческой зоне России.

Разброс полученных оценок очевиден: на ЕЧ и АЧ оценки климатически обусловленной урожайности различаются как в целом, так и по отдельным периодам. При этом следует выделить важный момент: оценки средней урожайности 2, 3, и 4-го десятилетий относительно 1961–1990 гг. не превышают 100 % (за исключением Южного ФО в 1986–1995 гг.).

Уровень климатически обусловленной урожайности от первого к четвёртому десятилетию понижается на большей части рассматриваемой территории, но это снижение не является монотонным. В средних десятилетиях (1986–1995 и 1996–2005 гг.) эта урожайность колеблется в диапазоне, не превышающем 5–10 %.

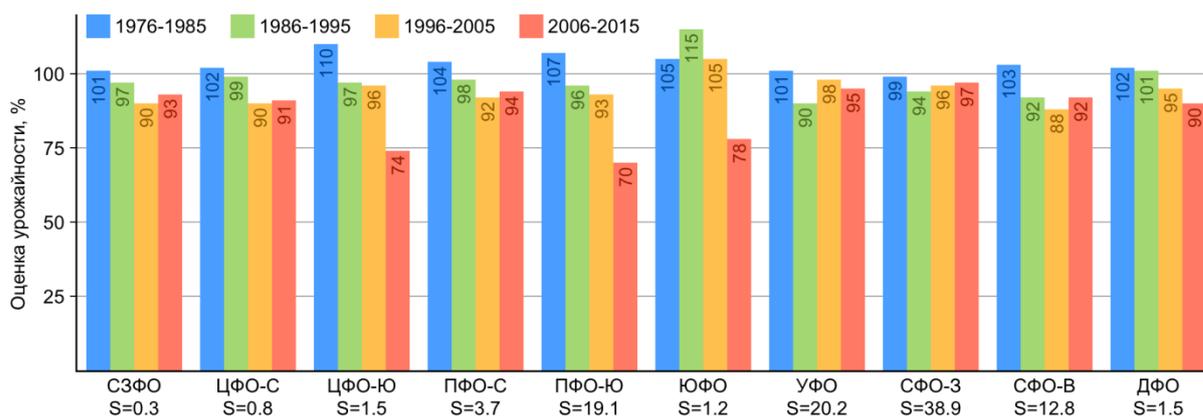


Рисунок 3.11 — Оценка средней климатически обусловленной урожайности яровой пшеницы за периоды 1976–1985, 1986–1995, 1996–2005 и 2006–2015 гг. относительно средних значений за 1961–1990 гг. по отдельным регионам России (S — доля посевной площади в регионе от общей по РФ за 1996–2015 гг., %. Обозначения регионов — см. табл. 3.5)

На ЕЧ диапазон колебаний средних оценок климатически обусловленной урожайности за последнее десятилетие значительный — примерно от 70 % в южных и юго-восточных регионах до 90–94 % в северных и северо-западных. В то же время, в Сибири, на Урале и на Дальнем Востоке диапазон колебаний относительной урожайности от десятилетия к десятилетию практически на всей территории не превышает 10 % (рис. 3.11).

Как показано выше (табл. 3.6, рис. 3.7–3.10), потепление последних десятилетий не вполне однородно по его воздействию на агроклиматические ресурсы и, как следствие, на продуктивность зерновых культур в сельскохозяйственных регионах ЕЧ и АЧ России.

Отрицательные тенденции в рядах климатически обусловленной урожайности наиболее отчётливо проявляются в южных и юго-восточных регионах ЕЧ (Южный ФО, центрально-чернозёмные области, юго-восток Приволжского ФО). На этой территории в результате изменений агроклиматических ресурсов средняя величина этой урожайности за последнее десятилетие понизилась на 25–30 % относительно базового периода 1961–1990 гг. Анализ показал, что одним из основных факторов,

приводящим к снижению продуктивности яровой пшеницы в этом регионе, является рост температуры в период вегетации. С начала потепления средняя температура вегетационного периода в этом регионе повысилась на 1,0–1,5 °С, что вызвало сокращение его в среднем на 4–5 суток. Даты всходов яровой пшеницы ранее 30 апреля наблюдаются на ЕЧ южнее 55° с. ш. (по линии Брянск–Саратов) (рис. 3.8). Показатели увлажнения также претерпели существенные изменения. На территории ЕЧ, за исключением самых северных районов, сумма осадков вегетационного периода яровой пшеницы не превышает 200 мм, что ниже её физиологической потребности. Изменение соотношения тепла и влаги, характеризуемое ГТК, также подтверждает факт усиления засушливости на этой территории (рис. 3.10).

Результатом изменения агроклиматических ресурсов явилось снижение степени благоприятности условий для произрастания яровой пшеницы территорий юга ЕЧ за последнее десятилетие. Максимальное относительное снижение климатически обусловленной урожайности за этот период составляет ~70–74 % в южных областях Приволжского ФО и чернозёмных областях Центрального ФО, соответственно. На остальной территории ЕЧ значимого снижения урожайности за последние три десятилетия не наблюдается (≤ 8 %).

В сельскохозяйственных регионах Восточной Сибири и на Дальнем Востоке изменение агроклиматических ресурсов за период потепления менее значительное, чем на ЕЧ. Температура вегетационного периода здесь повысилась, но незначительно и в среднем превышает уровень первого десятилетия примерно на 0,6–0,8 °С. Изменение режима осадков также не претерпело существенных изменений. ГТК за вегетационный период изменяется в диапазоне от 1,5 до 2,5 на Дальнем Востоке, и от 1,0 до 1,3 в Восточной Сибири в среднем за последние четыре десятилетия. Как результат, изменения средней климатически обусловленной урожайности по десятилетиям в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке не превышали 10 %, т. е. находились в пределах её естественной изменчивости.

В Западной Сибири и на Урале колебания климатически обусловленной урожайности от десятилетия к десятилетию в большинстве случаев не превышают 5 %. В этих регионах не выявлено значимого снижения урожайности, связанного с долговременными изменениями температурного и влажностного режимов. Напротив, в отдельных регионах Новосибирской и Челябинской областей и в Алтайском крае во 2-е, 3-е и 4-е десятилетия уровень климатически обусловленной урожайности выше, чем в первое. Диапазон колебаний температуры вегетационного периода от десятилетия к десятилетию здесь составляет $\pm 0,3$ °С. При анализе показателей, характеризующих режим увлажнённости территории в среднем по десятилетиям, не выявлены их статистически значимые изменения.

Таким образом, агроклиматические условия начального периода потепления были самыми благоприятными для роста и развития яровой пшеницы на рассмотренном отрезке времени на ЕЧ России. В среднем, на территории АЧ России изменение агроклиматических ресурсов, по оценкам не такое значительное, как на ЕЧ, не повлияло значимо на продуктивность яровой пшеницы. Но это не означает, что локально в отдельных районах не наблюдалось существенного снижения климатически обусловленной урожайности культуры (или повышения), обусловленного изменением климата.

На основании полученных результатов можно утверждать, что сельскохозяйственные регионы ЕЧ более чувствительны к современному потеплению, и реакция климатически обусловленной урожайности на изменение агроклиматических ресурсов существенно «острее», чем на АЧ. Действительно, средняя за 2006–2015 гг. климатически обусловленная урожайность яровой пшеницы на ЕЧ составляет 75 % от уровня 1961–1990 гг., в то время как на АЧ — 95 % (табл. 3.7).

В среднем климатически обусловленная урожайность яровой пшеницы понизилась на ~10–12 % с 1976 по 2015 год, т. е. оценка тенденции к понижению составляет примерно 3 % за десятилетие.

Таблица 3.7 — 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.

Регион	<i>S</i> , %	Оценка урожайности, %			
		1976–1985	1986–1995	1996–2005	2006–2015
Европейская часть	26,6	106	97	93	75
Азиатская часть	73,4	100	93	95	95
Россия	100,0	102	94	95	90

Примечание: *S* — доля посевной площади в регионе от общей по РФ за 1996–2015 гг., %

Как отмечалось выше, преобладающая часть климатических моделей прогнозирует, что ожидаемые темпы потепления будут аналогичны предыдущим темпам. Результаты расчётов, представленные в этом разделе, показывают, что за последние четыре десятилетия средняя температура вегетационного периода яровой пшеницы повысилась на юге и юго-востоке ЕЧ примерно на 1,0 °С; на севере северо-западе ЕЧ — ~2,5 °С и менее чем на 1,0 °С на Урале и в Сибири.

Расчитанные оценки изменения продуктивности яровой пшеницы в основных регионах её произрастания позволяют дать ответ на вопрос — как наблюдаемый рост температуры и её вероятное повышение в ближайшее десятилетие влияет и повлияет на урожайность яровой пшеницы в южных и северных регионах её произрастания в России.

Полученные результаты достаточно убедительно указывают на различную реакцию зерновых (на примере яровой пшеницы) в северных и южных регионах земледельческой зоны России на изменение агроклиматических ресурсов. Оцениваемые воздействия варьируют значительно. На юге и юго-востоке ЕЧ повышение температуры вегетационного периода в сочетании с наблюдаемыми тенденциями к усилению степени засушливости территории обуславливает снижение урожайности яровой пшеницы.

Действительно, продуктивность яровой пшеницы в 2006–2015 гг. на юге и юго-востоке ЕЧ составляет ~70 % от её уровня в 1961–1990 гг., в то время как на АЧ — 95 %, где значимого снижения урожайности не выявлено — колебания урожайности по десятилетиям остаются на уровне её естественной изменчивости. В целом же по России климатически обусловленная урожайность яровой пшеницы понизилась на ~12 % с 1976 по 2015 год. Темпы снижения урожайности на уровне 3 % за десятилетие нельзя считать незначимыми, принимая во внимание, что по отдельным годам оценки могут варьировать значительно.

3.4 Построение и идентификация физико-статистических функционалов Погода-Урожай

Разработка региональных и национальных систем мониторинга и прогнозирования урожайности на основе динамических моделей с достаточно высоким, например, суточным разрешением требует значительных затрат, что ограничивает их использование крупными прогностическими центрами. По этой причине получение простых агрегированных зависимостей (3.2), пригодных для использования широким кругом специалистов, остаётся актуальной задачей.

Интерес к методологии идентификации функционалов Погода-Урожай растёт в связи с проблемой оценки последствий изменений климата и адаптации сельского хозяйства к этим изменениям. В работе (Lobell et al., 2007, 2008, 2010) приведены оценки влияния наблюдаемых изменений климата на урожайность шести важнейших мировых продовольственных культур (табл. 3.8).

Обращают на себя внимание высокие (до 65 %) значения коэффициентов детерминации для таких распространённых культур как ячмень, соя, кукуруза и пшеница при максимально агрегированном учёте климатических переменных в виде средних значений температуры и сумм осадков за вегетационный период.

Таблица 3.8 — Статистики регрессионных моделей Погода-Урожай для шести основных сельскохозяйственных культур 1961–2002 гг. (Lobell et al., 2011)

Статистики	Пшеница	Рис	Кукуруза	Соя	Ячмень	Сорго
Коэффициент детерминации R^2	0,41	0,29	0,47	0,52	0,65	0,29
% изменения урожайности для $\Delta t_{\min} = \Delta t_{\max} = 1$ °C	-0,54	-0,60	-8,30	-1,30	-8,90	-8,40

В табл. 3.8 представлена нижняя граница оценок R^2 . Ясно, что эти оценки повысятся при более дифференцированном представлении метеорологических переменных и учёте начальных условий формирования урожая. Можно предположить, что столь высокие значения R^2 в какой-то мере обязаны представлению переменных в модели Погода-Урожай в разностной форме.

Перейдём к изложению методологии разностного подхода к построению функционалов Погода-Урожай и оценке обусловленных климатом трендов урожайности основных сельскохозяйственных культур для территории России. Автором в соавторстве с О. Д. Сиротенко опубликован ряд работ с изложением нового подхода к идентификации функционалов Погода-Урожай для оценки последствий изменения климата (Сиротенко, Павлова, 2010; Павлова, 2010, 2013).

Зависимость F , ставящую в соответствие климатическим элементам, функциям времени $x(t)$, значения урожайности Y , назовём функционалом Погода-Урожай:

$$Y = F[x_1(t), x_2(t), \dots, x_k(t)], \quad (3.2)$$

где климатические элементы $x(t)$ для каждого года задаются на отрезке $\tau_0 \leq t \leq \tau_f$.

Продолжительность периода учёта климатических элементов $t = \tau_f - \tau_0$ равна разности между датой созревания урожая τ_f и датой начала

вегетационного периода τ_0 , которая назначается до сева, чтобы учесть влияние климата на «стартовые» условия формирования урожая — запасы влаги в почве, содержание легко разложимого органического вещества и другие параметры, определяющие текущее «эффективное» плодородие почвы. Динамические модели Погода-Урожай, ориентированные на учёт процессов формирования урожая, позволяют решить (3.2), привлекая определенное число оцениваемых параметров (Галямин, 1981; Сиротенко, 1981; Полуэктов, 1991; Моделирование роста ..., 1986; Франс, Торнли, 1987; Полуэктов и др., 2006). С другой стороны, идентификация функционала (3.2) для расчёта и прогнозирования урожайности — традиционная статистическая задача, решаемая с помощью уравнений регрессии.

Расчёты по оценке влияния наблюдаемых изменений климата на урожайность выполнялись на обширных фактических данных по урожайности сельскохозяйственных культур (данные Росстата) и данных метеорологических наблюдений с 1975 по 2010 гг. для всей территории России. При расчётах в выбранных реперных (опорных) точках использованы данные наблюдений с 1951 по 2017 гг. Расчёты выполнялись с учётом принятого административного деления России по 54 субъектам (краям, областям, республикам), 6 ФО и 11 выбранным крупным регионам.

В данной работе использована база данных «Института глобального климата и экологии» (ИГКЭ) для мониторинга глобального климата, содержащая временные ряды основных климатических параметров за период инструментальных наблюдений (Доклад об особенностях климата, 2011–2018). Расчёты выполнялись на основании среднемесячных значений температуры воздуха и месячных сумм осадков по 455 гидрометеорологическим станциям, расположенным на территории бывшего СССР.

Агрегированные зависимости приращения урожайности (ΔY^j) от приращения метеорологических факторов — температуры (ΔT^j) и сумм осадков (ΔP^j) можно представить в виде:

$$Y^j - Y^{j-1} = c_0 + a_i \times (T_i^j - T_i^{j-1}) + b_i \times (P_i^j - P_i^{j-1}), \quad (3.3)$$

где j и $(j-1)$ — индексы текущего и предыдущего годов, соответственно; $i = 1, \dots, n$ — номер месяца.

Переход к представлению временных рядов в форме первых разностей, если и не позволяет полностью элиминировать технологические тренды в рядах урожайности за длительные промежутки времени (2–3 десятилетия), то позволяет устранить тренды урожайности за ближайшие 2–3 года. Уравнения регрессии в форме первых разностей дают возможность получать более точные оценки влияния метеорологических факторов на урожайность (Lobell, et al., 2007; Lobell et al., 2011; Сиротенко, Павлова, 2010). В результате, применение этого метода позволяет идентифицировать искомые зависимости со значимыми (при 5 % уровне) коэффициентами корреляции для всех рассматриваемых территориальных единиц, что далеко не всегда можно получить в рамках классических уравнений регрессии.

Рассмотрим возможность применения методологии разностного подхода к построению функционалов Погода-Урожай и оценке обусловленных климатом трендов урожайности основных сельскохозяйственных культур для территории России.

В табл. 3.9 приведены оценки коэффициентов корреляции (R) уравнений множественной регрессии для расчёта урожайности зерновых и зернобобовых культур в целом, ярового ячменя и озимой пшеницы и доли объяснённой дисперсии урожайности. Предикторами уравнений множественной регрессии в форме первых разностей по отдельным культурам выбраны: средняя температура воздуха и суммы осадков в мае и июне; для озимой пшеницы дополнительно — осадки осени и первых месяцев весны, марта и апреля.

В результате расчётов получены достаточно надёжные оценки влияния наблюдаемых изменений климата на урожайность основных сельскохозяйственных культур России. Доля объяснённой климатическими

факторами дисперсии урожайности озимой пшеницы достигает 60–65 % в Приволжском ФО.

Таблица 3.9 — Оценки коэффициентов множественной корреляции (R) в уравнениях регрессии (3.3) для расчёта изменений средней по области урожайности зерновых и зернобобовых культур, ярового ячменя и озимой пшеницы по данным за период 1975–2010 гг.

Регион	N	Зерновые и зернобобовые		Яровой ячмень		Озимая пшеница	
		R	R ² ·100 %	R	R ² ·100 %	R	R ² ·100 %
Северо-Западный (юг)	124	0,570	32,5	0,605	36,6	–	–
Центральный (север)	124	0,528	27,9	0,412	17,0	0,572	32,7
Центральный (центр)	186	0,608	37,0	0,599	36,0	0,546	29,8
Центральный (юг)	186	0,694	48,2	0,690	47,6	0,574	32,9
Приволжский (север)	155	0,723	52,3	0,687	47,2	0,775	60,1
Приволжский (юг)	186	0,818	66,9	0,765	58,5	0,807	65,1
Южный	155	0,775	60,1	0,780	60,8	0,698	48,7
Уральский (юг)	124	0,643	41,3	0,695	48,3	–	–
Сибирский (юго-запад)	186	0,544	29,6	0,524	27,5	–	–
Сибирский (юго-восток)	62	0,590	34,8	0,512	26,2	–	–
Дальневосточный (юг)	93	0,515	26,5	0,515	26,5	–	–
Среднее		0,636	40,4	0,616	37,9	0,662	43,8

Примечание: N — размерность выборки. Прочерки (–) означают, что культура не высевается или высевается на незначительных площадях.

В среднем по России оценки для зерновых и зернобобовых и ярового ячменя также достаточно высоки и составляют 40,4 и 37,9 % соответственно. Более высокая точность прогностической зависимости достигнута по сравнению с полученными ранее оценками (Сиротенко, Павлова, 2010) за счёт учёта условий тепло- и влагообеспеченности осеннего и зимнего периодов вегетации, особенно для озимых культур.

В табл. 3.10 представлены найденные коэффициенты уравнений множественной регрессии для южных областей Приволжского ФО (Республик Татарстан и Башкортостан, Пензенской, Самарской, Саратовской и Оренбургской областей). Все полученные оценки имеют высокий уровень значимости (p_{level} не превышает 1 %). Коэффициенты регрессии в стандартизованном масштабе (β) показывают, что продуктивность зерновых

и зернобобовых и ярового ячменя наиболее чувствительна к изменениям июньской температуры и майских осадков в данном регионе. Для рядов урожайности зерновых и зернобобовых, которые объединяют яровые и озимые культуры, оказались значимы осадки осеннего периода. Отметим высокий уровень дисперсии урожайности, объясняемой выбранными метеорологическими факторами — 67 % для зерновых и зернобобовых в целом и 59 % для ярового ячменя.

Таблица 3.10 — Оценки коэффициентов уравнений множественной регрессии для расчёта изменения урожайности зерновых и зернобобовых и ярового ячменя (ц/га) для южных областей Приволжского ФО с использованием метода первых разностей для исключения тренда

Предикторы	β	B	σ_B	$t = B / \sigma_B$	p_{level}
Зерновые и зернобобовые ($R = 0,82$; $n = 183$)					
Свободный член		0,169439	0,251467	0,67380	0,501302
$T_{май}$	-0,225449	-0,425086	0,096528	-4,40374	0,000018
$T_{июнь}$	-0,350295	-0,726770	0,109524	-6,63571	0,000000
$R_{май}$	0,338911	0,060245	0,009190	6,55561	0,000000
$R_{июнь}$	0,153601	0,023440	0,008233	2,84698	0,004927
$R_{осень}$	-0,175485	-0,018359	0,004654	-3,94446	0,000114
Яровой ячмень ($R = 0,77$; $n = 183$)					
Свободный член		0,156202	0,326589	0,47828	0,633027
$T_{май}$	-0,161689	-0,354372	0,124947	-2,83618	0,005086
$T_{июнь}$	-0,403551	-0,973223	0,142184	-6,84480	0,000000
$R_{май}$	0,318883	0,065890	0,011736	5,61419	0,000000
$R_{июнь}$	0,148691	0,026375	0,010591	2,49044	0,013659

Примечание: R — множественный коэффициент корреляции, n — объем выборки, B — коэффициент регрессии, β — коэффициент регрессии в стандартизованном масштабе, σ_B — стандартная ошибка B . Жирным шрифтом выделены статистически значимые оценки (p_{level}).

Рассмотрим результаты расчётов оценок изменения урожайности зерновых и зернобобовых культур в целом и ярового ячменя при изменении климата за период 1975–2010 гг. на территории зерновых регионов России, рассчитанных по формуле (3.3) с учётом трендов метеорологических параметров за этот период (табл. 3.11).

Таблица 3.11 — Оценки изменений урожайности (ΔY , ц/га/10 лет) зерновых и зернобобовых культур в целом, ярового ячменя и озимой пшеницы в сельскохозяйственных регионах России за период с 1975 по 2010 гг. (Павлова, 2010)

Регион	Оценки изменений урожайности (ΔY)					
	ц/га/10 лет	%/10 лет	ц/га/10 лет	%/10 лет	ц/га/10 лет	%/10 лет
	зерновые и зернобобовые		яровой ячмень		озимая пшеница	
Северо-Западный (юг)	0,20	1,6	0,0	0,0		
Центральный (север)	0,22	2,0	-0,0	-0,3	0,31	2,2
Центральный (центр)	-0,17	-1,2	-0,17	-1,1	0,28	1,6
Центральный (юг)	-0,15	-0,8	-0,46	-2,4	0,07	0,3
Приволжский (север)	-0,00	-0,0	-0,05	-0,3	0,61	3,6
Приволжский (юг)	-0,07	-0,5	-0,20	-1,5	0,88	4,9
Южный	0,44	1,9	-0,07	-0,4	0,83	3,1
Уральский (юг)	0,82	6,1	0,21	1,4		
Сибирский (юго-запад)	0,35	2,8	0,25	1,9		
Сибирский (юго-восток)	0,28	2,3	0,37	3,0		
Дальневосточный (юг)	0,22	0,2	-0,0	-0,0		
Россия	0,17	1,2	0,004	0,032	0,50	2,6

Зерновые и зернобобовые культуры. За период с 1975 по 2010 гг. потепление климата обусловило незначительное снижение урожайности всех зерновых и зернобобовых культур (~1 % за 10 лет) на ЕЧ России. В то же время отмечается рост урожайности на АЧ — от 0,2 % на Дальнем Востоке до 6,1 % на Урале (табл. 3.11). В Сибири климатообусловленный рост урожайности зерновых составил 2,3–2,8 %. Средняя оценка роста урожайности для территории России оценивается величиной порядка 1,2 % за десятилетие или 4,5 % (1,2x35/10 лет) при изменении климатических условий за 1975–2010 гг.

Яровой ячмень. Данные табл. 3.11, позволяют заключить, что положительные тренды климатообусловленной урожайности ярового ячменя прослеживаются лишь на АЧ России — на Урале и в Сибири. На юго-востоке Сибири оценка линейного тренда урожайности ярового ячменя составляет 3 % за десятилетие. В то же время, на ЕЧ России, наблюдаемые изменения климатических условий привели к снижению урожайности ярового ячменя

на 2,4 % за 10 лет на юге Центрального ФО, соответственно (или на 9 % за 1975–2010 гг.). В среднем отрицательные тренды климатообусловленной урожайности ярового ячменя на ЕЧ компенсируются положительными трендами на АЧ.

Озимая пшеница. Более благоприятным по агрометеорологическим условиям период потепления был для озимой пшеницы, урожайность которой росла во всех регионах её возделывания на территории России. При этом значительный темп роста продуктивности озимой пшеницы (3,9 % за десятилетие) наблюдается в Южном ФО — в регионе, дающем основной валовой сбор этой культуры. Высокие темпы климатически обусловленной урожайности озимой пшеницы отмечались также в Поволжье. В целом по России рост климатически обусловленной урожайности озимых зерновых культур составил 0,5 ц/га за десятилетие или 2,6 % за период с 1975 по 2010 гг. (табл. 3.11).

Результаты оценки трендов урожайности основных зерновых культур для территории России, обусловленных изменением климата, полученные с помощью методологии разностного подхода в целом согласуются и не противоречат оценкам и выводам разделов (3.2 и 3.3).

3.5 Климатически обусловленные изменения крупномасштабной пространственно-временной структуры урожайности

В результате глобального потепления выявлены существенные изменения в пространственно-временной структуре полей температуры и атмосферных осадков (Переведенцев и др., 2013, 2014, 2016, 2017; Кислов и др., 2011; Черенкова и др., 2012, 2015; Бардин, 2011).

Для оценки влияния последствий таких изменений на продуктивность сельскохозяйственных культур и, как следствие, на продовольственную безопасность России была исследована пространственно-временная структура полей урожайности зерновых культур за 1955–1980 и 1981–2006 гг. по территории земледельческой зоны России.

Перейдём к рассмотрению полученных автором результатов.

1. Впервые рассчитаны скользящие средние по двадцатилетним периодам элементы корреляционной матрицы по температуре воздуха за апрель — август 1955–2006 гг. для территории России в целом и для основных зерновых регионов: Южного, Приволжского, Уральского, Западно-Сибирского ФО и центрально-чернозёмных областей (рис. 3.12, табл. 3.12).

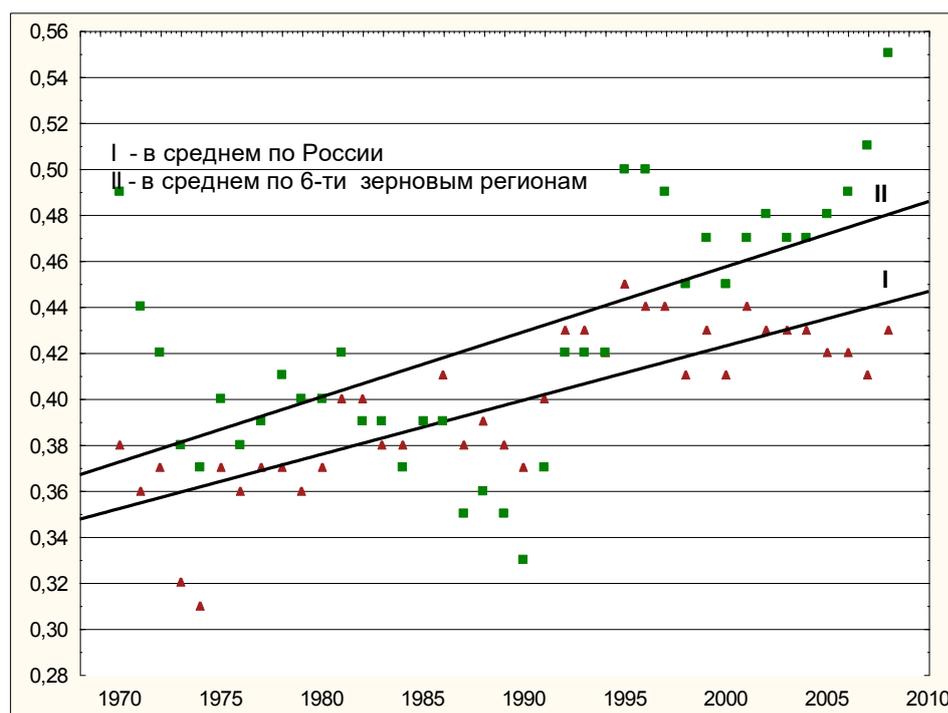


Рисунок 3.12 — Динамика скользящих средних элементов (по двадцатилетним периодам) корреляционной матрицы температуры воздуха в апреле–августе за период 1955–2006 гг. по России в среднем и шести основным зерновым регионам

2. Выявлен существенный рост синхронности колебаний температуры воздуха за тёплый период года (рис. 3.13), связанной, по-видимому, с изменениями глобальной циркуляции атмосферы. Асинхронные связи температуры ЕЧ и АЧ России, характеризующиеся отрицательными коэффициентами корреляции в 1955–1980 гг., сменились синхронными колебаниями в 1981–2006 гг. (табл. 3.12).

Так, ослабла отрицательная связь температурного режима Сибирского ФО и ЕЧ России — значимые отрицательные коэффициенты с Северо-

Западным, Центральным и Приволжским ФО сменились на слабые положительные или отрицательные коэффициенты корреляции. Средние значения коэффициентов корреляции, характеризующие связь температуры тёплого периода года (апрель–август), рассчитанные за период 1955–1980 гг., изменяются в диапазоне от –0,24 (Сибирский ФО) до 0,38 (Приволжский ФО). Соответствующие оценки коэффициентов корреляции за период 1981–2006 гг. имеют положительный знак, а диапазон изменений — от 0,14 в Сибирском ФО до 0,47–0,51 в Центральном, Приволжском и Южном ФО (табл. 3.12).

Таблица 3.12 — Матрица коэффициентов корреляции, характеризующая изменения синхронности колебаний осреднённой по регионам температуры воздуха за тёплый период года за 1955–1980 и 1981–2006 гг. по территории земледельческой зоны России

	Федеральный округ	1	2	3	4	5	6	7
1955–1980								
1	Северо-Западный	1,00	0,85	0,69	0,28	–0,07	–0,53	0,01
2	Центральный		1,00	0,83	0,59	–0,08	–0,50	–0,09
3	Приволжский			1,00	0,65	0,42	–0,37	0,04
4	Южный				1,00	0,15	–0,06	–0,02
5	Уральский					1,00	0,25	0,17
6	Сибирский						1,00	–0,23
7	Дальневосточный							1,00
	Средние	0,20	0,27	0,38	0,27	0,14	–0,24	–0,02
1981–2006								
1	Северо-Западный	1,00	0,86	0,68	0,72	0,29	0,13	0,26
2	Центральный		1,00	0,79	0,80	0,22	0,02	0,11
3	Приволжский			1,00	0,67	0,73	–0,05	0,20
4	Южный				1,00	0,24	0,33	0,30
5	Уральский					1,00	0,11	0,18
6	Сибирский						1,00	0,24
7	Дальневосточный							1,00
	Средние	0,45	0,47	0,50	0,51	0,30	0,14	0,23

Вместе с этим существенно — в 1,5 раза, возросла междугодичная изменчивость температуры воздуха тёплого периода года на территории земледельческой зоны России. Значительная изменчивость полей осадков на

столь обширной территории не позволила выявить значимых статистических отличий элементов корреляционной матрицы за указанные периоды.

3. Анализ корреляционных матриц рядов урожайности зерновых культур с исключённым технологическим трендом подтвердил индуцированный глобальным потеплением рост синхронности колебаний междугодичной изменчивости урожайности.

В табл. 3.13 представлены оценки элементов корреляционных матриц урожайности с исключённым трендом за 1955–1980 и 1981–2006 гг., которые свидетельствуют о существенном росте в связи с глобальным потеплением связности (синхронности колебаний) урожайности на территории России. Средний коэффициент корреляции матриц возрос с 0,28 до 0,41. Заметно возросла степень синхронности связанных с изменениями климата колебаний средней урожайности в европейских и азиатских регионах России. Выделяются три региона, где синхронные связи урожайности с урожайностью других регионов либо усилились (Южный и Поволжье, юг), либо асинхронные сменились синхронными связями (Западная Сибирь).

4. Выявлена тенденция к росту междугодичной изменчивости средней по территории регионов урожайности сельскохозяйственных культур. Так, за период с 1981 по 2006 гг. изменчивость урожайности (σ_{ij}) в среднем для земледельческой зоны России повысилась на 19,2 % (с 2,28 до 2,72 ц/га).

5. Полученные данные позволяют заключить, что наблюдаемые изменения климата ведут к снижению продовольственной безопасности России в связи с уменьшением взаимной компенсации связанных с засухами недоборов зерна в географически удалённых районах и ростом междугодичной изменчивости валовых сборов зерна.

Полученные оценки изменений в пространственно-временной структуре полей урожайности зерновых культур могут учитываться при разработке адаптационных мер к изменениям климата, в частности, таких как пересмотр географической структуры посевных площадей по зернопроизводящим регионам.

Таблица 3.13 — Корреляционная матрица (r_{ij}) урожайности зерновых и зернобобовых культур с исключенным линейным трендом за периоды (а) 1955–1980 и (б) 1981–2006 гг. по регионам России. Диагональные элементы — среднее квадратическое отклонение урожайности (σ_{ij}), ц/га

Регион	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
(а) 1955–1980											
Северо-Западный	1,71	0,86	0,66	0,48	0,49	0,17	0,09	–0,09	–0,01	0,41	0,02
Центральный, с.		2,09	0,80	0,53	0,74	0,22	0,02	–0,02	–0,12	0,27	0,24
Центральный, ц.			2,55	0,82	0,85	0,47	0,29	0,05	–0,14	0,31	0,08
Центральный, юг				3,03	0,72	0,69	0,46	0,16	–0,08	0,24	–0,04
Приволжский, с.					1,55	0,53	0,30	0,22	–0,16	0,15	0,37
Приволжский, юг						2,69	0,70	0,56	0,12	0,11	–0,03
Южный							3,17	0,20	0,16	0,22	–0,30
Уральский								2,69	0,55	0,30	0,20
Зап.-Сибирский									2,52	0,43	–0,07
В.-Сибирский										1,41	–0,09
Д.-Восточный											1,69
(б) 1981–2006											
Северо-Западный	2,48	0,76	0,51	0,31	0,50	0,43	0,42	0,29	0,28	0,26	0,21
Центральный, с.		2,03	0,73	0,49	0,73	0,48	0,33	0,17	0,38	0,31	0,06
Центральный, ц.			2,90	0,88	0,71	0,56	0,64	0,02	0,47	0,60	0,38
Центральный, юг				3,86	0,65	0,58	0,75	0,01	0,33	0,65	0,60
Приволжский, с.					2,72	0,82	0,33	0,52	0,23	0,21	0,20
Приволжский, юг						3,30	0,39	0,60	0,18	0,19	0,30
Южный							4,19	0,10	0,38	0,67	0,68
Уральский								2,84	0,04	–0,11	–0,01
Зап.-Сибирский									1,95	0,42	0,26
В.-Сибирский										1,46	0,58
Д.-Восточный											2,24

ГЛАВА 4. Климатические риски возделывания сельскохозяйственных культур

4.1 Климатические риски возделывания зерновых культур и оценка уязвимости территории

К неблагоприятным последствиям глобального потепления относится повышение степени засушливости климата на значительной части территории России (Дроздов, 1980; Мещерская, 1988, 1997; Уланова, Страшная, 2000; Страшная и др., 2005, 2011, 2013; Переведенцев и др., 2012; Черенкова, Бардин и др., 2015; Золотокрылин и др., 2014; Черенкова, 2017; Клещенко и др., 2013, 2016; Зоидзе, Хомякова, 2000; и др.). Увеличение частоты засух наблюдается не только в регионах с прогнозируемым снижением количества осадков, но и в областях, где количество осадков увеличивается при изменении климата (Глобальные изменения климата ..., под ред. Иванова, Кирюшина, 2009).

Сильные засухи связаны с определенными циркуляционными системами — блокирующими антициклонами (Кислов, 2015; Черенкова, 2017; Vaghioredro, 2006). Эти авторы отмечают, что Восточно-Европейская равнина (ВЕР) — один из регионов умеренных широт, над которым блокирующие образования являются достаточно типичным явлением.

Об изменении гидротермических ресурсов ВЕР при потеплении в 21 веке можно судить по данным, приведённым в коллективной монографии (Кислов и др., 2008; Кислов и др., 2015; Эколого-географические последствия ..., 2011).

Ниже представлен проведённый автором детальный анализ показателей влагообеспеченности и их динамики для территории земледельческой зоны России — гидротермического коэффициента Г. Т. Селянинова (ГТК) и индекса засушливости Д. А. Педя. Показатели влагообеспеченности рассчитаны для современных климатических условий (1961–1989 гг.), на середину текущего столетия (2046–2065 гг.) и на конец столетия (2081–

2100 гг.). Как показали результаты расчётов, представленные авторами, к середине 21 века повторяемость лет с условиями, близкими к норме, в летние месяцы уменьшится в центре ВЕР, и возрастёт частота засушливых ситуаций. К северу от 56–58° с. ш. сохранятся благоприятные гидрометеорологические условия, возрастут увлажнение и температура, увеличится повторяемость ситуаций с нормальным увлажнением. На юге ВЕР изменчивость гидротермических условий уменьшается, но на фоне роста температур и уменьшения количества осадков возрастает засушливость климата. Прогнозируемые изменения условий засушливости, сделанные на основании ГТК Сеянинова и индекса Педя, достаточно хорошо согласуются между собой.

События последних лет наглядно демонстрируют масштабность ущерба от катастрофических явлений, связанных с климатическими изменениями. Так, например, в 2010 и 2012 гг. засухи на территории России привели к резкому сокращению производства зерна в стране, росту цен на зерновые культуры (Фролов, Страшная, 2011). Ущерб от потери урожайности на фоне затянувшейся засухи составил в эти годы более 300 млрд рублей (Хан, 2015). В этой связи актуальной представляется задача определения и количественной оценки таких понятий как риски потерь урожая сельскохозяйственных культур, уязвимость территории, опасное гидрометеорологическое явление.

Автором впервые предложен метод оценки климатических рисков и потерь урожайности от неблагоприятных погодных условий с использованием результатов моделирования в системе КПУ и данных наблюдений метеорологических параметров. Разработанный метод оценки и прогноза климатических рисков при возделывании сельскохозяйственных культур с целью преодоления неблагоприятных последствий изменений климата и повышения устойчивости региональных систем земледелия рассматривается как дальнейшее развитие действующей системы агроклиматического мониторинга.

В различных природно-сельскохозяйственных регионах России с разными типами климата факторы уязвимости сельского хозяйства заметно отличаются. Для северных и влажных регионов к этим факторам можно отнести вторжение холодных воздушных масс с севера, избыточное увлажнение и заморозки, в южных и сухих регионах — это волны тепла, засухи, пыльные бури, суховеи, ветровая и водная эрозия.

Рассмотрим определение понятия климатического риска при производстве сельскохозяйственных культур. В современной литературе риск определяется как функция двух переменных: частоты и последствий нежелательного события (Быков и др., 2004; Устойчивость земледелия и риски ..., под ред. Иванова и Ускова, 2009). В методических рекомендациях ГГО им. А. И. Воейкова (Кобышева, 2014) и в монографии (Глобальные изменения ..., под ред. Иванова и Кирюшина, 2009) климатический риск определяется как вероятность ожидаемых потерь урожайности, вытекающая из взаимодействия между неблагоприятными метеорологическими факторами и уязвимостью субъекта. Но, исходя из этих определений, не всегда можно получить количественные оценки климатических рисков в том или ином земледельческом регионе.

Определим климатический риск (R) как функцию двух переменных: повторяемости засух и уязвимости сельскохозяйственного производства на данной территории (Павлова, Варчева, 2016, 2017):

$$R = p \cdot V, \quad (4.1)$$

где p — вероятность (повторяемость) опасного гидрометеорологического явления (ОЯ), %; V — уязвимость (vulnerability) территории при производстве сельскохозяйственных культур, подвергающейся воздействию ОЯ, ед.

Вероятность (p) оценивается как отношение числа лет с ОЯ (N_{cr}) к общему числу лет (N) периода:

$$p = \frac{N_{cr}}{N} \cdot 100\%. \quad (4.2)$$

Дефицит агроклиматических ресурсов, обуславливающий уровень уязвимости территории (V) при возделывании сельскохозяйственных культур, оцениваем соотношением урожайности данной культуры и биоклиматического потенциала территории:

$$V = 1 - \frac{Y}{BCP}, \quad (4.3)$$

где BCP — биоклиматический потенциал (bioclimatic potential) территории, рассчитанный с помощью системы КПУ, ц/га; Y — средняя урожайность сельскохозяйственной культуры, ц/га.

Рассмотрим оценку климатических рисков, обусловленных, прежде всего, опасным явлением «засуха» (РД Росгидромета 52.88.699, 2008), приводящим к серьёзным экономическим и экологическим последствиям, как на региональном, так и национальном уровне. На протяжении многих лет агрометеорологами для оценки засух в качестве индикатора применяется ГТК Селянинова, (Уланова, Страшная, 2000; Страшная, Коренкова, 2005; Страшная и др., 2013; Золотокрылин, 2014; Zolotokrylin et al., 2014; Meshcherskaya, Blazhevich, 1997). В Центре мониторинга засух ФГБУ «ВНИИСХМ» для оценки засух используются до восьми показателей: ГТК, показатель увлажнения Д. А. Шашко, запасы продуктивной влаги в разных слоях почвы и др. (Клещенко и др., 2013).

Вопросы определения наиболее информативных показателей (критериев) засух и влияния их на урожайность зерновых культур наиболее полно рассмотрены в работах (Уланова, Страшная, 2000; Фролов и Страшная, 2011; Страшная и др., 2013). Авторы показали, что среди множества показателей, характеризующих засуху, ГТК в большей степени коррелирует с урожайностью основных зерновых культур.

Будем фиксировать наступление сильной атмосферной засухи при пороговом значении ГТК ($ГТК \leq 0,6$), рассчитанном за период с мая по август ($ГТК_{5-8}$), охватывающим период активной вегетации основных сельскохозяйственных культур.

Повторяемость неурожайных лет или частота лет с урожайностью ниже некоторого критического уровня ($Y < Y_{cr}$) также служит косвенной оценкой числа лет (N_{cr}) с неблагоприятными опасными явлениями. Согласно А. М. Алпатьеву (Алпатьев, 1954), за критический уровень (Y_{cr}) принимается урожайность, которая на 40 % ниже её среднего значения за ряд лет.

Предложенный нами подход к количественной оценке климатических рисков потерь при неблагоприятных агроклиматических условиях (засухах) реализован на примере яровой и озимой пшеницы для основных зерновых регионов. В анализ включены субъекты РФ (области, края, республики), имеющие посевные площади под зерновыми и зернобобовыми культурами не менее 200 тыс. га в Центральном, Приволжском и Южном ФО.

В табл. 4.1 представлены рассчитанные по формулам (4.1)–(4.3) оценки климатических рисков недобора урожая яровой и озимой пшеницы (по Алпатьеву) и оценки степени уязвимости (V) территории по отношению к возделыванию зерновых культур за период 1994–2013 гг. Расчёты выполнялись по отдельным субъектам РФ. Там же приведены оценки повторяемости засух по ГТК ($ГТК_{5-8} \leq 0,6$). Список субъектов ранжирован в соответствии с посевной площадью, занятой яровой пшеницей.

Оценки климатических рисков, приведённые в табл. 4.1, разделены по градациям: низкие (Н) — от 0 до 5 %; средние (С) — от 6 до 15 %; высокие (В) — от 16 до 25 % и очень высокие (ОВ) — выше 25 %.

Как следует из формул (4.1)–(4.3), риск близок к максимальной величине (100 %) в случае, когда на рассматриваемой территории каждый год наблюдается неблагоприятное метеорологическое явление (в данном случае — засуха) на фоне низких, по сравнению с БКП, среднемноголетних урожаев зерновых культур.

Расчёты показали, что в Оренбургской, Волгоградской и Саратовской области высокие климатические риски яровой пшеницы тесно коррелируют с высокой повторяемостью засух ($ГТК \leq 0,6$), которая составляет 52, 51 и 45 %, соответственно (табл. 4.1).

Таблица 4.1 — Климатические риски недобора урожая пшеницы яровой и озимой и степень уязвимости земледельческой зоны России. Расчёты за 1994–2013 гг. (Павлова, Варчева, 2017)

Субъект РФ: область, край, республика	Климатический риск недобора урожая, %		Уязвимость террито- рии возделывания, ед.		Повторяемость засух, % (ГТК ₅₋₈ ≤ 0,6)
	яровая	озимая	яровая	озимая	
Центральный ФО	6,4	4,8	0,66	0,55	10
Тамбовская	С	С	0,63	0,48	16
Орловская	Н	Н	0,60	0,49	7
Тульская	Н	Н	0,69	0,60	4
Курская	Н	Н	0,67	0,57	5
Липецкая	С	Н	0,56	0,44	12
Воронежская	С	С	0,73	0,61	20
Рязанская	С	С	0,65	0,58	8
Белгородская	С	Н	0,74	0,60	7
Приволжский ФО	23,0	18,0	0,69	0,59	16
Оренбургская	ОВ	ОВ	0,81	0,67	52
Башкортостан	С	С	0,68	0,58	16
Татарстан	Н	С	0,52	0,46	8
Саратовская	ОВ	ОВ	0,76	0,58	45
Самарская	В	В	0,77	0,65	28
Ульяновская	С	С	0,72	0,61	12
Кировская	Н	Н	0,67	0,56	4
Пензенская	С	С	0,72	0,64	9
Нижегородская	Н	Н	0,64	0,56	6
Удмуртия	Н	Н	0,68	0,59	3
Мордовия	С	Н	0,63	0,53	9
Чувашия	Н	Н	0,68	0,63	5
Марий Эл	С	С	0,73	0,64	8
Южный ФО	37,9	12,1	0,76	0,49	34
Волгоградская	ОВ	В	0,82	0,54	51
Краснодарский	С	Н	0,75	0,54	14
Ростовская	ОВ	С	0,70	0,38	36
Северо-Кавказский ФО	15,2	5,5	0,66	0,36	23
Ставропольский	В	С	0,66	0,36	23
Уральский ФО	11,8	10,7	0,71	0,68	11
Курганская	В	С	0,75	0,73	18
Челябинская	С	В	0,78	0,69	22
Тюменская	Н	Н	0,63	0,61	3
Свердловская	Н	Н	0,69	0,69	1
Сибирский ФО	4,9	3,1	0,73	0,68	5
Алтайский	Н	Н	0,80	0,67	2
Омская	С	С	0,75	0,64	13
Новосибирская	С	С	0,77	0,73	13
Красноярский	Н	Н	0,66	0,68	2
Кемеровская	Н	Н	0,72	0,69	1
Иркутская	Н	—	0,70	—	1
Россия	12,5	10,6	0,70	0,56	16

Примечание. Градации климатических рисков: от 0 до 5 % — низкие (Н), от 6 до 15 % — средние (С), от 16 до 25 % — высокие (В), выше 25 % — очень высокие риски (ОВ).

Отметим, что частота неурожаев озимой пшеницы в Свердловской области составляет ~35 %. Эта оценка, по нашему мнению, не связана с частотой атмосферных засух — здесь основными факторами, приводящими к потерям урожайности, может быть переувлажнение почвы, запаздывание сроков уборки из-за неблагоприятных погодных условий и др.

В формуле (4.3) показатель уязвимости территории $V \rightarrow 0$, если урожайность сельскохозяйственной культуры и БКП сопоставимы (близки по величине), и, наоборот, $V \rightarrow 1$, если урожайность культуры значительно ниже него. Как показывают расчёты, оценки степени уязвимости (V) по отношению к яровой пшенице изменяются в диапазоне от 0,52 в Татарстане до 0,82 в Волгоградской области (табл. 4.1). К наиболее уязвимым территориям при возделывании яровой пшеницы относятся Волгоградская и Оренбургская области и Алтайский край, где $V \sim 0,80$. В наиболее благоприятных для выращивания яровой пшеницы условиях находятся Республика Татарстан, Липецкая и Орловская области, где соответствующие значения V составляют 0,52; 0,56 и 0,60 (табл. 4.1).

По отношению к производству озимой пшеницы самыми уязвимыми оказались территории Курганской и Новосибирской областей ($V=0,73$); менее уязвимыми — Ставропольский край и Ростовская область ($V=0,36-0,38$) (табл. 4.1).

Таким образом, полученные оценки позволяют рассматривать величину уязвимости как характеристику степени «недоиспользования» БКП территории при производстве сельскохозяйственных культур.

Рассмотрим оценки климатических рисков при возделывании яровой и озимой пшеницы по отдельным ФО.

Приволжский ФО

В Приволжском ФО посевной клин яровой пшеницы занимает вдвое большую площадь, чем озимой.

Оценки климатических рисков при производстве зерновых культур по ФО в среднем достаточно высокие и составляют 23 и 18 % для яровой и озимой пшеницы соответственно (табл. 4.1).

Очень высокие риски (ОВ) недобора урожая яровой пшеницы, по нашим расчётам, имеют место в Оренбургской и Саратовской областях — 42 и 34 % соответственно, высокие (В) — в Самарской области (22 %). Климатические риски недобора урожайности в Республике Башкортостан, на территории которой находится почти 6 % общей посевной площади яровой пшеницы в стране, оцениваются как средние (табл. 4.1).

Высокие (В) и очень высокие (ОВ) климатические риски при производстве озимой пшеницы отмечаются в Самарской (20 %), Саратовской (26 %) и Оренбургской (32 %) областях. В градацию низких рисков (Н) по озимой пшенице отнесены территории Кировской и Нижегородской областей, Республик Удмуртия, Мордовия и Чувашия (табл. 4.1).

Обращает на себя внимание факт синхронности степени оценки климатических рисков (ОВ — ОВ, В — В и т. д.) для яровой и озимой пшеницы: практически на всей территории округа, за исключением Татарстана и Мордовии, все субъекты попадают в одни и те же градации риска (табл. 4.1).

Южный и Северо-Кавказский ФО

На территории Северо-Кавказского и Южного ФО анализ климатических рисков недоборов урожая практически сводится к анализу посевов озимой пшеницы, где её посевные площади составляют ~15 и ~36 % от общей посевной площади по стране соответственно. Оценки рисков потерь урожая озимой пшеницы в Краснодарском и Ставропольском краях и Ростовской области попадают в градацию низких и средних; в Волгоградской области — в градацию высоких (табл. 4.1).

Уральский ФО

Доля посевных площадей под яровой пшеницей в Уральском ФО составляет около 16 % от общей площади её посевов по стране. Под посевами озимой пшеницы заняты сравнительно небольшие площади — преимущественно в Челябинской и Курганской областях. Средневзвешенная оценка риска получения низких урожаев яровой пшеницы по Уральскому ФО составляет ~12 % (табл. 4.1). Отметим, что соответствующие оценки рисков выше в основных регионах её возделывания: в Челябинской области (17 %) и в Курганской (14 %).

Сибирский ФО

Большие посевные площади заняты в Сибирском ФО под яровой пшеницей, которые составляют ~47 % от общей посевной площади в стране. Посевов озимой пшеницы здесь мало, и при этом около 70 % её площадей сосредоточено на территории Алтайского края. На большей части территории округа риски недобора урожая яровой пшеницы оцениваются как низкие, а на территории Омской и Новосибирской областей — как средние (11 %). Средняя оценка риска неурожаев яровой пшеницы по Сибирскому ФО невысока и составляет 4,9 % (табл. 4.1).

Сопоставим полученные оценки рисков при возделывании яровой и озимой пшеницы с оценкой других параметров, характеризующих агроклиматические ресурсы рассматриваемых регионов.

Так, известно, что среднее Поволжье является зоной заметно меняющихся условий увлажнения: от засушливого юго-востока территории (например, Самарская область) до достаточно увлажнённого северо-запада, например, Республика Марий Эл (Страшная, Коренкова, 2005).

Расчёты показывают, что в Самарской области риски крупных неурожаев и яровой, и озимой пшеницы достаточно высокие (~20 %), а в Республике Марий Эл оценки рисков достигают лишь величины ~8 % (см. рис. 4.1).

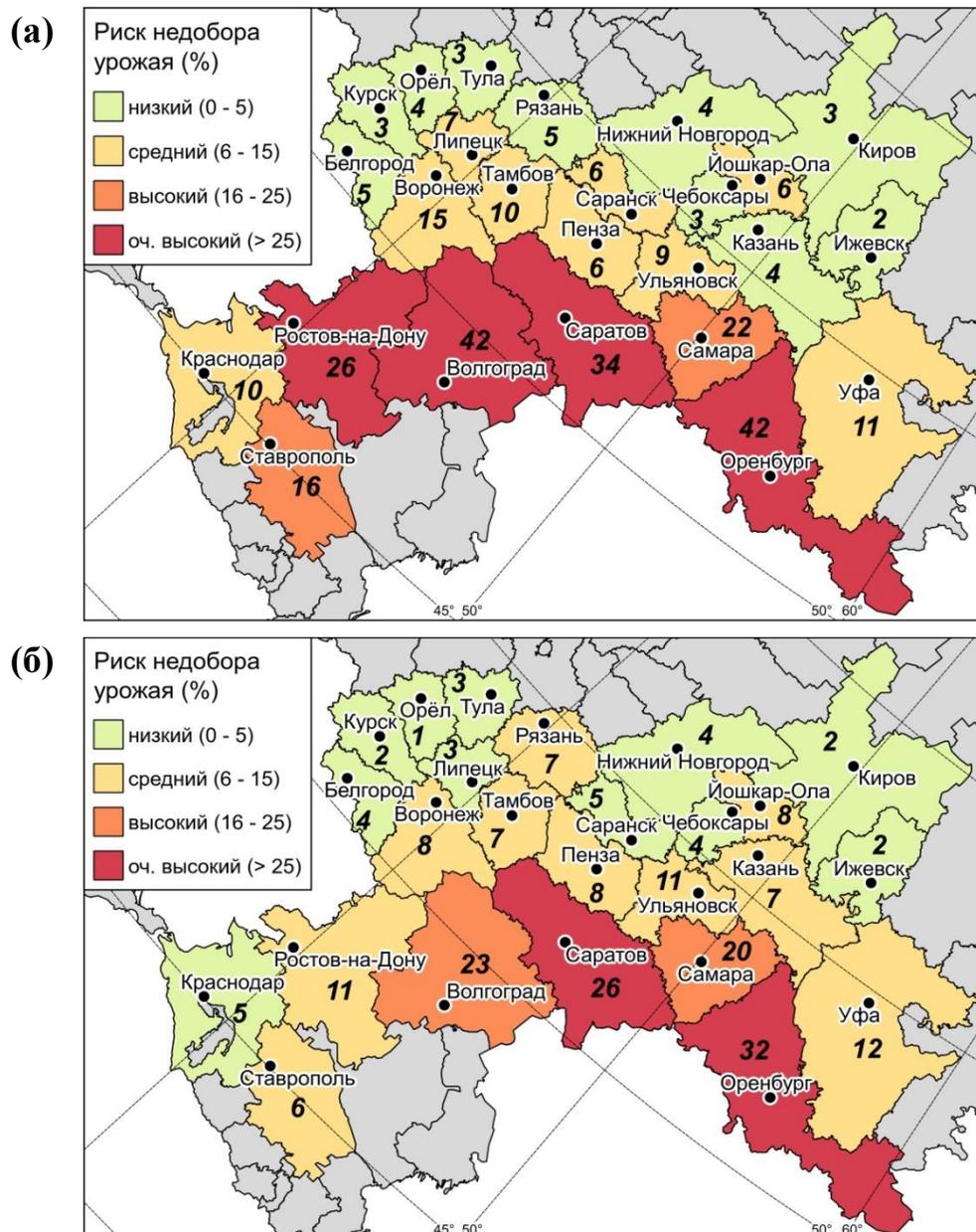


Рисунок 4.1 — Картосхема распределения климатических рисков недобора урожая в 1994–2013 гг. (а) яровой и (б) озимой пшеницы

С помощью разработанного метода можно получить сравнительные оценки климатических рисков крупных неурожаев по отдельным сельскохозяйственным культурам в регионе. Например, в Краснодарском крае и Ростовской области риск крупных недоборов зерна озимой пшеницы оценивается как низкий и средний, в то же время, для яровой пшеницы — как средний и очень высокий (табл. 4.1). Не вдаваясь в детальную агроклиматическую характеристику этих регионов, можно сделать вывод,

что полученные оценки рисков в целом достаточно тесно связаны с их климатическими и почвенными особенностями.

На рис. 4.1 представлено пространственное распределение оценок рисков недобора урожаев яровой (а) и озимой (б) пшеницы, рассчитанных по формулам (4.1)–(4.3) в Приволжском, Южном ФО и центрально-чернозёмных областях. Можно видеть, что на ЕЧ России зона высоких рисков неурожая яровой пшеницы охватывает бóльшую территорию, чем озимой пшеницы.

Анализ оценок климатических рисков, представленных на картосхеме (рис. 4.1), позволяет выделить территории, благоприятные для выращивания как яровой, так и озимой пшеницы. Это регионы Центрального ФО (Орловская, Тульская, Курская области) и Приволжского ФО (Кировская и Нижегородская области, Республики Удмуртия и Чувашия). По мере продвижения от этих районов к югу риски недобора урожаев возрастают из-за увеличения повторяемости засух.

Анализ показал, что максимальные риски получения низких урожаев яровой пшеницы при засухах характерны для Южного (38 %) и Приволжского (23 %) ФО; озимой пшеницы — Приволжского (18 %) и Южного (12 %) ФО. Средние по России риски недобора урожая яровой и озимой пшеницы, рассчитанные с учётом посевных площадей, отличаются незначительно, 12,5 и 10,6 % соответственно. Выявлено, что низкие риски недобора урожаев яровой и озимой пшеницы (в 2 раза ниже средних по России) отмечаются в Сибирском (половина ярового клина страны) и Центральном (четверть посевных площадей озимой пшеницы) ФО (табл. 4.1).

Таким образом, можно заключить, что введение понятий риска и уязвимости в систему действующего агроклиматического мониторинга позволяет дополнить средние многолетние агрометеорологические характеристики вероятностными оценками их изменчивости при возрастании неустойчивости климата, что повышает информационную значимость агрометеорологического обеспечения сельскохозяйственного производства.

Полученные количественные оценки рисков неурожая позволяют учитывать природно-экономические характеристики территории в процессе принятия агротехнологических решений, как в сельскохозяйственной практике, так и в области агрострахования. Остановимся на одном примере.

Одним из возможных способов повышения стабильности сельскохозяйственного производства в условиях изменяющегося климата является оптимизация минерального питания растений (Федосеев, 1979). При анализе эффективности применения минеральных удобрений с учётом факторов уязвимости многими авторами использовались результаты обобщения данных Географической сети опытов с удобрениями (Геосеть).

Ниже представлены результаты исследования автором устойчивости производства зерновых культур при применении минеральных удобрений на основе расчёта рисков недобора климатически обусловленной урожайности яровой и озимой пшеницы и ячменя.

Максимальные абсолютные величины снижения риска за счёт оптимизации минерального питания растений составили при его изначально высоком и очень высоком уровне до 25 % для озимой пшеницы, до 15 % для яровой пшеницы, до 11 % для озимого ячменя, до 6 % для ярового ячменя, что реализуется при средних дозах внесения азотных удобрений. При этом в большинстве случаев обеспечивалось снижение риска на одну градацию, а для озимых культур — на две градации за счёт лучшей реализации культурами БКП (Романенков, Павлова и др., 2018).

Климатические риски при производстве озимой пшеницы для всех сравниваемых опытов были ниже соответствующих значений для яровой пшеницы. За счёт правильной агротехники (своевременность технологических операций, оптимизация севооборотов) снижение рисков более выражено для озимой пшеницы по сравнению с яровой. Внесение удобрений обеспечивало большее влияние на снижение абсолютной величины климатических рисков возделывания яровой пшеницы по сравнению с озимой.

Проведённое исследование показало практическую значимость разработанного автором метода оценки климатических рисков и иллюстрирует возможности метода для выявления наиболее удачных агротехнологических приёмов, обеспечивающих адаптацию систем земледелия к условиям засухи.

4.2 Оценка ущерба от неблагоприятных природных явлений

В земледельческой зоне России, как и во многих странах мира, наблюдается тенденция увеличения потерь при производстве сельскохозяйственных культур из-за усиливающихся воздействий опасных природных явлений. Как уже отмечалось в разделе 4.1, в связи с обширной территорией, большим разнообразием климатических и ландшафтных условий земледельческие районы России подвержены воздействию различных опасных метеорологических, агрометеорологических и гидрологических явлений. Из агрометеорологических опасных явлений наибольший ущерб зерновому хозяйству России наносят засухи, т. к. более 60 % всех посевных площадей основных зерновых культур расположено в зонах недостаточного и неустойчивого увлажнения. Естественно, что в таких условиях угроза повреждений этих культур засухой в том или ином районе достаточно велика. Как известно, чаще всего эта угроза становится реальной в юго-восточных районах ЕЧ России и сравнительно редко — в северных и западных.

Ущерб, наносимый сельскому хозяйству засухами, зависит от территории, охваченной ими, а также от интенсивности и продолжительности засушливого периода. При локальных засухах зерновое хозяйство страны, как правило, не несёт больших потерь. При обширных и интенсивных засухах ущерб, причиняемый ими, резко увеличивается, что вызывает необходимость их мониторинга по определенным показателям или критериям (Фролов, Страшная, 2011).

В качестве критериев засух используются различные показатели, например, аномалии количества осадков (% от климатической нормы) в сочетании с аномалией температуры воздуха, относительная влажность и дефицит влажности воздуха, запасы продуктивной влаги в почве или снижение урожайности относительно её средней величины более чем на 10 % (Алпатьев, 1954; Дроздов, 1980; Мещерская, 1988; Раунер, 1981). Распространены комплексные коэффициенты увлажнения (засушливости), представляющие собой в большинстве случаев отношение сумм осадков к испаряемости, где испаряемость учитывается косвенно по суммам температур или дефициту влажности воздуха.

В работе (Страшная и др., 2011) сформирована сводка сильных обширных засух продолжительностью не менее двух месяцев, которые охватывали три крупных района и более за период с 1891 по 2010 гг. (фрагмент сводки приведён в табл. 4.2). Обширной считалась засуха, которая была распространена в районе не менее чем на 30 % территории. За период с 1946 по 2010 гг. для идентификации засух использовались как метеорологические данные, так и данные по урожайности зерновых культур при учёте их посевной площади, за более ранние годы использовались литературные источники.

Таблица 4.2 — Районы, охваченные сильными и обширными засухами в России за период с 1891 по 2010 гг. (Страшная и др., 2011)

Годы засух	Поволжский	Центрально-Чернозёмный	Северо-Кавказский	Уральский	Западно-Сибирский	Центральный	Волго-Вятский
Число случаев	32	26	23	24	15	12	13
Повторяемость, %	27	22	19	20	12	10	11

Как следует из полной таблицы (Страшная и др., 2011), в трёх десятилетиях (1931–1940, 1951–1960 и 1991–2000 гг.) наблюдалось по четыре

сильных засухи, в остальных девяти десятилетиях — по 2–3 таких засухи. За последние 70 лет наиболее обширными, охватывающими 5–7 районов, были сильные засухи в 1946, 1963, 1975, 1981, 1995, 1998, 1999 годах и засуха 2010 года, которая по охвату территории стоит в одном ряду с перечисленными. За период с 1891 по 2010 гг. повторяемость сильных и обширных засух составляет: в Поволжском районе — 27 %, в Центрально-Чернозёмном, Уральском и Северо-Кавказском — от 19 до 22 %, в Центральном, Волго-Вятском и Западно-Сибирском — от 10 до 12 %.

За последние 30 лет в годы с сильными и обширными засухами, в целом по России, валовые сборы зерна уменьшались почти наполовину. Так, например, в годы с сильными засухами (1981, 1995, 1998 и 2010 гг.) валовые сборы составляли соответственно 73,8; 63,4; 47,9 и 60,9 млн т, тогда как в годы, благоприятные по условиям увлажнения (1993, 1997, 2002, 2008, 2015, 2016, 2017 гг.), они составляли от 86,6 до 134,1 млн т в 1993 и 2017 гг. соответственно. Следует отметить, что в 1995 и 1998 гг. уменьшение валовых сборов обусловлено не только засухой, но и сокращением посевных площадей под зерновыми культурами (по сравнению с 1981 г. почти на 12–15 млн га).

Более показательной величиной для сравнительной оценки засух (при изменении посевных площадей) является урожайность. В годы с сильными засухами (1981, 1995, 1998 и 2010 гг.) средняя по России урожайность зерновых культур составляла соответственно 10,0; 11,6; 9,4 и 14,1 ц/га, а в благоприятные (1993, 1997, 2002 и 2008 гг.) — 16,3; 16,5; 18,6 и 23,1 ц/га (Страшная и др., 2011). Понятно, что, ввиду столь резких колебаний урожайности и валовых сборов зерна, правильная и своевременная оценка интенсивности засухи и её возможных последствий (недобора урожая) в значительной степени может определять продовольственную безопасность как отдельных регионов, так и страны в целом, учитывая возможность выбора стратегии закупки зерна на рынках внутри страны или за её пределами. Такая оценка необходима и для различных экономических

расчётов и для планирования хозяйственной деятельности сельскохозяйственных товаропроизводителей.

Объективной оценкой последствий засухи для любой территории может служить ущерб, определяемый как величина снижения урожайности. Однако урожайность в конкретной природно-климатической зоне изменяется не только под воздействием погоды, но и в связи с изменениями, происходящими в культуре земледелия.

Рассмотрим оценки ущерба от неблагоприятных природных явлений, полученные с помощью системы КПУ. Мониторинг показателей агроклиматических условий, осуществляемый с её помощью, позволяет количественно оценить условия формирования урожайности, а также рассчитать основной показатель — климатически обусловленную урожайность. Как указывалось выше (см. гл. 2), при расчётах климатически обусловленной урожайности автоматически исключается технологический тренд, что и позволяет выделить влияние на ежегодные потери урожайности исключительно агрометеорологических факторов.

В табл. 4.3 представлены рассчитанные с помощью системы КПУ оценки числа неурожайных лет (N_{cr}) по яровой пшенице, полученные по 20-летним периодам: 1961–1980 гг. (базовый) и 1994–2013 гг. Расчёты выполнялись по 24 областям (краям, республикам), посевные площади которых составляют не менее 100 тыс. га. Показатель N_{cr} определяется как число случаев с урожайностью ниже некоторого критического уровня (Y_{cr} , см. выше). Будем рассматривать две градации недобора урожайности: от 20 до 40 % (существенный) и более 40 % (критический).

Анализ показывает, что число неурожайных лет за 1994–2013 гг. по сравнению с базовым периодом, увеличилось в подгруппе субъектов с максимальными площадями: в Алтайском крае — от 0 до 1, в Оренбургской области — от 2 до 6 и Омской — от 1 до 3 (случаев). В целом за период 1993–2014 гг. число неурожайных лет по отдельным субъектам с потерями выше 40 % либо не изменилось, либо увеличилось (табл. 4.3).

Таблица 4.3 — Сравнительные оценки частоты неурожайных (N_{cr}) и урожайных лет яровой пшеницы в основных зерновых регионах по двадцатилетним периодам 1961–1980 и 1994–2013 гг. Расчёты выполнены в имитационной системе КПУ

Субъект РФ: край, область, республика	Число неурожайных лет за период, N_{cr}				Число урожайных лет за 1994–2013 >40 %	Относительные посевные площади S_{94-13}/S_{61-80} , %
	1961–1980		1994–2013			
	градации потерь/прибыли урожайности		градации потерь/прибыли урожайности			
	20–40 %	>40 %	20–40 %	>40 %		
Алтайский	4	0	0	1		62
Оренбургская	3	2	2	6	2	53
Омская	4	1	1	3	3	86
Новосибирская	4	0	3	0		68
Курганская	1	5	4	4	2	62
Челябинская	3	1	2	2		68
Башкортостан	1	1	3	2	1	52
Красноярский	1	0	1	0		53
Татарстан	3	2	3	2	1	67
Саратовская	3	2	4	4	3	24
Тюменская	3	0	2	1		59
Кемеровская	2	1	1	1	1	76
Иркутская	0	0	0	0		47
Самарская	4	2	1	5	2	27
Пермская	2	2	3	0		60

Таким образом, сравнительный анализ числа лет с крупными потерями климатически обусловленной урожайности яровой пшеницы за период 1994–2013 и 1961–1980 гг. на большей части рассматриваемой территории позволил выявить тенденцию к увеличению числа неурожайных лет. Частота крупного недобора урожая яровой пшеницы увеличивается в основных регионах её возделывания. Выделяются регионы с максимальной частотой неурожайных лет: Оренбургская, Самарская, Саратовская и Курганская области (2–3 случая за 10 лет).

Для сравнительной оценки интенсивности засух и ущерба от них выбраны годы с локальными минимумами урожайности, рассчитанной в системе КПУ, начиная с 1951 по 2013 гг. (табл. 4.4). Расчёты показывают, что засуха 2010 г. на ЕЧ России привела к недобору порядка 50 % урожая яровой пшеницы, что превышает потери в экстремально засушливые 1972 и 1981 гг.,

составившие соответственно 43 и 49 % от уровня урожая 2008 г. (табл. 4.4). Таким образом, можно утверждать, что за последние 60 лет засуха 2010 г. оказалась наиболее значимой по расчётным потерям климатически обусловленной урожайности яровой пшеницы.

Таблица 4.4 — Оценка потерь климатически обусловленной урожайности яровой пшеницы в засушливые годы, %, относительно 2008 г. по отдельным федеральным округам на ЕЧ России. Расчёты выполнены в имитационной системе КПУ

Федеральный округ	Годы								
	1951	1972	1975	1981	1995	1998	2010	2012	2013
Центральный	-16,1	-45,9	-36,1	-53,3	-25,6	-34,2	-50,5	-19,9	-35,1
Северо-Западный	0,5	-39,7	2,0	-24,3	-9,7	-13,5	-35,8	-7,4	-20,8
Приволжский	-22,0	-35,6	-44,0	-58,1	-28,9	-60,0	-61,8	-27,8	-38,9
Южный	-18,1	-52,3	-49,0	-59,6	-30,3	-43,0	-54,6	-54,6	-61,7
ЕЧ России	-13,9	-43,4	-31,8	-48,8	-23,6	-37,7	-53,0	-25,8	-38,0
Уральский	27,5	72,8	-7,5	-5,2	27,2	-28,5	-11,8	-15,6	14,4
Сибирский	12,2	50,4	0,9	9,2	19,9	-8,5	18,5	-18,6	28,4
Дальневосточный	47,9	60,5	39,5	54,6	36,5	44,4	10,9	8,3	25,0

На рис. 4.2 представлены оценки потерь климатически обусловленной урожайности яровых зерновых культур в 2010 и 2012 гг., рассчитанные относительно высокоурожайного 2008 г. Можно видеть, что крупномасштабная засуха 2010 г. привела к значительному снижению этой урожайности яровых зерновых культур практически на всей ЕЧ России, особенно на юго-востоке территории.

Расчётная климатически обусловленная урожайность яровых зерновых культур в 2010 г. была на ~80 % ниже урожайности 2008 г. в Самарской, Оренбургской, Пензенской, Саратовской областях и Республике Татарстан. Значительные потери урожайности яровых зерновых культур (~65 %) выявлены в Республиках Башкортостан, Мордовия, Чувашия и Калмыкия, в Курской, Липецкой и Тамбовской областях, а также в Краснодарском и Ставропольском краях.

Пространственное распространение засухи в 2012 и 2010 гг. значительно различалось. Расчёты показали, что самые крупные потери климатически обусловленной урожайности яровой пшеницы зафиксированы на ЕЧ России в 2010 г., а на АЧ России в 2012 г. — в Новосибирской (44 %), в Кемеровской (50 %) и Томской (59 %) областях, и в Алтайском крае (32 %).

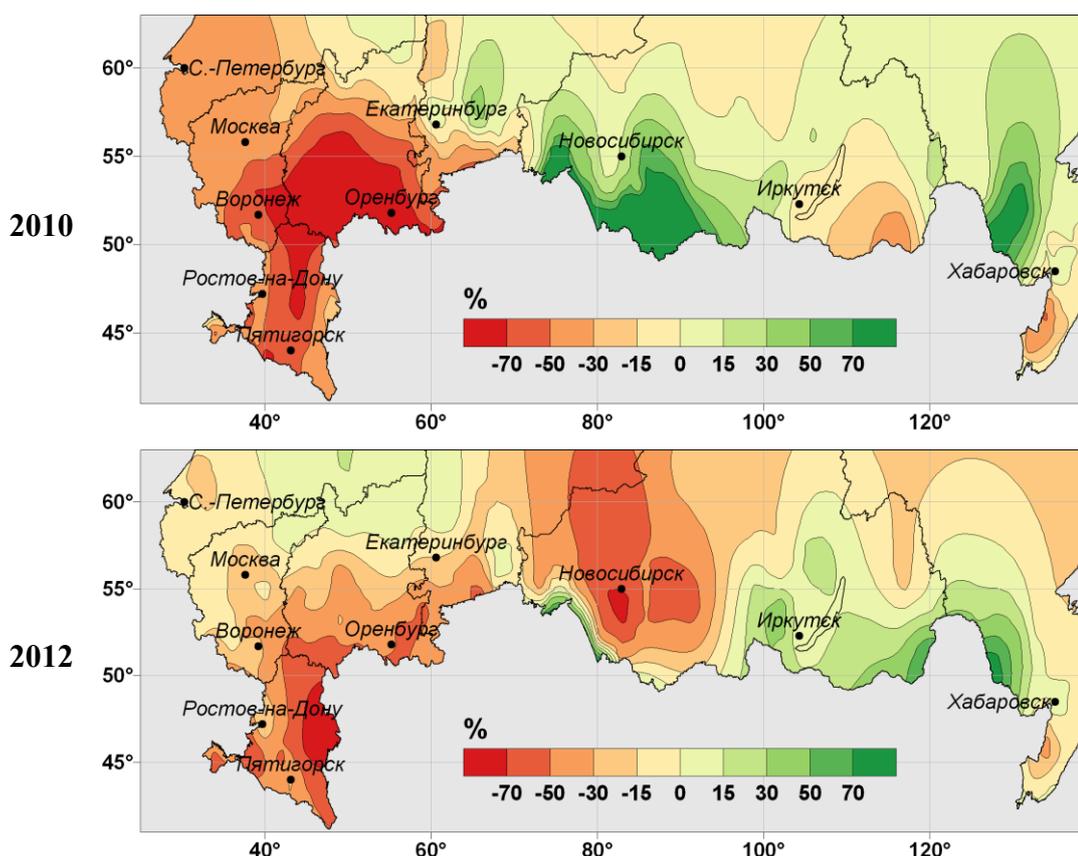


Рисунок 4.2 — Отклонения (%) климатически обусловленной урожайности яровой пшеницы в 2010 и 2012 гг. от уровня урожайности в 2008 г. Имитационная система КПУ

Сопоставление контрастных по агрометеорологическим условиям, но хронологически близких лет, неурожайного 2010 г. и рекордного по урожайности 2008 г., даёт возможность оценить диапазон влияния погодных условий на продуктивность сельского хозяйства России при практически не менявшемся уровне агротехники. Уменьшение валового сбора зерна на 50 млн тонн (почти в 2 раза) от 2008 к 2010 гг. может служить оценкой

возможного диапазона воздействия междугодичной изменчивости климата на продуктивность сельского хозяйства России.

4.3 Оценка степени неблагоприятности территорий для производства сельскохозяйственных культур

Оценка наблюдаемых изменений климата и динамики агроклиматических ресурсов тесно связана с работами по оценке степени неблагоприятности территорий субъектов РФ для производства сельскохозяйственной продукции. Начиная с 2015 г. ФГБУ «ВНИИСХМ» участвует в работе по выполнению постановления правительства по оценке степени неблагоприятности территорий субъектов РФ для производства сельскохозяйственной продукции.

Под руководством и непосредственном участии автора разработана технологическая схема оценки степени неблагоприятности территорий субъектов РФ по отношению к двум опасным агрометеорологическим явлениям — «засуха» и «переувлажнение». Набор климатических показателей для такой оценки определён пунктом 4 «Правил отнесения территорий к неблагоприятным для производства сельскохозяйственной продукции территориям», которые утверждены постановлением Правительства РФ от 27.01.2015 № 51 (Правила отнесения ..., 2015). Разработан формат представления ежегодных результатов расчётов в табличной и графической формах. Результаты расчётов передаются в Минсельхоз РФ 1 июня (текущего года).

Схема расчётов включает следующие этапы:

1. Сбор, обработка и контроль данных наблюдений за температурой воздуха и осадкам по станциям-корреспондентам декадных агрометеорологических телеграмм КН-21 (начиная с 2009 г. данные в системе «Прометей»).

2. Расчёт гидротермического коэффициента Г. Т. Селянинова (ГТК), по данным сетевых наблюдений (примерно 897 метеорологических станций и

постов Гидрометслужбы) в пределах территории восьми ФО и 85 субъектов РФ. Расчётный период наблюдений охватывает скользящие 20-летние периоды: 1995–2014, ..., 1998–2017 гг.

3. Построение картосхем и расчёт площадей территорий по заданным критериям условий засушливости и переувлажнения в геоинформационной системе QGIS.

4. Сравнительный анализ расчётных индексов засушливости и переувлажнения (ГТК) текущего года с предшествующими расчётными периодами.

Согласно «Правила отнесения ...» (2015) (см. выше), принято, что критериями отнесения территорий к неблагоприятным для производства сельскохозяйственных культур территориям на основе климатических условий являются наличие территорий, подверженных сильным засухам, и наличие территорий, подверженных переувлажнению, что характеризуется следующими показателями, рассчитанными по данным за период не менее 20 лет:

- а) вероятность сильных засух (ГТК равен 0,6 и менее) — 50 % и более;
- б) вероятность переувлажнения в период уборки сельскохозяйственных культур (ГТК равен 2,0 и более) — 30 % и более.

ГТК для оценки засух рассчитывается за период май–август, для оценки переувлажнения — за август–сентябрь.

$$ГТК = \frac{\Sigma P_{V-VIII}}{0,1 \Sigma T_{V-VIII}}, \quad (4.4)$$

где ΣP_{V-VIII} — сумма осадков за май–август (мм); ΣT_{V-VIII} — сумма активных температур выше 10 °С за май–август (°С).

В Росгидромет и Министерство сельского хозяйства РФ ежегодно передаются таблицы, содержащие расчётные данные ГТК и картосхемы границ районов с вероятностью сильных засух ($ГТК \leq 0,6$ за май–август) в 50 % и более лет, и переувлажнения ($ГТК \geq 2,0$ за август–сентябрь) в 30 % и более лет согласно разработанной методике. На рис. 4.3 представлена

картосхема распределения значений вероятности (%) сильных засух ($ГТК \leq 0,6$) за май–август и переувлажнения ($ГТК \geq 2,0$) за август–сентябрь по территории России, построенная по данным за период 1998–2017 гг.

Выявлены территории, подверженные сильным засухам — Астраханская, Оренбургская, Волгоградская и Саратовская области, Республики Калмыкия и Крым (табл. 4.5). Вероятность сильных засух за май–август на территории этих субъектов колеблется от 51 % (Саратовская и Волгоградская области) до 90 % (Астраханская область).

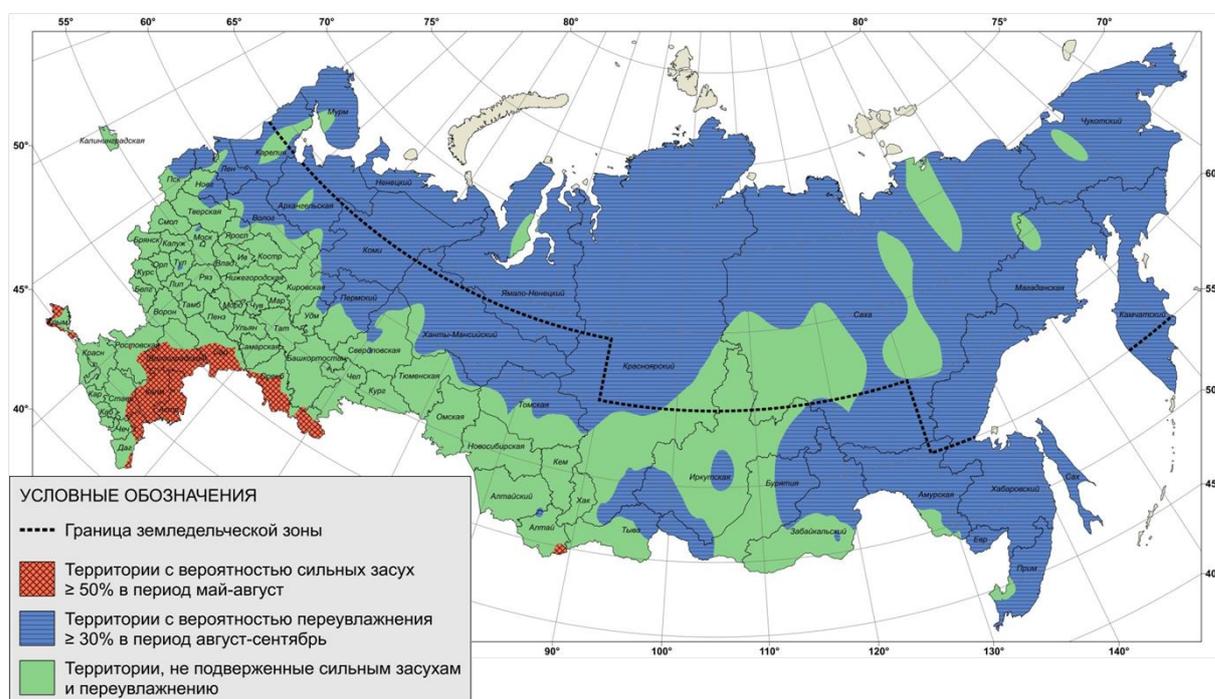


Рисунок 4.3 — Картосхема границ районов с неблагоприятными агрометеорологическими условиями: сильными засухам с вероятностью $\geq 50\%$ и переувлажнением с вероятностью $\geq 30\%$ (по данным 1998–2017 гг.)

Территории, подверженные ОЯ «переувлажнение», расположены по северной границе земледельческой зоны России и на Дальнем Востоке. Вероятность переувлажнения за август–сентябрь на выделенной территории (заливка синего на рис. 4.3) изменяется значительно — от 78 % (Ненецкий автономный округ) до 30 % (Вологодская, Иркутская области) (табл. 4.5).

Таблица 4.5 — Перечень субъектов РФ, подверженных неблагоприятным агрометеорологическим явлениям для производства сельскохозяйственной продукции: сильным засухам с вероятностью ≥ 50 % и переувлажнению с вероятностью ≥ 30 % (по данным наблюдений за 1998–2017 гг.)

Засуха		Переувлажнение	
Субъект РФ: республика, область	Вероятность (%) сильных засух за май–август	Субъект РФ: республика, край, область, авт. округ	Вероятность (%) переувлажнения за август–сентябрь
Астраханская	90	Ненецкий	78
Калмыкия	56	Сахалинская	62
Оренбургская	53	Коми	60
Крым	53	Магаданская	54
Волгоградская	51	Хабаровский	54
Саратовская	51	Камчатский	54
		Чукотская	52
		Ямало-Ненецкий	51
		Ханты-Мансийский	48
		Мурманская	45
		Еврейская авт.	43
		Ленинградская	43
		Саха (Якутия)	40
		Амурская	39
		Архангельская	38
		Карелия	34
		Приморский	33
		Псковская	32
		Вологодская	30
		Иркутская	30

Рассмотрим рассчитанные вероятности сильных засух и переувлажнения на территории отдельных субъектов России. На рис. 4.4 и 4.5 представлены картосхемы распределения значений вероятности сильных засух за май–август и переувлажнения за август–сентябрь по районам Саратовской области и Пермского края Приволжского ФО, рассчитанные за период с 1995 по 2014 гг.

Расчёты позволили выявить области и административные районы Приволжского ФО, подверженные сильным засухам. Вероятность сильных засух в мае–августе на территории Саратовской области колеблется от 20 % в Аркадакском районе до 90 % в Александрово-Гайском (рис. 4.4). Высока

вероятность засух в Новоузенском (85 %), Краснокутском (75 %) и Ершовском (70 %) районах. Анализ показал, что высокая степень подверженности ОЯ «засуха» характерна для территории всей Саратовской области — в 50 % случаев (лет) на 50 % территории области наблюдается засуха (по данным за 1995–2014 гг.).

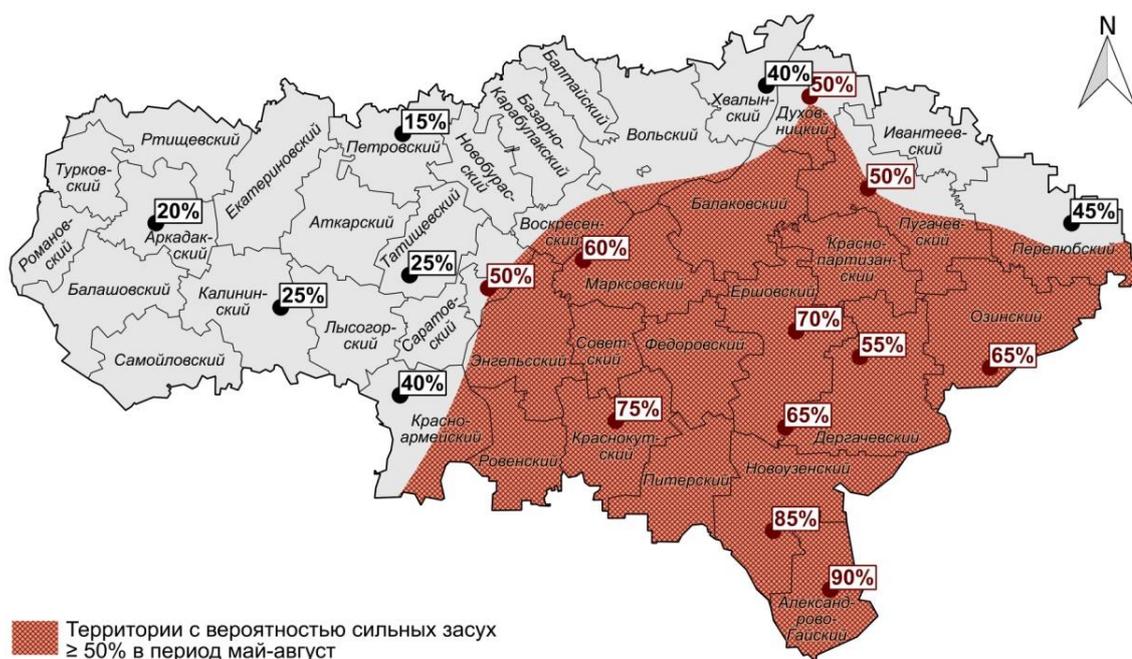


Рисунок 4.4 — Картограмма границ районов с неблагоприятным агрометеорологическим явлением «засуха» на территории Саратовской области (по данным за 1995–2014 гг.)

Территории, подверженные ОЯ «переувлажнение», расположены по северо-восточной границе Приволжского ФО. На картограмме Пермского края (рис. 4.5) заливкой синего цвета выделены территории, вероятность переувлажнения на которых за август–сентябрь составляет не менее 30 % (по данным наблюдений за 1995–2014 гг.). Чаще всего ОЯ «переувлажнение» наблюдается в Чердынском (60 %) и Гайнском (50 %) районах Пермского края.

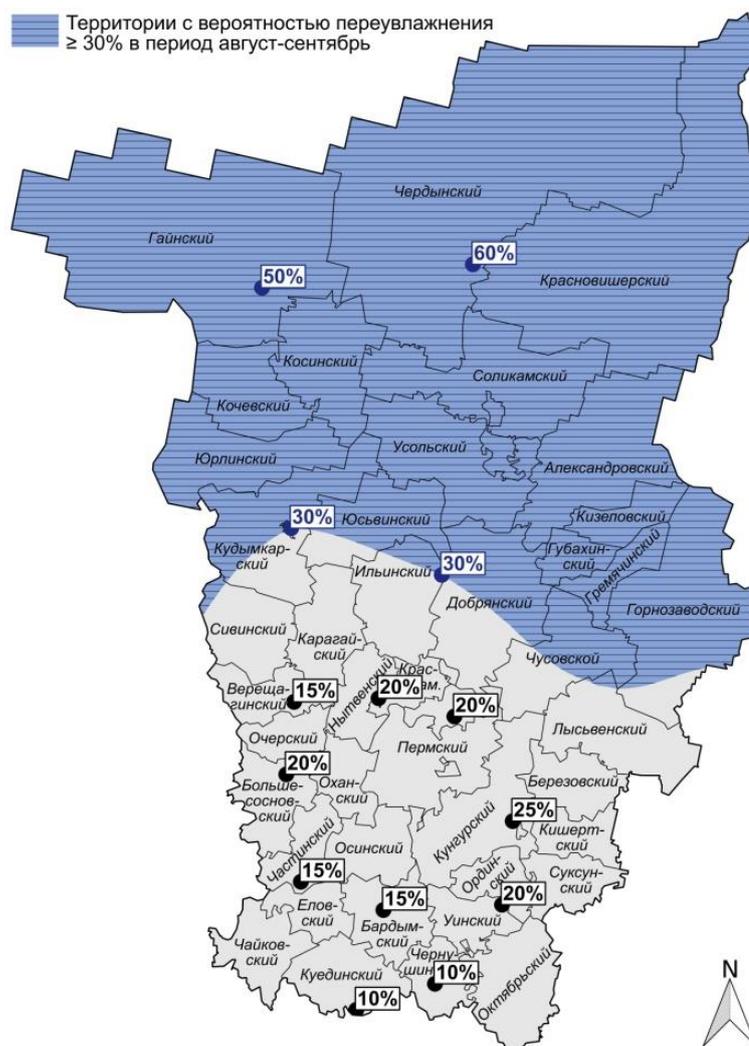


Рисунок 4.5 — Картосхема границ районов с неблагоприятным агрометеорологическим явлением «переувлажнение» в Пермском крае (по данным 1995–2014 гг.)

На основе представленных материалов можно утверждать, что разработанная технология позволяет выявить территории, подверженные тем или иным ОЯ по заданным критериям в масштабах муниципальных образований, краёв, областей и республик для целей агрострахования и иных видов поддержки сельхозпроизводителей, осуществляемой центральными и местными органами власти.

ГЛАВА 5. Оценка влияния изменений агроклиматических ресурсов на продуктивность зерновых культур и биоклиматический потенциал в 21 веке

5.1 Оценка изменений агроклиматических ресурсов и продуктивности растениеводства на основе сценариев моделей общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦА(О))

5.1.1 Сценарии изменения климата на основе МОЦА(О) в 21 веке для территории России

Наиболее полной глобальной сводкой результатов исследований по проблеме изменений климата являются оценочные доклады IPCC (2001, 2007, 2013, 2014). Оценки Третьего оценочного доклада (2001) развиты и уточнены в материалах Рабочей группы II в Четвёртом оценочном докладе (Working Group II Contribution to the Intergovernmental Panel on Climate Change Fourth Assessment Report Climate Change 2007: Climate Change Impacts, Adaptation and Vulnerability, 2007) и Пятом оценочном докладе (IPCC, 2013).

Большинство исследователей считает, что имеется доказательная база, подтверждающая, что процесс потепления продолжается и велика вероятность того, что такая тенденция сохранится до конца текущего столетия (Jones et al., 2003; Brohan, 2006; Ранькова, 2005; Елисеев, 2010; Елисеев и др., 2011; Груза, Ранькова, 2012; Переведенцев и др., 2011–2014, 2017; Мохов, 2018). Выводы Межправительственной группы экспертов по изменению климата МГЭИК о глобальном потеплении, которое наблюдается в настоящее время, продолжают находить подтверждение в данных наблюдений.

На рис. 5.1 приведён ход температуры приземного воздуха, осреднённой над континентами Северного и Южного полушария, а также ход глобально осреднённой приповерхностной температуры земного шара по данным T3288 (ИГКЭ) и CRUTEM (UK) (Груза, Ранькова и др., 2016),

начиная с 1976 г. Ранее эти изменения были обнаружены и для территории России (Рубинштейн, Полозова, 1966; Будыко, Винников и др., 1976; Будыко, 1980; Израэль и др., 2001; Груза, Ранькова, 1980). Как показывают расчёты, территория России существенно более чувствительна к воздействиям климата, чем Северное полушарие и земной шар в целом. Так, по данным (Груза, Ранькова и др., 2016), размах аномалий среднегодовых температур России за период 1886–2015 гг. достигает 3,0–4,0 °С, в то время как для суши Северного полушария он находится на уровне 1,0–1,5 °С.

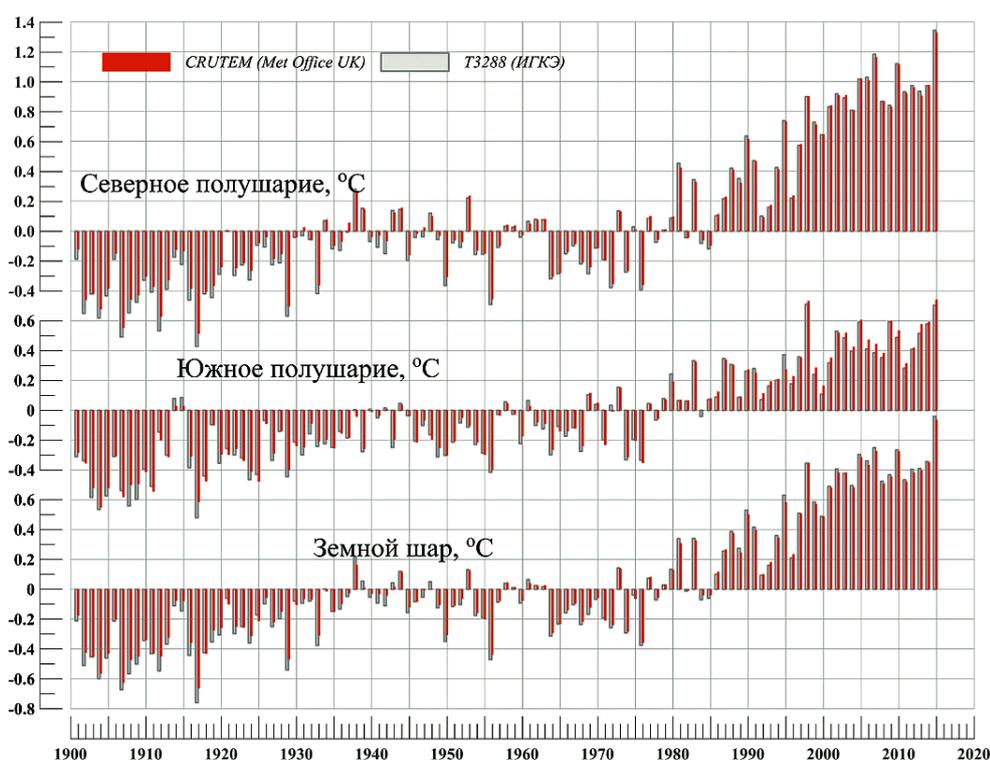


Рисунок 5.1 — Временные ряды пространственно осреднённых среднегодовых (январь–декабрь) аномалий температуры приземного воздуха (°С, 1901–2015 гг.), рассчитанные по методике Hadley/CRU (красного цвета) и ИГКЭ Росгидромета и РАН (серого цвета) (Груза, Ранькова и др., 2016)

Исследование влияния ожидаемых в 21 веке изменений климата на продуктивность сельского хозяйства является одной из приоритетных задач современной агроклиматологии. Самые первые перспективные оценки были построены на базе палеоклиматических сценариев (Будыко и др., 1976, 1981).

Одновременно с появлением палеоклиматических сценариев в ФГБУ «ВНИИСХМ» были начаты работы по оценке последствий изменений климата в сельском хозяйстве. Первые оценки изменений продуктивности сельскохозяйственных культур при реализации палеоклиматического сценария (Будыко и др., 1981; Винников, Гройсман, 1979) были получены автором в соавторстве с О. Д. Сиротенко в рамках НИР Росгидромета (Отчёт о НИР, 1992 г.).

Наиболее перспективным методом исследования проблемы изменений климата и их влияния на продуктивность сельскохозяйственных культур являются динамические агроклиматические модели, позволяющие оценивать эффект при любом сценарии изменения климата.

Основные научные результаты по оценке последствий ожидаемых в 21 веке изменений климата для сельского хозяйства России представлены в следующих работах: Менжулин, Саватеев и др., 1981; Сиротенко, Павлова, 1994; Сиротенко, Абашина, Павлова, 1995, 1998; Сиротенко, Абашина, 1998; Кислов, 2001; Кислов и др., 2008; Израэль, Сиротенко, 2003; Сиротенко, Абашина, Романенков, 2005; Сиротенко, Грингоф, 2006; Сиротенко, Романенков, 2007; Оценка макроэкономических последствий ..., под ред. Катцова, 2011; Belyaeva and Vokusheva, 2018).

В последнее время появились новые публикации в этой области — по оценке влияния изменений климата на мировое сельское хозяйство (Lobell, Field, 2007), для стран Европы и США (Александров, 2006) и для территории России (Чебакова, 2006; Tchebakova et al., 2009, 2016; Alcamo et al., 2007).

Результаты исследований автора по обсуждаемой проблеме вошли в раздел «Сельское хозяйство» Оценочного доклада об изменении климата (2008) и Второго оценочного доклада (2014), включены в издания Национальных Докладов Межведомственной комиссии РФ по проблемам изменения климата, коллективные монографии (под ред. С. М. Семенова, 2012; под ред. В. М. Катцова, 2011), в Доклад о климатических рисках ... (под ред. В. М. Катцова и Б. Н. Порфирьева, 2017). В соавторстве с

И. Г. Грингофом издано учебное пособие «Основы сельскохозяйственной метеорологии, Т. III» (2013), рассчитанное на студентов-бакалавров географических факультетов университетов и вузов.

На каждом этапе исследований автор ориентировался на опубликованные на тот момент наиболее вероятные сценарии изменений климата. Приведём некоторые из этих сценариев: самые первые — палеоклиматические (1981); сценарии МОЦА(O): GISS, CCC, GFDL (1996); транзитивный сценарий GFDL CM3 (2001); сценарии ЕНАМ, GFDL CM3, HAD CM3, CCC (2008); региональная климатическая модель ГГО (2010). На текущем этапе работы автор использует данные сценариев проектов сравнения климатических моделей CMIP3 (Collins et al., 2001; Meehl et al., 2007; Kingdom, 2008) и CMIP5: ЕНАМ, GFDL CM3, HAD CM3, CCC (Diffenbaugh, Field, 2013; Taylor et al., 2012) и сценария, построенного на основе статистического анализа наблюдаемых тенденций параметров климатической системы (Израэль и др., 2001, 2008; Груза, Ранькова, 2012). Последние результаты (Катцов и др., 2016, 2017; Катцов, Школьник и др., 2017, 2019) связаны с вероятностными оценками изменения климата, полученными с помощью региональной модели ГГО (РКМ) (см. раздел 5.2).

Стремление к созданию совершенной модели климатической системы привело к разработке ансамблевого подхода — эффективного инструмента сглаживания погрешностей моделирования — (Murphy et al., 2010; Shukla et al., 2006; Meehl et al., 2007; Мелешко, Катцов и др., 2008; Shkolnik et al., 2017). Известно, что межмодельные различия климатических сценариев, особенно значительные для полей осадков, являются одним из основных источников неопределённости, что ограничивает точность оценок при расчётах возможных изменений продуктивности сельскохозяйственных культур. Средние по ансамблю сценарии позволяют уменьшить эту неопределённость. Они удовлетворительно согласуются с данными наблюдений и могут быть положены в основу региональных агроклиматических прогнозов и оценок.

Результаты исследований по количественной оценке последствий изменений климата на продуктивность сельскохозяйственных культур, полученные на основе перечисленных выше сценариев, выполнены автором лично и представлены в работах автора, как лично, так и в соавторстве (Сиротенко, Павлова и др., 1994, 2001, 2007, 2010; Павлова и др., 2012–2019).

Сценарии эмиссии CO₂

Для прогнозирования изменений климатической системы используются климатические модели разных уровней сложности: простые климатические модели, модели промежуточной сложности и полные климатические модели атмосферы земли и океана. В процессе моделирования рассчитываются изменения климата для набора сценариев антропогенных воздействий. В климатических моделях, участвующих в 5-й фазе Проекта сравнения совместных моделей (CMIP5), использовался новый набор 4-х сценариев — Репрезентативные траектории концентраций (Representative Concentration Pathways, RCP) (Taylor et al., 2012; Peters et al., 2012). Эти сценарии уточняют предыдущие оценки (Clarke et al., 2007). Сценарии RCP основаны на данных о выбросах и концентрациях полного набора парниковых газов и аэрозолей и химически активных газов, а также влиянии землепользования и изменения в растительном покрове.

Прогнозные оценки концентраций парниковых газов к 2100 году следующие: 420 ppm (RCP2.6), 538 ppm (RCP4.5), 670 ppm (RCP6.0) и 936 ppm (RCP8.5) (IPCC, 2013–2014).

Сценарий RCP2.6 подразумевает, что пик выбросов парниковых газов придётся на 2010–2020 гг., после чего произойдёт спад. Сценарий RCP4.5 соответствует пику выбросов к 2040 г., а RCP6.0 — к 2080 г. Согласно сценарию RCP8.5 выбросы продолжают расти в течение столетия. В данной работе мы будем использовать два сценария антропогенного радиационного воздействия (radiation forcing): RCP4.5 («умеренный») и RCP8.5 («жесткий»).

На рис. 5.2 приведена динамика концентрации CO₂ при 4-х сценариях антропогенного воздействия, представленная в работах (van Vuuren et al., 2011).

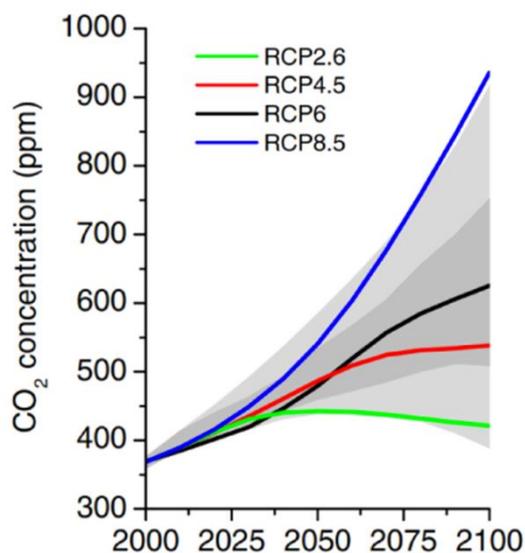


Рисунок 5.2 — Прогнозируемые изменения концентрации CO₂ в 21 столетии при четырёх сценариях эмиссии парниковых газов (van Vuuren et al., 2011)

Постановка численных экспериментов в системе КПУ

Общая схема модельных агроклиматических расчётов по сценариям GFDL CM3 (US, Princeton, Geographical Dynamics Laboratory; Donner et al., 2011), HAD CM3 (UK, Hadley Atmospheric Model; Pope et al., 2000, Collins et al., 2001), ANS 31 (ансамблевый сценарий ГГО; Мелешко и др., 2008) и сценарию глобального потепления (ИГКЭ; Ранькова, 2005; Gruza, Rankova, 2012) приведена в табл. 5.1. Рассматривались четыре временных периода:

S2: 2011–2030 гг.

S3: 2034–2053 гг. (RCP4.5)

2028–2047 гг. (RCP8.5)

S4: 2041–2060 гг.

S5: 2080–2099 гг.

(5.1)

Таблица 5.1 — Схема модельных расчётов по 4-м сценариям изменения климата: GFDL CM3 (US, Princeton, Geographical Dynamics Laboratory), HAD CM3 (UK, Hadley Atmospheric Model), ANS 31 (ГГО) и сценарию ИГКЭ

Сценарий	Сценарий эмиссии RCP4.5				Сценарий эмиссии RCP8.5			
	период*							
	S2	S3	S4	S5	S2	S3	S4	S5
	рост содержания CO ₂ , %							
	20	35	43	67	28	39	51	80
ANS 31	+	+	+	+	+	+	+	+
GFDL	+	+	+	+	+	+	+	+
HAD	+	+	+	+	+	+	+	+
ИГКЭ	-	+	-	-	-	-	-	-

Примечание: * — обозначение в (5.1).

Основными климатическими параметрами сценариев на основе МОЦА(О) являются отклонения среднемесячной температуры воздуха (°С) и сумм осадков (%) за 12 календарных месяцев по отношению к базовому периоду (1961–1990 гг.) в узлах регулярной сетки (в зависимости от модели: 1,0° с. ш. × 1,0° в. д.; 1,5° с. ш. × 1,5° в. д. и др.). Глобальные модели циркуляции атмосферы и региональные климатические модели обеспечивают прогноз изменения климата в узлах регулярной сетки, но не всегда с достаточным уровнем разрешения, необходимым для агроклиматических расчётов. Для того чтобы получить данные для расчётов на локальном (региональном) уровне нами применялся метод статистического даунскейлинга выходных данных МОЦА(О). Для этой цели использовались ряды данных наблюдений в локальных точках за температурой воздуха и осадками для установления связи между предикторами (выходными данными моделей МОЦА) и предиктантами (входными данными системы КПУ — локальными климатическими переменными).

Далее представлены результаты численных экспериментов в системе КПУ по определению прогнозируемых изменений показателей тепло- и влагообеспеченности, а также продуктивности сельскохозяйственных

культур и биоклиматического потенциала в 21 веке. В качестве входных данных использованы результаты даунскейлинга климатических параметров сценариев на основе МОЦА(О).

Прогнозируемые изменения температуры и осадков в 21 веке

В табл. 5.2 представлен прогноз изменений температуры (ΔT , °C) и осадков (ΔP , %) в сельскохозяйственной зоне России по климатическим сценариям: GFDL CM3, HAD CM3 и ANS 31 — на ближайшую перспективу (2011–2030 гг.) по двум сценариям эмиссии CO₂: RCP4.5 и RCP8.5.

Можно видеть, что на территории России с развитым сельским хозяйством при сценарии эмиссии RCP4.5 («умеренный») ожидается рост зимних температур на 2,9 °C (GFDL); 1,8 °C (HAD) и 1,5 °C (ANS 31). При этом не во всех регионах рост зимних температур опережает рост весенних и летних. В весенне-летний период по сценарию GFDL прогнозируется рост температуры на 2,0–2,7 °C и менее значительный (1,2–2,1 °C) по сценариям HAD и ANS 31. Пространственная изменчивость температуры в большей степени характерна для сценария GFDL: от 1,5–1,7 °C в Дальневосточном ФО весной и летом до 2,3–3,3 °C в Приволжском ФО. Максимальный рост температуры по всем трём сценариям ожидается в Приволжском и Уральском ФО (табл. 5.2). Разность температур летнего и зимнего сезона, характеризующая степень континентальности климата, минимальна по ансамблевому сценарию ANS 31 (0,2 °C).

В весенне-летний период по сценарию GFDL (RCP4.5) ожидается увеличение осадков на 20,4–27,3 % по сравнению с современным уровнем (табл. 5.2). При этом максимальное увеличение осадков можно ожидать в Приволжском (24,5–34,9 %), Уральском (27,5–38,6 %) и Сибирском (21,5–33,6 %) ФО. В то же время согласно сценарию HAD на территории Приволжского, Южного и Уральского ФО прогнозируется увеличение осадков только на 10–17 %, но на фоне меньшего роста температуры весной и летом. Рост осадков в зимний период по рассматриваемым сценариям

сопоставим с их изменениями в весенний период, но превышает соответствующие аномалии летом и осенью.

Таблица 5.2 — Изменения температуры воздуха (ΔT , °C) и осадков (ΔP , %) в сельскохозяйственной зоне России по климатическим сценариям: GFDL CM3, HAD CM3 и ANS 31 на 2011–2030 гг. Сценарии эмиссии: RCP4.5 и RCP8.5. Расчёты в системе КПУ

ФО*	ΔT , °C				ΔP , (P–P ₀)/P ₀ , %				CR= $\Delta P/(\Delta T \cdot 10)$, %/°C			
	зима	весна	лето	осень	зима	весна	лето	осень	зима	весна	лето	осень
GFDL, RCP4.5												
СЗФО	2,3	3,1	1,8	1,6	21,9	17,7	20,6	19,3	1,0	0,6	1,1	1,2
ЦФО	2,2	3,2	2,3	1,7	16,7	15,8	16,3	10,6	0,8	0,5	0,7	0,6
ПФО	3,0	3,3	2,3	1,6	23,0	24,5	34,9	17,4	0,8	0,7	1,5	1,1
ЮФО	1,8	2,0	2,8	1,6	12,2	19,0	3,3	7,2	0,7	1,0	0,1	0,5
УФО	3,2	2,8	1,8	1,4	25,3	27,5	38,6	29,2	0,8	1,0	2,1	2,1
СФО	3,4	2,4	1,8	2,1	28,1	21,5	33,6	17,8	0,8	0,9	1,9	0,8
ДВФО	2,5	1,5	1,7	1,9	7,2	8,3	17,5	9,0	0,3	0,6	1,0	0,5
Россия	2,9	2,7	2,0	1,8	22,1	20,4	27,3	16,1	0,8	0,8	1,4	0,9
GFDL, RCP8.5												
Россия	2,8	2,6	2,7	2,2	32,4	23,6	14,7	13,1	1,2	0,9	0,5	0,6
HAD, RCP4.5												
СЗФО	2,0	2,2	1,3	1,6	8,3	13,2	3,3	-1,4	0,4	0,6	0,3	-0,1
ЦФО	1,7	2,0	0,9	1,6	8,4	25,6	6,9	9,4	0,5	1,3	0,8	0,6
ПФО	1,8	2,5	1,3	1,4	13,0	16,7	13,1	-0,6	0,7	0,7	1,0	0,0
ЮФО	1,2	1,3	1,1	1,0	17,1	14,9	14,0	-4,1	1,4	1,1	1,3	-0,4
УФО	2,2	2,8	1,6	1,6	14,6	15,8	9,5	4,5	0,7	0,6	0,6	0,3
СФО	1,7	2,0	1,2	1,5	16,9	9,2	-1,6	12,0	1,0	0,5	-0,1	0,8
ДВФО	1,9	1,6	1,1	1,2	-0,2	8,6	16,3	4,5	0,0	0,5	1,5	0,4
Россия	1,8	2,1	1,2	1,5	13,1	14,5	6,1	6,2	0,7	0,7	0,5	0,4
HAD, RCP8.5												
Россия	2,8	2,4	1,6	1,5	20,3	18,6	8,7	11,8	0,7	0,8	0,5	0,8
ANS 31, RCP4.5												
СЗФО	1,5	1,4	1,3	1,3	10,7	7,2	2,8	5,0	0,7	0,5	0,2	0,4
ЦФО	1,5	1,3	1,3	1,3	10,5	8,5	4,5	2,9	0,7	0,7	0,3	0,2
ПФО	1,6	1,4	1,3	1,3	10,5	9,7	6,8	3,1	0,7	0,7	0,5	0,2
ЮФО	1,1	0,9	1,3	1,1	6,8	7,5	-1,5	1,0	0,6	0,8	-0,1	0,1
УФО	1,6	1,5	1,3	1,3	13,3	9,2	7,2	6,1	0,8	0,6	0,6	0,5
СФО	1,4	1,3	1,2	1,4	14,8	10,0	5,1	8,4	1,1	0,8	0,4	0,6
ДВФО	1,3	1,0	1,0	1,2	7,4	7,4	6,6	6,9	0,6	0,7	0,7	0,6
Россия	1,5	1,3	1,3	1,3	11,9	9,1	5,0	5,5	0,8	0,7	0,4	0,4
ANS 31, RCP8.5												
Россия	1,6	1,4	1,4	1,4	12,8	9,8	3,0	6,9	0,8	0,7	0,2	0,5

* Обозначения для федеральных округов (ФО): СЗФО — Северо-Западный; ЦФО — Центральный; ПФО — Приволжский; ЮФО — Южный; УФО — Уральский; СФО — Сибирский; ДВФО — Дальневосточный.

Осенние осадки согласно сценарию HAD понизятся в основных регионах возделывания озимой пшеницы в Приволжском и Южном ФО.

Анализ соотношения изменения летних осадков и температуры ($CR = \Delta P / (\Delta T \cdot 10)$, %/°C; множитель 10 введён для удобства) по сценариям позволяет условно классифицировать сценарий GFDL как сценарий потепления гумидного (влажного) типа. Средние по территории России рассчитанные величины CR на 2011–2030 гг. составляют 1,4; 0,5 и 0,4 для сценариев GFDL, HAD и ANS 31 соответственно (табл. 5.2). Но существуют региональные различия. Например, для климатических проекций модели HAD характерна большая изменчивость этого показателя по территории. Практически на всей ЕЧ России величина CR изменяется от 0,8 до 1,3 (влажный тип потепления), в то время как в Сибири и на Урале величина CR изменяется в диапазоне от –0,1 до 0,6 (засушливый тип потепления) (табл. 5.2).

Аномалии температуры (ΔT) и осадков (ΔP) в земледельческой зоне России по климатическому сценарию ANS 31 при эмиссии RCP4.5 и RCP8.5 на временном интервале S2 (2011–2030 гг.) практически не различаются (табл. 5.2). Незначительные различия по сценариям GFDL и HAD: по температуре от 0,1 до 0,7 °C, по осадкам — от 4 до 14 %.

Верхней границей оценок можно считать прогнозируемые изменения температуры воздуха (ΔT , °C) и сумм осадков (ΔP , %) в земледельческой зоне России по трём климатическим сценариям GFDL CM3, HAD CM3 и ANS 31 на 2080–2099 гг. при сценарии эмиссии RCP8.5 (табл. 5.3). К концу столетия климатические прогнозы режима увлажнения для отдельных ФО «расходятся» в большей мере, чем на начало века (2011–2030 гг.). Особенно эти различия проявляются в летний период, когда прогнозируемые изменения осадков разнонаправлены по знакам и по величине. По сценарию HAD CM3 прогнозируется уменьшение сумм летних осадков практически на всей территории, на 8,5–29,3 %. По сценарию GFDL количество летних осадков увеличится практически на территории всех ФО на 7,8–48,0 %, за

исключением Южного ФО. «Умеренный» ансамблевый сценарий (ANS 31) прогнозирует незначительное разнонаправленное изменение сумм осадков для большей части России.

Таблица 5.3 — Изменения температуры воздуха (ΔT , %) и осадков (ΔP , %) в земледельческой зоне России по климатическим сценариям: GFDL CM3, HAD CM3 и ANS 31 на 2080–2099 гг. Сценарий эмиссии RCP8.5. Расчёты в системе КПУ

ФО*	ΔT , °C				ΔP , (P-P ₀)/P ₀ , %				CR= $\Delta P/(\Delta T \cdot 10)$, %/°C			
	зима	весна	лето	осень	зима	весна	лето	осень	зима	весна	лето	осень
GFDL												
СЗФО	8,3	7,2	7,1	7,2	56,8	35,9	7,8	30,8	0,7	0,5	0,1	0,4
ЦФО	8,4	7,3	7,3	7,7	43,5	28,6	9,1	10,6	0,5	0,4	0,1	0,1
ПФО	9,5	8,4	7,2	7,5	68,3	48,5	31,9	13,1	0,7	0,6	0,4	0,2
ЮФО	6,3	5,8	8,5	7,4	25,4	26,5	-20,5	-25,6	0,4	0,5	-0,2	-0,3
УФО	10,4	9,0	7,4	7,3	83,8	65,4	40,3	25,4	0,8	0,7	0,5	0,3
СФО	10,4	8,2	7,7	8,2	105,3	53,9	48,0	32,7	1,0	0,7	0,6	0,4
ДВФО	8,9	5,9	7,4	8,2	33,7	22,1	43,1	10,6	0,4	0,4	0,6	0,1
Россия	9,4	7,8	7,5	7,8	73,1	44,5	30,2	18,5	0,8	0,6	0,4	0,2
HAD												
СЗФО	8,9	7,3	7,3	7,4	40,6	31,2	-28,0	15,6	0,5	0,4	-0,4	0,2
ЦФО	8,8	7,4	7,3	6,9	47,1	33,5	-29,3	22,5	0,5	0,5	-0,4	0,3
ПФО	8,6	8,6	8,0	7,1	40,6	30,4	-14,9	13,5	0,5	0,4	-0,2	0,2
ЮФО	6,2	6,1	7,1	5,8	34,5	12,1	-16,8	13,8	0,6	0,2	-0,2	0,2
УФО	9,1	9,3	8,3	7,6	49,8	27,3	-8,5	30,9	0,5	0,3	-0,1	0,4
СФО	7,9	7,8	7,6	7,4	67,6	35,2	-11,0	36,6	0,9	0,5	-0,1	0,5
ДВФО	8,6	6,8	6,4	7,0	36,8	32,7	36,3	45,0	0,4	0,5	0,6	0,6
Россия	8,2	7,8	7,6	7,1	51,8	31,1	-12,7	27,3	0,6	0,4	-0,2	0,4
ANS 31												
СЗФО	7,0	5,3	5,5	5,5	32,9	22,2	-5,4	13,7	0,5	0,4	-0,1	0,2
ЦФО	7,0	5,4	5,8	5,5	28,5	20,6	-7,0	7,0	0,4	0,4	-0,1	0,1
ПФО	7,5	6,0	5,8	5,7	32,3	25,4	0,9	10,0	0,4	0,4	0,0	0,2
ЮФО	4,9	4,5	6,1	5,2	15,4	9,8	-15,5	-1,8	0,3	0,2	-0,3	0,0
УФО	8,1	6,7	6,1	6,0	41,0	26,5	1,8	16,2	0,5	0,4	0,0	0,3
СФО	7,4	6,1	5,9	6,1	48,5	26,9	4,7	20,8	0,7	0,4	0,1	0,3
ДВФО	6,7	5,0	5,3	5,9	27,1	20,2	18,3	19,0	0,4	0,4	0,3	0,3
Россия	7,1	5,8	5,9	5,8	36,8	23,5	0,6	13,9	0,5	0,4	0,01	0,2

* Обозначения для федеральных округов (ФО): СЗФО — Северо-Западный; ЦФО — Центральный; ПФО — Приволжский; ЮФО — Южный; УФО — Уральский; СФО — Сибирский; ДВФО — Дальневосточный.

Из представленных прогнозных оценок температуры воздуха и осадков по разным сценариям изменения климата и регионам можно сделать вывод, что неопределённость сценарных прогнозов должна приниматься во

внимание при комплексной оценке последствий изменений климата на сельскохозяйственное производство. Один из путей уменьшения этой неопределённости — агроклиматические расчёты при разных пространственных масштабах осреднения: страна, ФО, край, область, республика — на основе точечных оценок. Сравнительный анализ оценок, полученных по разным сценариям, позволил определить регионы, где агроклиматические оценки совпадают по знаку, если не по величине, и очертить границы областей с достоверными оценками.

5.1.2 Изменение теплообеспеченности

Перейдём к рассмотрению рассчитанных изменений агроклиматических показателей термического и влажностного режимов на следующие двадцатилетние периоды: 2011–2030, 2034–2053 (или 2028–2047) и 2080–2099 гг. по сценариям ANS 31, GFDL CM3 и HAD CM3.

В табл. 5.4–5.11 представлены оценки параметров, характеризующие изменения агроклиматических условий относительно базового периода по этим сценариям для отдельных ФО при сценариях эмиссии RCP4.5 и RCP8.5.

В качестве агроклиматических показателей, характеризующих термический режим, рассмотрим следующие:

- средняя температура воздуха за январь ($T_{\text{январь}}$) и июль ($T_{\text{июль}}$);
- средняя температура тёплого периода года ($T_{>5^{\circ}\text{C}}$) и периода вегетации зерновых культур ($T_{\text{зерн.}}$);
- дата возобновления вегетации (переход температуры через 5°C весной);
- сумма температур за период с температурой выше 5°C (ΣT_5) и 10°C (ΣT_{10});
- продолжительность тёплого периода года: (а) периода с температурой выше 5°C и (б) периода вегетации зерновых культур.

Сценарий ANS 31

Данные (табл. 5.4) показывают, что к 2030, 2053 и 2099 гг. по сценарию ANS 31 при варианте антропогенного воздействия RCP4.5 можно ожидать роста температуры воздуха и холодного, и тёплого периода года. Температура тёплого периода года ($T_{>5^{\circ}\text{C}}$) в среднем по территории России увеличится по периодам на 0,8; 1,3 и 1,9 °С. В период вегетации зерновых культур соответствующие отклонения составят 1,1; 1,4 и 1,9 °С, что, вероятно, приведёт к сокращению продолжительности их вегетационного периода на 3–6 сут.

Таблица 5.4 — Ожидаемые изменения показателей *термического режима* относительно базового периода на территории земледельческой зоны России на периоды 2011–2030, 2034–2053 и 2080–2099 гг. по сценарию ANS 31 (сценарий эмиссии RCP4.5)

Федеральный округ	Средняя температура воздуха, °С				Дата возобновления вегетации, сут.	Сумма температур, °С		Продолжительность периода, сут.	
	T _{январь}	T _{июль}	T _{>5°C}	T _{зерн.}		ΣT ₅	ΣT ₁₀	T _{>5°C}	вегетации зерновых
2011–2030									
Северо-Западный	1,7	1,2	0,8	1,1	–6	286	295	13	–10
Центральный	1,6	1,3	0,8	1,0	–4	279	282	10	–7
Приволжский	1,6	1,3	0,9	1,1	–5	282	275	10	–7
Южный	1,2	1,4	0,7	0,5	–3	276	297	8	–3
Уральский	1,7	1,3	0,8	1,5	–5	273	293	11	–10
Сибирский	1,4	1,3	0,8	1,3	–5	258	259	10	–8
Дальневосточный	1,3	1,0	0,7	0,5	–3	206	220	7	–7
Россия	1,5	1,3	0,8	1,1	–5	275	281	10	–7
2034–2053									
Северо-Западный	2,8	2,1	1,1	1,5	–10	466	472	21	–13
Центральный	2,8	2,2	1,2	1,3	–8	475	462	18	–10
Приволжский	2,9	2,2	1,4	1,5	–9	491	475	17	–9
Южный	1,9	2,3	1,1	0,6	–6	480	507	14	–4
Уральский	2,9	2,3	1,5	2,0	–9	471	495	17	–15
Сибирский	2,5	2,2	1,4	2,0	–8	428	430	15	–13
Дальневосточный	2,3	1,8	1,2	1,0	–6	365	396	12	–9
Россия	2,6	2,2	1,3	1,4	–8	471	472	17	–10
2080–2099									
Северо-Западный	4,4	3,0	1,7	1,9	–15	721	703	32	–15
Центральный	4,4	3,1	1,7	1,7	–11	697	694	27	–13
Приволжский	4,6	3,1	2,0	1,9	–12	703	685	24	–12
Южный	3,0	3,3	1,7	1,0	–9	732	758	21	–5
Уральский	4,6	3,2	2,3	2,7	–12	718	701	24	–18
Сибирский	3,9	3,1	2,0	2,4	–11	626	630	21	–16
Дальневосточный	3,5	2,7	1,8	1,2	–8	558	610	17	–11
Россия	4,1	3,1	1,9	1,9	–11	697	692	25	–13

Теплообеспеченность сельскохозяйственных культур повысится повсеместно: суммы температур выше 5 °С в течение столетия возрастут на 275 °С к 2030 г. и на 697 °С к 2099 г.; начало вегетационного периода сдвинется на более ранние сроки — от 5 до 11 сут. В целом продолжительность вегетационного и безморозного периода увеличится от 10 сут. (2030 г.) до 25 сут. (2099 г.), что, вероятно, приведёт к улучшению условий проведения сельскохозяйственных работ и уменьшению потерь продукции при уборке урожая.

Следует отметить, что этот сценарий достаточно «сглаженный» и изменения показателей термического режима по ФО незначительные, за исключением температуры и продолжительности вегетационного периода зерновых культур. Так, в 2034–2053 гг. температура периода вегетации зерновых культур увеличится от 0,6 °С (Южный ФО) до 2,0 °С (Уральский и Сибирский ФО), а его продолжительность сократится на 4 и 13–15 сут. соответственно (табл. 5.4).

В табл. 5.5 приведены оценки ожидаемых изменений показателей термического режима на 2011–2030, 2028–2047 и 2080–2099 гг. по сценарию ANS 31 при варианте эмиссии RCP8.5.

Данные этой таблицы показывают, что до середины столетия на периоды 2011–2030 и 2028–2047 гг. изменения показателей, характеризующих условия теплообеспеченности при вариантах эмиссии RCP4.5 и RCP8.5, различаются незначительно (табл. 5.4 и 5.5). Однако к концу столетия изменения термических показателей резко расходятся. При варианте эмиссии RCP8.5 резко возрастает температура по сезонам года, при максимальных её значениях в зимний период. Как следствие — продолжительность периода вегетации увеличивается в среднем до полутора месяцев (43 сут.), и наоборот, вегетация зерновых сокращается на 17 сут. (табл. 5.5). Рост суммы температуры, превышающей пороговые значения 5 и 10 °С, составляет около 1300 °С.

Повышение температуры приведёт к увеличению продолжительности вегетационного периода в тех регионах, где сельскохозяйственное производство в настоящее время ограничено из-за недостатка тепла. В результате потепления границы районов возможного растениеводства продвинулись в России к северу. Для зоны растениеводства северная граница проходит там, где сумма температур выше 5 °С составляет 1300 °С. Таким образом, по условиям теплообеспеченности практически вся территория России станет пригодной для пахотного земледелия.

Таблица 5.5 — Ожидаемые изменения показателей *термического режима* относительно базового периода на территории сельскохозяйственной зоны России на периоды 2011–2030, 2028–2047 и 2080–2099 гг. по сценарию **ANS 31** (сценарий эмиссии **RCP8.5**)

Федеральный округ	Средняя температура воздуха, °С				Дата возобновления вегетации, сут.	Сумма температур, °С		Продолжительность периода, сут.	
	T _{январь}	T _{июль}	T _{>5°C}	T _{зерн.}		ΣT ₅	ΣT ₁₀	T _{>5°C}	вегетации зерновых
2011–2030									
Северо-Западный	1,6	1,6	0,9	1,3	–7	307	322	13	–10
Центральный	1,7	1,6	0,9	1,1	–5	309	315	11	–8
Приволжский	1,8	1,4	0,9	1,1	–6	306	300	11	–7
Южный	1,2	1,5	0,8	0,5	–4	311	330	9	–3
Уральский	2,0	1,2	0,9	1,5	–6	297	319	12	–10
Сибирский	1,8	1,3	0,9	1,4	–5	278	281	11	–8
Дальневосточный	1,4	1,0	0,8	0,6	–3	216	233	7	–7
Россия	1,7	1,4	0,9	1,1	–5	302	308	11	–7
2028–2047									
Северо-Западный	2,6	2,3	1,3	1,6	–10	490	499	21	–14
Центральный	2,7	2,4	1,4	1,6	–8	512	511	18	–11
Приволжский	2,9	2,3	1,5	1,6	–8	513	503	18	–10
Южный	1,9	2,5	1,3	0,7	–6	523	551	15	–4
Уральский	2,9	2,3	1,6	2,1	–9	497	516	18	–15
Сибирский	2,5	2,2	1,4	2,0	–8	452	453	16	–13
Дальневосточный	2,3	1,9	1,3	1,0	–6	379	407	12	–9
Россия	2,6	2,3	1,4	1,6	–8	500	504	17	–11
2080–2099									
Северо-Западный	7,5	5,6	2,8	2,7	–23	1289	1313	55	–21
Центральный	7,4	5,9	2,9	2,5	–19	1269	1312	46	–17
Приволжский	7,8	5,8	3,3	2,6	–20	1272	1286	43	–16
Южный	5,1	6,3	3,1	1,4	–17	1409	1406	39	–6
Уральский	8,4	6,2	3,8	3,9	–22	1314	1330	43	–23
Сибирский	7,5	6,0	3,8	3,6	–20	1231	1265	38	–20
Дальневосточный	6,8	5,3	3,5	2,0	–15	1097	1177	30	–17
Россия	7,4	5,9	3,3	2,7	–20	1290	1312	43	–17

Сценарий GFDL CM3

Ожидаемые изменения показателей термического режима относительно базового периода на территории России за периоды 2011–2030, 2034–2053 (или 2028–2047) и 2080–2099 гг. по сценарию GFDL CM3 при вариантах эмиссии RCP4.5 и RCP8.5 приведены в табл. 5.6 и 5.7.

Таблица 5.6 — Ожидаемые изменения показателей *термического режима* относительно базового периода на территории сельскохозяйственной зоны России на периоды 2011–2030, 2034–2053 и 2080–2099 гг. по сценарию **GFDL CM3** (сценарий эмиссии **RCP4.5**)

Федеральный округ	Средняя температура воздуха, °С				Дата возобновления вегетации, сут.	Сумма температур, °С		Продолжительность периода, сут.	
	T _{январь}	T _{июль}	T _{>5°C}	T _{зерн.}		ΣT ₅	ΣT ₁₀	T _{>5°C}	вегетации зерновых
2011–2030									
Северо-Западный	1,9	1,6	1,6	1,5	–9	526	535	17	–10
Центральный	2,0	1,6	1,4	1,4	–12	475	523	19	–12
Приволжский	1,6	2,3	1,5	0,9	–7	531	543	13	–5
Южный	2,1	1,7	1,9	1,6	–9	547	576	15	–9
Уральский	2,2	1,6	1,6	1,9	–10	473	552	16	–14
Сибирский	2,5	2,0	1,2	1,7	–10	395	420	15	–11
Дальневосточный	2,4	1,7	1,3	1,1	–4	343	385	9	–10
Россия	2,2	1,8	1,6	1,5	–9	501	531	15	–10
2034–2053									
Северо-Западный	4,1	2,4	1,9	1,6	–15	737	755	30	–13
Центральный	4,0	2,1	2,1	1,4	–13	796	838	28	–10
Приволжский	4,5	2,3	2,5	2,0	–12	805	854	24	–11
Южный	2,5	3,2	2,2	1,0	–8	799	856	19	–5
Уральский	4,5	3,5	2,8	3,3	–11	800	870	23	–21
Сибирский	3,5	3,8	2,7	3,5	–12	792	841	24	–19
Дальневосточный	3,2	3,1	2,3	1,6	–8	646	729	18	–12
Россия	3,8	3,1	2,4	2,0	–12	791	839	24	–13
2080–2099									
Северо-Западный	4,4	3,5	2,3	2,2	–19	972	1003	41	–17
Центральный	4,7	3,2	2,3	1,8	–15	958	1006	35	–13
Приволжский	5,4	3,1	2,8	2,2	–15	991	1034	32	–13
Южный	3,7	4,7	2,6	0,9	–13	1118	1138	30	–5
Уральский	6,1	4,1	3,6	3,8	–15	1075	1133	31	–23
Сибирский	6,4	4,6	3,4	4,0	–13	1007	1076	29	–21
Дальневосточный	4,8	4,3	3,2	2,4	–9	876	976	21	–18
Россия	5,5	4,0	2,8	2,4	–15	1011	1057	33	–15

В среднем для территории России изменение температуры как вегетационного периода в целом, так и периода вегетации зерновых, превышает их значения по сценарию ANS 31 на 0,8–1,1 и 0,4–0,6 °С

соответственно. Осреднённые данные об изменении сумм температур по всей сельскохозяйственной зоне России, важнейшего показателя, определяющего размещение сельскохозяйственных культур, показывают, что темпы роста глобального потепления, прогнозируемого по сценарию GFDL, выше, чем по сценарию ANS 31. Так, изменение сумм температур выше 5 и 10 °С по сценарию GFDL на 2011–2030 гг. составит ~530 °С, по сценарию ANS 31 такое изменение ожидается к 2034–2053 гг.

Таблица 5.7 — Ожидаемые изменения показателей *термического режима* относительно базового периода на территории сельскохозяйственной зоны России на периоды 2011–2030, 2028–2047 и 2080–2099 гг. по сценарию **GFDL CM3** (сценарий эмиссии **RCP8.5**)

Федеральный округ	Средняя температура воздуха, °С				Дата возобновления вегетации, сут.	Сумма температур, °С		Продолжительность периода, сут.	
	T _{январь}	T _{июль}	T _{>5°C}	T _{зерн.}		ΣT ₅	ΣT ₁₀	T _{>5°C}	вегетации зерновых
2011–2030									
Северо-Западный	2,6	1,9	1,4	1,4	-10	609	582	25	-10
Центральный	2,6	1,8	1,2	1,6	-11	515	515	24	-13
Приволжский	2,2	2,6	1,5	0,5	-10	664	696	20	-3
Южный	2,7	1,9	1,7	1,4	-11	582	576	19	-3
Уральский	2,9	2,5	1,8	2,4	-11	536	567	18	-16
Сибирский	2,2	3,0	1,8	2,7	-8	527	536	17	-16
Дальневосточный	1,7	1,8	1,5	1,4	-4	405	452	11	-11
Россия	2,4	2,4	1,6	1,6	-10	577	580	20	-10
2028–2047									
Северо-Западный	4,8	2,5	1,5	1,7	-16	735	674	36	-14
Центральный	4,8	2,6	1,8	1,4	-14	789	765	32	-11
Приволжский	5,1	2,9	2,4	2,0	-15	812	805	26	-12
Южный	3,5	3,1	1,8	0,3	-13	864	878	26	-5
Уральский	5,4	3,9	3,0	3,4	-14	870	885	25	-21
Сибирский	5,0	3,5	2,6	3,4	-11	765	808	23	-19
Дальневосточный	3,7	3,0	2,0	1,6	-7	584	657	17	-13
Россия	4,8	3,2	2,2	2,0	-14	804	802	27	-13
2080–2099									
Северо-Западный	7,7	7,1	3,6	2,5	-31	1742	1789	72	-20
Центральный	7,7	7,2	4,1	2,5	-25	1755	1846	60	-17
Приволжский	8,6	7,4	4,4	2,8	-27	1724	1824	54	-16
Южный	5,8	8,6	4,4	0,9	-25	1993	1960	52	-8
Уральский	9,5	8,2	5,2	4,8	-26	1741	1855	51	-27
Сибирский	9,4	7,6	5,0	4,7	-24	1648	1745	48	-25
Дальневосточный	8,7	7,3	5,0	2,8	-16	1512	1630	37	-22
Россия	8,6	7,6	4,4	2,9	-26	1759	1834	55	-17

Следует отметить, что хотя абсолютные величины прогнозируемых изменений термических ресурсов различаются по этим сценариям, наблюдается достаточно хорошая их пространственная согласованность. Так, например, минимальное изменение продолжительности вегетации зерновых культур и по сценарию ANS 31 и по GFDL ожидается в Южном ФО (3–8 сут), а максимальное — в Уральском и Сибирском ФО (20–25 сут.) (табл. 5.5 и 5.7).

Пространственно-временные изменения сумм активных температур (выше 10 °С) относительно базового периода на территории ЕЧ России на 2011–2030, 2028–2047 и 2080–2099 гг. по сценариям ANS 31 и GFDL CM3 (RCP8.5) представлены в виде картосхем на рис. 5.3.

Сценарий HAD CM3

Если судить по данным изменений температуры воздуха по сезонам года, приведённым в табл. 5.2, то можно сделать вывод, что сценарий HAD CM3 занимает промежуточное положение между сценариями ANS 31 и GFDL. Общие тенденции показателей термического режима по сценарию HAD сохраняются с незначительными различиями. Поэтому нет необходимости в его детальном анализе.

5.1.3 Изменение влагообеспеченности

В число анализируемых показателей увлажнённости территории включены следующие:

- сумма осадков за вегетационный период ($\Sigma R_{>5^{\circ}\text{C}}$) и за период вегетации зерновых культур ($\Sigma R_{\text{зерн.}}$);
- гидротермический коэффициент Г. Т. Селянинова за май–август (ГТК_{5-8});
- фактическое (АЕ) и потенциальное (РЕ) испарение;
- влагозапасы пахотного слоя почвы (0–20 см) на дату возобновления вегетации (W^4_{20}) и в метровом слое (0–100 см) на середину июля (W^7_{100});

– число дней вегетационного периода с влажностью пахотного слоя почвы 10 мм и ниже ($N_{W20 \leq 10 \text{ мм}}$).

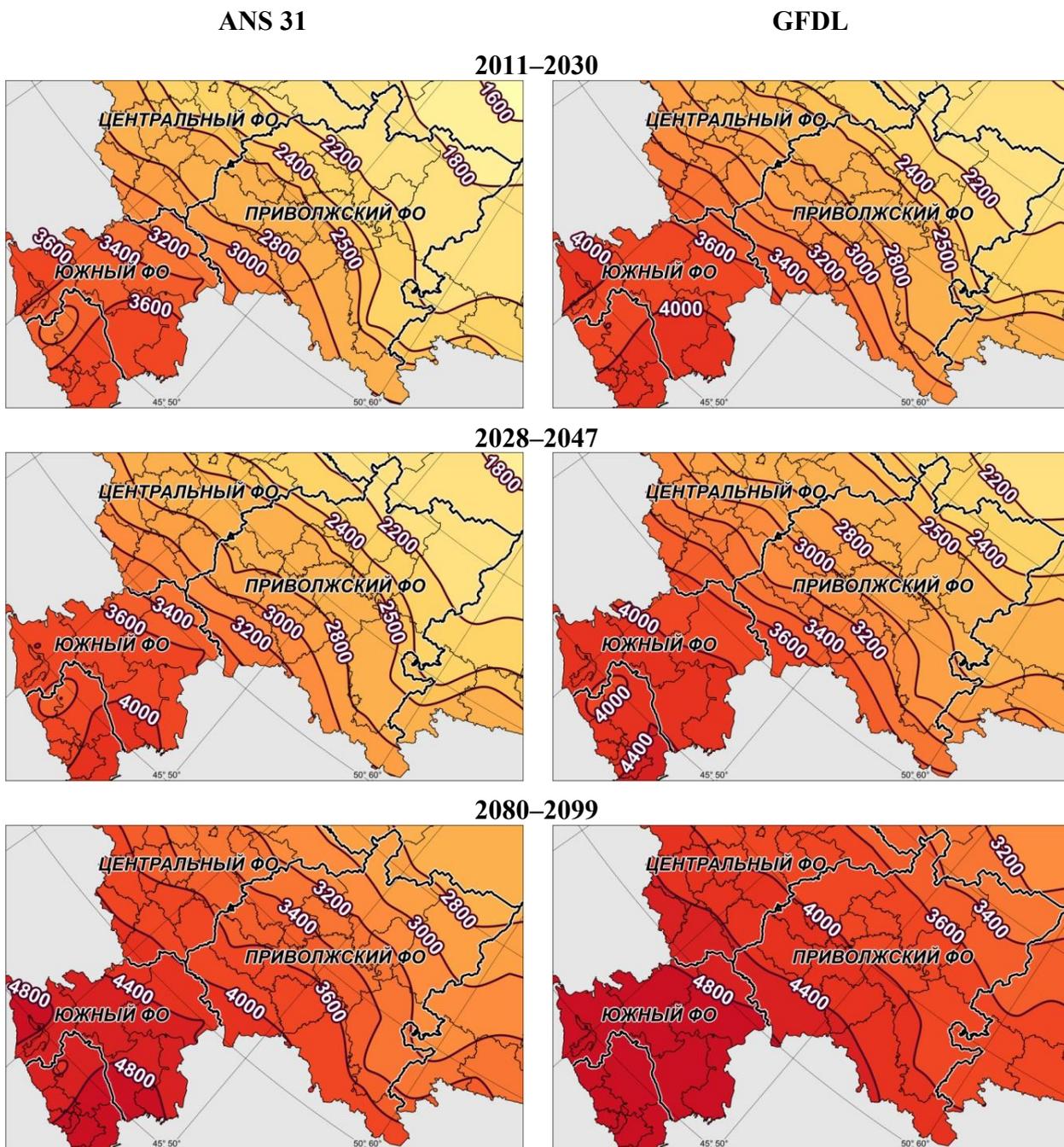


Рисунок 5.3 — Пространственно-временные изменения ($^{\circ}\text{C}$) сумм активных температур (выше 10°C) относительно базового периода на территории ЕЧ России на 2011–2030, 2028–2047 и 2080–2099 гг. по сценариям ANS 31 и GFDL CM3 (сценарий эмиссии RCP8.5)

Сценарий ANS 31

Анализ показателей увлажнённости и термического режима показал, что при реализации ансамблевого сценария на территории земледельческой зоны России можно ожидать некоторого роста засушливости, которая проявляется через уменьшение ГТК и рост потенциального и фактического испарения. К 2030 г. (сценарий антропогенного воздействия RCP4.5) величина ГТК на территории земледельческой зоны уменьшится незначительно (5 %) по отношению к базовому периоду (табл. 5.8).

Таблица 5.8 — Ожидаемые изменения показателей *увлажнённости* относительно базового периода на территории земледельческой зоны России на периоды 2011–2030, 2034–2053 и 2080–2099 гг. по сценарию ANS 31 (сценарий эмиссии RCP4.5)

Федеральный округ	Осадки, %		ГТК ₅₋₈ , ед.	АЕ, мм	РЕ, мм	W ⁴ ₂₀ , мм	W ⁷ ₁₀₀ , мм	N _{W20≤10мм} , сут.
	ΣR _{>5°C}	ΣR _{зерн.}						
2011–2030								
Северо-Западный	8	-11	-0,14	67	113	-3	-28	3
Центральный	8	-6	-0,06	31	88	-1	-17	2
Приволжский	8	-3	-0,03	26	86	-1	-8	1
Южный	5	7	-0,05	3	39	-3	-4	4
Уральский	7	-11	-0,11	20	109	-2	-12	6
Сибирский	7	-6	-0,06	35	100	1	-10	3
Дальневосточный	8	-1	-0,01	12	83	-3	-30	0
Россия	8	-4	-0,06	28	87	-1	-12	3
2034–2053								
Северо-Западный	12	-16	-0,23	91	160	-3	-27	4
Центральный	13	-9	-0,12	47	138	-3	-18	4
Приволжский	12	-4	-0,09	32	127	-2	-13	2
Южный	10	4	-0,07	9	65	-1	-6	4
Уральский	8	-13	-0,21	33	170	-2	-11	10
Сибирский	9	-12	-0,14	49	157	1	-13	4
Дальневосточный	10	-5	-0,09	41	147	-4	-35	0
Россия	11	-7	-0,13	40	133	-2	-14	4
2080–2099								
Северо-Западный	22	-19	-0,28	134	244	-4	-35	6
Центральный	20	-11	-0,20	64	200	-2	-26	8
Приволжский	19	-7	-0,13	51	192	-2	-14	6
Южный	13	-3	-0,08	18	93	-1	-4	8
Уральский	14	-16	-0,22	55	245	-4	-10	10
Сибирский	15	-10	-0,16	73	229	1	-12	6
Дальневосточный	14	-4	-0,16	73	224	-2	-33	1
Россия	18	-10	-0,17	61	196	-2	-17	7

К середине столетия (2034–2053 гг.) возможный диапазон колебаний ГТК по федеральным округам составит от -0,07 до -0,23, а к концу столетия

(2080–2099 гг.) — от –0,08 до –0,28 (или 22–28 %) в Южном и Северо-Западном ФО соответственно.

К концу столетия для RCP8.5 степень засушливости (по величине ГТК), возрастет значительно. ГТК уменьшится на –0,36 или на 26 % относительно базового периода (табл. 5.9). Максимальные отрицательные аномалии ГТК согласно этому сценарию будут наблюдаться в Центральном (–30 %), Северо-Западном (–29 %) и Уральском (–28 %) ФО.

Таблица 5.9 — Ожидаемые изменения показателей *увлажнённости* относительно базового периода на территории земледельческой зоны России на периоды 2011–2030, 2028–2047 и 2080–2099 гг. по сценарию **ANS 31** (сценарий эмиссии **RCP8.5**)

Федеральный округ	Осадки, %		ГТК ₅₋₈ , ед.	АЕ, мм	РЕ, мм	W ⁴ ₂₀ , мм	W ⁷ ₁₀₀ , мм	N _{W20≤10мм} , сут.
	ΣR _{>5°C}	ΣR _{зерн.}						
2011–2030								
Северо-Западный	8	–14	–0,15	73	121	–2	–28	4
Центральный	7	–9	–0,10	28	88	–2	–16	2
Приволжский	7	–5	–0,06	22	85	–2	–9	2
Южный	6	5	–0,05	3	40	–2	–4	3
Уральский	6	–14	–0,16	17	107	–3	–11	6
Сибирский	7	–7	–0,08	36	105	1	–10	3
Дальневосточный	7	–4	–0,03	14	82	–4	–30	0
Россия	7	–6	–0,09	27	88	–2	–12	3
2028–2047								
Северо-Западный	12	–18	–0,25	96	166	–3	–27	4
Центральный	11	–12	–0,18	39	133	–3	–20	5
Приволжский	11	–7	–0,12	27	123	–2	–12	3
Южный	7	0	–0,09	4	62	–1	–6	4
Уральский	7	–14	–0,22	34	169	–2	–10	9
Сибирский	9	–12	–0,15	51	164	1	–12	5
Дальневосточный	9	–5	–0,11	33	138	–4	–34	0
Россия	10	–9	–0,15	37	132	–2	–14	5
2080–2099								
Северо-Западный	36	–28	–0,54	154	333	–4	–56	11
Центральный	30	–23	–0,45	57	234	–1	–34	8
Приволжский	34	–14	–0,29	51	230	–1	–19	9
Южный	13	–14	–0,17	6	98	–1	0	9
Уральский	20	–26	–0,44	44	308	–3	–17	19
Сибирский	20	–24	–0,36	73	298	1	–22	9
Дальневосточный	26	–13	–0,31	95	310	–3	–43	1
Россия	27	–20	–0,36	59	242	–1	–23	10

Эти оценки могут служить верхней границей оценок изменения ГТК по ансамблевому сценарию. Заметим, что значение ГТК ≤ 0,6 ед. является одним из критериев отнесения территории субъекта РФ к неблагоприятной для

производства сельскохозяйственной продукции территории (Правила отнесения ..., 2015).

Количество выпавших осадков за период вегетации зерновых культур снижается на 4 и 10 % на периоды 2011–2030 и 2080–2099 гг., соответственно для сценария RCP4.5 (табл. 5.8). Для варианта сценария RCP8.5 соответствующие оценки составляют –6 и –20 % (табл. 5.9). За тёплый период года количество осадков ($\Sigma R_{>5^{\circ}\text{C}}$) увеличивается, но это, прежде всего, связано с увеличением продолжительности вегетационного периода (см. табл. 5.4 и 5.5).

Снижение запасов влаги в почве на начало вегетации в пахотном слое (W^4_{20}) и на середину июля в метровом слое (W^7_{100}) практически на всей рассматриваемой территории (за исключением отдельных областей Сибирского ФО) также указывает на некоторое ухудшение условий влагообеспеченности посевов сельскохозяйственных культур. Расчёты (RCP4.5) показывают, что число дней вегетационного периода, когда влажность пахотного слоя почвы снижается до критического уровня 10 мм (ОЯ «Почвенная засуха»), увеличится на 3 сут. к 2030 г. и на 7 сут. к 2099 г. (табл. 5.8). По отдельным ФО ожидается рост этого показателя в интервале от 1 (Дальневосточный ФО) до 10 сут. (Уральский ФО). На территории достаточно увлажнённых северо-западных областей и Дальнего Востока увеличение числа дней с критической степенью увлажнённости пахотного слоя до 1–6 сут., вероятно, не повлияет на агроклиматические условия произрастания сельскохозяйственных культур. Максимальные значения этого показателя получены для сценария эмиссии RCP8.5 к 2099 г. и составляют ~10 сут.: от 1 до 19 сут. (табл. 5.9).

Сценарий GFDL CM3

Изменения показателей увлажнённости территории России по ФО, рассчитанные по сценарию GFDL CM3, представлены в табл. 5.10 и 5.11.

При реализации этого сценария (RCP4.5) ГТК к 2030 г. по земледельческой зоне России увеличится на 0,08 (–0,03...+0,15) ед.; к 2053 г. уменьшится на 0,07 (0,00...–0,17) ед. и останется практически неизменным к 2099 г. — 0,01 (–0,14...+0,15) ед. (табл. 5.10). Выделяется территория Приволжского ФО, где до конца столетия прогнозируемые изменения ГТК будут положительными.

Таблица 5.10 — Ожидаемые изменения показателей *увлажнённости* относительно базового периода на территории земледельческой зоны России на периоды 2011–2030, 2034–2053 и 2080–2099 гг. по сценарию **GFDL CM3** (сценарий эмиссии **RCP4.5**)

Федеральный округ	Осадки, %		ГТК _{5–8} , ед.	AE, мм	PE, мм	W ⁴ ₂₀ , мм	W ⁷ ₁₀₀ , мм	N _{W20≤10мм} , сут.
	ΣR _{>5°C}	ΣR _{зерн.}						
2011–2030								
Северо-Западный	29	4	0,07	143	215	–4	–25	5
Центральный	23	11	0,00	79	171	–3	–19	3
Приволжский	34	35	0,14	89	192	–1	–14	–5
Южный	18	17	–0,03	20	61	0	–5	1
Уральский	31	15	0,11	79	225	–3	–11	0
Сибирский	31	8	0,15	93	208	1	–13	1
Дальневосточный	14	–2	0,02	41	154	–5	–36	1
Россия	28	18	0,08	81	177	–2	–15	0
2034–2053								
Северо-Западный	35	1	–0,07	168	278	–4	–33	7
Центральный	29	12	–0,13	79	210	–3	–23	6
Приволжский	34	27	0,00	86	229	–1	–16	1
Южный	17	18	–0,08	17	76	0	–6	–1
Уральский	29	10	–0,09	75	280	–2	–14	8
Сибирский	27	–9	–0,11	92	271	1	–17	5
Дальневосточный	17	–5	–0,17	67	227	–3	–43	0
Россия	29	13	–0,07	83	220	–1	–18	4
2080–2099								
Северо-Западный	54	1	–0,06	226	390	–3	–47	10
Центральный	49	17	–0,05	135	305	–3	–35	7
Приволжский	65	42	0,15	154	348	–2	–23	0
Южный	19	22	–0,13	16	94	–1	–4	15
Уральский	52	6	0,00	121	400	–2	–21	13
Сибирский	50	8	–0,01	147	380	0	–20	7
Дальневосточный	28	–10	–0,14	104	310	–3	–42	2
Россия	50	21	0,01	132	317	–2	–25	7

Суммы осадков за период от всходов до уборки зерновых культур увеличатся по всем ФО, за исключением Дальневосточного и Сибирского (к середине столетия). В основных зернопроизводящих регионах — Приволжском, Южном и Уральском ФО — осадки возрастут на 15–35, 10–27

и 6–42 % к началу, середине и концу 21 века соответственно. В течение тёплого периода года увеличение количества выпавших осадков будет значительным и составит от 28 % (2011–2030 гг.) до 50 % (2080–2099 гг.) (табл. 5.10).

Таблица 5.11 — Ожидаемые изменения показателей *увлажнённости* относительно базового периода на территории земледельческой зоны России на периоды 2011–2030, 2028–2047 и 2080–2099 гг. по сценарию **GFDL CM3** (сценарий эмиссии **RCP8.5**)

Федеральный округ	Осадки, %		ГТК ₅₋₈ , ед.	АЕ, мм	РЕ, мм	W ⁴ ₂₀ , мм	W ⁷ ₁₀₀ , мм	N _{W20≤10мм} , сут.
	ΣR _{>5°C}	ΣR _{зерн.}						
2011–2030								
Северо-Западный	28	–5	–0,06	129	203	–4	–27	4
Центральный	23	5	–0,09	61	156	–3	–19	5
Приволжский	28	20	0,04	66	169	–1	–14	–3
Южный	16	25	–0,04	27	79	–1	–6	1
Уральский	21	–3	–0,06	62	210	–2	–12	5
Сибирский	21	–5	–0,05	74	204	1	–17	3
Дальневосточный	13	–1	–0,06	37	160	–3	–40	1
Россия	23	9	–0,03	66	166	–1	–16	2
2028–2047								
Северо-Западный	37	–6	–0,11	170	275	–5	–34	6
Центральный	28	4	–0,15	73	200	–2	–24	5
Приволжский	35	22	0,01	89	232	–2	–15	–2
Южный	18	24	–0,07	24	96	–2	–7	6
Уральский	27	–4	–0,12	75	288	–4	–14	6
Сибирский	28	–7	–0,10	92	269	1	–17	5
Дальневосточный	15	–3	–0,13	60	214	–3	–42	0
Россия	29	9	–0,07	83	222	–2	–18	3
2080–2099								
Северо-Западный	73	–9	–0,43	248	467	–3	–60	14
Центральный	54	–2	–0,36	121	324	–1	–41	9
Приволжский	70	21	–0,19	129	333	–1	–22	–1
Южный	16	9	–0,20	14	148	–1	1	22
Уральский	55	–6	–0,36	106	392	1	–19	14
Сибирский	66	–8	–0,20	153	423	1	–21	6
Дальневосточный	45	–16	–0,26	128	362	–4	–42	7
Россия	57	4	–0,27	124	338	–1	–26	8

Несмотря на прогнозируемое увеличение количества осадков, как показывают расчёты, можно ожидать снижения запасов влаги в почве: незначительного на начало вегетации в пахотном слое (W⁴₂₀) и более значимого на середину июля в метровом слое (W⁷₁₀₀) по всем ФО. В Приволжском, Южном и Сибирском ФО, это снижение незначительное и составит лишь 1–2 мм в пахотном слое почвы. В целом по условиям режима

увлажнённости этот сценарий можно условно отнести к гумидному типу потепления (табл. 5.10).

5.1.4 Изменение продуктивности зерновых культур и биоклиматического потенциала

Основу оценок последствий будущих изменений климата на сельское хозяйство составляют расчёты с использованием физико-математических моделей климата разного пространственного разрешения. На основе модельных оценок рассчитываются агроклиматические индексы, позволяющие оценить связь между климатом и продуктивностью сельскохозяйственных культур (Rosenzweig et al., 2000; Qian et al., 2010; Trnka, 2012; Trnka et al., 2014; Lioubimtseva et al., 2015; и др.). Среди инструментов оценки воздействий изменений климата на агросферу выделяются два основных — это регрессионные и динамические модели, использующие в качестве входной информации результаты расчётов климатических моделей.

С помощью регрессионных моделей достигнут заметный прогресс в оценке влияния изменений климата на продуктивность сельскохозяйственных культур (Lobell and Burke, 2010; Deschênes and Greenstone, 2007; Schlenker and Roberts, 2009; Ortiz-Bobea and Just, 2012; Tchebakova et al., 2009, 2016). Среди таких моделей можно выделить интегрированную региональную модель (IRMA) (Wechsung et al., 2008), которая активно используется для оценки уязвимости сельскохозяйственного производства в Восточной Германии в условиях изменяющегося климата.

Динамические модели формирования урожая предпочтительнее при оценке влияния изменений климата на сельское хозяйство (Ortiz-Bobea and Just, 2012; Novel Methods ..., 2018).

Такие модели, разработанные для отдельных реперных точек, сельскохозяйственных регионов и земного шара в целом, используют исторические данные об урожайности и метеорологические наблюдения

(Rosenzweig, Parry, 1994; Mearns et al., 1995; Semenov et al., 1995; Sirotenko et al., 1997; Alcamo et al., 2007; Lotze-Campen et al., 2008; Tao et al., 2009; Lehmann et al., 2013; Schierhorn et al., 2014; Krysanova et al., 1998, 2015). Важное преимущество динамических моделей: они способны моделировать урожайность с учётом климатических и не климатических факторов: изменением концентрации углекислого газа и тропосферного озона в атмосфере, интенсивности использования удобрений, регуляторов роста, норм высева, ирригации и других технологических приёмов.

Прогнозы воздействия изменения климата на урожайность сельскохозяйственных культур по своей сути неопределённые (Godfray et al., 2010). Моделируемые воздействия изменения климата на продуктивность сельскохозяйственных культур отличаются в разных моделях из-за различий в их структуре и в значениях параметров. Доля неопределённости в прогнозах воздействия изменения климата обусловленная вариациями между моделями сельскохозяйственных культур, больше, чем неопределённость обусловленная вариациями между моделями общей циркуляции и методами их динамического или статистического даунскейлинга (метод получения климатических данных высоко разрешения из МОЦА с относительно низким разрешением) (Asseng et al., 2013).

Неопределённость в моделируемых воздействиях возрастает с увеличением концентрации CO_2 и связанным с этим потеплением. Эта неопределённость может быть уменьшена за счёт уточнения соотношения между ростом температуры и увеличением CO_2 в моделях МОЦА и лучшей количественной оценки за счёт использования многомодельных ансамблей (Asseng et al., 2011).

Количественно неопределённость часто оценивается при прогнозировании будущих выбросов парниковых газов и их влияния на климат (Moss et al., 2010). В то же время мультимодельный анализ неопределённости реакции сельскохозяйственных культур на изменение климата проводился редко, поскольку систематические и объективные

сравнения между динамическими моделями продукционного процесса сельскохозяйственных культур затруднительны (Godfray et al., 2010; White et al., 2011).

Самое полное на сегодняшний день стандартизированное сопоставление динамических моделей сельскохозяйственных культур представлено в серии публикаций (Asseng et al., 2013; Rosenzweig et al., 2013). Анализировались и сравнивались 27 динамических моделей яровой пшеницы. При этом моделируемая урожайность зерна варьировалась в широких пределах, хотя медианные значения и были близки к наблюдаемой урожайности в однолетних экспериментах для четырёх выбранных регионов: в Нидерландах, Аргентине, Индии и Австралии.

Диапазон моделируемых урожаев удалось значительно уменьшить после полной калибровки, так что >50 % урожаев от калиброванных моделей уместились в пределах среднего коэффициента вариации (CV%) ($\pm 13,5$ %) из >300 полевых опытов с пшеницей (Asseng et al., 2013).

В процессе сравнения установлено, что отдельные модели способны точно моделировать урожайность пшеницы при различных условиях водно-теплового режима, особенно если входной информации достаточно для настройки модели.

Таким образом, динамические модели сельскохозяйственных культур способны точно моделировать измеренный урожай зерна и другие компоненты урожая в различных условиях, если входной информации достаточно.

В итоге авторы (Asseng et al., 2013) приходят к следующим выводам:

1) Прогнозы по отдельным моделям сельскохозяйственных культур не отражают существенных неопределённостей, которые, как известно, существуют в реакции сельскохозяйственных культур на изменение климата.

2) Ансамбли динамических моделей обладают потенциалом для количественной оценки значительного и до сих пор не оценённого

компонента неопределённости при моделировании производственного процесса сельскохозяйственных культур.

3) Необходимо совершенствовать модели производственного процесса, чтобы точнее отражать влияние теплового стресса и высокотемпературных воздействий CO₂ на рост растений и формирование урожая.

Имитационная система КПУ, созданная на основе динамической модели Погода-Урожай, как и упомянутые выше имитационные системы и модели, позволяет оценить агроклиматические последствия изменения климата, и, в первую очередь, оценить ожидаемые изменения продуктивности зерновых культур. По своим функциональным свойствам система КПУ сравнима с моделями, тестируемыми в проекте сравнения моделей продуктивности AgMeet, и, в то же время, имеет ряд преимуществ.

Её специфическими особенностями является детальный учёт старения и распада биомассы, включая повторную утилизацию продуктов разложения, наличие блока водного режима, позволяющего рассчитать динамику влажности почвы для всех основных типов почвы земледельческой зоны РФ. Наличие блока минерального питания растений позволяет учитывать процессы антропогенной деградации почв. Возможна оценка прямых эффектов CO₂ и увеличения содержания тропосферного озона на растения (тип С3) через устьичное регулирование (см. гл. 1). Для снижения порога неопределённости оценок, возникающих при расчётах, по выходным данным РКМ с помощью системы КПУ можно получить вероятностный прогноз урожайности зерновых культур при изменении климата. Подробно этот вопрос будет рассмотрен в следующем разделе (5.2).

Перейдём к оценке возможных изменений показателей продуктивности с использованием КПУ при наиболее вероятных сценариях изменения климата в 21 столетии. Рассматривались изменения двух показателей продуктивности: урожайности яровых зерновых культур и биоклиматического потенциала.

Биоклиматический потенциал

Биоклиматический потенциал (БКП) характеризует первичную чистую (нетто) продукцию агрофитоценозов и имеет определенные преимущества по сравнению с расчётной урожайностью конкретных сельскохозяйственных культур поскольку учитывает увеличение продолжительности тёплого периода года при потеплении и не зависит от степени адаптации той или иной системы земледелия к изменяющимся климатическим условиям.

В табл. 5.12 приведены изменения БКП по ФО России по сценариям ANS 31, GFDL CM3 и HAD CM3 для временных срезов: 2011–2030 гг. (S2), 2034–2053 и 2028–2047 гг. (S3), 2041–2060 гг. (S4), 2080–2099 гг. (S5) при двух вариантах антропогенного воздействия RCP4.5 и RCP8.5. Основные полученные результаты опубликованы в работах автора (Павлова, 2010, 2011, 2012; Павлова, Карачёнова, 2016).

Важный общий вывод, следующий из данных табл. 5.12 — глобальное потепление по трём рассматриваемым сценариям (ANS 31, GFDL и HAD) при умеренном антропогенном воздействии (RCP 4.5) приведёт практически повсеместно к росту БКП на территории России. Исключение составляет территория Южного ФО, где в начале и середине столетия величина БКП понизится примерно на 8–11 % (GFDL). Средние значения БКП современной земледельческой зоны при естественном увлажнении и плодородии повысятся к 2053 г. (S3) на 12,3; 10,2 и 11,0 % по сценариям ANS 31, GFDL и HAD соответственно. Для достаточно увлажнённой территории Северо-Западного ФО рост БКП будет ещё более значительным — на уровне 23–27 %.

При реализации сценария эмиссии RCP8.5 рост БКП сохранится до середины столетия на всей территории России, за исключением Южного ФО (ANS 31, GFDL). К концу века (2080–2099 гг.) средние оценки БКП по территории России уменьшаются на: –0,8; –6,6 и –4,2 % по сценариям ANS 31, GFDL и HAD соответственно (табл. 5.12).

Таблица 5.12 — Изменение БКП по ФО России в 21 веке по сценариям изменения климата ANS 31, GFDL CM3 и HAD CM3 при сценариях эмиссии RCP4.5 и RCP8.5

Федеральный округ	Изменение продуктивности, %							
	сценарий эмиссии RCP4.5				сценарий эмиссии RCP8.5			
	период*							
	S2	S3	S4	S5	S2	S3	S4	S5
рост содержания CO ₂ , %								
	20	35	43	67	28	39	51	80
ANS 31								
Северо-Западный	13,2	23,0	26,8	43,3	13,4	22,3	26,1	21,4
Центральный	8,8	15,6	18,7	28,7	7,8	12,9	12,0	0,1
Приволжский	10,5	13,0	15,8	24,6	9,8	11,4	10,6	-2,8
Южный	-0,2	-1,1	1,0	5,8	-1,4	-3,4	-6,6	-14,1
Уральский	6,2	10,7	16,7	26,2	6,7	11,5	12,7	-2,7
Сибирский	9,2	13,5	17,3	27,0	8,8	14,4	13,0	1,1
Дальневосточный	8,6	12,9	15,5	27,9	8,9	11,7	10,4	2,7
Россия	8,2	12,3	15,6	25,1	7,7	11,1	10,5	-0,8
GFDL								
Северо-Западный	17,2	26,1	34,7	45,2	16,1	23,1	20,3	9,6
Центральный	7,2	11,4	16,0	26,4	3,8	6,9	0,4	-7,8
Приволжский	9,4	13,3	9,0	28,4	5,6	8,1	2,4	-5,2
Южный	-10,9	-7,8	-10,3	0,0	-7,9	-6,5	-8,8	-9,2
Уральский	10,7	11,7	5,5	22,0	4,1	5,8	3,5	-16,0
Сибирский	12,3	8,3	3,5	22,6	3,4	9,1	9,9	-8,2
Дальневосточный	3,3	3,5	9,1	13,4	2,0	5,9	2,1	-20,8
Россия	7,3	10,2	9,0	23,9	3,9	7,2	3,4	-6,6
HAD								
Северо-Западный	16,3	26,8	31,9	40,9	30,2	43,3	43,2	16,7
Центральный	14,6	17,2	22,6	19,8	24,2	30,4	26,2	0,1
Приволжский	12,0	9,0	12,7	11,8	15,7	19,9	22,5	-8,8
Южный	3,2	1,0	3,5	1,8	4,0	6,9	7,6	-4,5
Уральский	7,1	3,8	7,7	7,9	12,9	19,5	23,4	-17,9
Сибирский	7,1	10,5	14,9	15,4	16,1	21,2	26,5	-5,5
Дальневосточный	9,2	18,3	20,6	24,4	23,4	29,5	35,1	11,0
Россия	10,4	11,0	15,0	15,1	16,9	22,7	24,0	-4,2

Примечание: * — обозначение см. в (5.1).

Отметим, что оценки БКП для варианта RCP8.5 по ансамблевому сценарию ANS 31 и сценарию GFDL CM3, представленные в табл. 5.12, в среднем по территории России достаточно хорошо согласуются между собой, но могут различаться для отдельных регионов и федеральных округов.

Урожайность зерновых культур

Необходимо рассматривать и возможные негативные последствия потепления. Важнейшее из них — снижение урожайности зерновых культур 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.

Табл. 5.13 содержит данные моделирования урожайности зерновых культур на прогнозируемые климатические изменения на примере яровой пшеницы по сценариям ANS 31, GFDL CM3 и HAD CM3. При варианте эмиссии RCP4.5 в целом по территории России оценки изменений продуктивности зерновых останутся положительными до конца столетия и составят от 9 до 12 % (ANS 31 и GFDL) или понизятся незначительно на 1–2 % (HAD CM3).

Продуктивность зерновых культур к середине столетия (S3) при варианте эмиссии RCP8.5 понизится незначительно при реализации сценария GFDL на 0,9–4,5 %. К концу столетия падение продуктивности зерновых по земледельческой зоне в среднем согласно трём сценариям будет значительным: –17,6 % (ANS 31), –16,4 % (GFDL) и –19,7 % (HAD CM3). В «выигрыше» останутся только регионы с достаточным уровнем увлажнённости: Северо-Западный (от 22 до 36 % к середине столетия) и Дальневосточный ФО (от 9 до 46 % к середине столетия).

Особо отметим, что к середине и концу столетия климатически обусловленная урожайность яровой пшеницы при сохранении современного уровня агротехники понизится в основных регионах её возделывания. К концу столетия (ANS 31, RCP8.5) максимального спада продуктивности зерновых культур следует ожидать в регионах с большим валовым сбором: в Приволжском (–25,6 %), Южном (–10,3 %), Уральском (–37,9 %) и Сибирском (–27,3 %) ФО.

Таблица 5.13 — Изменение урожайности яровой пшеницы по ФО России в 21 веке по сценариям изменения климата: ANS 31, GFDL CM3 и HAD CM3 при сценариях эмиссии RCP4.5 и RCP8.5

Федеральный округ	Изменение продуктивности, %							
	RCP4.5				RCP8.5			
	период*							
	S2	S3	S4	S5	S2	S3	S4	S5
рост содержания CO ₂ , %								
	20	35	43	67	28	39	51	80
ANS 31								
Северо-Западный	18,7	25,4	27,0	38,0	15,9	21,9	20,4	14,2
Центральный	9,4	11,9	13,8	18,3	6,9	8,0	4,9	-9,5
Приволжский	3,1	0,3	1,8	4,5	2,0	-1,0	-5,0	-25,6
Южный	-5,1	-5,3	-5,0	-1,2	-5,8	-8,3	-8,0	-10,3
Уральский	-2,7	-7,7	-6,3	-4,8	-3,5	-7,1	-14,2	-37,9
Сибирский	-0,8	-3,8	-1,8	1,2	-1,4	-3,7	-9,6	-27,3
Дальневосточный	13,0	17,0	19,6	30,8	11,7	16,2	16,0	3,4
Россия	3,6	3,0	4,4	8,5	2,2	1,1	-2,4	-17,6
GFDL								
Северо-Западный	27,1	34,4	41,1	45,7	22,7	24,9	18,7	10,9
Центральный	10,7	20,9	24,5	28,1	6,9	8,0	1,5	-6,1
Приволжский	5,2	5,7	-4,3	14,8	0,0	-7,9	-14,8	-17,8
Южный	-13,6	-3,9	-3,5	5,9	-1,4	2,1	2,8	7,6
Уральский	-2,8	-16,5	-28,3	-14,4	-14,0	-29,4	-30,9	-48,9
Сибирский	-2,8	-24,7	-29,8	-12,6	-19,9	-23,3	-22,4	-45,4
Дальневосточный	8,5	9,8	11,9	13,5	2,8	8,8	4,6	-22,6
Россия	3,8	3,4	-0,2	12,0	-0,9	-4,5	-8,4	-16,4
HAD								
Северо-Западный	25,6	25,7	27,1	35,7	29,9	36,4	37,5	6,5
Центральный	18,7	8,1	9,2	11,7	15,0	14,2	17,8	-13,5
Приволжский	3,1	-7,4	-4,7	-11,9	-0,7	-5,3	6,1	-27,8
Южный	3,8	0,2	0,4	-1,8	-4,7	-0,1	0,6	1,1
Уральский	-9,8	-21,4	-17,1	-26,0	-6,3	-11,0	-5,0	-49,5
Сибирский	-5,3	-7,2	-3,9	-8,6	5,9	0,8	1,8	-29,3
Дальневосточный	18,2	26,7	30,8	32,1	43,0	46,0	31,3	4,8
Россия	6,0	-1,1	1,1	-1,7	5,7	4,3	9,2	-19,7

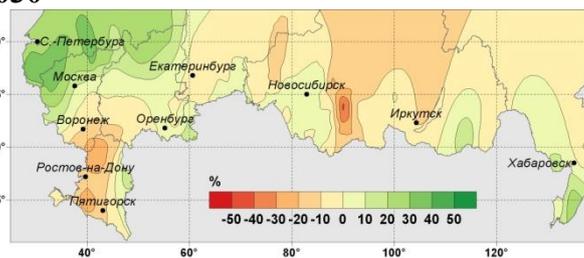
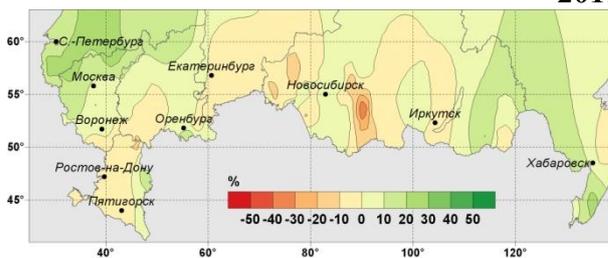
Примечание: * — обозначение см. в (5.1).

На рис. 5.4–5.5 представлены карты, иллюстрирующие пространственное распределение изменений продуктивности яровой пшеницы на территории земледельческой зоны России при реализации ансамблевого сценария ANS 31 и сценария GFDL CM3 при вариантах эмиссии RCP4.5 и RCP8.5 на периоды 2011–2030, 2034–2053 (2028–2047) и 2080–2099 гг.

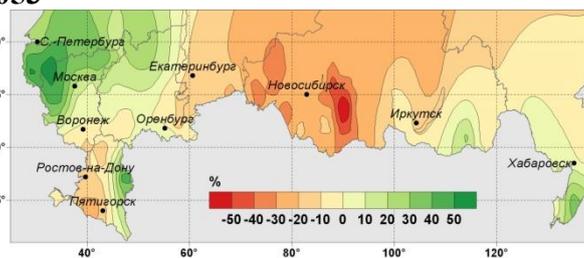
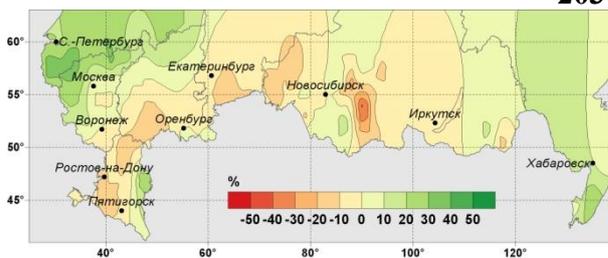
ANS 31

GFDL

2011–2030



2034–2053



2080–2099

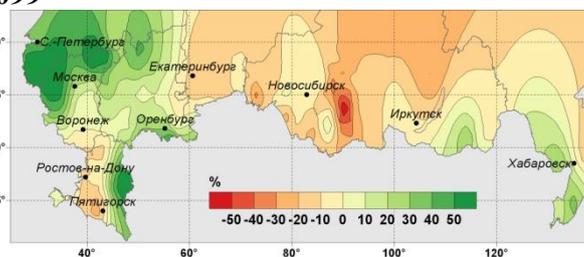
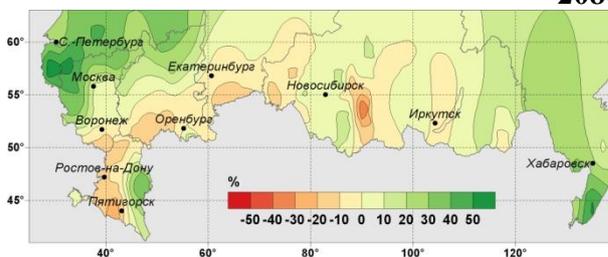


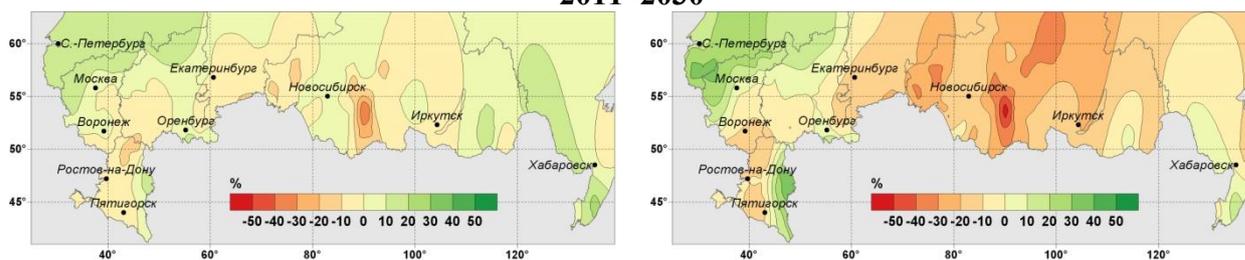
Рисунок 5.4 — Пространственное распределение изменений продуктивности яровой пшеницы на территории земледельческой зоны России при реализации сценариев ANS 31 и GFDL CM3 при варианте эмиссии RCP4.5 на периоды 2011–2030, 2034–2053 и 2080–2099 гг.

Полученные результаты свидетельствуют, что сельское хозяйство России в силу разнообразия почвенно-климатических условий при своевременном принятии мер адаптации в условиях изменяющегося климата располагает резервом повышения продуктивности сельскохозяйственных культур. Отрицательный эффект влияния изменений климата на зерновое хозяйство России может быть перекрыт ростом валовых сборов зерна на территории страны путём сокращения посевов зерновых в тех регионах, где ожидается уменьшение урожайности, и увеличением посевных площадей там, где ожидается её рост.

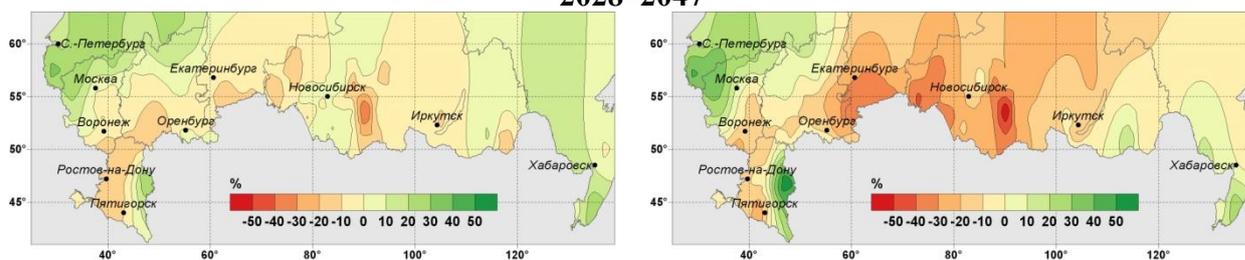
ANS 31

GFDL

2011–2030



2028–2047



2080–2099

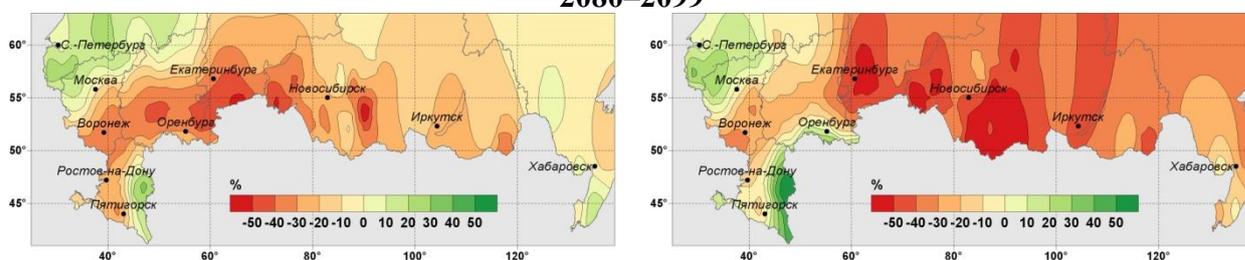


Рисунок 5.5 — Пространственное распределение изменений продуктивности яровой пшеницы на территории земледельческой зоны России при реализации сценариев ANS 31 и GFDL CM3 при варианте эмиссии RCP8.5 на периоды 2011–2030, 2028–2047 и 2080–2099 гг.

Рассчитанные оценки для территории России в целом обобщены и представлены в табл. 5.14. Основной вывод, следующий из представленных здесь данных — глобальное потепление повсеместно приведёт к росту БКП территории России при сценарии суммарной эмиссии CO₂ RCP4.5. Средние значения БКП современной земледельческой зоны при естественном увлажнении и плодородии почв повысятся на 7–10 % к 2030 г., на 10–12 % — к 2053 г., на 9–15 % к 2060 г. и на 15–25 % к 2099 г. (табл. 5.14) относительно базового периода. При этом для достаточно увлажнённых территорий (например, Северо-Западный ФО) рост БКП будет ещё более значительным — на 13–17, 23–27, 27–35 и 40–45 % соответственно. При сценарии эмиссии RCP8.5 рост БКП продолжится только до середины столетия, затем в среднем

для сельскохозяйственной зоны понизится, но незначительно, на 1–6 % (табл. 5.14). Максимального снижения уровня БКП, на 9–14 %, можно ожидать в южных регионах ЕЧ России (табл. 5.12).

Таблица 5.14 — Изменения БКП и урожайности зерновых культур на территории России в 21 веке по 4 климатическим сценариям: ANS 31, GFDL CM3, HAD CM3 и сценарию ИГКЭ (сценарии эмиссии RCP4.5 и RCP8.5)

Климатический сценарий	Сценарий эмиссии								
	RCP4.5				период*	RCP8.5			
	S2	S3	S4	S5		S2	S3	S4	S5
Биоклиматический потенциал									
ANS 31	8,2	12,3	15,6	25,1	7,7	11,1	10,5	–0,8	
GFDL	7,3	10,2	9,0	23,9	3,9	7,2	3,4	–6,6	
HAD	10,4	11,0	15,0	15,1	16,9	22,7	24,0	–4,2	
ИГКЭ	—	—	—	—	—	8,5	—	—	
Зерновые									
ANS 31	3,6	3,0	4,4	8,5	2,2	1,1	–2,4	–17,6	
GFDL	3,8	3,4	–0,2	12,0	–0,9	–4,5	–8,4	–16,4	
HAD	6,0	–1,1	1,1	–1,7	5,7	4,3	9,2	–19,7	
ИГКЭ	—	—	—	—	—	2,9	—	—	

Примечание: * — обозначение см. в (5.1).

При реализации умеренного эмиссионного сценария RCP4.5 урожайность зерновых культур в первой трети столетия, вероятно, повысится. Прогнозируемый её рост составит от 4 до 6 % (табл. 5.14). К концу столетия неопределённость оценок возрастает: при расчётах по сценариям ANS 31 и GFDL можно ожидать повышения урожайности на 9–12 %, а по сценарию HAD — незначительного понижения (2 %). Таким образом, оценку изменения продуктивности зерновых культур к середине 21 века по сценарию ANS 31 и GFDL (RCP4.5) можно рассматривать как нижнюю, а по сценарию HAD — как верхнюю границу оценок.

К концу столетия продуктивность зерновых снизится, если рассматривать вариант суммарной эмиссии CO₂ по сценарию RCP8.5. При

таком варианте глобального потепления максимальный спад продуктивности зерновых составит от 16 до 20 % относительно базового периода.

Следует акцентировать внимание на следующем обстоятельстве. Все полученные оценки ожидаемых изменений продуктивности при расчётах связаны с двумя факторами — с изменением гидрометеорологического режима и с ростом концентрации CO₂ в атмосфере. Обогащение атмосферы углекислым газом («удобрительный эффект») в значительной степени «снимает» отрицательные последствия потепления климата для уровня БКП на территории России. Но для зерновых культур баланс между положительным влиянием повышения содержания двуокиси углерода в атмосфере и отрицательным воздействием аридизации климата на урожайность зерновых в России, как рассмотрено выше, может быть как положительным, так и отрицательным (табл. 5.13).

5.2 Оценка изменений агроклиматических ресурсов и продуктивности зерновых культур на основе региональной климатической модели

5.2.1 Региональная модель изменения климата для вероятностной оценки последствий изменений климата

Оценка последствий изменений климата в агросекторе, как и в других сферах экономики, должна проводиться с учётом неопределённости прогнозных оценок изменений климата, то есть рассматриваться в вероятностном пространстве. В общем случае неопределённость оценок будущих изменений урожайности обусловлена несколькими причинами: во-первых, существуют различия между принятыми ИРСС сценариями будущего радиационного воздействия на глобальную климатическую систему, совокупность которых отвечает ограниченным представлениям о будущем развитии мировой экономики (van Vuuren et al., 2011); во-вторых, системы моделей климата и продуктивности агроэкосистем, работающие по этим сценариям, различаются по уровню сложности и пространственному

разрешению, моделируя разные отклики агроклиматической системы на антропогенное воздействие.

Следующий по значимости источник неопределённости — естественная климатическая изменчивость, накладывающаяся на реакцию агроклиматической системы при антропогенном воздействии. Чтобы минимизировать влияние указанного типа изменчивости на оценку климатических трендов, целесообразно использовать большие модельные климатические ансамбли. Размер ансамбля и высокая пространственная детализация расчётов на базе высокоразрешающих модельных систем играют ключевую роль в оценках будущих изменений в статистике экстремальных погодно-климатических явлений (Kendon et al., 2008). Такой подход позволяет реалистично описывать амплитуду и пространственный масштаб явлений, имеющих редкую повторяемость и приводящих к существенным потерям в агросфере. Современные региональные модели по сравнению с глобальными имеют более высокое разрешение ($\sim 10^1$ км), что обеспечивает более реалистичное описание мезомасштабной компоненты изменчивости (Rummukainen et al., 2015) и более обоснованный расчёт диапазона неопределённости прогнозных оценок регионального климата.

Региональная климатическая модель (РКМ), использованная в ансамблевых расчётах будущих изменений климата (Shkolnik et al., 2017), имеет разрешение 25 км и охватывает всю территорию северо-восточной Евразии. Входной информацией в РКМ служат расчёты будущих изменений климата по глобальной модели (Шнееров и др., 2001; Shkolnik et al., 2017) более низкого разрешения (~ 200 км). Обе модели имеют одинаковое разрешение по вертикали и аналогичные параметризации физических процессов в атмосфере и деятельном слое почвы. Эти процессы включают перенос солнечной и длинноволновой радиации в облачной атмосфере, крупномасштабную конденсацию и конвекцию, турбулентный обмен теплом, влагой и моментом количества движения, перенос тепла и влаги в деятельном слое почвы, процессы таяния (накопления) снега и другие

процессы. В качестве граничных условий на поверхности океана модели используют данные о пяти вариантах эволюции температуры поверхности океана и концентрации морского льда, полученных в глобальных моделях CMIP5: ACCESS1-0 (Австралия), CESM1-CAM5 (США), MPI-ESM-MR (Германия), GFDL-CM3 (США) и INM-CM4 (Россия). Две последние модели прогнозируют, соответственно, наибольшее и наименьшее потепление в 21 веке из всего ансамбля CMIP5, остальные модели дают оценки, близкие к средней по ансамблю.

Разработчики РКМ (Shkolnik et al., 2017) рассчитали оценки изменений регионального климата на основе беспрецедентно большого ансамбля, допускающего вероятностную интерпретацию мезомасштабных климатических воздействий на сельское хозяйство. Были исследованы агроклиматические последствия глобального потепления климата для условий произрастания ведущих сельскохозяйственных культур хлопчатника, яровой пшеницы и ярового ячменя для территории Средней Азии (Школьник и др., 2018; Надёжина и др., 2018).

Результаты 50 численных экспериментов при разных начальных условиях в атмосфере и на подстилающей поверхности суши для трёх десятилетних периодов: 2030–2039, 2050–2059 и 2090–2099 гг. (сценарий эмиссии RCP8.5; van Vuuren, 2011) — позволили получить по 500 реализаций для каждого периода.

Результаты ансамблевых расчётов РКМ были использованы как входные данные для системы КПУ для выполнения серии агроклиматических расчётов.

Для этого автор разработал программный комплекс преобразования модельных расчётов РКМ во входной поток КПУ. Это позволило провести поэтапную обработку среднемесячных метеорологических данных (температура воздуха и месячные суммы осадков) в узлах регулярной сетки и представить их в окончательном виде — соответствующих суточных

значениях на заданной сети метеорологических станций и постов по каждой из 500 реализаций для трех временных срезов 21 столетия.

На основе программы интерполяции, разработанной автором, проведено восстановление всего набора входных параметров системы КПУ. Для каждого элемента ансамбля РКМ ($3 \times 500 = 1500$) рассчитаны начальные условия: фенологические даты (всходов, колошения, созревания, даты 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.). Расчёты в системе КПУ выполнены для территории Приволжского, Южного и чернозёмных областей Центрального ФО (рис. 5.6).

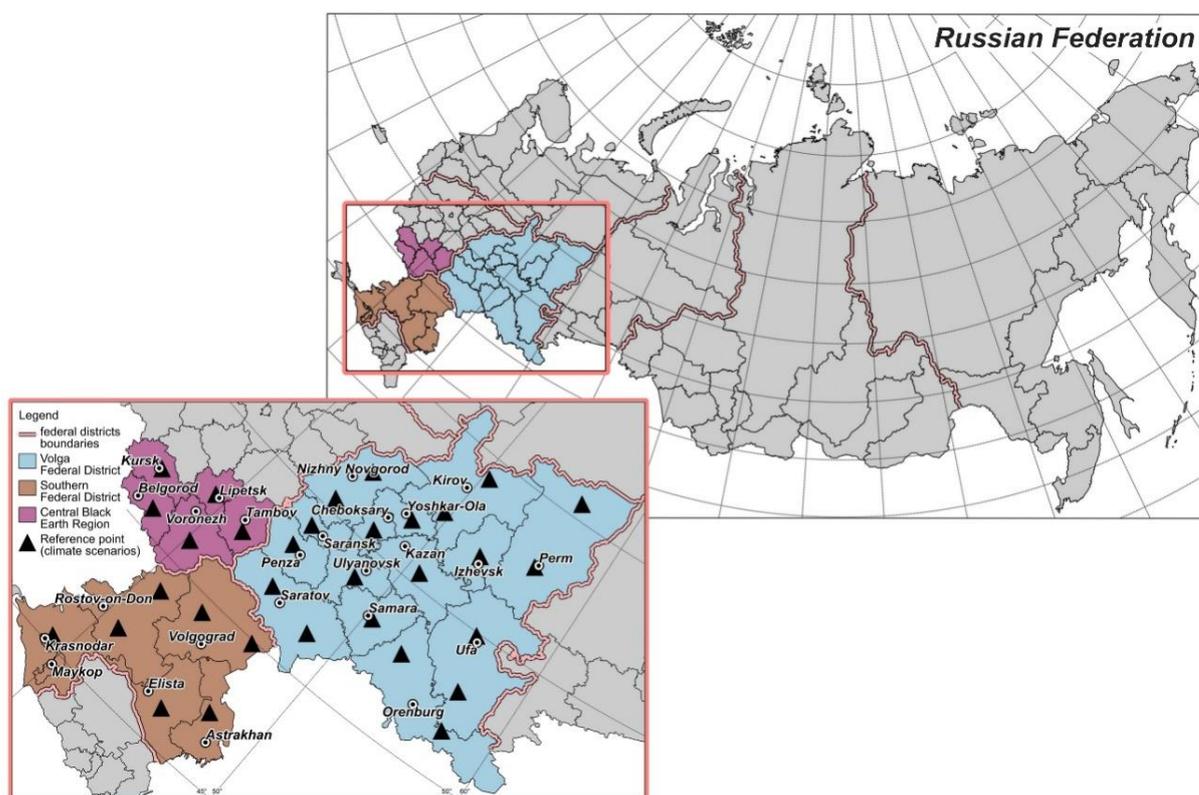


Рисунок 5.6 — Схема расположения сети метеорологических станций и постов для агроклиматических расчётов в системе КПУ на территории основных зерновых регионов ЕЧ России

5.2.2 Прогнозируемые изменения температуры воздуха и осадков

Климатические изменения, соответствующие данным РКМ, приведены в табл. 5.15.

Таблица 5.15 — Изменение сезонных средних температур (°С) и сумм осадков (%), осреднённых по 50 реализациям, относительно базового периода 1990–1999 гг. для трёх временных интервалов: 2030–2039, 2050–2059 и 2090–2099 гг. (по данным РКМ, сценарий эмиссии RCP8.5)

Федеральный округ	Средняя температура воздуха, °С				Сумма осадков, %			
	зима	весна	лето	осень	зима	весна	лето	осень
2030–2039								
Центральный*	2,1	1,7	1,9	1,7	9	14	–7	6
Приволжский	2,2	1,8	1,7	2,0	12	10	–5	10
Южный	1,7	1,6	1,9	1,7	10	15	–1	8
2050–2059								
Центральный*	3,8	3,0	2,9	3,0	18	22	–7	12
Приволжский	4,4	3,5	2,7	3,4	23	17	–5	18
Южный	3,3	2,8	3,0	2,9	19	25	1	15
2090–2099								
Центральный*	7,9	5,6	5,5	5,3	37	36	–18	16
Приволжский	8,4	6,5	5,5	6,2	47	31	–16	28
Южный	6,8	5,3	5,6	5,2	35	42	6	24

Примечание: * Белгородская, Воронежская, Курская, Липецкая и Тамбовская области.

На рассматриваемой территории России с развитым сельским хозяйством в Центральном, Приволжском и Южном ФО ожидается рост зимних температур более значительный, чем температура воздуха в тёплый период года для всех трёх временных периодов. Соответствующие изменения температуры календарной зимы составляют 1,7–2,2; 3,3–4,4 и 6,8–8,4 °С в 2030–2039 гг. (I), 2050–2059 гг. (II) и 2090–2099 гг. (III) соответственно. Изменения температуры весной и летом положительны, но менее значительны: от 1,6 до 1,9 °С (I), от 2,7 до 3,5 °С (II) и от 5,3 до 6,5 °С (III) (табл. 5.15).

В ближайшей перспективе в весенний период, ожидается увеличение осадков на 10–15 % по сравнению с базовым периодом на рассматриваемой территории. В то же время в летний период — снижение на 7 % в

Центральном ФО и на 5 % в Приволжском ФО. К середине и концу столетия тенденции в изменениях весенне-летних осадках сохранятся: увеличение осадков весной и снижение за летний период. Например, к 2090–2099 гг. количество осадков весной увеличится на 31–42 %, а летом понизится на 16–18 % по сравнению с базовым периодом. В Южном ФО количество летних осадков останется на уровне базового периода (–1 %) в 2030–2039 гг., а к 2090–2099 гг. можно ожидать незначительного увеличения — на 6 %. Осенние осадки увеличатся повсеместно, от 6–10 % в 2030–2039 гг. до 16–28 % в 2090–2099 гг.

На рис. 5.7(а) и 5.8(а) представлено пространственное распределение отклонений средней температуры воздуха (°C) и сумм осадков (мм) за календарную весну и лето для трёх временных периодов 2030–2039, 2050–2059 и 2090–2099 гг. от соответствующих величин базового периода 1990–1999 гг. (mean, а). Осреднение оценок выполнялось по 50 реализациям региональной модели ГГО. Здесь представлены также две выбранные климатические реализации: влажная или гумидная (wet, б) и сухая или аридная (dry, в). Критерием для их выбора служил комплексный показатель — урожайность и показатели тепло- и влагообеспеченности культур.

5.2.3 Оценка изменений тепло- и влагообеспеченности

Размерность ансамбля реализаций РКМ (50 реализаций) позволяет получить вероятностные оценки возможного изменения показателей гидротермического режима региона с высокой степенью статистической обеспеченности и с более полным описанием мезомасштабной изменчивости по сравнению с глобальными моделями. В то же время, широкий диапазон модельных реализаций по изменению температуры воздуха и осадков дает возможность оценить множество возможных вариаций климата, включая экстремальные.

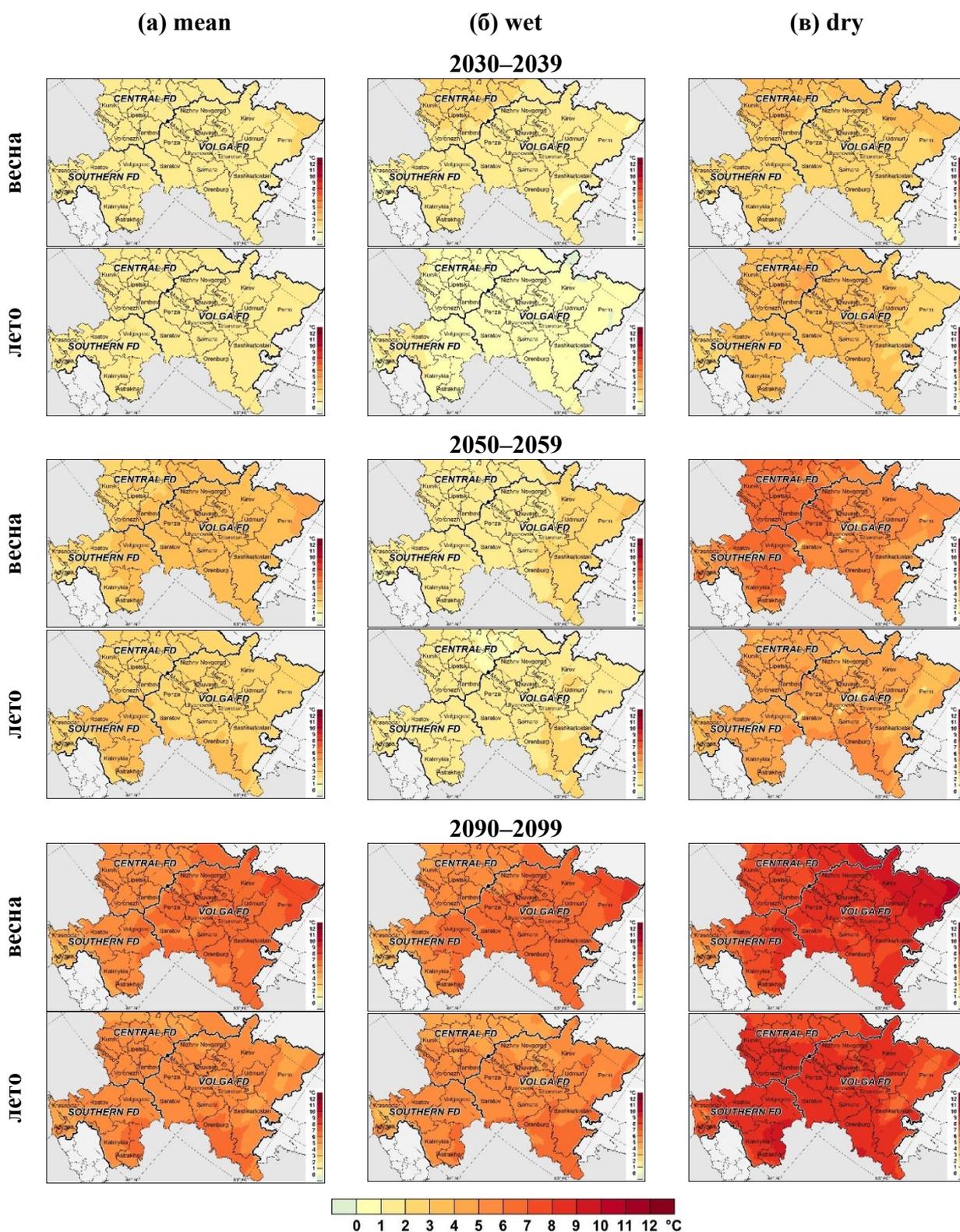


Рисунок 5.7 — Прогнозируемые изменения средней температуры воздуха (°C) за весну и лето относительно базового периода 1990–1999 гг. на 2030–2039, 2050–2059 и 2090–2099 гг. для (а) среднего из 50-ти реализаций, mean; (б) гумидной реализации, wet; (в) аридной реализации, dry. Картограммы построены по данным РКМ ГГО (RCP8.5) в узлах регулярной сетки (0,5° с. ш. × 0,5° в. д.)

Ожидаемые изменения агроклиматических показателей на ЕЧ России на 2030–2039, 2050–2059 и 2090–2099 гг. рассчитаны с помощью имитационной системы КПУ для средних по ансамблю оценок и для двух модельных реализаций: самого влажного (wet) и самого засушливого (dry) климата в 21 веке — и представлены в табл. 5.16.

Таблица 5.16 — Изменения показателей термического и влажностного режимов вегетационного периода яровой пшеницы относительно базового периода 1990–1999 гг. на 2030–2039, 2050–2059 и 2090–2099 гг. для территорий Центрального (ЦФО), Приволжского (ПФО) и Южного (ЮФО) ФО. Расчёты выполнены в имитационной системе КПУ по данным региональной модели изменения климата (сценарий эмиссии RCP8.5)

ФО	Сценарий	Т _{январь} , °С	Т _{июль} , °С	ΣТ ₁₀ , °С	Вегетационный период яровой пшеницы						Дефицит испарения (за тёплый период года), мм	
					дата всходов, сут.	продолжительность периода, сут.	Т _{зерн.} , °С	ΣR _{зерн.} , %	ГТК, ед.	W ⁶ ₁₀₀ , мм		
2030–2039												
ЦФО*	mean	2,2	2,0	401	-5	-5	1,0	-12	-0,14	-17	61	
	wet	1,2	0,2	262	-8	2	-0,2	17	0,19	-20	64	
	dry	1,5	4,0	948	-8	-12	2,3	-26	-0,27	-19	101	
ПФО	mean	2,1	1,8	351	-5	-7	1,2	-13	-0,14	-17	59	
	wet	0,3	0,5	143	-1	-1	0,2	9	0,09	-9	31	
	dry	2,3	4,0	740	-10	-13	2,4	-25	-0,25	-26	92	
ЮФО	mean	1,9	1,9	418	-6	-3	0,5	4	0,07	-8	41	
	wet	1,5	1,1	254	-9	3	-0,6	2	0,01	-8	32	
	dry	0,9	3,4	784	-7	-7	1,3	-3	-0,01	-7	57	
2050–2059												
ЦФО*	mean	3,8	3,0	681	-10	-7	1,2	-11	-0,12	-23	97	
	wet	0,5	1,5	353	-5	-2	0,4	-1	-0,02	-19	71	
	dry	2,4	5,0	1018	-20	-15	3,1	-37	-0,42	-14	140	
ПФО	mean	4,2	2,8	629	-11	-10	1,6	-15	-0,16	-29	101	
	wet	0,9	1,5	376	-9	-4	0,6	-12	-0,15	-22	71	
	dry	2,5	3,8	825	-20	-13	2,2	-20	-0,20	-40	130	
ЮФО	mean	3,3	2,9	720	-10	-4	0,8	5	0,08	-10	63	
	wet	1,5	1,2	435	-7	0	-0,2	17	0,15	-13	44	
	dry	0,9	4,7	1035	-18	-11	2,7	-52	-0,43	3	57	
2090–2099												
ЦФО*	mean	8,4	5,6	1339	-22	-9	1,6	-19	-0,19	-32	137	
	wet	8,8	4,5	1258	-27	-3	0,0	40	0,52	-41	125	
	dry	12,5	8,0	2063	-26	-16	3,7	-32	-0,36	-73	135	
ПФО	mean	8,4	5,6	1271	-22	-14	2,5	-25	-0,26	-45	167	
	wet	9,7	5,4	1261	-23	-14	2,2	-12	-0,12	-47	174	
	dry	11,6	8,1	1917	-29	-19	3,6	-31	-0,29	-46	189	
ЮФО	mean	7,3	5,4	1383	-27	-1	0,6	11	0,13	-24	102	
	wet	7,1	4,8	1348	-44	13	-2,1	65	0,54	-34	104	
	dry	10,0	7,5	1999	-35	-1	1,6	4	0,09	-51	106	

Примечание: * Белгородская, Воронежская, Курская, Липецкая и Тамбовская области.

Как можно видеть, в 21 веке ожидается увеличение расходной части водного баланса — при росте температуры испарение в тёплый период года возрастёт на фоне прогноза слабого роста или уменьшения осадков (табл. 5.16). Рост испаряемости приведёт к значительному увеличению дефицита испарения (разности между потенциальным и фактическим испарением). Диапазон ожидаемого дефицита испарения за тёплый период года может возрасти от ~40–60 мм (2030–2039 гг.) до ~100–170 мм (2090–2099 гг.). В период 2030–2039 гг. изменение степени континентальности климата, определяемой по разности температур июля и января, в среднем по регионам незначительное (0,2–0,3 °С), но к концу 21 века может достигнуть величины 1,9–2,4 °С.

Анализ показывает, что при реализации этого сценария степень засушливости климата увеличится для всех трёх временных интервалов практически на всей рассматриваемой территории. Процесс иссушения будет наблюдаться в Центральном и Приволжском ФО, о чём свидетельствует падение величины ГТК в диапазоне от –0,12 до –0,16 ед. в период 2050–2059 гг. и от –0,19 до –0,26 к концу 21 века, и будет сопровождаться уменьшением запасов влаги в почве. Так, ожидаемые уменьшения запасов влаги в верхнем метровом слое почвы в Приволжском ФО составят для трёх рассматриваемых периодов в 21 веке, соответственно 17, 29 и 45 мм (табл. 5.16).

Ожидаемый рост засушливости территории, по-видимому, в меньшей степени затронет территорию Южного ФО, где наблюдается некоторый рост ГТК (на ~0,07–0,13 ед.) и незначительное снижение июньских запасов влаги в почве в этом регионе (табл. 5.16).

В ближней и среднесрочной перспективе суммы активных температур повысятся на 351–418 °С в 2030–2039 гг. и на 629–720 °С в 2050–2059 гг. (табл. 5.16). Дата всходов яровой пшеницы сдвинется на более ранние сроки — на 5–6 сут. (2030–2039 гг.) и 10–11 сут. (2050–2059 гг.). Суммы осадков

вегетационного периода яровой пшеницы к середине столетия понизятся на 11–15 % в Центральном и Приволжском ФО и повысятся на 4–5 % в Южном относительно базового периода (табл. 5.16). На фоне уменьшения количества атмосферных осадков к концу столетия (на 19–25 %) средняя температура за период вегетации яровой пшеницы в Центральном и Приволжском ФО повысится на 1,6–2,5 °С.

Как отмечено выше, при усилении аридности климата в будущем (в среднем по ансамблю), имеются «экстремальные» прогнозные реализации с относительно благоприятными условиями увлажнения («wet») и, наоборот, с исключительной засушливостью («dry»). Расчёт агроклиматических показателей для этих реализаций даёт представление о верхней границе оценок при прогнозировании воздействий изменений климата на продуктивность сельского хозяйства. Так, к 2050–2059 гг. ожидаемый рост июльской температуры при реализации «dry» составит 3,8–5,0 °С (для сравнения по сценарию «wet» — 1,2–1,5 °С). В этом случае величина ГТК понизится от 0,20 до 0,43 ед., а сумма осадков за период вегетации яровой пшеницы сократится в Приволжском, Центральном и Южном ФО на 20, 37 и 52 %, соответственно (табл. 5.16).

На рис. 5.9 (а) представлены значения сумм температур за период с температурой выше 10 °С, суммы осадков и ГТК за период вегетации яровой пшеницы, осреднённые за базовый период, и соответствующие значения для ансамблевых реализаций «wet» (б) и «dry» (в) на 2050–2059 гг. Разброс оценок вариантов «wet» и «dry», указывает на значительный вклад естественной изменчивости климата в ошибку предсказания ансамблем будущих изменений агроклиматических показателей для рассматриваемой территории.

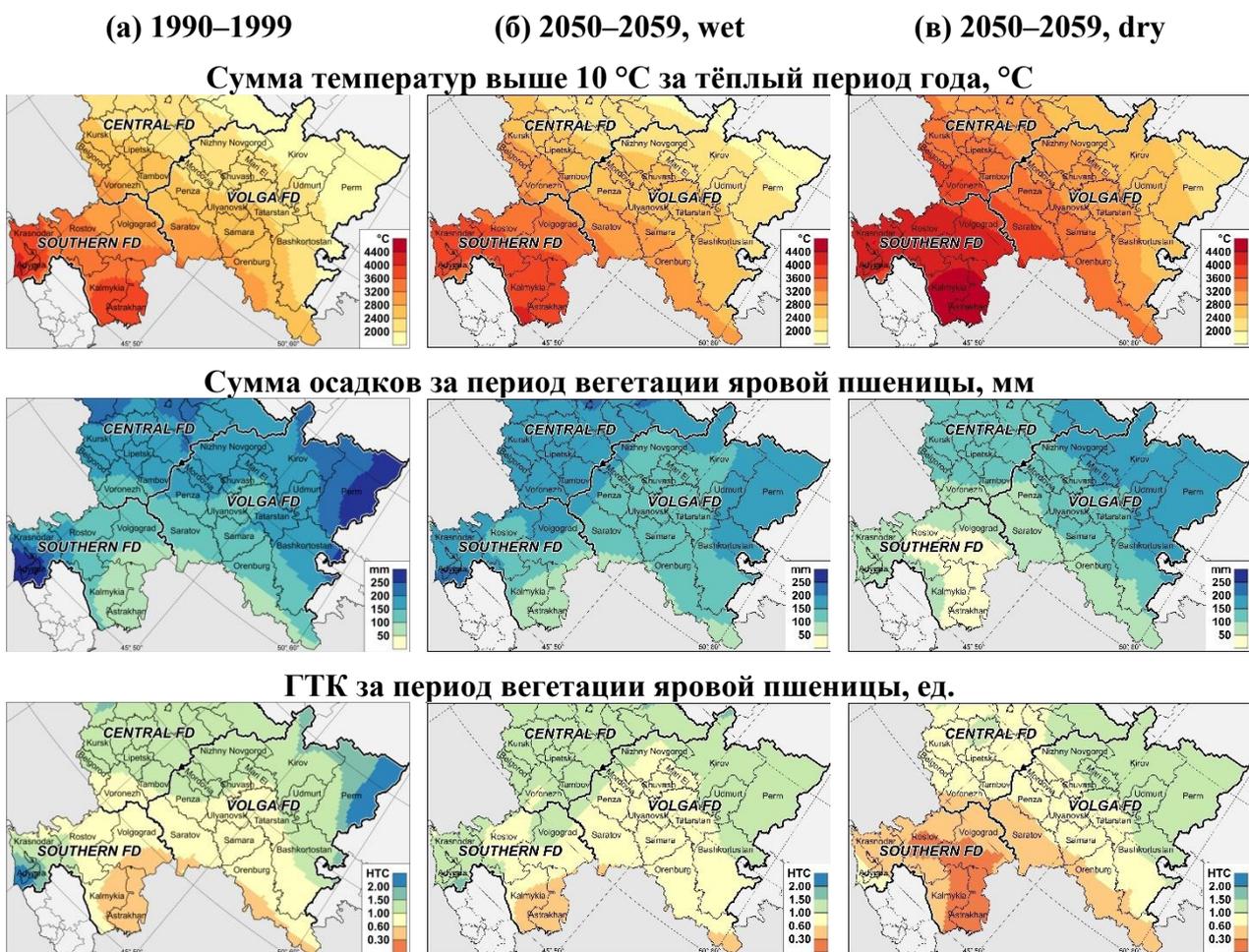


Рисунок 5.9 — Средние значения сумм температур выше 10 °С (°С), суммы осадков (мм) и ГТК (ед.) за базовый период 1990–1999 гг. (а) и на период 2050–2059 гг. при двух реализациях региональной модели изменения климата: (б) влажной (wet), (в) сухой (dry)

5.2.4 Вероятностная оценка изменений продуктивности зерновых культур

В табл. 5.17 и рис. 5.10 представлены оценки климатических воздействий на продуктивность яровой пшеницы в основных ареалах её возделывания в регионе для разных временных горизонтов в 21 веке. Расчёты выполнены с учётом изменения уровня концентрации CO₂ в атмосфере согласно оценкам, приведённым в (Clarke et al., 2007, 2009).

В близкой перспективе (2030–2039 гг.) можно ожидать снижения урожайности на территории Центрального ФО (чернозёмная зона) на $-11,7 \pm 3,0$ %, величина которого к середине века может достигнуть

–15,8±5,1 % относительно базового периода. К концу столетия урожайность зерновых может сократиться на треть при прогнозируемых изменениях климата и при отсутствии адаптационных мер, направленных на предотвращение негативных тенденций в обеспеченности тёплом и влагой посевов сельскохозяйственных культур.

Таблица 5.17 — Средние оценки (из 50-ти реализаций) изменения урожайности яровой пшеницы и соответствующие 95 % доверительные интервалы ($Y \pm \Delta Y$, %) на территории Центрального, Приволжского и Южного ФО. Расчёты в имитационной системе КПУ

Федеральный округ	Среднее изменение по ансамблю, $Y \pm \Delta Y$, %		
	2030–2039	2050–2059	2090–2099
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±3,4
Вся территория	–9,1±2,3	–10,3±3,2	–18,9±2,8

Примечание: * Белгородская, Воронежская, Курская, Липецкая и Тамбовская области.

Полученные средние по ансамблю оценки изменения урожайности яровой пшеницы и соответствующий 95 % доверительный интервал (ΔY , %) для Приволжского ФО показывают, что до середины текущего столетия на этой территории не следует ожидать роста климатически обусловленной урожайности. Снижение продуктивности яровой пшеницы составит –6,7±3,0 % к 2050–2059 гг., что вдвое меньше ожидаемого падения продуктивности в центрально-чернозёмных областях (–15,8±5,1 %). Умеренный рост засушливости климата в ближайшие 2–3 десятилетия на территории Приволжского ФО не окажет существенного влияния на сельское хозяйство.

В Южном ФО снижение урожайности яровой пшеницы в 2030–2039 гг. может достигнуть величины –9,9±2,3 %. При прогнозируемых изменениях агрометеорологических условий к концу столетия (сдвиг даты всходов на более ранние сроки, рост температуры лишь на 0,6 °С и увеличение сумм

осадков на 11 % — см. табл. 5.16) можно ожидать лишь незначительного снижения урожайности яровой пшеницы — на $2,6 \pm 3,4$ %.

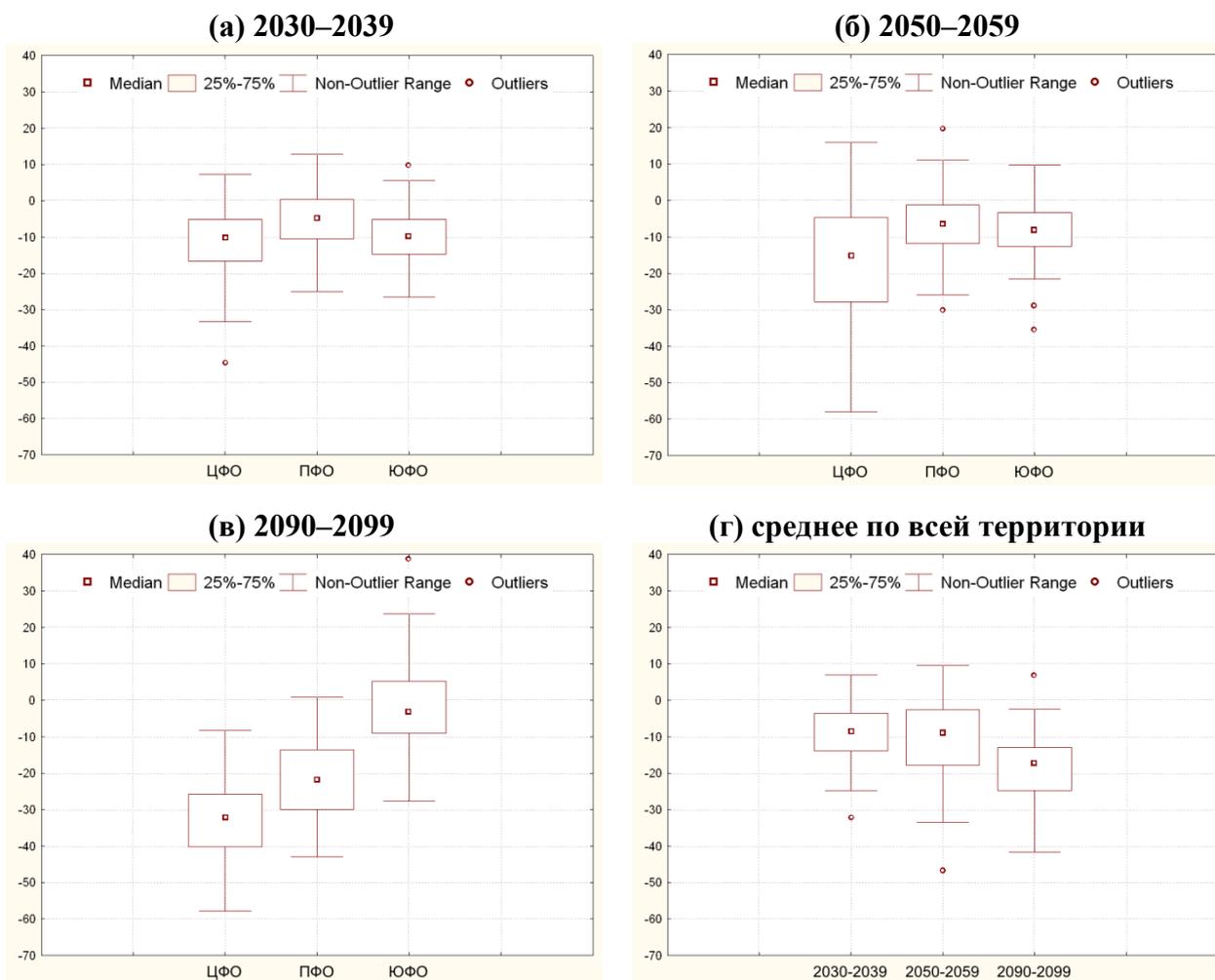


Рисунок 5.10 — Блочная диаграмма предсказанных изменений средней урожайности яровой пшеницы на: (а) 2030–2039, (б) 2050–2059, (в) 2090–2099 гг. в Центральном (ЦФО, чернозёмные области), Приволжском (ПФО) и Южном (ЮФО) ФО и на всей территории в целом (г). Размах «усов» показывает вариации урожаев яровой пшеницы по ФО. Экстремальные значения (выбросы) обозначены точками. Верх, середина и нижняя граница каждого блока есть 25-й, 50-й и 75-й процентиль выборки, концы усов (линии вне блока) отмечают самое нижнее и самое верхнее значение выборки, которые равны 1,5 величины внутривквартильного размаха границ блока

В целом полученные в системе КПУ оценки будущих изменений факторов урожайности в основных зернопроизводящих районах ЕЧ России указывают на усиление в 21 веке неблагоприятных погодно-климатических

условий для выращивания зерновых. Основная причина — 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. В тот же период наибольшие потери продуктивности могут составить $-15,8 \pm 5,1$ % в центрально-чернозёмных областях, наименьшие ($-6,7 \pm 3,0$ %) — в Приволжском ФО. К концу века урожайность зерновых здесь может сократиться на треть в отсутствии адаптационных мер, направленных на предотвращение негативных тенденций в обеспеченности растений влагой и снижением её запасов в почве.

На территории России прогнозируемое потепление приведёт к существенному расширению вегетационного (тёплого) периода года. Суммы температур выше 10 °С возрастут на ~ 600 – 700 °С к 2050–2059 гг. и почти на ~ 1300 – 1400 °С к концу века. Это позволит использовать в земледелии позднеспелые сорта, которые обычно более урожайные. Полученные в системе КПУ оценки показывают, что использование среднеспелых и позднеспелых сортов позволит увеличить урожайность зерновых культур на 15 % в конце 21 века на территории отдельных регионов (Павлова, 2010).

Эффективное использование дополнительных тепловых ресурсов в результате потепления климата может быть достигнуто путём внедрения новых более теплолюбивых культур (сортов), а также в результате выращивания вторых (пожнивных) культур для утилизации тепловых ресурсов, остающихся после уборки основной культуры. Это также приведёт к росту продуктивности и зерновых и кормовых культур даже при сохранении современного агротехнического уровня земледелия.

Использование ансамблей высокоразрешающих систем совместно с имитационными моделями продуктивности агроэкосистем — одна из возможностей для количественной оценки ожидаемых изменений

продуктивности сельскохозяйственных культур и получения вероятностных оценок воздействия климатических изменений на сельскохозяйственный сектор экономики России.

ГЛАВА 6. Метод пространственно-временных аналогов для оценки последствий изменений климата на продуктивность растениеводства

6.1 Пространственные аналоги будущих агроклиматических условий

Разброс модельных оценок и мнений экспертов о возможной реакции сельского хозяйства на ожидаемые изменения природной среды продолжает оставаться очень высоким для многих регионов мира (IPCC, 2013, 2014). Одна из основных причин такого положения — значительные различия между используемыми сценариями изменения климата с одной стороны, и методологии исследований, с другой.

Отдавая должное возможностям имитационных систем, следует заключить, что к задаче оценки влияния изменений климата на продуктивность и устойчивость сельского хозяйства должны привлекаться и другие методы, поскольку многие аспекты сельскохозяйственного производства (экономические, экологические и социальные) не охватываются существующими моделями.

При невозможности разработки и применения достаточно надёжных имитационных моделей эффективным средством прогнозирования откликов сельского хозяйства на изменения климата может служить метод пространственно-временных аналогов.

Этот метод довольно широко и достаточно успешно использовался для определения территорий со сходными условиями климата с целью заимствования и акклиматизации сельскохозяйственных культур, а также приёмов земледелия. Примеры применения этого подхода можно найти в исследованиях Н. И. Вавилова, Г. Т. Селянинова, Ф. Ф. Давитая, С. А. Сапожниковой и других учёных. Практическим результатом применения и развития этого метода явилась известная карта агроклиматических аналогов влажной и сухой субтропических зон СССР, а

также карты агроклиматических аналогов для отдельных сельскохозяйственных культур (Сеянинов, 1966).

Предлагаемый аналоговый подход к оценке последствий изменений климата в агросфере изложен в наших работах (Сиротенко, Павлова, 2003, 2010, 2012).

Предположим, что сценарий изменения климата для данного региона известен, например, рассчитан с помощью той или иной глобальной климатической модели циркуляции атмосферы и океана (МОЦА(О)). Климатические прогнозы (проекции) МОЦА(О) обычно доступны в форме отклонений среднемесячных величин приземной температуры воздуха и атмосферных осадков от величин за базовый период (см. гл. 5). При наличии лишь таких обобщённых данных производные от них агроклиматические показатели также должны быть предельно общими. Классическая агроклиматология в качестве минимального набора показателей предлагает параметры, которые характеризуют теплообеспеченность, влагообеспеченность и условия перезимовки растений.

Для оценки теплообеспеченности используется сумма среднесуточных величин температуры воздуха за период с температурой выше 10 °С (ΣT_{10}). Выбор показателя влагообеспеченности не представляется столь однозначным. Из достаточно обширного числа показателей влагообеспеченности, предложенных разными авторами, мы выбрали гидрометеорологический показатель засухи ΔE (дефицит испарения) А. И. Будаговского (Будаговский, 1964):

$$\Delta E = E_0 - E, \quad (6.1)$$

где E_0 и E — испарение и испаряемость, мм.

Физическая обоснованность ΔE как интегрального показателя влагообеспеченности растений доказана Будаговским. Из анализа уравнений энерго-массообмена слоя растительности следует, что E_0 и E определяются теми же гидрометеорологическими условиями, что и прирост биомассы

растений. Для нашей задачи ΔE рассчитывается за период с температурой выше $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ в системе КПУ.

Для характеристики суровости зимы, следуя Д. И. Шашко (Шашко, 1967), используем среднюю температуру самого холодного месяца года (января) T_{\min} .

Итак, на основании заданного сценария МОЦА(О) прогнозируемые агроклиматические условия i -го района (области) можно представить в виде трёхмерного вектора: $\Sigma T^i, \Delta E^i, T_{\min}^i$. Современные агроклиматические условия России и сопредельных стран представим в виде матрицы размерностью $N \cdot 3$, где N — число строк равное числу регионов в списке аналогов.

Для реализации алгоритма используем также климатические данные по земледельческой зоне бывшего СССР (без Средней Азии и Закавказья), входящие в состав системы КПУ (см. гл. 1).

В качестве показателя меры близости агроклиматических условий удобно использовать суммарную относительную ошибку по модулю:

$$K^{ij} = \sum_{p=1}^n \left| \frac{x_p^i - x_p^j}{x_p^i} \right| \sigma_p, \quad (6.2)$$

где i — номер района, для которого определяется аналог; j — номер аналога; σ_p — нормированные весовые коэффициенты; $(\sum_{p=1}^n x_p = 1)$; n — размерность вектора, характеризующего агроклиматические условия.

Задача сводится к поиску номера аналога, минимизирующего (6.2) на множестве $j\{1, 2, \dots, N\}$.

В табл. 6.1–6.4 представлены результаты расчётов для двух сценариев изменения климата: HAD CM3 и GFDL. Используемая здесь версия сценария GFDL — относительно ранний транзитивный сценарий (IPCC, 2001; Climate Change, 2001).

Переходя к анализу полученных результатов, необходимо отметить, что географическую локализацию приведённых в табл. 6.1–6.4 аналогов не следует абсолютизировать. Качество аналогов в данном случае характеризует величина ошибки *K*.

Таблица 6.1 — Аналоги агроклиматических условий областей, краёв и республик РФ при изменении климата по сценариям HAD CM3 (2020–2030 гг.) и GFDL (2030–2040 гг.) (Сиротенко, Павлова, 2003)

№	Прогноз агроклиматических показателей			Современный аналог: агроклиматические показатели			Ошибка (К)		
	область, край, республика	ΣT_{10} , °С	ΔE , мм	T_{min} , °С	область, край, республика	ΣT_{10} , °С		ΔE , мм	T_{min} , °С
HAD CM3									
1	Ленинградская	2054	61	–5,8	Ивано-Франковская	2134	66	–5,3	6,9
2	Новгородская	2247	94	–7,0	Могилевская	2214	97	–7,5	3,7
3	Ярославская	2228	131	–9,0	Брянская	2287	102	–8,1	14,3
4	Ивановская	2276	168	–9,9	Орловская	2241	252	–9,4	13,4
5	Московская	2411	189	–8,7	Курская ¹	2380	293	–8,8	12,6
6	Калужская	2518	142	–6,9	Черниговская	2480	142	–7,8	1,0
7	Рязанская	2711	340	–9,3	Липецкая	2427	325	–10,1	8,7
8	Марий Эл	2373	284	–11,6	Мордовия	2246	302	–12,0	5,0
9	Тамбовская	3010	417	–9,5	Волгоградская ² , з	2966	586	–9,5	10,1
10	Пензенская	2733	399	–10,4	Тамбовская	2429	388	–11,1	7,2
11	Татарстан	2547	397	–11,6	Тамбовская	2429	388	–11,1	3,9
12	Башкортостан, с	2523	441	–13,6	Самарская	2474	482	–13,6	3,3
GFDL									
1	Ленинградская	1912	43	–7,6	Псковская	1927	47	–7,8	4,0
2	Новгородская	2073	55	–7,7	Витебская	2081	48	–7,4	6,3
3	Ярославская	2064	103	–9,2	Калужская	2084	92	–9,4	5,0
4	Ивановская	2075	144	–9,7	Нижегородская, с	1974	154	–12,4	11,1
5	Московская	2181	146	–8,8	Черниговская	2480	142	–7,0	13,5
6	Калужская	2309	115	–7,7	Брянская	2287	102	–8,1	6,2
7	Рязанская	2488	338	–9,3	Липецкая	2427	325	–10,1	4,8
8	Марий Эл	2176	249	–11,8	Нижегородская, ю	2167	273	–12,0	3,6
9	Тамбовская	2717	433	–9,8	Белгородская	2589	430	–8,2	8,4
10	Пензенская	2496	403	–11,0	Тамбовская	2429	388	–11,1	2,5
11	Татарстан	2326	397	–12,9	Пензенская	2269	364	–12,3	5,5
12	Башкортостан, с	2256	439	–16,5	Кокчетавская, з	2164	442	–16,8	2,2

Обозначение: с — север, ю — юг, з — запад, в — восток. Вторые аналоги: ¹ — Орловская область, $\Delta E=252$ мм; ² — Белгородская область, $\Delta E=430$ мм.

Так, согласно табл. 6.1, с наибольшей ошибкой ($K=14,3$) определён агроклиматический аналог Ярославской области — Брянская область. Современный климат Брянской области близок к ожидаемому климату Ярославской области по теплообеспеченности сельскохозяйственных культур (суммы температур равны 2287 и 2228 °С соответственно) и по суровости зимы (январские температуры равны $-8,1$ и $-9,0$ °С соответственно). Однако, по степени засушливости современный климат Брянской области ($\Delta E=102$ мм) отличается от прогнозируемой величины ($\Delta E=131$ мм). По степени засушливости будущим климатическим условиям Ярославской области ближе современные условия Черниговской области на Украине, где $\Delta E=142$ мм.

Этот пример позволяет заключить, что при использовании предлагаемого метода на практике не всегда следует ориентироваться только на единственный аналог, а предусматривать возможности рассмотрения следующих ближайших аналогов.

Изменения агроклиматических условий при потеплении климата по сценарию HAD CM3 и сценарию GFDL в целом можно интерпретировать как «перенос» климата, направленный с юго-запада на северо-восток. Так, к 2020–2030 гг. агроклиматические условия Новгородской области по сценарию HAD CM3 должны оказаться следующими: $\Sigma T_{10}=2247$ °С, $\Delta E=94$ мм, $T_{\min}=-7$ °С. Наиболее близким современным аналогом для них являются агроклиматические условия Могилевской области Республики Беларусь: $\Sigma T_{10}=2214$ °С, $\Delta E=97$ мм, $T_{\min}=-7,5$ °С.

При дальнейшем потеплении к 2050–2060 гг. движение в юго-западном направлении продолжится, и агроклиматическим аналогом Новгородской области станет Ровенская область (Украина) (табл. 6.2).

Анализируя качество подбора аналогов в табл. 6.1 и 6.2, можно заметить, что наиболее значимые различия относятся к условиям увлажнения. Например, современный климат Полтавской области (табл. 6.2) является хорошим аналогом ожидаемых климатических условий Рязанской

области при глобальном потеплении (по теплообеспеченности и суровости зимы). Однако в Рязанской области установятся, по-видимому, более благоприятные условия увлажнения, чем в современной Полтавской области. Более приемлемым аналогом по условиям увлажнения представляется Киевская область ($\Delta E = 328$ мм).

Таблица 6.2 — Аналоги агроклиматических условий областей, краёв и республик РФ при изменении климата по сценариям HAD CM3 (2050–2060 гг.) и GFDL (2060–2070 гг.) (Сиротенко, Павлова, 2003)

№	Прогноз агроклиматических показателей				Современный аналог: агроклиматические показатели				Ошибка (К)
	область, край, республика	ΣT_{10} , °С	ΔE , мм	T_{\min} , °С	область, край, республика	ΣT_{10} , °С	ΔE , мм	T_{\min} , °С	
HAD CM3									
1	Ленинградская	2304	105	–3,4	Закарпатская	2546	116	–4,6	15,0
2	Новгородская	2518	145	–4,2	Ровенская	2484	134	–5,0	8,5
3	Ярославская	2445	185	–5,7	Житомирская	2445	194	–5,8	2,3
4	Ивановская	2506	212	–6,4	Житомирская	2445	194	–5,8	7,4
5	Московская	2683	233	–6,4	Тернопольская	2490	239	–5,2	11,1
6	Калужская	2806	184	–5,3	Житомирская	2445	194	–5,8	9,5
7	Рязанская	2989	367	–6,6	Полтавская ¹	2771	480	–6,5	11,0
8	Марий Эл	2689	306	–7,1	Сумская	2504	276	–7,6	8,3
9	Тамбовская	3317	438	7,3	Луганская ²	2907	557	–7,5	12,7
10	Пензенская	3147	424	–8,0	Белгородская	2589	430	–8,2	8,5
11	Татарстан	2995	415	–8,4	Белгородская	2589	430	–8,2	7,4
12	Башкортостан, с	2980	455	–11,4	Волгоградская ³ , в	3097	667	–11,4	11,9
GFDL									
1	Ленинградская	2430	78	–5,3	Гродненская	2217	82	–5,5	6,0
2	Новгородская	2533	115	–5,2	Закарпатская	2546	116	–4,6	3,8
3	Ярославская	2503	178	–6,3	Житомирская	2445	194	–5,8	6,4
4	Ивановская	2496	206	–6,6	Житомирская	2445	194	–5,8	7,4
5	Московская	2586	214	–5,8	Житомирская	2445	194	–5,8	5,4
6	Калужская	2648	184	–4,9	Житомирская	2445	194	–5,8	9,3
7	Рязанская	2788	378	–6,1	Черкасская	2740	444	–5,8	7,3
8	Марий Эл	2526	292	–8,3	Курская	2380	293	–8,8	4,7
9	Тамбовская	2954	468	–6,3	Полтавская	2771	480	–6,5	4,7
10	Пензенская	2747	444	–7,3	Харьковская ⁴	2780	543	–7,3	6,5
11	Татарстан	2918	542	–9,4	Белгородская ⁵	2589	430	–8,2	7,4
12	Башкортостан, с	2542	477	–12,5	Самарская	2474	482	–13,6	4,0

Обозначение: с — север, ю — юг, з — запад, в — восток. Вторые аналоги: ¹ — Киевская область, $\Delta E = 328$ мм; ² — Полтавская область, $\Delta E = 480$ мм; ³ — Саратовская область, запад, $\Delta E = 578$ мм; ⁴ — Белгородская область, $\Delta E = 430$ мм; ⁵ — Воронежская область, $\Delta E = 514$ мм.

В примечаниях к табл. 6.1 и 6.2 приведены «вторые» аналоги, которые ближе к оригиналам по условию увлажнения территории за тёплый период года.

Для уточнения географического положения аналогов расчёты были выполнены только для тёплого периода года, т. е. аналоги определялись по условиям теплообеспеченности (ΣT_{10}) и влагообеспеченности (ΔE). Результаты этих расчётов для сценария HAD CM3 (2030–2040 гг.) и сценария GFDL (2030–2040 гг.) представлены на рис. 6.1. Сопоставим их с данными табл. 6.1 и табл. 6.2. Так, если аналог ожидаемых агроклиматических условий Ленинградской области не изменился — это Ивано-Франковская область (Украина), то при исключении характеристики суровости зимы в качестве аналога для Тамбовской области выбрана не Волгоградская (табл. 6.1), а Черкасская область (рис. 6.1а).

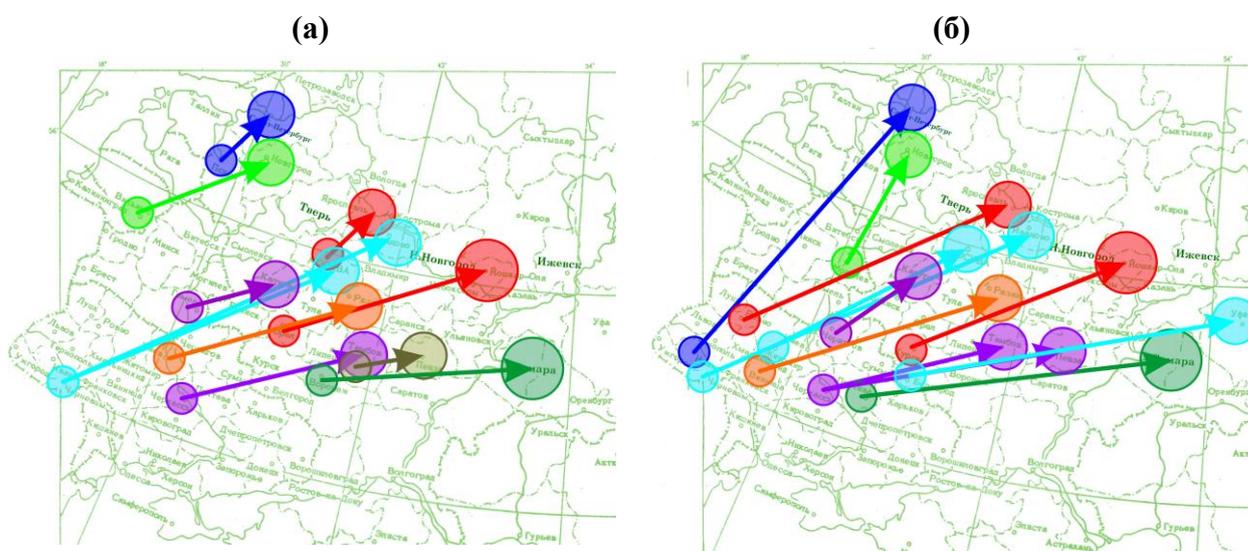


Рисунок 6.1 — Динамика условий тепло- и влагообеспеченности сельскохозяйственных культур при изменении климата: (а) по сценарию GFDL на 2030–2040 гг.; (б) по сценарию HAD CM3 на 2020–2030 гг.

Таким образом, исключение параметра T_{\min} позволило более чётко выявить географические закономерности изменения условий тёплого периода года на ЕЧ России при глобальном потеплении. Ожидаемые изменения по обоим сценариям можно интерпретировать как «перенос»,

направленный с юго-востока на северо-запад. Заметим, что направления соответствующих векторов для двух рассматриваемых сценариев (рис. 6.1) практически совпадают. Можно представить вариант глобального потепления, при котором перенос воздушных масс был бы направлен с юго-востока на северо-запад. Этот вариант потепления кардинально отличался бы от рассмотренных выше сценариев, поскольку перенос, имеющий западную составляющую, можно охарактеризовать как гумидный, а восточную — как аридный.

Возникает вопрос о содержательной экономической интерпретации информации, полученной методом аналогов. Необходимо дать сравнительную количественную характеристику эффективности современного сельского хозяйства административных областей (республик), указанных в табл. 6.1 и 6.2.

Для этих целей будем использовать интегральный показатель продуктивности растениеводства — биоклиматический потенциал, рассчитанный в системе КПУ. Для устранения различий в плодородии почвы для сопоставляемых территориальных единиц значения БКП определялись при условии достаточного минерального питания растений.

Представленные в табл. 6.3 величины приращений БКП, которые ожидаются при изменении климата по соответствующему сценарию, согласованно свидетельствуют об улучшении агроклиматических условий для сельского хозяйства. Для сценария HAD CM3 средний рост БКП составил 23 %, а для GFDL — 15 %. Эти результаты подтверждают очевидный вывод о положительном влиянии «западного переноса» климатических условий на продуктивность сельского хозяйства.

Таблица 6.3 — Количественные оценки приращения биоклиматического потенциала при изменении климата по сценариям HAD CM3 (2020–2030 гг.) и GFDL (2030–2040 гг.)

№	Область, республика	Современный агро-климатический аналог	Приращение БКП	
			Δ, т/га	%
HAD CM3				
1	Ленинградская	Ивано-Франковская	4,06	36
2	Новгородская	Могилевская	2,37	19
3	Ярославская	Ровенская	3,75	32
4	Ивановская	Черновицкая	4,44	39
5	Московская	Житомирская	2,77	22
6	Калужская	Черниговская	1,98	15
7	Рязанская	Винницкая	1,97	16
8	Марий Эл	Курская	2,00	17
9	Тамбовская	Черкасская	1,25	10
10	Пензенская	Черкасская	1,77	15
11	Самарская	Полтавская	3,47	36
12	Башкортостан (север)	Белгородская	2,27	20
GFDL				
1	Ленинградская	Псковская	1,42	13
2	Новгородская	Литва	1,48	12
3	Ярославская	Московская	1,08	9
4	Ивановская	Черновицкая	4,44	39
5	Московская	Черновицкая	3,25	26
6	Калужская	Гомельская	2,05	15
7	Рязанская	Киевская	2,18	17
8	Марий Эл	Орловская	1,64	14
9	Тамбовская	Черкасская	1,25	10
10	Пензенская	Тамбовская	0,52	04
11	Самарская	Воронежская	1,04	11
12	Башкортостан (север)	Кокчетавская	0,90	9

6.2 Временные аналоги будущих агроклиматических условий

Изложенный в предыдущем разделе (6.1) пространственный аналоговый подход может быть применён к определению временных аналогов ожидаемых климатических условий. Годы-аналоги агроклиматических условий Московской области при изменении климата по сценарию GFDL к 2060–2070 гг. представлены в табл. 6.4.

Таблица 6.4 — Годы-аналоги современных агроклиматических условий Московской области при изменении климата по сценарию GFDL к 2060–2070 гг.

Год-аналог	ΣT_{10} , °С	ΔE , мм	Ошибка, К	БКП, т/га
1983	2465	219	3,5	5,6
1979	2315	217	5,9	4,7
1963	2503	234	6,3	5,1
1989	2294	208	7,0	4,8
Сценарий GFDL	2590	214	—	—
Среднее, 1891–2000	2090	196	—	4,8

Для определения аналогов использовались метеорологические данные наблюдений за более чем столетний период, с 1891 по 2004 гг. Согласно этому сценарию сумма температур выше 10 °С к 2060–2070 гг. составит 2590 °С, а величина дефицита испарения — 214 мм. Таким образом, ожидается значительный (~500 °С) рост термических ресурсов территории области при незначительном для данного региона росте засушливости (на 10 %). Ближайшим аналогом ожидаемых в будущем условий оказался 1983 г. (далее 1879, 1963 и 1989 гг.).

Наряду с естественной ограниченностью метода временных аналогов этот подход имеет известные преимущества по сравнению с пространственными аналогами.

Так, при поиске лет-аналогов сохраняется идентичность свойств почв, которая нарушается для пространственных аналогов. Прогностические возможности метода временных аналогов в этой связи представляются довольно значительными. Для их реализации необходима урожайная статистика за соответствующий период времени, т. е. за все прошлое столетие. Получение таких материалов сопряжено, конечно, с определенными трудностями. В специальной разработке нуждаются детали методики такого прогнозирования (необходимо уточнить критерий аналогичности, оптимизировать число используемых лет-аналогов и процедуру осреднения полученных для них данных). В табл. 6.4 в качестве

примера такого прогноза представлены рассчитанные с помощью имитационной системы КПУ значения БКП. На основании данных для 4-х лет аналогов можно сделать вывод, что продуктивность сельского хозяйства Московской области в 2060–2070 гг. при реализации сценария GFDL не уменьшится, а, скорее всего, возрастет. Средняя величина БКП, рассчитанная по четырём годам-аналогам, составила 5,1 т/га, тогда как средняя величина за период наблюдений с 1891 по 2000 гг. равна 4,8 т/га.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что метод аналогов наряду с имитационным моделированием является весьма эффективным средством исследования влияния изменений климата на сельское хозяйство. Пространственные и временные аналоги будущих агроклиматических условий могут давать такую информацию о сельском хозяйстве, которую трудно или невозможно получить другими методами.

Вместе с тем рассмотренный подход имеет ряд ограничений. Аналог по определению не полностью адекватен оригиналу. Поэтому при интерпретации полученных этим методом результатов необходимо проявлять определенную осторожность. Так, например, найденные нами пространственные аналоги будущих агроклиматических условий могут значительно отличаться от оригиналов по почвенным условиям, которые во многом определяют продуктивность сельского хозяйства.

Эффективность метода напрямую зависит от объема информации в используемой базе данных, которую необходимо существенно расширить, включив в неё территории за пределами бывшего СССР. Прогностические возможности метода временных аналогов также можно увеличить, привлекая данные наблюдений за прошлые годы по окружающим территориям.

ГЛАВА 7. Адаптация, оптимизация и размещение сельскохозяйственного производства при наблюдаемых и ожидаемых изменениях климата

7.1 Адаптация сельскохозяйственного производства к ожидаемым изменениям климата

Для получения реалистичных оценок влияния ожидаемых изменений климата нельзя не учитывать возможность приспособления (адаптации) сельского хозяйства к изменяющимся условиям среды, хотя эта природно-экономическая система отличается высокой консервативностью.

С начала современного потепления (с 1976 г.) климат существенно изменился, но сельское хозяйство России до сих пор не имеет достаточно обоснованной стратегии реагирования на эти изменения и несёт потери вполне устранимые при адаптации. Для преодоления негативных последствий изменения климата и достижения конкурентных преимуществ в аграрном секторе экономики России необходима эффективная стратегия адаптации. Россия нуждается в ней в большей степени, чем другие страны — крупные производители продовольствия. Для этого есть, по крайней мере, три причины. Первая причина — рекордно быстрые как наблюдаемые, так и прогнозируемые изменения климата; вторая — исключительно сильная зависимость сельского хозяйства от изменений и колебаний климата; третья — наличие огромного потенциала адаптации.

Стратегия земледелия как России в целом, так и отдельных её областей в 21 веке состоит в его интенсификации, с целью подъёма продуктивности сельскохозяйственных культур, и прежде всего зерна. Это представляется вполне реалистичным при достижении современного уровня химизации земледелия стран Западной и Центральной Европы, т. е. при внесении достаточного количества удобрений и необходимой мелиорации почв, включающей известкование, снижение уровня грунтовых вод и т. д. (Ладонин, 1999). Интенсификацию сельского хозяйства можно рассматривать

одновременно и как форму технологической адаптации к изменяющимся климатическим условиям.

Ниже приведены результаты, иллюстрирующие принципиальные возможности имитационной системы КПУ при решении задач адаптации производства сельскохозяйственных культур к изменениям климата. Как указывалось выше, в системе КПУ предполагается использование многомерной системы оценок БКП для ряда фиксированных уровней интенсификации земледелия: низкозатратного — Y_0 , интенсивного при орошаемом земледелии — Y_W , интенсивного на базе химизации — Y_N и высокоинтенсивного на базе химизации и орошения — Y_{WN} .

С помощью системы КПУ нами получены оценки приращения урожайности при разных мерах адаптации, включающие достаточный уровень увлажнённости (ΔY_W) и достаточный уровень минерального питания (ΔY_N). Расчёты выполнены на примере яровой пшеницы для среднего по ансамблю региональной модели ГГО из 50 реализаций на 2030–2039, 2050–2059 и 2090–2099 гг. и представлены в табл. 7.1.

При достаточном увлажнении почвы ожидаемое приращение урожайности яровой пшеницы к 2050–2059 гг. в засушливых регионах составит: в Южном ФО — 8–16 ц/га и на юге Приволжского ФО — 7–11 ц/га. В нечернозёмной зоне на менее плодородных почвах (север Приволжского ФО) урожайность может увеличиться на 11–18 ц/га за счёт достаточного минерального питания (табл. 7.1).

При комплексной оптимизации условий увлажнения и минерального питания прирост урожайности может быть значительным и достигать величины от 21 до 28 ц/га. Диапазоны оценок прироста урожайности при разных мерах адаптации к изменениям климата к середине и концу текущего столетия незначительно отличаются от приведённых выше оценок для периода 2030–2039 гг.

Таблица 7.1 — Количественные оценки мер адаптации к изменениям климата на 2050–2059 гг. на примере яровой пшеницы при трёх вариантах прогнозируемых условий: среднего из 50-ти реализаций, влажного и сухого. Расчёты в имитационной системе КПУ

Федеральный округ	Приращение урожайности, ц/га					
	среднее		влажный		сухой	
	ΔY_W	ΔY_N	ΔY_W	ΔY_N	ΔY_W	ΔY_N
Центральный ¹	3–10	7–12	3–7	14–20	1–3	5–10
Приволжский, север	1–4	11–18	1–3	18–22	2–4	10–15
Приволжский, юг	7–11	5–8	6–10	6–10	4–6	5–7
Южный	8–16	2–6	8–14	2–6	3–8	1–4

¹ Белгородская, Воронежская, Курская, Белгородская, Липецкая и Тамбовская области. Меры адаптации: ΔY_W — достаточное увлажнение, ΔY_N — минерализация.

На примере яровой пшеницы с помощью системы КПУ рассчитаны сравнительные оценки мер адаптации к изменению климата по сценарию GFDL на 2030–2030 и 2090–2099 гг. по отдельным субъектам Приволжского, Южного и Центрального ФО (табл. 7.2).

Данные табл. 7.2 показывают, что соотношение прироста урожайности за счёт мер, улучшающих водный режим посева, и мер, связанных с достаточными дозами удобрений, различаются и весьма значительно по регионам. В Южном ФО оценки мер орошения (A_W) и минерализации (A_N) на 2011–2030 гг. соотносятся как 84 и 16 %, а в Центральном ФО — как 23 и 77 %.

Таким образом, для областей Южного ФО первоочередными мерами по стабилизации сельскохозяйственного производства может стать внедрение влагосберегающих технологий. Для центрально-чернозёмных областей более эффективной мерой станет доведение дозы вносимых удобрений до доз, принятых в высокотехнологичных системах землепользования. В целом полученные оценки хорошо согласуются с оценками изменений агроклиматических условий по сценарию GFDL, рассмотренными в разделе 5.1.

Таблица 7.2 — Сравнительные оценки эффективности мер адаптации (достаточная увлажнённость, A_W, и достаточное минеральное питание, A_N) при производстве яровой пшеницы в Приволжском, Южном и Центральном ФО. Сценарий GFDL CM3 (RCP4.5) на 2011–2030 и 2080–2099 гг.

Регион	Период			
	2011–2030		2080–2099	
	Эффективность мер адаптации, %			
	A_W	A_N	A_W	A_N
Центральный	23	77	28	72
Белгородская	34	66	42	58
Воронежская	59	41	53	47
Курская	2	98	11	89
Липецкая	10	90	18	82
Тамбовская	11	89	18	82
Приволжский	20	80	23	77
Кировская	3	97	1	99
Нижегородская	1	99	3	97
Оренбургская	56	44	48	52
Пензенская	11	89	15	85
Пермский	0	100	3	97
Башкортостан	29	71	29	71
Марий Эл	13	87	21	79
Мордовия	9	91	13	87
Татарстан	22	78	37	63
Самарская	38	62	33	67
Саратовская	40	60	43	57
Удмуртская	7	93	13	87
Ульяновская	30	70	34	66
Чувашская	27	73	32	68
Южный	84	16	76	24
Астраханская	93	7	88	12
Волгоградская	83	17	75	25
Краснодарский	88	12	81	19
Калмыкия	95	5	85	15
Ростовская	59	41	52	48

Пространственное распределение оценок мер адаптации при производстве яровой пшеницы (%) к изменениям климата по данным сценария GFDL (RCP4.5) на периоды: 2011–2030, 2028–2047, 2041–2060 и 2080–2099 гг. приведены на рис. 7.1. Предлагаемая форма визуализации полученных оценок даёт возможность выполнить пространственный и

временной анализ возможных откликов системы современного землепользования на меры адаптации при изменении климата на рассматриваемой территории по отдельным субъектам. Таким образом, предложенный метод позволяет использовать полученные оценки при среднесрочном и долгосрочном планировании мер адаптации на федеральном и региональном уровне.

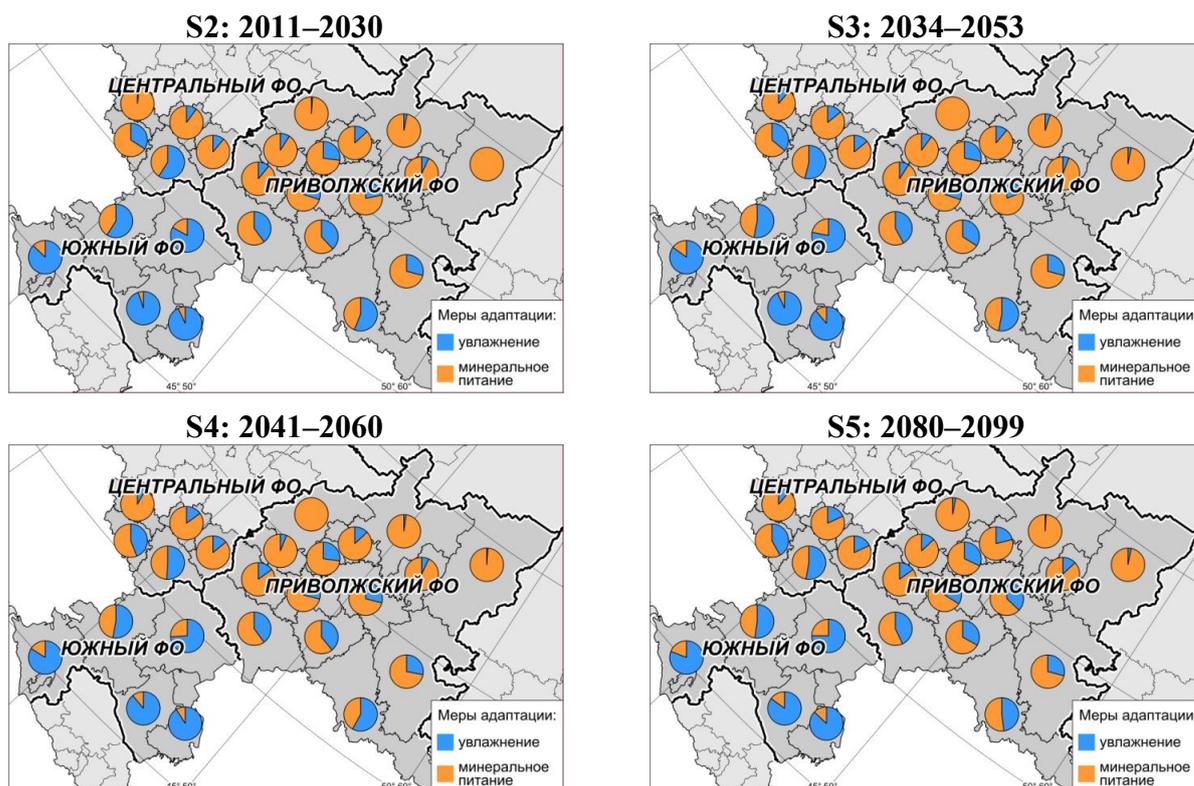


Рисунок 7.1 — Сравнительные оценки эффективности мер адаптации при производстве яровой пшеницы (%) к изменениям климата по данным сценария GFDL CM3 (RCP4.5) на периоды: 2011–2030, 2034–2053, 2041–2060 и 2080–2099 гг. Суммарный прирост урожайности за счёт достаточной увлажнённости почвы (синяя заливка) и за счёт достаточного минерального питания растений (оранжевая) принят за 100 %

Регионы, на территории которых возможен рост аридности климата, — это, в первую очередь, центрально-чернозёмные области, Приволжский и Южный ФО. В центрально-чернозёмных областях отмечается рост засушливости и связанное с ним ухудшение агрометеорологических условий возделывания сельскохозяйственных культур.

Поэтому для центрально-чернозёмных областей первоочередными мерами по стабилизации сельскохозяйственного производства могут быть: (1) внедрение влагосберегающих технологий, включая сохранение площадей под чистыми или занятыми парами, (2) увеличение доли озимых зерновых культур, (3) расширение посевов засухоустойчивых культур — кукурузы, сорго и проса. Вместе с тем, для использования дополнительных тепловых ресурсов следует рекомендовать расширение посевов вторых пожнивных культур в благоприятные по увлажнению годы.

Анализ наблюдаемых и ожидаемых изменений климата на территории Южного и Поволжского ФО не выявил масштабных проявлений роста степени засушливости климата. Следовательно, меры адаптивного характера должны быть направлены на использование отмеченных положительных сторон потепления. Это расширение площадей, занятых озимыми зерновыми, более урожайными, чем яровые культуры.

Целесообразно пересмотреть видовой и сортовой состав возделываемых сельскохозяйственных культур с целью отбора видов (сортов) более позднеспелых и более продуктивных для использования дополнительных тепловых ресурсов, а также расширить посевы дефицитных для России сельскохозяйственных культур, проявляющих высокие требования к теплу. Это в первую очередь относится к производству зерна кукурузы. Расширение посевов сахарной свёклы должно положительно сказаться на экспортно-импортных потоках сахара и сахарного сырья. Что касается расширения посевов масличных культур — подсолнечника, сои и особенно рапса озимого, то возможности для их возделывания также возрастут в связи с потеплением климата.

Необходимо предусмотреть расширение орошаемого земледелия, особенно для Поволжского и Северо-Кавказского ФО, с учётом того, что потепление климата повышает его эффективность. Расширение массивов поливных земель — в условиях потепления — наиболее радикальный путь

использования дополнительных тепловых ресурсов для стабилизации сельскохозяйственного производства.

Одновременно с интенсификацией сельского хозяйства в земледельческой зоне России по западноевропейской модели могут широко использоваться и другие приёмы адаптации, приводящие к росту продуктивности земледелия.

В зоне *достаточного увлажнения* адаптационные экономические меры должны быть направлены на использование связанных с потеплением климата дополнительных ресурсов тепла путём:

- расширения посевов более позднеспелых и более урожайных видов (сортов) зерновых культур, кукурузы, подсолнечника, позднеспелых сортов картофеля, рапса и др.;
- увеличения применения удобрений и средств химизации, которые более эффективны в условиях более тёплого и влажного климата;
- расширения свеклосеяния, повышения доли более теплолюбивых видов масличных и кормовых культур — подсолнечника, люцерны и др.;
- повышения удельного веса животноводства, базирующегося на «сенном» типе кормления для использования растущей кормовой базы;
- расширения посевов пожнивных сельскохозяйственных культур;
- уменьшения затрат на корма и обогрев рабочих помещений в результате сокращения периода стойлового содержания скота;
- развития осушительной мелиорации.

К негативным воздействиям изменений климата на территории достаточно увлажнённой Нечернозёмной зоны следует отнести растущую уязвимость растениеводства к воздействию вредителей и болезней. Адаптационные меры здесь должны быть направлены на уменьшение этой угрозы (Ясюкевич и др., 2007; Попова и др., 2013, 2016).

В зоне *недостаточного увлажнения* адаптационные экономические меры должны быть направлены не только на использование дополнительных тепловых ресурсов, но и на экономное расходование водных ресурсов путём:

– более широкого внедрения влагосберегающих технологий (снегозадержание, уменьшение непродуктивного испарения, ультраранние сроки сева и др.);

– расширения посевов более засухоустойчивых культур — прежде всего кукурузы, а также подсолнечника, проса и др.;

– расширения посевов озимых культур — пшеницы в степных районах Поволжья, Урала и Западной Сибири, ячменя на Северном Кавказе, в Ростовской и Волгоградской областях;

– расширения орошаемого земледелия, которое следует рассматривать не только как самую кардинальную меру борьбы с ростом засушливости климата, но и как условие наиболее полного использования дополнительных тепловых ресурсов.

Эти предложения, хотя и давно известны, в целом рациональны и актуальны с точки зрения обеспечения продовольственной безопасности.

Переход на западноевропейский уровень агротехники может дать значительный эффект в условиях степной и лесостепной зон.

Программа обеспечения продовольственной безопасности была разработана ещё в первой половине 20 столетия усилиями Н. И. Вавилова, Д. Н. Прянишникова и др., когда проблема антропогенного глобального потепления не обсуждалась даже в теоретическом отношении. Тем не менее, центральное положение этой программы — перенос сельскохозяйственного производства в зону «гарантированного увлажнения» становится по настоящему актуальным именно сейчас для стабилизации производства в условиях аридизации климата.

7.2 Метод корректировки посевных площадей зерновых культур при адаптации к изменению климата

7.2.1 Оптимизация временного распределения посевных площадей

Гидрометеорологическая информация и составляемые на её основе агрометеорологические прогнозы — значительный резерв повышения

эффективности сельского хозяйства в рамках инновационных технологий. Стоимость гидрометеорологической информации совершенно не соответствует её значимости, особенно для сельского хозяйства России, страны с преимущественно рискованным земледелием и самым суровым климатом на Земле.

Рассмотрим задачу оптимального расширения производства какого-либо вида сельскохозяйственной продукции путём максимизации среднегодовалого валового урожая \bar{Y} :

$$\bar{Y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i s_i \equiv \overline{ys}, \quad (7.1)$$

где i — номер года; N — число лет; y_i , s_i — соответственно урожайность и посевная площадь данной культуры в i -ом году.

Для любых двух случайных величин y и s можно записать (Сиротенко, Павлова, 2001, 2004):

$$M_{ys} = M_y M_s + COV(y, s), \quad (7.2)$$

где M — символ математического ожидания; $COV(y, s)$ — ковариация.

Представим (7.1) в более удобной форме, используя известные выражения для коэффициента корреляции и коэффициента вариации:

$$K_A = \frac{M_{ys}}{M_y M_s} = 1 + r_{ys} V_y V_s, \quad (7.3)$$

где r_{ys} — коэффициент корреляции случайных величин y и s ; V_y , V_s — коэффициенты вариации, $V_y = \sigma_y / \bar{y}$ и $V_s = \sigma_s / \bar{s}$.

Пусть y — ежегодная урожайность той или иной сельскохозяйственной культуры (ц/га), а s — занимаемая ею площадь (га). Тогда K_A — отношение математического ожидания валового урожая при заданном распределении посевных площадей (M_{ys}) к математическому

ожиданию той же величины при постоянной площади ($M_y M_s$) будем называть *коэффициентом адаптивности* K_A , который определяется степенью синхронности (асинхронности) посевных площадей и урожайности.

Нами показано (Сиротенко, Павлова, 2001), что \bar{Y} и \bar{Y}_0 связаны между собой соотношением:

$$\bar{Y} = K_A \bar{Y}_0 = \bar{Y}_0 (1 + r_{ys} V_y V_s), \quad (7.4)$$

где Y_0 — средний валовый урожай; Y — валовый урожай при заданном распределении посевных площадей.

Оптимизация временного распределения посевных площадей по линейному и нелинейному правилам

Рассмотрим временной аспект оптимизации посевных площадей.

Предположим, что посевные площади данной сельскохозяйственной культуры в каждом году определяются в зависимости от прогнозируемой урожайности \hat{y} по правилу:

$$s = f(\hat{y}), \quad (7.5)$$

где f — некоторая известная функция. В нашей работе (Сиротенко,

Павлова, 2001) в качестве $f(\hat{y})$ использовалась линейная функция:

$$s_i = a \hat{y}_i, \quad (7.6)$$

где $a > 0$ — коэффициент пропорциональности.

Естественно предположить, что для прогнозирования урожайности используется уравнение регрессии, для которого

$$M \hat{y} = M y \text{ и } \sigma_{\hat{y}}^2 = r_{y\hat{y}}^2 \sigma_y^2, \quad (7.7)$$

где $\sigma_{\hat{y}}^2, \sigma_y^2$ — оценки дисперсии прогнозируемой и фактической урожайности; $r_{y\hat{y}}^2$ — коэффициент детерминации для случайных величин y и \hat{y} .

На основании (7.6) и (7.7) определим $V_s = \frac{\sigma_s}{M_s}$ и с учётом того, что $r_{y\hat{y}} = r_{ys}$, окончательно получим:

$$K_A = 1 + r_{y\hat{y}}^2 V_y^2. \quad (7.8)$$

Таким образом, эффективность ежегодной корректировки посевных площадей по правилу (7.6) зависит от произведения двух величин — коэффициента детерминации $r_{y\hat{y}}^2$, характеризующего точность прогнозирования урожайности до сева, и квадрата коэффициента вариации временного ряда урожайности. Оба параметра практически полностью определяются агроклиматическими условиями.

В табл. 7.3 представлены оценки эффективности предлагаемой ежегодной корректировки посевных площадей по правилу (7.6) для трёх уровней оправдываемости долгосрочных прогнозов урожайности: высокой ($r_{y\hat{y}} = 0,9$), средней ($r_{y\hat{y}} = 0,7$) и низкой ($r_{y\hat{y}} = 0,5$).

Заметим, что точность агрометеорологических прогнозов урожайности зависит от климатических условий территории, вида сельскохозяйственной культуры и степени стабильности агротехники. Достигнутую в настоящее время Гидрометеослужбой среднюю точность прогнозов урожайности ранних яровых культур (на дату сева) можно оценить коэффициентом корреляции порядка 0,7 для большей части степной зоны России. Для отдельных засушливых районов точность прогнозов урожайности может быть выше (оценки $r_{y\hat{y}}$ могут достигать или даже превышать 0,9). Например, для метода прогноза среднеобластной урожайности яровой пшеницы в

Саратовской области на основании осеннего увлажнения почвы и суммы зимних осадков (Дегтярева, 1973) множественный коэффициент корреляции прогностической зависимости равен $r_{y\hat{y}} = 0,82$. На территории нечернозёмной зоны урожайность прогнозируется хуже — оценки $r_{y\hat{y}}$ здесь редко превышают величину 0,5. Но в последние годы выполнены исследования, позволяющие значимо повысить точность прогнозов урожайности, в том числе в зоне достаточного увлажнения (Дмитренко, 1978; Клещенко, и др., 2016; Страшная и др., 2005, 2013; Русакова и др., 2010).

Таблица 7.3 — Приращение среднего валового урожая (Y/Y_0 , %) в результате ежегодной корректировки посевной площади на основании прогнозов урожайности по линейному и альтернативному правилам (Сиротенко, Павлова, 2001)

Точность прогноза урожайности	Коэффициент вариации урожайности, V						
	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
(а) линейное правило							
Низкая	1,0	2,2	4,0	6,2	9,0	12,2	16,0
Средняя	2,0	4,4	7,8	12,2	17,6	24,0	31,4
Высокая	3,2	7,3	13,0	20,2	29,2	39,7	51,8
(б) альтернативное правило							
Низкая	9,7	13,6	17,5	21,5	25,4	29,3	33,3
Средняя	10,5	16,1	21,7	27,4	32,8	38,4	44,0
Высокая	14,8	18,7	29,7	33,8	41,2	48,7	56,2

Данные, приведённые в табл. 7.3, позволяют заключить, что прирост среднемноголетнего валового сбора в результате ежегодной корректировки посевных площадей согласно (7.6) экономически достаточно эффективен в степной и лесостепной зонах России. Так, при $V=0,5$ и $(0,7 \leq r_{y\hat{y}} \leq 0,9)$ валовый сбор яровой пшеницы увеличится на 12–20 %. Такой уровень изменчивости урожайности V характерен для областей степного Поволжья — Волгоградской, Саратовской, Самарской и др.

Оптимизация временного распределения посевных площадей по нелинейному правилу

Закономерен вопрос — нельзя ли повысить эффективность ежегодной корректировки посевных площадей за счёт замены (7.6) другим правилом.

Рассмотрим эффективность простейшего нелинейного правила назначения посевных площадей по прогнозу урожайности:

$$s_i = \begin{cases} 1, & \text{если } \hat{y} \geq \bar{y} \\ 0 & \text{в остальных случаях} \end{cases} \quad (7.9)$$

где \bar{y} — средняя многолетняя урожайность (норма).

Это правило простое и легко применимое на практике, поскольку для использования необходим лишь знак прогноза урожайности. Правило предполагает, что значительный в современных условиях «избыточный» земельный фонд будет привлекаться не ежегодно, а лишь в те годы, когда ожидаемый урожай превышает норму и высока вероятность полной окупаемости затрат. В научных публикациях прошлых лет, включая дореволюционный период, можно найти рекомендации по использованию аналогичного подхода в остро засушливых регионах России для «перехвата» редких (1–2 раза в 5 лет) «обломных» урожаев зерна.

Заметим, что $V_s = 1$ для важного частного случая — альтернативной стратегии «все или ничего», когда при благоприятном прогнозе урожайности вся резервная площадь засеивается ($s = 1$), а при неблагоприятном прогнозе — посев не производится ($s = 0$). Максимально возможный в этом случае выигрыш при $V_y = 0,5$ достигает 50 %.

Сопоставим первую и четвертую строки табл. 7.3 для «плохих» прогнозов урожайности ($r_{y\hat{y}} = 0,5$). При $V_y = 0,2$ переход от линейной к альтернативной стратегии повышает эффективность метода почти в 10 раз, при $V_y = 0,4$ — в 4 раза, а при $V_y = 0,6$ — в 2,8 раза. При более высокой оправдываемости прогнозов урожайности ($r_{y\hat{y}} = 0,9$) рост эффективности

метода за счёт перехода к альтернативной стратегии также весьма значителен, хотя и не так велик, как для «плохих» прогнозов.

Этот результат статистического моделирования ещё раз подтверждает известный тезис, что оптимизация процедур использования прогнозов способна в значительной степени повысить их эффективность, особенно при низкой оправдываемости последних.

Вывод очевиден — стратегия оптимизации посевных площадей должна выбираться в зависимости от оценок $r_{y\hat{y}}$ и V_y , т. е. от возможной точности прогнозирования и степени междугодичной изменчивости урожайности. Тем не менее, альтернативная стратегия, строящаяся на основе альтернативных прогнозов, имеет несомненные преимущества. Методически корректный альтернативный прогноз урожайности получить значительно легче, чем прогноз в абсолютных величинах урожайности, поскольку при альтернативном прогнозировании ослабляются требования к учёту агротехнического тренда урожайности.

Рассмотрим возможность оценки адаптационного потенциала при современном уровне оправдываемости прогнозов зерновых культур на фоне межгодовой изменчивости урожайности за последние два десятилетия. В табл. 7.4 представлены рассчитанные по правилу (7.6) оценки адаптационного потенциала (K_A , %) по субъектам Центрального, Северо-Западного, Приволжского и Южного ФО при реально достижимой точности агрометеорологических прогнозов урожайности от средней ($r_{y\hat{y}}=0,70$) до высокой ($r_{y\hat{y}}=0,90$). Здесь же приведены коэффициенты вариации для средней по области урожайности ярового ячменя, яровой и озимой пшеницы (V , %) за 1996–2015 гг.

Данные табл. 7.4 позволяют заключить, что приращение среднемноголетней валовой урожайности яровых зерновых за счёт ежегодной корректировки посевных площадей по правилу (7.6) будет

значимым на юге и юго-востоке Приволжского и в Южном ФО (7–14 %). В самых засушливых регионах, в Волгоградской и Астраханской областях, среднемноголетний валовый сбор зерновых может увеличиться на ~30 %. В среднем по ФО оценки адаптационного потенциала по яровому ячменю и яровой пшенице составят: в Приволжском — 5–9 %, Центральном — 5–9 %, Северо-Западном — 7–12 %, и Южном — 6–16 % (табл. 7.4).

Таблица 7.4 — Коэффициенты адаптационного потенциала (K_A , %), рассчитанные при корректировке посевных площадей по прогнозу урожайности и коэффициенты вариации среднеобластной урожайности зерновых культур (V , %) в Центральном, Приволжском, Южном и Северо-Западном ФО при $r_{y\hat{u}} = \{0,7-0,9\}$ по данным за 1996–2015 гг.

Федеральный округ (область, край, республика)	Яровая пшеница		Яровой ячмень		Озимая пшеница	
	V , %	K_A , %	V , %	K_A , %	V , %	K_A , %
Центральный	34	6–9	33	5–9	28	4–6
Ивановская	37	7–11	37	7–11	25	3–5
Костромская	25	3–5	33	5–9	24	3–5
Тверская	35	6–10	49	12–20	46	10–17
Ярославская	34	6–9	38	7–12	32	5–8
Брянская	35	6–10	39	7–12	30	4–7
Владимирская	26	3–5	26	3–6	23	3–4
Калужская	34	6–9	35	6–10	26	3–5
Московская	30	4–7	29	4–7	24	3–5
Рязанская	46	10–17	35	6–10	29	4–7
Смоленская	30	4–7	34	6–9	39	7–12
Белгородская	39	7–12	26	3–6	29	4–7
Воронежская	36	6–10	32	5–8	27	4–6
Курская	32	5–8	31	5–8	28	4–6
Липецкая	33	5–9	28	4–6	27	4–6
Орловская	31	5–8	28	4–6	25	3–5
Тамбовская	35	6–10	35	6–10	24	3–5
Тульская	34	6–9	32	5–8	24	3–5
Северо-Западный	37	7–11	39	7–12	46	10–17
Вологодская	22	2–4	28	4–6	57	16–26
Ленинградская	28	4–6	31	5–8	32	5–8
Новгородская	57	16–26	47	11–18	55	15–25
Псковская	43	9–15	54	14–24	51	13–21
Калининградская	33	5–9	36	6–10	36	6–10
Приволжский	32	5–8	34	6–9	30	4–7
Марий Эл	32	5–8	31	5–8	25	3–5
Мордовия	34	6–9	36	6–10	29	4–7
Удмуртия	25	3–5	27	4–6	32	5–8

Продолжение таблицы 7.4

Федеральный округ (область, край, республика)	Яровая пшеница		Яровой ячмень		Озимая пшеница	
	$V, \%$	$K_A, \%$	$V, \%$	$K_A, \%$	$V, \%$	$K_A, \%$
Чувашия	29	4–7	28	4–6	26	3–5
Кировская	25	3–5	27	4–6	29	4–7
Нижегородская	24	3–5	26	3–5	27	4–6
Пермский	17	1–2	21	2–4	26	3–5
Башкортостан	39	7–12	42	9–14	35	6–10
Татарстан	38	7–12	36	6–10	32	5–8
Оренбургская	39	7–12	47	11–18	33	5–9
Пензенская	42	9–14	40	8–13	32	5–8
Самарская	38	7–12	41	8–14	32	5–8
Саратовская	41	8–14	44	8–16	31	5–8
Ульяновская	31	5–8	34	6–9	31	5–8
Южный	45	10–16	34	6–9	27	4–6
Краснодарский	31	5–8	25	3–5	20	2–3
Волгоградская	54	14–24	43	9–15	29	4–7
Ростовская	38	7–12	33	5–9	24	3–5
Астраханская	63	19–32	44	9–16	42	9–14
Ставропольский	36	6–10	25	3–5	23	3–4

Оценки адаптационного потенциала для посевов озимых культур в целом ниже, чем для яровых, за исключением Северо-Западного ФО, где существует значительный адаптационный потенциал за счёт ежегодной корректировки посевных площадей (10–17 %). Очевидно, это связано с меньшей межгодовой изменчивостью урожайности озимых и более высокой степенью адаптивности при современном распределении посевных площадей.

Рассчитанные выше оценки эффективности ежегодной корректировки (оптимизации) посевных площадей рассматривались на основании оценок $r_{y\hat{y}}$ для «областного» масштаба осреднения. Мы предполагаем, что данный метод не менее эффективен для районного уровня или отдельных хозяйств.

К сожалению, методы прогнозирования урожая для административных районов и, тем более, хозяйств, до сих пор за редким исключением не разрабатывались, а необходимая урожайная статистика труднодоступна.

Поэтому до проведения специальных исследований можно предположить следующее. Эффективность ежегодной корректировки

посевных площадей для отдельных районов должна быть не меньшей, чем для областного уровня поскольку при уменьшении масштаба пространственного осреднения коэффициент вариации урожайности увеличивается. Рост коэффициента вариации при переходе от областного к районному уровню должен привести к пропорциональному росту эффективности рассматриваемого метода.

Так, средний коэффициент вариации урожайности озимой пшеницы, рассчитанный по 43 районам Ростовской области за период с 1990 по 1998 гг., составляет 36 %, а среднеобластной урожайности — 29 %. И переход от областного к районному уровню должен привести к пропорциональному росту эффективности рассматриваемого метода. Но при уменьшении масштаба осреднения точность прогнозирования урожайности может уменьшиться, поэтому реальный рост эффективности, по-видимому, будет несколько ниже 7 %.

Метод корректировки посевных площадей по данным агрометеорологических прогнозов урожайности до сева может быть распространён на случай нескольких культур. Кроме этого предлагаемую методику можно обобщить для задач, требующих учёта разнообразных ограничений на посевные площади, например, в связи с необходимостью соблюдения рекомендованных севооборотов. Универсальным методом решения всех указанных задач является стохастическое моделирование (метод Монте-Карло), использованный в работе (Сиротенко, Павлова, 2001).

7.2.2 Корректировка пространственного распределения площадей

Предлагаемый математический аппарат в равной степени применим и к пространственному распределению посевных площадей. В работе А. А. Жученко (Жученко, 1990) отмечается, что «если к 1900 г. в европейской части России и даже в пределах отдельных губерний структура основных сельскохозяйственных культур была чётко приурочена (методом «проб и ошибок») к определенным почвенно-климатическим макро- и

микроразонам, то при сложившейся к настоящему времени структуре посевных площадей наблюдается неоправданная мозаичность приоритетности культур даже в сопредельных областях и районах». Неадаптивная структура посевных площадей, отличающаяся необычной пестротой и «островным» доминированием отдельных культур, является, по мнению Жученко, одной из важных причин неэффективности нашего сельского хозяйства.

Для объективной оценки степени адаптивности распределения посевных площадей на территории Приволжского и Южного ФО рассчитаны статистические показатели, необходимые для расчётов по формуле (7.2). В табл. 7.5 приведены коэффициенты вариации урожайности (V_y , %) яровой пшеницы, ярового ячменя, озимой пшеницы и их посевных площадей (V_s , %), а также коэффициенты корреляции между урожайностью и посевной площадью (r_{ys}) и между урожайностью текущего года и климатическим прогнозом (средняя урожайность за предшествующие 10 лет) ($r_{y\hat{y}}$).

При прогнозе урожайности текущего года по средней урожайности за предшествующие 10 лет (так называемый «прогноз по климату») соответствующие коэффициенты корреляции оказались достаточно высокими и значимыми практически на всей территории на 95 % уровне. Межгодовая изменчивость урожайности (V_y) по всем трём культурам варьирует значительно: по яровой пшенице — от 31 до 98 %; яровому ячменю от 29 до 81 % и озимой пшенице от 22 до 88 % (табл. 7.5). При этом максимальная изменчивость наблюдалась в аномально засушливом 2010 г. по яровым и озимым зерновым.

Величины r_{ys} , приведённые в этой таблице, для яровой пшеницы и ярового ячменя практически за все годы и в среднем за 20-летний период отрицательны. Это означает, что распределение посевных площадей яровых зерновых культур в Южном ФО скорее можно определить как контрадаптивное, чем адаптивное ($r_{ys} = -0,13$).

Таблица 7.5 — Статистические оценки пространственной изменчивости среднеобластной урожайности и посевных площадей зерновых культур в Приволжском и Южном ФО, рассчитанные за 1996–2015 гг. (в расчёт включены данные 14-ти субъектов Приволжского и 5 субъектов Южного ФО)

Год	Параметр											
	V_y	V_s	r_{yy}^{\wedge}	r_{ys}	V_y	V_s	r_{yy}^{\wedge}	r_{ys}	V_y	V_s	r_{yy}^{\wedge}	r_{ys}
	Яровая пшеница				Яровой ячмень				Озимая пшеница			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1996	49	153	0,64	-0,02	42	82	0,63	-0,32	28	126	0,64	0,24
1997	42	141	0,38	0,16	37	90	0,26	-0,04	22	135	0,65	0,22
1998	58	137	0,88	-0,40	62	88	0,86	-0,49	66	122	0,89	0,64
1999	42	130	0,66	0,26	59	88	0,72	0,10	38	135	0,84	0,50
2000	31	157	0,80	-0,23	29	93	0,88	-0,07	33	138	0,90	0,54
2001	37	157	0,94	-0,18	32	91	0,91	-0,12	29	142	0,87	0,55
2002	40	161	0,88	-0,09	40	91	0,83	-0,07	32	134	0,91	0,51
2003	39	144	0,67	0,10	39	92	0,67	-0,06	41	141	0,79	0,31
2004	35	144	0,86	-0,10	40	89	0,88	0,03	45	141	0,81	0,78
2005	40	140	0,85	-0,23	38	89	0,91	-0,22	47	134	0,92	0,71
2006	40	142	0,88	-0,07	40	88	0,90	-0,06	36	143	0,89	0,48
2007	51	149	0,89	0,20	50	86	0,87	-0,14	40	134	0,91	0,44
2008	46	163	0,95	0,03	40	85	0,92	-0,05	43	132	0,98	0,64
2009	48	173	0,66	-0,30	46	82	0,68	-0,44	33	129	0,93	0,34
2010	98	164	0,40	-0,35	81	81	0,28	-0,42	88	131	0,76	0,73
2011	38	174	0,90	-0,19	26	83	0,90	-0,25	46	141	0,91	0,60
2012	44	169	0,83	-0,37	41	83	0,80	-0,45	53	138	0,85	0,66
2013	45	171	0,68	-0,33	41	82	0,58	-0,43	37	142	0,89	0,55
2014	31	168	0,81	-0,53	30	78	0,84	-0,48	41	144	0,89	0,72
2015	43	155	0,89	-0,39	39	84	0,92	-0,49	49	142	0,93	0,72
сред.	45	155	0,77	-0,15	43	86	0,76	-0,22	42	1,36	0,86	0,54

В то же время, урожайность озимой пшеницы и её посевная площадь в Южном и Приволжском ФО связаны достаточно тесно. В среднем за двадцатилетний период коэффициент корреляции между этими величинами составляет 0,54, достигая максимального значения 0,78 в 2004 г. Начиная с 2004 г., величина r_{ys} изменяется в диапазоне от 0,34 до 0,73, что свидетельствует о высокой степени адаптивности распределения посевных площадей этой культуры.

В табл. 7.6 приведены значения статистических оценок пространственной изменчивости урожайности и посевных площадей зерновых культур, рассчитанных по данным наблюдений для территории Центрального ФО (17 областей). Не останавливаясь на детальном анализе, отметим лишь основное значимое отличие оценок, представленных в табл. 7.5 и табл. 7.6. Коэффициенты корреляции между урожайностью зерновых и их посевными площадями в Центральном ФО выше, чем на юге ЕЧ России. Средние оценки r_{ys} за 1996–2015 гг. составляют для яровой пшеницы, ярового ячменя и озимой пшеницы 0,32; 0,49 и 0,59 соответственно.

Таблица 7.6 — Статистические оценки пространственной изменчивости урожайности и посевных площадей зерновых культур в Центральном ФО, рассчитанные по 17 областям за 1996–2015 гг.

Год	Параметр											
	V_y	V_s	r_{yy}^{\wedge}	r_{ys}	V_y	V_s	r_{yy}^{\wedge}	r_{ys}	V_y	V_s	r_{yy}^{\wedge}	r_{ys}
	Яровая пшеница				Яровой ячмень				Озимая пшеница			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1996	23	84	0,68	0,37	22	71	0,67	0,23	25	95	0,82	0,74
1997	25	87	0,72	0,23	24	75	0,87	0,68	28	105	0,95	0,78
1998	30	80	0,87	0,59	32	79	0,87	0,65	40	100	0,95	0,80
1999	37	76	0,67	0,24	57	84	0,77	0,44	29	103	0,83	0,77
2000	23	72	0,78	0,34	30	94	0,85	0,50	17	96	0,67	0,51
2001	27	78	0,82	0,35	28	95	0,95	0,67	32	102	0,95	0,88
2002	35	82	0,92	0,37	32	97	0,95	0,59	22	107	0,87	0,74
2003	34	83	0,89	0,49	31	1,01	0,86	0,60	30	111	0,80	0,66
2004	32	85	0,86	0,40	29	1,01	0,90	0,50	24	116	0,80	0,47
2005	32	100	0,78	0,51	27	1,05	0,88	0,57	25	110	0,87	0,76
2006	29	100	0,86	0,44	21	1,06	0,86	0,60	19	115	0,45	0,24
2007	16	101	0,34	0,10	14	1,09	0,09	-0,23	16	112	0,79	0,41
2008	30	89	0,86	0,22	30	1,08	0,81	0,87	32	109	0,91	0,87
2009	29	92	0,76	0,40	19	1,08	0,88	0,62	23	109	0,89	0,62
2010	25	98	0,23	-0,09	27	1,08	0,49	-0,11	21	103	0,24	-0,02
2011	15	88	-0,10	0,15	17	1,08	0,84	0,68	20	102	0,63	0,38
2012	20	80	0,76	0,17	23	1,09	0,84	0,32	18	105	0,66	0,40
2013	34	83	0,67	0,39	32	1,08	0,75	0,75	33	104	0,88	0,82
2014	28	98	0,92	0,42	20	1,05	0,80	0,60	26	108	0,84	0,77
2015	20	1,06	0,76	0,37	13	1,08	0,60	0,27	16	102	0,52	0,26
сред.	27	88	0,70	0,32	26	99	0,78	0,49	25	106	0,77	0,59

Результаты расчёта коэффициентов адаптационного потенциала при ежегодной корректировке посевных площадей на основе прогноза урожайности (I) и на основе перераспределения посевных площадей по степени коррелированности с урожайностью (II), представлены в табл. 7.7.

Перераспределение посевных площадей, занятых под зерновые культуры, с учётом климатического прогноза урожайности в Южном и Приволжском ФО, могло бы увеличить валовый сбор яровой пшеницы на 54 %, ярового ячменя — на 28 %, а озимой пшеницы — на 49 % (табл. 7.7).

В Центральном ФО адаптационная составляющая валовых урожаев яровой пшеницы при учёте гарантированных прогнозов урожайности оказалась ниже и составила 17 %, ярового ячменя и озимой пшеницы — 20 %.

Перераспределение посевных площадей по степени их коррелированности с урожайностью позволило бы увеличить валовый сбор озимой пшеницы в Южном и Приволжском ФО на 31 %, а в Центральном ФО на 16 % (табл. 7.7).

Таблица 7.7 — Агрегированные по ФО коэффициенты адаптационного потенциала зерновых культур при межгодовой (I) и пространственной (II) корректировке посевных площадей (по данным за 1996–2015 гг.)

Федеральный округ	Адаптационный потенциал, %					
	яровая пшеница		яровой ячмень		озимая пшеница	
	I	II	I	II	I	II
Южный и Приволжский	54	—	28	—	49	31
Центральный	17	6	20	13	20	16

Обозначения: I — при временной корректировке (по прогнозу урожайности); II — при пространственной корректировке (по посевным площадям); (—) адаптационный потенциал отсутствует.

Адаптация сельского хозяйства к новым климатическим условиям не исчерпывается перераспределением посевных площадей и, как отмечено в

Климатической доктрине РФ (2009), будет эффективной, если примет 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 сельскохозяйственного производства. Одна из таких технологий представлена в диссертационной работе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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 агроэкосистем. 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 погодно-климатических 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 неопределенность отклика продуктивности зерновых на 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 среднемноголетнего 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абашина Е. В., 1979. Метод учета азотного питания растений в динамических моделях, предназначенных для оценки агрометеусловий формирования урожая зерновых культур, Труды ИЭМ, вып. 13(91), с. 101–119.
2. Абашина Е. В., Сиротенко О. Д., 1986. Прикладная динамическая модель формирования урожая для имитационных систем агрометеорологического обеспечения сельского хозяйства, Труды ВНИИСХМ, вып. 21, с. 13–33.
3. Агрометеорологический ежегодник за 1963–1964 с/х год, 1968. Приволжское УГМС (Татарская АССР, Пензенская, Ульяновская, Куйбышевская, Оренбургская и Саратовская области), Приволжское УГМС, вып. 12, 569 с.
4. Агрометеорологический ежегодник за 1962–1963 с/х год, 1968. Северо-Кавказское УГМС (Волгоградская, Ростовская, Астраханская области), Ростов-на-Дону, вып. 4, 537 с.
5. Агроклиматические ресурсы, 1971–1978. Справочники по областям, краям, республикам, Л., Гидрометеиздат.
6. Александров В. А., 2006. Колебания и изменения климата и их влияние на экосистемы юго-восточной и центральной Европы, а также юго-восточных районов США, Диссертация в виде научного доклада на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, СПб., 98 с.
7. Алпатьев А. М., 1954. Влагооборот культурных растений, Л., Гидрометеиздат, 323 с.
8. Андерсон Т., 1963. Введение в многомерный статистический анализ, М., 500 с.
9. Байшоланов С. С., Павлова В. Н., Клещенко А. Д., Муканов Е. Н., Чернов Д. А., Жакиева А. Р., 2018. Оценка агроклиматических ресурсов Костанайской области Республики Казахстан, Метеорология и гидрология, № 3, с. 82–91.
10. Бараев А. И., Бакаев Н. М., Веденева М. Л. и др., 1978. Яровая пшеница, под общей ред. Бараева А. И., М., Колос, 429 с.
11. Бардин М. Ю., 2011. Сценарные прогнозы изменения температуры воздуха для регионов РФ до 2030 г. с использованием эмпирических стохастических моделей климата, Метеорология и гидрология, № 4, с. 5–21.
12. Баталов Ф. З., 1980. Сельскохозяйственная продуктивность климата для яровых зерновых культур, Л., Гидрометеиздат, 112 с.
13. Бойко А. П., 1993. Исследование гидрометеорологического режима среды обитания растений численными методами, СПб., Гидрометеиздат, 215 с.
14. Бойко А. П., Павлова В. Н., 1986. Восстановление профиля запасов почвенной влаги с использованием аппарата сплайн-интерполяции, Труды ВНИИСХМ, Математическое моделирование в агрометеорологии, вып. 21, с. 103–110.
15. Борисоник З. Б., 1974. Яровой ячмень, М., Колос, 255 с.
16. Будаговский А. И., 1964. Испарение почвенной влаги, М., Наука, 244 с.

17. Будаговский А. И., Ничипорович А. А., Росс Ю. К., 1964. Количественная теория фотосинтеза и ее использование для решения научных и практических задач физической географии, Изв. АН СССР, сер. Географическая, № 6, с. 13–27.
18. Будыко М. И., 1956. Тепловой баланс земной поверхности, Л., Гидрометеиздат, 255 с.
19. Будыко М. И., 1977. Современное изменение климата, Л., Гидрометиздат, 47 с.
20. Будыко М. И., Винников К. Я., Дроздов О. А., Ефимова Н. А., 1976. Предстоящие изменения климата, Изв. АН СССР, Сер. геогр., № 6, с. 6–20.
21. Будыко М. И., 1980. Климат в прошлом и будущем, Л., Гидрометеиздат, 352 с.
22. Будыко М. И., 1981. Изменения термического режима атмосферы в фанерозое, Метеорология и гидрология, № 10, с. 5–10.
23. Будыко М. И., Бютнер Э. К., Винников К. Я., Голицин Г. С., Дроздов О. Д., Кароль И. П., 1981. Антропогенные изменения климата, Метеорология и гидрология, № 8, с. 5–14.
24. Будыко М. И., Израэль Ю. А., 1987. Антропогенные изменения климата, Л., Гидрометеиздат, 406 с.
25. Будыко М. И., Израэль Ю. А., Маккарен М. С., Хекта А. Д., 1991. предстоящие изменения климата, Л., Гидрометеиздат, 272 с.
26. Быков А. А., Акимов В. А., Фалеев М. И., 2004. Нормативно-экономические модели управления риском, Проблемы анализа риска, Российское научное общество анализа риска, т. 1, № 2. с. 125–137.
27. Вериго С. А. и Разумова Л. А., 1963. Почвенная влага и ее значение в сельскохозяйственном производстве, Л., Гидрометеиздат, 289 с.
28. Вильфанд Р. М., Страшная А. И., 2011. Климат, прогнозы погоды и агрометеорологическое обеспечение сельского хозяйства в условиях изменения климата. Адаптация сельского хозяйства России к меняющимся погодно-климатическим условиям, Сборник докладов международной научно-практической конференции 7–11 декабря 2010, М., РГАУ-МСХА им. К. А. Тимирязева, с. 23–38.
29. Вильфанд Р. М., Страшная Ф. И., Береза О. В., 2016. О динамике агроклиматических показателей условий сева, зимовки и формирования основных зерновых культур, Труды ГМЦ РФ, № 360, с. 45–78.
30. Винников К. Я., Гройсман П. Я., 1979. Эмпирическая модель современных изменений климата, Метеорология и гидрология, № 3, с. 25–36.
31. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации, 2014. Росгидромет, М., 1008 с.
32. Галямин Е. П., 1981. Оптимизация оперативного распределения водных ресурсов в орошении, Л., Гидрометеиздат, 272 с.
33. Галямин Е. П., Сиптиц С. О., 1974. Оптимальное управление ростом сельскохозяйственной культуры в условиях дефицита водных ресурсов. В кн.: Биологические системы в земледелии и лесоводстве, М., с. 132–135.

34. Глобальные изменения климата и прогноз рисков в сельском хозяйстве России, 2009. Под редакцией академиков Россельхозакадемии Иванова А. Л. и Кирюшина В. И., М., 518 с.
35. Гордеев А. В., Клещенко А. Д., Черняков Б. А., Сиротенко О. Д., Темников В. Н., Усков И. Б., Романенков В. А., Рухович Д. И., 2008. Биоклиматический потенциал России: меры адаптации в условиях изменяющегося климата, М., 205 с.
36. Грингоф И. Г., Павлова В. Н., 2011. Основы сельскохозяйственной метеорологии, т. III. Учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по направлению «Гидрометеорология» и специальностям «Метеорология» и «Агрономия», Обнинск, с. 243–384.
37. Груза Г. В., Ранькова Э. Я., 1980. Структура и изменчивость наблюдаемого климата. Температура воздуха над Северным полушарием, Л., Гидрометеиздат, 72 с.
38. Груза Г. В., Ранькова Э. Я., 2012. Наблюдаемые и ожидаемые изменения климата России: температура воздуха, ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», 194 с.
39. Груза Г. В., Ранькова Э. Я., Рочева Э. В., Самохина О. Ф., 2016. Климатические особенности температурного режима у поверхности земли в 2015 г., Фундаментальная и прикладная климатология, т. 1, с. 104–136.
40. Давитая Ф. Ф., 1958. Засухи в СССР и научное обоснование мер борьбы с ними по природным зонам, М., Изд., Минсельхоза СССР, 37 с.
41. Дегтярева Г. В., 1973. Прогноз урожая яровой пшеницы до ее посева по инерционным факторам, Метеорология и гидрология, № 4, с. 77–84.
42. Дмитренко В. П., 1978. Агрометеорологические исследования УкрНИГМИ (исторический очерк), Тр. УкрНИГМИ, вып. 164, с. 3–32.
43. Дронин Н. М., Кириленко А. П., 2012. Роль климатического и политэкономического факторов в динамике урожайности зерновых в отечественной истории XX века. Вестник МГУ, сер. 5, география, 5, с. 13–18.
44. Дроздов О. А., 1980. Засухи и динамика увлажнений, Л., Гидрометеиздат, 92 с.
45. Доклад о климатических рисках на территории Российской Федерации, 2017. Под ред. В. М. Катцова и Б. Н. Порфирьева, СПб., Росгидромет, 105 с.
46. Дрыгина Т. Ф. Справочник агрогидрологических свойств почв Северного Кавказа, Волгоградской и Астраханской областей, 1962. Под ред. д-ра с.-х. наук С. И. Долгова, Л., Гидрометеиздат, 267 с.
47. Елисеев А. В., Мохов И. И., Мурышев К. Е., 2011. Оценки изменений климата XX–XXI веков с использованием версии климатической модели ИФА РАН, включающей модель общей циркуляции океана, Метеорология и гидрология, № 2, с. 5–16.
48. Елисеев А. В., 2010. Автореферат докторской диссертации на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, МГУ, М., 42 с.
49. Жученко А. А., 1990. Адаптивное растениеводство (эколого-генетические основы), Кишинев, «Штиинца», 432 с.
50. Зоидзе Е. К., Хомякова Т. В., 2000. Оценка засушливых явлений в Российской Федерации, Труды ВНИИСХМ, вып. 33, с. 118–133.

51. Золотокрылин А. Н., Виноградова В. В., Мещерская А. В., Страшная А. И., Черенкова Е. А., 2014. Засухи и опустынивание. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации, М., Росгидромет, с. 551–587.
52. Золотокрылин А. Н., Титкова Т. Б., Черенкова Е. А., 2014. Увлажнение засушливых земель Европейской территории России: настоящее и будущее, Аридные экосистемы, т. 20, № 2(59), с. 5–12.
53. Золотокрылин А. Н., Черенкова Е. А., Титкова Т. Б., Виноградова В. В., Михайлов А. Ю., 2014. Климатические ресурсы и условия устойчивого развития засушливых земель юго-восточной части России. В монографии: «Стратегические ресурсы и условия устойчивости развития Российской Федерации», Глава 5, с. 5–61.
54. Золотокрылин А. Н., Черенкова Е. А., Титкова Т. Б., Михайлов А. Ю., Бардин М. Ю., Ширяева А. В., Виноградова В. В., 2016. Изменения урожайности зерновых культур Европейской России, вызванные квазидвухлетней цикличностью атмосферных процессов, в журнале Известия Российской академии наук, Наука, М., с. 90–99.
55. Израэль Ю. А., Груза В. Г., Катцов В. М., Мелешко В. П., 2001. Изменение глобального климата. Роль антропогенных воздействий, Метеорология и гидрология, № 5, с. 5–21.
56. Израэль Ю. А., Сиротенко О. Д., 2003. Моделирование влияния изменений климата на продуктивность сельского хозяйства России, Метеорология и гидрология, № 6, с. 5–17.
57. Израэль Ю. А., Груза Г. В., Ранькова Э. Я., 2008. Предел предсказуемости и стратегический прогноз изменений климата. Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем, т. XXII, СПб., Гидрометеоиздат, с. 9–28.
58. Катцов В. М., Школьник И. М., Ефимов С. В., Константинов А. В., Павлова В. Н., Павлова Т. В., Хлебникова Е. И., Пикалева А. А., Байдин А. В., Борисенко В. А., 2016. Развитие технологии вероятностного прогнозирования регионального климата на территории России и построение на ее основе сценарных прогнозов изменения климатических воздействий на секторы экономики. Часть 1, Постановка задачи и численные эксперименты, Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова, вып. 583, с. 7–29.
59. Катцов В. М., Школьник И. М., Ефимов С. В., 2017. Перспективные оценки изменений климата в российских регионах: детализация в физическом и вероятностном пространствах, Метеорология и гидрология, № 7, с. 68–80.
60. Катцов В. М., Школьник И. М., Павлова В. Н., Хлебникова Е. И., Ефимов С. В., Константинов А. В., Павлова Т. В., Пикалева А. А., Рудакова Ю. А., Салль И. А., Байдин А. В., Задворных В. А., 2019. Развитие технологии вероятностного прогнозирования регионального климата на территории России и построение на ее основе сценарных прогнозов изменения климатических воздействий на секторы экономики. Часть II, Оценки климатических воздействий. Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова, вып. 593, с. 6–52.
61. Кендалл М., Стьюарт А., 1976. Многомерный статистический анализ и временные ряды, М., Наука, 736 с.

62. Кислов А. В., 2001. Климат в прошлом, настоящем и будущем, М., МАИК «Наука/Интерпериодика», 351 с.
63. Кислов А. В., Евстигнеев В. М., Малхазова С. М., Соколихина Н. Н., Суркова Г. В., Торопов П. А., Чернышев А. В., Чумаченко А. Н., 2008. Прогноз климатической ресурсообеспеченности Восточно-Европейской равнины в условиях потепления XXI века, М., Макс-Пресс, 292 с.
64. Кислов А. В., Варенцов М. И., Тарасова Л. Л., 2015. Роль весенней влажности почвы в формировании крупномасштабных засух Восточно-Европейской равнины 2002 и 2010 гг., Известия РАН, ФАО, М., Наука, т. 51, № 4, с. 464–471.
65. Клещенко А. Д., 2010. Научные основы агрометеорологического и агроклиматического обеспечения аграрного сектора экономики России, Метеорология и гидрология, № 1, с. 43–52.
66. Клещенко А. Д., Страшная А. И., Вирченко О. В., Хомякова Т. В., Чуб О. В., Задорнова О. И., 2013. Мониторинг засух на основе наземной и спутниковой информации, Труды ФГБУ «ВНИИСХМ», вып. 38, с. 87–108.
67. Клещенко А. Д., Лебедева В. М., Гончарова Т. А., Найдина Т. А., Шкляева Н. М., 2016. Оценка потерь урожайности от засухи с помощью динамико-статистической модели прогнозирования продуктивности сельскохозяйственных культур, Метеорология и гидрология, № 4, с. 94–102.
68. Климатическая доктрина Российской Федерации, 2009. <http://meteoinfo.ru/climatedoctrine>.
69. Кобышева Н. В., 2014. Методология экономической оценки практических мероприятий, СПб., ГГО, 14 с.
70. Колосков П. И., 1953. О биоклиматическом потенциале и его распределении по территории СССР, Труды НИИАК, вып. 23, с. 90–111.
71. Колосков П. И., 1971. Климатический фактор сельского хозяйства и агроклиматическое районирование, Л., Гидрометеиздат, 328 с.
72. Константинов А. Р., 1974. О путях развития агрометеорологии и агроклиматологии, Метеорология и гидрология, № 5, с. 109–113.
73. Ладонин В. Ф., 1999. Стратегия земледелия России в XXI веке, М., Агроконсалт, 36 с.
74. Манелля А. И., 1997. Развитие рынка зерна (тенденции производства зерна в Российской Федерации за 1970–1996 годы), М., 128 с.
75. Манелля А. И. и др., 1999. Зерновое хозяйство России за годы 1970–1998, Центр экономической конъюнктуры, М., 158 с.
76. Мелешко В. П., Катцов В. М., Говоркова В. А., Спорышев П. В., Школьник И. М., Шнееров Б. Е., 2008. Климат России в XXI веке. Ч. 3: Будущие изменение климата, рассчитанные с помощью ансамбля моделей общей циркуляции атмосферы и океана СМIP3, Метеорология и гидрология, № 9, с. 5–21.
77. Менжулин Г. В., 1984. Влияние современных изменений климата и содержания углекислоты в атмосфере на продуктивность сельскохозяйственных культур, Метеорология и гидрология, № 4, с. 95–101.

78. Менжулин Г. В., Саватеев С. П., 1981. Влияние современных изменений климата на урожайность сельскохозяйственных культур, В сб.: Проблемы углекислого газа, Л., Гидрометеиздат, с. 186–197.
79. Менжулин Г. В., Саватеев С. П., Павловский А. А., 2010. Влияние современных изменений климата на повторяемость аномалий урожайности озимой и яровой пшеницы в северо-западном регионе России, Вестник Санкт-Петербургского университета, Серия 7: Геология, география. 1, с. 40–52.
80. Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем, 2012. Под ред. С. М. Семенова, М., Росгидромет, 508 с.
81. Мещерская А. В., 1988. О показателе засух и урожайности зерновых культур, Метеорология и гидрология, № 2, с. 91–98.
82. Моделирование роста и продуктивности сельскохозяйственных культур, 1986. Под ред. Ф. В. Т. Пеннинга де Фриза и Х. Х. ванн Лаара, Л., Гидрометеиздат, 320 с.
83. Мохов И. И., 2018. Оценка способности современных климатических моделей адекватно оценивать риск возможных региональных аномалий и тенденций изменения, Доклады Академии наук, Наука (М.), т. 479, № 4, с. 452–455.
84. Ничипорович А. А. и др., 1961. Фотосинтетическая деятельность растений в посевах, М., Изд-во АН СССР, 133 с.
85. Надежина Е. Д., Школьник И. М., Стернзат А. В., Егоров Б. Н., Пикалева А. А., 2018. Испарение с орошенных участков в аридных регионах по оценкам системы моделей регионального климата и пограничного слоя атмосферы, Метеорология и гидрология, № 6, с. 87–97.
86. Обухов В. М., 1949. Урожайность и метеорологические факторы, М., Госпланиздат, 319 с.
87. Ольчев А. В., Мухартова Ю. В., Левашова Н. Т., Волкова Е. М., Рыжова М. С., Мангура П. А., 2017. Влияние пространственной неоднородности растительного покрова и рельефа на вертикальные потоки CO₂ в приземном слое атмосферы, Известия Российской академии наук, Физика атмосферы и океана, Наука (М.), т. 53, № 5, с. 612–623.
88. Ольчев А. В., Дещеревская О. А., Курбатова Ю. А., Молчанов А. Г., Новенко Е. Ю., Придача В. Б., Сазонова Т. А., 2013. CO₂ и H₂O обмен в лесных экосистемах южной тайги при климатических изменениях, Доклады Академии наук, Наука (М.), т. 450, № 6, с. 731–735.
89. Ольчев А. В., 2015. Потоки CO₂ и H₂O в лесных экосистемах в условиях изменяющегося климата (оценки с применением математических моделей), Автореферат докторской диссертации на соискание ученой степени доктора биологических наук, М.
90. Отчет о НИР, 1992. Разработать методы комплексных системных оценок социально-экономических последствий изменения климата на окружающую среду и хозяйственную деятельность (экосистемы суши, гидрологический режим, мир океана, криосфера, сельское хозяйство), № гос. регистрации 01.9.00035864 (гл. 5).
91. Оценка макроэкономических последствий изменений климата на территории Российской Федерации на период до 2030 года и дальнейшую

перспективу, 2011. Под ред. В. М. Катцова, Б. Н. Порфирьева, М., Росгидромет, 450 с.

92. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации, 2008. Изменения климата, т. I, М., Росгидромет, 227 с.

93. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации, 2008. Техническое резюме, М., Росгидромет, 89 с.

94. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации, 2008. Последствия изменений климата, т. II, М., Росгидромет, 288 с.

95. Павлова В. Н., 1986. Развертка информации о возможных изменениях климата для расчетов по динамическим моделям формирования урожаев, Математическое моделирование в агрометеорологии, Труды ВНИИСХМ, вып. 21, с. 84–103.

96. Павлова В. Н., 2009. Проблема оценки влияния изменений климата на продуктивность агросферы России: методология, модели, результаты расчетов, Известия Самарского научного центра РАН, т. 11, № 1(7), с. 1559–1565.

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

98. Павлова В. Н., Абашина Е. В., 2011–2013. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2010, 2011, 2012. Раздел Агроклиматические условия, М., с. 60–71. climatechange.igse.ru.

99. Павлова В. Н., 2013. Влияние изменений климата на экосистемы, агросферу и сельскохозяйственное производство, в кн. Основы сельскохозяйственной метеорологии, Учебное пособие, т. 3, часть II, Обнинск, с. 243–369.

100. Павлова В. Н., 2013. Агроклиматические ресурсы и продуктивность сельского хозяйства России при реализации новых климатических сценариев в XXI-ом веке, Труды ГГО, вып. 569, с. 20–37.

101. Павлова В. Н., Караченкова А. А., 2013, 2014, 2015, 2016, 2017. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за годы, Раздел Агроклиматические условия, М., 2014–2018, с. 39–43. climatechange.igse.ru.

102. Павлова В. Н., Попова Е. Н., 2014. Глава 6.7 «Сельское хозяйство», Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации, М., Росгидромет, с. 920–963.

103. Павлова В. Н., 2015. Стохастическая модель генерации суточных метеорологических параметров по их среднемесячным значениям, Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, № 2015660183 от 24.09. 2015, Москва.

104. Павлова В. Н., Караченкова А. А., 2016. Наблюдаемые изменения климата и динамика агроклиматических ресурсов в XX–XXI столетиях на территории Приволжского федерального округа, Труды ГГО им. А. И. Воейкова, вып. 583, с. 112–128. <http://voeikovmgo.ru/images/stories/publications/2016/583.pdf>.

105. Павлова В. Н., Варчева С. Е., 2016. Динамическая модель продуктивности яровой пшеницы в степной зоне России и Казахстана, Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016660261 от 09.09.2016, Москва.
106. Павлова В. Н., 2017. Глава 3.3 «Сельское хозяйство», Доклад о климатических рисках на территории Российской Федерации, Санкт-Петербург, с. 52–62.
107. Павлова В. Н., Варчева С. Е., 2017. Оценки степени уязвимости территории и климатического риска крупных неурожаев зерновых культур в зерносеющих регионах России, Метеорология и гидрология, № 8, с. 39–49.
108. Павлова В. Н., Варчева С. Е., 2017. Оценка климатических рисков при производстве зерновых культур в Приволжском федеральном округе, Агрофизика, № 2, с. 1–8. <http://www.agrophys.ru/content-Agrophysika2-2017>.
109. Павлова В. Н., Варчева С. Е., 2017. Оценка климатических рисков потерь урожая в региональных системах земледелия, Фундаментальная и прикладная климатология, т. 3, с. 122–132.
110. Павлова В. Н., 2017. Расчёт индексов (показателей) для оценки агроклиматических ресурсов территории при изменении климата, Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ (№ 2017663536).
111. Павлова В. Н., Calanca P., Караченкова А. А., 2018. Продуктивность яровой пшеницы в степной зоне России и Казахстана при современном изменении климата. В кн.: Новые методы и результаты исследований ландшафтов в Европе, Центральной Азии и Сибири, Под ред. Сычева В. Г. и Мюллера Л., т. 3, с. 263–267.
112. Павлова В. Н. Раздел Доклада о научно-методических основах для разработки стратегии адаптации к изменениям климата в Российской Федерации (в области компетенции Росгидромета) (Ред. Катцов В.М., Порфирьев Б. Н.). Санкт-Петербург. 2020, с. 93-107.
113. 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.
114. Павлова В. Н., Карачёноква А. А. Оценка изменений климатообусловленной урожайности яровой пшеницы в земледельческой зоне России. Фундаментальная и прикладная климатология. 2020. №12. С. 78–94.
115. Павлова В.Н., Богданович А.Ю., Семёнов С.М. Об оценке степени благоприятности климата для культивирования зерновых, исходя из частоты сильных засух. 2020. Метеорология и гидрология. № 12. С. 95-101.
116. Пасов И. М., 1986. Изменчивость урожаев и оценка ожидаемой продуктивности зерновых культур, Л., Гидрометеиздат, 152 с.
117. Переведенцев Ю. П., Шанталинский К. М., 2011. Мониторинг глобальных и локальных изменений климата в тропосфере и стратосфере Северного полушария, Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем, т. 24, с. 116–130.
118. Переведенцев Ю. П., Важнова Н. А., Наумов Э. П., Шанталинский К. М., Федотов В. И., Куролап С. А., 2012. Жара в Центральном Черноземье: последствия, причины, прогнозы, Центрально-Черноземное кн. изд-во Воронеж, 222 с.

119. Переведенцев Ю. П., Мохов И. И., Елисеев А. В. и др., 2013. Теория общей циркуляции атмосферы, Казань, Казанский университет, 224 с.
120. Переведенцев Ю. П., Шанталинский К. М., Важнова Н. А., 2014. Пространственно-временные изменения основных показателей температурно-влажностного режима в Приволжском федеральном округе, Метеорология и гидрология, № 4, с. 32–48.
121. Переведенцев Ю. П., Гурьянов В. В., Шанталинский К. М., Аухадеев Т. Р., 2017. Динамика тропосферы и стратосферы в умеренных широтах Северного полушария и современные изменения климата в Приволжском федеральном округе, Казань, Изд-во Казан. ун-та, 186 с.
122. Переведенцев Ю. П., Шанталинский К. М., Шерстюков Б. Г., Николаев А. А., Гурьянов В. В., Аухадеев Т. Р., Мирсаева Н. А., Антонова А. В., 2018. Климатические изменения в Республике Татарстан в XX–XXI веках, Российский журнал прикладной экологии, № 4, с. 3–10.
123. Полуэктов Р. А., 1991. Динамические модели агроэкосистемы, Л., Гидрометеиздат, 312 с.
124. Полуэктов Р. А., Жуковский Е. Е., 1980. Модели продуктивности посевов и агромониторинг, В сб.: Физические, агроэкологические основы управления средой обитания растений, Л., с. 85–103.
125. Полуэктов Р. А., Смоляр Э. И., Терлеев В. В., Топаж А. Г., 2006. Модели продукционного процесса сельскохозяйственных культур, СПб., Изд. С.-Петербургского университета, 392 с.
126. Полуэктов Р. А., Топаж А. Г., Якушев В. П., Медведев С. А., 2012. Использование динамической модели агроэкосистемы для оценки влияния климатических изменений на продуктивность посевов (теория и реализация), Вестник РАСХН, № 2, с. 7–12.
127. Попова Е. Н., Семенов С. М., 2013. Современные и ожидаемые изменения границ климатического ареала колорадского жука в России и соседних странах, Метеорология и гидрология, № 7, с. 103–110.
128. Попова Е. Н., Попов И. О., 2016. Прогноз изменений климатического ареала колорадского жука на территории России и соседних стран при различных сценариях антропогенного воздействия на климат, Известия РАН, Серия географическая, № 1, с. 67–73.
129. «Правила отнесения территорий к неблагоприятным для производства сельскохозяйственной продукции территориям»: постановление Правительства РФ от 27.01.2015 № 51. <http://base.garant.ru/70853938/>.
130. Предстоящие изменения климата, 1991. Совместный советско-американский отчет о климате и его изменениях, под ред. Будыко М. И., Израэля Ю. А., Маккракена М. С., Хекта А. Д., Л., Гидрометеиздат, 272 с.
131. Процеров А. В., 1953. Справочник агрогидрологических свойств почв Союза ССР. Под ред. д-ра с.-х. наук С. И. Долгова, Л., Гидрометеиздат, 308 с.
132. РД Росгидромета 52.88.699, 2008. Положение о порядке действий учреждений и организаций при угрозе возникновения и возникновении опасных природных явлений, М., Росгидромет.

133. Ранькова Э. Я., 2005. Климатическая изменчивость и изменения климата за период инструментальных наблюдений. Диссертация в виде научного доклада на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, ГУ ИГКЭ Росгидромета и РАН, М., 67 с.
134. Растянный В. Г., Дерюгина И. В., 2009. Урожайность хлебов в России 1795–2007, М., ИВ РАН, 191 с.
135. Раунер Ю. Л., 1981. Климат и урожайность зерновых культур, М., Наука, 163 с.
136. Романенков В. А., Павлова В. Н., Беличенко М. В., 2018. Оценка климатических рисков при возделывании зерновых культур на основе региональных данных и результатов длительных опытов геосети, *Агрохимия*, № 1, с. 77–86. <https://www.libnauka.ru/journal/agrokhimiya/agrokhimiya-2018-1/>.
137. Росс Ю. К., 1975. Радиационный режим и архитектура растительного покрова, Л., Гидрометеиздат, 342 с.
138. Рубинштейн Е. С., Полозова Л. Г., 1966. Современное изменение климата, Л., Гидрометеиздат, 200 с.
139. Русакова Т. И., Лебедева В. М., Грингоф И. Г., 2010. Исследование климатообусловленных колебаний урожайности основных зерновых культур, их количественная оценка в новых социально-экономических условиях Российской Федерации, *Метеорология и гидрология*, № 12, с. 88–97.
140. Савватеев С. П., Менжулин Г. В., 2009. Мировая продовольственная проблема в свете развивающихся процессов глобального потепления, *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*, т. 166, с. 559–563.
141. Сапожникова С. А., 1958. Опыт агроклиматического районирования СССР. В кн.: *Вопросы агроклиматического районирования СССР*, М., Изд. Минсельхоза СССР, с. 14–37.
142. Сапожникова С. А., 1963. Принципы сельскохозяйственной бонитировки климата СССР, *Труды Всесоюзного научного метеорологического совещания*, т. VIII, Л., Гидрометеиздат, с. 3–10.
143. Селянинов Г. Т., 1958. Принципы агроклиматического районирования территории СССР. В кн.: *Вопросы агроклиматического районирования СССР*, М., Изд., Минсельхоза СССР, с. 7–14.
144. Селянинов Г. Т., 1966. Агроклиматическая карта мира, Л., Гидрометеиздат, 12 с.
145. Сиптиц С. О., Романенко И. А., Евдокимова Н. Е., 2018. Влияние природно-климатического фактора на устойчивость аграрного производства, *Международный сельскохозяйственный журнал*, № 4, с. 15–19. DOI: 10/24411/2587-6740-2018-14053.
146. Сиптиц С. О., 2005. Моделирование динамики управляемых агропродовольственных систем. Автореферат дис. доктора экономических наук: 08.00.13, Москва, 50 с.
147. Сиротенко О. Д., 1981. Математическое моделирование водно-теплового режима и продуктивности агроэкосистем, Л.: Гидрометеиздат, 167 с.

148. Сиротенко О. Д., Абашина Е. В., Павлова В. Н., 1984. Оценка влияния возможных колебаний и изменений климата на продуктивность сельского хозяйства, Известия АН, Физика атмосферы и океана, № 11, с. 1104–1110.
149. Сиротенко О. Д., Павлова В. Н., 1986. Стохастическое моделирование суточных климатических данных для расчетов по динамическим моделям «погода-урожай», Труды ВНИИСХМ, Математическое моделирование в агрометеорологии, вып. 21, с. 75–83.
150. Сиротенко О. Д., 1991. Имитационная система КЛИМАТ–УРОЖАЙ СССР, Метеорология и гидрология, № 4, с. 67–73.
151. Сиротенко О. Д., Павлова В. Н., 1994. Парниковый эффект и продовольственная проблема России, Метеорология и гидрология, № 7, с. 5–16.
152. Сиротенко О. Д., Абашина Е. В., Павлова В. Н., 1995. Чувствительность сельского хозяйства России к изменениям климата, химического состава атмосферы и плодородия почв, Метеорология и гидрология, № 4, с. 107–114.
153. Сиротенко О. Д., Абашина Е. В., 1998. Агроклиматические ресурсы и физико-географическая зональность России при глобальном потеплении, Метеорология и гидрология, № 3, с. 92–103.
154. Сиротенко О. Д., Павлова В. Н., 2001. Агрометеорологические аспекты оптимизации использования земельных ресурсов, Метеорология и гидрология, № 12, с. 84–95.
155. Сиротенко О. Д., Павлова В. Н., 2003. Оценка влияния изменений климата на сельское хозяйство методом пространственно-временных аналогов, Метеорология и гидрология, № 8, с. 89–99.
156. Сиротенко О. Д., Павлова В. Н., 2004. Сколько стоит прогноз урожайности, Плодородие, № 4(19), с. 30–32.
157. Сиротенко О. Д., Павлова В. Н., 2004. Сколько стоит прогноз урожайности, Метеоспектр. Вопросы специализированного гидрометеорологического обеспечения, М., № 1(17), с. 73–77.
158. Сиротенко О. Д., Абашина Е. В., Романенков В. А., 2005. Моделирование влияния изменений климата на динамику органического углерода в пахотных почвах, эмиссию CO₂ и продуктивность агроэкосистем, Метеорология и гидрология, № 8, с. 83–95.
159. Сиротенко О. Д., Грингоф И. Г., 2006. Оценки влияния ожидаемых изменений климата на сельское хозяйство Российской Федерации, Метеорология и гидрология, № 8, с. 92–101.
160. Сиротенко О. Д., Романенков В. А., 2007. Климат и эволюция биосферы: Россия XX–XXI века, Наука в России РАН, № 6, с. 32–37.
161. Сиротенко О. Д., 2007. Методы оценки изменений климата для сельского хозяйства и землепользования, Методическое пособие, М., Росгидромет, 77 с.
162. Сиротенко О. Д., Груза Г. В., Ранькова Э. Я., Абашина Е. В., Павлова В. Н., 2007. Современные климатические изменения теплообеспеченности, увлажненности и продуктивности агроферы России, Метеорология и гидрология, № 8, с. 90–103.

163. Сиротенко О. Д., Абашина Е. В., Павлова В. Н., Долгий-Трач В. А., 2008. Разработка системы регионального круглогодичного мониторинга водно-теплового режима посевов сельскохозяйственных культур, Труды Регионального конкурса научных проектов в области естественных наук, Калуга, вып. 13, с. 276–281.

164. Сиротенко О. Д., Абашина Е. В., Павлова В. Н., 2009. Проблема оценки влияния изменений климата на продуктивность агросферы: модели, сценарии и результаты для сельского хозяйства России, Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции, т. 166, St.-Petersburg, с. 567–573.

165. Сиротенко О. Д., Павлова В. Н., 2010. Новый подход к идентификации функционалов ПОГОДА-УРОЖАЙ для оценки последствий изменения климата, Метеорология и гидрология, № 2, с. 92–100.

166. Сиротенко О. Д., Павлова В. Н., 2010. Аналоговый прогноз урожайности зерновых культур и основные направления оптимизации размещения сельскохозяйственного производства с учетом изменений климата, В сб.: Агрометеорологическое обеспечение устойчивого развития сельского хозяйства в условиях глобального изменения климата. Труды . ВНИИСХМ, вып. 37, с. 22–41.

167. Сиротенко О. Д., Клещенко А. Д., Абашина Е. В., Павлова В. Н., Семендяев А. К., 2011. Мониторинг изменений климата и оценка последствий глобального потепления для сельского хозяйства, Агрофизика, № 3, с. 31–39.

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

169. Сиротенко О. Д., Клещенко А. Д., Павлова В. Н., Абашина Е. В., 2011. Численный мониторинг как метод исследования коэволюции климата, почв и агросферы на протяжении XX и XXI-го столетий, Труды регионального конкурса научных проектов в области естественных наук, Калуга: АНО КНЦ, вып. 16, с. 211–215.

170. Сиротенко О. Д., Павлова В. Н., 2011. Последствия изменений климата для экономического развития России. Раздел 3.2.2 Сельское хозяйство. В сб.: Оценка макроэкономических последствий изменений климата на территории Российской Федерации на период до 2030 года и дальнейшую перспективу, Под ред. В. М. Катцова, Б. Н. Порфирьева. М., Росгидромет, 450 с.

171. Сиротенко О. Д., Павлова В. Н., 2012. Методы оценки влияния изменений климата на продуктивность сельского хозяйства, Глава 5. Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем, Под ред. С. М. Семенова, М., Росгидромет, с. 165–189.

172. Сиротенко О. Д., Павлова В. Н., Абашина Е. В., 2013. Методика оценки агроклиматических условий для мониторинга изменений современного климата на территории Российской Федерации, Сайт Росгидромета РФ <http://method/meteorf.ru>.

173. Соколов А. В., Фридлант В. М., Докучаев В. В., (ред.) 1974. Агрохимические характеристики 113 типов почв СССР, М., Наука, 447 с.

174. Справочник агрогидрологических свойств почв центральных областей нечерноземной полосы Европейской территории СССР, 1962. Под ред. д-ра с.-х. наук С. И. Долгова, Л., Гидрометеоздат , 267 с.

175. Стратегический прогноз изменения климата Российской Федерации на период до 2010–2015 гг. и их влияние на отрасли экономики России, 2005. М., Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, 28 с.
176. Страшная А. И., Пурина И. Э., Чуб О. В., Задорнова О. И., Чекулаева Т. С., 2013. Автоматизированная технология мониторинга и расчета количества декад с почвенной и атмосферно-почвенной засухой под зерновыми культурами, Труды Гидрометцентра России, вып. 349, с. 150–160.
177. Страшная А. И., Максименкова Т. А., Чуб О. В., 2011. Агрометеорологические особенности засухи 2010 года в России по сравнению с засухами прошлых лет, Труды ГМЦ, вып. 345, с. 194–214.
178. Страшная А. И., Коренкова Н. В., 2005. О засушливости в Среднем Поволжье и ее влиянии на урожайность яровой пшеницы, Труды ГМЦ России, вып. 340, с. 25–34.
179. Страшная А. И., Максименкова Т. А., Чуб О. В., 2013. Оперативное агрометеорологическое обеспечение аграрного сектора экономики России в условиях изменения агроклиматических ресурсов, Труды ФГБУ «ВНИИСХМ», вып. 38, с. 21–40.
180. Страшная А. И., Пурина И. Э., Чуб О. В., Задорнова О. И., Чекулаева Т. С., 2013. Автоматизированная технология мониторинга и расчета количества декад с почвенной и атмосферно-почвенной засухой под зерновыми культурами, Труды Гидрометцентра России, вып. 349, с. 150–160.
181. Суркова Г. В., 2017. Климатические ресурсы и их прогнозируемые изменения в XXI веке в России. Автореферат докторской диссертации на соискание ученой степени доктора географических наук, МГУ, М., 42 с.
182. Тарасова Л. Л., Шульгин И. А., 2010. Гидрорадиационный режим и урожайность яровых зерновых культур в центральных черноземных областях и Среднем Поволжье, Вестник Московского университета, серия 5: География, издательство Моск. ун-та (М.), № 4, с. 30–33.
183. Тарасова Л. Л., Шульгин И. А., 2012. К вопросу об агроклиматической оценке продуктивности яровых зерновых культур, Метеорология и гидрология, № 10, с. 94–101.
184. Тооминг Х. Г., 1977. Солнечная радиация и формирование урожая, Л., Гидрометеиздат, 200 с.
185. Топаж А. Г. Принцип оптимальности в математических моделях агрокоситем. Автореферат на соискание д-ра тех. наук. Санкт-Петербург. 2009 г.
186. Уланова Е. С., 1975. Агрометеорологические условия и урожайность озимой пшеницы. Л., Гидрометеиздат, 303 с.
187. Уланова Е. С., Забелин В. Н., 1990. Методы корреляционного и регрессионного анализа в агрометеорологии, Л., Гидрометеиздат, 207 с.
188. Уланова Е. С., Страшная А. И., 2000. Засухи в России и их влияние на урожайность зерновых культур, Труды ВНИИСХМ, вып. 33, с. 64–83.
189. Усков А. С., Усков И. Б., 2014. Основы адаптации земледелия к изменениям климата, СПб.: Нестор-История, 383 с.

190. Устойчивость земледелия и риски в условиях изменения климата, 2009. Резюме коллективной монографии РАСХН, Под ред. акад. РАСХН Иванова А. Л., чл.-кор. РАСХН Ускова И. Б., СПб, 96 с.
191. Федосеев А. П., 1979. Агрохимия и погода, Л., Гидрометеиздат, 240 с.
192. Франс Дж., Торнли Дж. Х. М., 1987. Математические модели в сельском хозяйстве, М., Агропромиздат, 400 с.
193. Фролов А. В., Страшная А. И., 2011. О засухе 2010 года и ее влиянии на урожайность зерновых культур, Сб. докладов «Анализ условий аномальной погоды на территории России летом 2010 г.» М., Триада ЛТД, с. 22–31.
194. Хан В. М., 2015. Деятельность Северо-Евразийского климатического центра (СЕАКЦ) и Северо-Евразийского климатического форума (СЕАКОФ) в международной структуре ВМО по улучшению климатического обслуживания, Труды Гидрометцентра РФ, вып. 358, с. 5–12. method.meteorf.ru/publ/tr/tr358.
195. Хлебникова Е. И., Рудакова Ю. Л., Салль И. А., Ефимов С. В., Школьник И. М., 2019. Изменение показателей экстремальности термического режима в XXI в.: ансамблевые оценки для территории России, Метеорология и гидрология, вып. 3, с. 11–23.
196. Чебакова Н. М., 2006. Возможная трансформация растительного покрова Сибири при различных сценариях изменения климата. Автореферат докторской диссертации на соискание ученой степени доктора биологических наук, Ин-т леса им. В. Н. Сукачева СО РАН, Красноярск, 60 с.
197. Черенкова Е. А., Кононова Н. К., 2012. Анализ опасных атмосферных засух 1972 и 2010 гг. и макроциркуляционных условий их формирования на территории европейской части России, Труды ГГО, вып. 565, с. 165–187.
198. Черенкова Е. А., Бардин М. Ю., Золотокрылин А. Н., 2015. Статистика осадков и засух в противоположные фазы квазидвухлетней цикличности атмосферных процессов и ее связь с урожайностью в европейской части РФ, Метеорология и гидрология, № 2, с. 23–35.
199. Черенкова Е. А., 2017. Опасная атмосферная засуха на Европейской части России в условиях современного летнего потепления, Фундаментальная и прикладная климатология, т. 2, с. 130–143. DOI: 10.21513/2410-8758-2017-2-130-143.
200. Чирков Ю. И., 1986. Агрометеорология (Учебник для студентов вузов под ред. И. Г. Грингофа), Л., Гидрометеиздат, 296 с.
201. Шашко Д. И., 1967. Агроклиматическое районирование СССР, Изд., «Колос», 335 с.
202. Шашко Д. И., 1985. Агроклиматические ресурсы СССР, Л., Гидрометеиздат, 247 с.
203. Шерстюков Б. Г., 2008. Региональные и сезонные закономерности изменений современного климата, ГУ «ВНИИГМИ-МЦД», 246 с.
204. Школьник И. М., Пигольцина Г. Б., Ефимов С. В., 2018. Воздействия глобального потепления на сельское хозяйство аридных зон Средней Азии в середине XXI века по оценкам ансамбля региональной климатической Модели, Труды ГГО, № 589, с. 5–49.

205. Шнееров Б. Е., Мелешко В. П., Матюгин В. А., Спорышев П. В., Павлова Т. В., Вавулин С. В., Школьник И. М., Зубов В. А., Гаврилина В. М., Говоркова В. А., 2001. Современное состояние глобальной модели общей циркуляции атмосферы ГГО (версия MGO-2). Моделирование общей циркуляции атмосферы и климата, Труды ГГО им. А. И. Воейкова, вып. 550, с. 3–43.
206. Шульгин И. А., 1973. Растение и солнце, Гидрометеиздат, 251 с.
207. Эколого-географические последствия глобального потепления климата XXI века на Восточно-Европейской равнине и Западной Сибири, 2011. Под ред. Касимова Н. С., Кислова А. В., М., МГУ, Географический факультет, 493 с.
208. Яковлев А. С., Макаров О. А., Киселев С. В. и др., 2016. Эколого-экономическая оценка деградации земель, МАКС Пресс Москва, 256 с.
209. Ясюкевич В. В., Попова Е. Н., Гельвер Е. С., Ривкин Л. Е., 2007. Влияние климатических факторов на формирование ареала колорадского жука (*Leptinotarsa decemlineata* Say). В кн.: Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем, т. 21, СПб, Гидрометеиздат, с. 348–379.
210. Acock, B., and Allen, L.H. Jr, "Crop responses to elevated carbon dioxide concentrations", in Strain, B.R., and Cure, J.D. (eds), *Direct Effects of Increasing Carbon Dioxide on Vegetation*, DOE/ER-()238 (Washington, DC: US Dept. of Energy, 1985).
211. Adams R. M., Hurd B. H., Lenhart S. and Leary N., 1998. Effects of global climate change on agriculture: An interpretive review, *Clim. Res.*, vol. 11, pp. 19–30.
212. Afonin A. N., Greene S. L., Dzyubenko N. I., Frolov A. N. (Eds.), 2008. *Interactive Agricultural Ecological Atlas of Russia and Neighboring Countries. Economic Plants and their Diseases, Pests and Weeds.* <http://www.agroatlas.ru>, accessed 15 July 2017.
213. Alcamo J., Dronin N., Endejan M., Golubev G., Kirilenko A., 2007. A new assessment of climate change impacts on food production shortfalls and water availability in Russia, *Global Environ Change*, vol. 17, pp. 429-444.
214. Anderson T. W., 2003. *An Introduction to Multivariate Statistical Analysis*. Third Edition. Wiley-Interscience, John Wiley and Sons, Hoboken, NJ, 721 p.
215. Asseng S., Ewert F., Rosenzweig C., Jones J. W., Hatfield J. L., Ruane A. C., Boote K. J., Thorburn P. J., Rotter R. P., Cammarano D., Brisson N., Basso B., Martre P., Aggarwal P. K., Angulo C., Bertuzzi P., Biernath C., Challinor A. J., Doltra J., Gayler S., Goldberg R., Grant R., Heng L., Hooker J., Hunt L. A., Ingwersen J., Izaurrealde R. C., Kersebaum K. C., Mueller C., Kumar S. N., Nendel C., O'Leary G., Olesen J. E., Osborne T. M., Palosuo T., Priesack E., Ripoche D., Semenov M. A., Shcherbak I., Steduto P., Stoeckle C., Stratonovitch P., Streck T., Supit I., Tao F., Travasso M., Waha K., Wallach D., White J. W., Williams J. R., Wolf J., 2013. Uncertainty in simulating wheat yields under climate change. *Nature Climate Change*, vol. 3, pp. 827–832. doi: 10.1038/nclimate1916.
216. Asseng S. et al, 2015. Rising temperatures reduce global wheat production, *Nature Climate Change*, vol. 5, pp. 143–147.
217. Barriopedro D., Garcia-Herrera R., Lupo A. R., Hernandez E., 2006. A Climatology of Northern Hemisphere Blocking, *J. Climate*, vol. 19, pp. 1042–1063.
218. Belyaeva M., Bokusheva R., 2018. Will climate change benefit or hurt Russian grain production? A statistical evidence from a panel approach, *Climatic Change*, vol. 149, pp. 205–217. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10584-018-2221-3>.

219. Bokusheva R., Hockmann H., Kumbhakar S. C., 2012. Dynamics of productivity and technical efficiency in Russian agriculture, *Eur. Rev. Agric. Econ.*, vol. 39, pp. 611–637.
220. Bouwer C., Heibloem M., 1986. *Irrigation Water Management. Training Manual No. 3. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome, Italy.*
221. Brisson N., Gate P., Gouache D., Charmet G., Oury F.-X., Huard F., 2010. Why are wheat yields stagnating in Europe? A comprehensive data analysis for France, *Field Crops Res.*, vol. 119, pp. 201–212.
222. Brown M. E., de Beurs K. M., Marshall M., 2012. Global phenological response to climate change in crop areas using satellite remote sensing of vegetation, humidity and temperature over 26 years, *Remote Sensing of Environment*, vol. 126, pp. 174–183.
223. Bruhn J. A., Fry E. W., Fick G. W., 1980. Simulation of Daily Weather Data Using Theoretical Probability Distribution, *J. Appl. Meteor.*, vol. 19, № 9, pp. 1029–1036.
224. Bulygina O. N., Korshunova N. N., Bardin M. Yu., Davletshin S. G., 2018. Russia in «State of the Climate in 2017», *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 99, № 8, pp. 150–152.
225. Cherenkova E., Semenova I., Bardin M., Zolotokrylin A. N., 2015. Drought and grain crop yields over the East European Plain under influence of quasi-biennial oscillation of global atmospheric processes, *International Journal of Atmospheric Sciences*, vol. 2015, № 1, pp. 1–11.
226. Clarke L., Edmonds J., Krev V., Richels R., Rose S., Tavoni M., 2009. International climate policy architectures overview of the EMF 22 international scenarios, *Energ Econ* 31 (suppl 2): S64–S81.
227. Clarke L., Edmonds J., Jacoby H., Pitcher H., Reilly J. and Richels R., 2007. *Scenarios of Greenhouse Gas Emissions and Atmospheric Concentrations. Sub-report 2.1A of Synthesis and Assessment Product 2.1 by the U.S, Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research, Department of Energy, Office of Biological & Environmental Research, Washington, DC, 154 p.*
228. Collins M., Tett S. F. B., Cooper C., 2001. The internal climate variability of HadCM3, a version of the Hadley Centre coupled model without flux adjustments, *Climate Dynamics*, vol. 17, pp. 61–81. doi:10.1007/s003820000094.
229. Cure, J.D. and Acock, B., "Crop responses to carbon dioxide doubling: a literature survey", *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 38: pp. 127-145 (1986).
230. Deschênes O., Greenstone M., 2007. The Economic Impacts of Climate Change: Evidence from Agricultural Output and Random Fluctuations in Weather, *The American Economic Review*, vol. 97, pp. 354–385.
231. Diffenbaugh N. S., Field C. B., 2013. Changes in Ecologically Critical Terrestrial Climate Conditions, *Science*, vol. 341, pp. 486–492.
232. Van Diepen C. A., Wolf J., van Keulen H., 1989. WOFOST: a simulation model of crop production. *Soil Use and Management* 5, 16–24.
233. Donner L. J., Wyman B. L., Hemler Richards S., 2011. The dynamical core, physical parameterizations, and basic simulation characteristics of the atmospheric

component AM3 of the GFDL Global Coupled Model CM3, *Journal of Climate*, vol. 24(13), pp. 3484–3519. doi:10.1175/2011JCLI3955.1.

234. Dronin N., Kirilenko A., 2008. Climate change and food stress in Russia: what if the market transforms as it did during the past century? *Climatic Change*, vol. 86, pp. 123–150.

235. Dronin N., Kirilenko A. Climate change and water resources in North Caucasus and South Urals. In *Rescue of Sturgeon species in the Ural River Basin*. NATO Science for Peace and Security Series - C: Environmental Security, Springer, 2008. p. 173–189.

236. FAO, 2016. Faostat FAOSTAT Data. Food and Agric. Org. United Nations, Rome. <http://www.fao.org/faostat>, accessed 15 July 2017.

237. Florian Schierhorn, Monireh Faramarzi, Alexander V Prishchepov, Friedrich J Koch and Daniel Müller, 2014. *Environ. Res. Lett.* 9 084017 (12 pp).

238. Gifford R. M., 1977. Growth pattern, carbon dioxide exchange and dry weight distribution in wheat growing under differing photosynthetic environments, *Aust J. Plant Physiol*, vol. 4, pp. 99–110.

239. Gifford R. M., 1979. Growth and yield of CO₂ enriched wheat under waterlimited conditions, *Aust J. Plant Physiol*, vol. 6, pp. 367–373.

240. Gifford R. M., "Direct effect of higher carbon dioxide levels concentrations on vegetation", in Pearman, G. I. (ed.), *Greenhouse: Planning for Climate Change* (Australia: CSIRO 1988), pp. 506–519.

241. Godfray H. C J. et al., 2010. Food security: The challenge of feeding 9 billion people. *Science* 327, 812–818.

242. Gruza G V., Rankova E. Ya., 2012. Observed and Expected Climate Changes over Russia: Surface air temperature. Report, Institute of Global Climate and Ecology, Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring (Roshydromet), Moscow, 194 p.

243. Hansen J., Russel E., Rind D., Stone P., Lacis A., Lebedeff S., Ruedy R., Trevis L., 1983. Efficient tree-dimensional global models for climate studies. Models 1 and 2, *Monthly Weather Rev*, vol. 3, pp. 609–662.

244. Hansen J. E., Ruedy R., Sato Mki., Inhoff M., Lawrence W., Easterling D., Peterson T., Karl T., 2001. A closer look at United States and global surface temperature change, *J. Geophys. Res*, vol. 106, pp. 23947–23963. doi:10.1029/2001JD000345.

245. Hillel, D., and Rosenzweig, C., *The Greenhouse Effect and Its Implications Regarding Global Agriculture*, Research Bulletin No. 724 (Amherst, Massachusetts: Massachusetts Agricultural Experiment Station, April, 1989).

246. Hoogenboom G., Jones J. W., Wilkens P. W., Porter C. H., Boote K. J., Hunt L. A., Singh U., Lizaso J. L., White J. W., Uryasev O., Royce F. S., Ogoshi R., Gijssman A. J., Tsuji G. Y., Koo J., 2012. *Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) Version 4.5*, Honolulu: University of Hawaii.

247. IPCC, 2001: *Climate Change 2001. The Scientific Basis*. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Houghton J. T., Ding Y., Griggs D. J., Noguer M., Van der Linden P. J. and Xiaosu D. (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881 p.

248. IPCC, 2007: Climate Change 2007. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marguis M., Averyt K. B., Tignor M. and Miller H. L. (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 976 p.

249. IPCC, 2013: Climate Change 2013. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Stocker T. F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S. K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V. and Midgley P. M. (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp, doi:10.1017/CBO9781107415324.

250. IPCC, 2014: Summary for policymakers. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Part A: global and sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Field C. B. et al., Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, Cambridge University Press, pp. 1–32.

251. Jamieson P. D., Semenov M. A., Brooking I. R., Francis G. S., 1998. Sirtus: a mechanistic model of wheat response to environmental variation, *European journal of Agronomy*, vol. 8, pp. 161–179.

252. Jones J. W., Hoogenboom G., Porter C. H., Boote K. J., Batchelov W. D., Hunt L. A., Wilkens P. W., Singh U., Gijsman A. J., Ritchie J. T., 2003. DSSAT cropping system model, *European journal of Agronomy*, vol. 18, pp. 235–265.

253. Kendon E. J., Rowell D. P., Jones R. G., Buonomo E., 2008. Robustness of future changes in local precipitation extremes, *J. Climate*, vol. 21, pp. 4280–4297. doi:10.1175/2008JCLI2082.1.

254. Kingdom, Met Office, FitzRoy Road, Exeter, Devon, EX1 3PB, United. Met Office. Retrieved 2016-11-14. "Met Office climate prediction model: HadCM3".

255. Kiselev S. V., Stokov A. S., Belugin A. Y., 2016. Projections of Russia's agricultural development under the conditions of climate change, *Studies on Russian Economic Development*, vol. 27(5), pp. 548–556.

256. Kobayashi K., Salam M. U., 2000. Comparing simulated and measured values using mean squared deviation and its components, *Agron. J.*, vol. 92, pp. 345–352.

257. Krysanova V., Mueller-Wohlfeil D. I., Becker A., 1998. Development and test of a spatially distributed hydrological / water quality model for mesoscale watersheds, *Ecological Modelling*, 106, pp. 261–289.

258. Krysanova V., Hattermann F., Huang Sh., Hesse C., Vetter T., Liersch S., Koch H. and Kundzewicz Z. W., 2015. Modelling climate and land use change impacts with SWIM: lessons learnt from multiple applications, *Hydrological Sciences Journal*, vol. 60, is. 4, doi 10.1080/02626667.2014.925560.

259. Larsen G. A., Pense R. B., 1982. Stochastic simulation of daily climatic data for agronomic models, *Agronomy J.* vol. 74, pp. 510–514.

260. Lehmann N., Finger R., Klein T., Calanca P., Walter A., 2013. Adapting crop management practices to climate change: Modeling optimal solutions at the field scale, *Agricultural Systems*, vol. 117, pp. 55–65.

261. Liefert W. 2002. Comparative Advantage in Russian agriculture, *American Journal of Agricultural Economics*, vol. 84, pp. 762–767.

262. Lioubimtseva E., Dronin N., Kirilenko A., 2015. Grain production trends in the Russian Federation, Ukraine and Kazakhstan in the context of climate change and international trade, in: Elbehri, A. (Ed.), *Climate Change and Food Systems: Global Assessments and Implications for Food Security and Trade*, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome.
263. Iizumi T., Ramankutty N., 2016. Changes in yield variability of major crops for 1981–2010 explained by climate change, *Environ Res Lett* 11(3):034003. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/3/034003>.
264. Lobell D. B., Schlenker W., Costa-Roberts J., 2008. Climate trends and global crop production since 1980, *Science* 333, pp. 616–620.
265. Lobell D. B., Burke M. B., Tebaldi C., Mastrandrea M. D., Falcon W. P. and Naylor R. L., 2008. Prioritizing Climate Change Adaptation Needs for Food Security in 2030, *Science*, 319(5863), pp. 607–610.
266. Lobell D. B., Field C. B., 2007. Global scale climate-crop yield relationships and the impacts of recent warming, *Environ, Res. Lett.*, vol. 2, pp. 1–7.
267. Lobell D. B., Schlenker W., Roberts J. C., 2011. Climate trends and global crop production since 1980. *Scienceexpress* /www.scienceexpress.org/5 May 2011/.
268. Lobell D. B., Schlenker W., Roberts J. C., 2011. Supporting online material for Climate trends and global crop production since 1980. [www.sciencemag.org/cgi/content full/science.1204531/DC1](http://www.sciencemag.org/cgi/content/full/science.1204531/DC1).
269. Lobell D. B., Burke M. B., 2010. On the Use of Statistical Models to Predict Crop Yield Responses to Climate Change, *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 150, pp. 1443–1452.
270. Lobell, D.B. and Gourdji, S.M. “The Influence of Climate Change on Global Crop Productivity”. 2012. *Plant Physiology*. Vol. 160, pp. 1686-1697.
271. Lotze-Campen H., Muller C., Bondeau A., Rost S., Popp A., Lucht W., 2008. Global food demand, productivity growth, and the scarcity of land and water resources: A spatially explicit mathematical programming approach, *Agricultural Economics*, vol. 39, pp. 325–338.
272. Mearns L. O., Giorgi F., McDaniel L. and Shields C., 1995. Analysis of climate variability and diurnal temperature in a nested regional climate model: Comparison with observations and doubled CO₂ results, *Clim. Dyn.*, vol. 11, pp. 193–209.
273. Meehl G. A., Covey C., Delworth T., Latif M., McAvaney B., Mitchell J. F. B., Stouffer R. J., Taylor K. E., 2007. The WCPM CMIP3 multimodel dataset: a new era in climate change research, *Bull. Amer. Met. Soc.*, vol. 88, p. 1383–1394. doi: 10/1175/BAMS-88-9-1383.
274. Meshcherskaya A. V., Blazhevich V. G., 1997. The Drought and Excessive Moisture Indices in a Historical Perspective in the Principal Grain-Producing Regions of the Former Soviet Union, *J. Climate*, vol. 10, pp. 2670–2682.
275. Morison, J.I.L., "Intercellular CO₂ concentration and stomatal response to CO₂", in Zeiger, E., Cowan, I.R. and Farquhar, G.D. (eds), *Stomatal Function* (Stanford: Stanford University Press, 1987), pp. 229-251.
276. Moss R. H. et al. 2010 The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature* 463, 747–756.

277. Müller D., Prishchepov A. V., Faramarzi M., Balmann A., 2014. The potential of Russia to increase its wheat production through cropland expansion and intensification, *Global Food Security*, vol. 3, pp. 133–141.
278. Mueller L., Sheudshen A., Eulenstein F. (eds), 2016. *Novel Methods for Monitoring and Managing Land and Water Resources in Siberia*. Springer Water, Springer, Cham, pp. 287–305. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24409-9_11.
279. Murphy J., Kattsov V., Keenlyside N., Kimoto M., Meehl J., Mehta V., Pohlmann H., Scaife A., Smith D., 2010. Towards Prediction of Decadal Climate Variability and Change. *Procedia Environmental Sciences*, vol. 1, pp. 287–304. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proenv.2010.09.018>.
280. Mirschel W., Wenkel K-O., Berg M., Wieland R., Nendel C., Köstner B., Topazh A. G., Terleev V. V., Badenko V. L., 2016. A spatial model-based decision support system for evaluating agricultural landscapes under the aspect of climate change. In: L. Mueller et al. (eds) In «Novel Methods for Monitoring and Managing Land and Water Resources in Siberia», Chapter 23, pp. 519–540. <https://zcloud.zalf.de/index.php/s/Q8RN9zeqJtyMf6y>.
281. Nicks A. D., Harp J. F., 1980. Stochastic generation of temperature and solar radiation data, *J. Hydrology*, vol. 48, pp. 1–7.
282. *Novel Methods and Results of Landscape Research in Europe, Central Asia and Siberia*, 2018. Monograph in 5 volumes, Landscape monitoring and modeling, Viktor G., Sychev and Lothar Mueller (eds), M., vol. III, 352 p.
283. Ortiz-Bobea A., Just R. E., 2012. Modeling the structure of adaptation in climate change impact assessment, *American Journal of Agricultural Economics*, vol. 95 (2), pp. 244–251.
284. Olchev A., Novenko E., Desherevskaya O., Krasnorutskaya K., Kurbatova J., 2009. Effects of climatic changes on carbon dioxide and water vapor fluxes in boreal forest ecosystems of European part of Russia, *J. Environmental Research Letters*, Institute of Physics Publishing (United Kingdom), № 4, c. 045007–045007.
285. Olchev Alexander, Novenko Elena, Popov Viktor, Pampura Tatiana, Meili Markus, 2017. Evidence of temperature and precipitation change over the past 100 years in a high-resolution pollen record from the boreal forest of Central European Russia, *J. Holocene*, SAGE Publications (United States), vol. 27, № 5, pp. 740–751.
286. Olchev A., Getmanova E., Novenko E., 2019. A modeling approach for reconstruction of annual land surface evapotranspiration using palaeoecological data. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Institute of Physics Publishing (United Kingdom).
287. Parry, M.L., "The impact of climatic variations on agricultural margins", in Kates. R.W., Ausubel, J.H., and Berberian, M., (eds), *Climate Impact Assessment*, SCOPE 27 (Chichester: John Wiley and Sons, 1985), pp. 351-368.
288. Pavlova Vera N., Varcheva Svetlana E., Bokusheva Raushan, Calanca Pierluigi, 2014. Modeling the effects of climate variability on spring wheat productivity in the steppe zone of Russia and Kazakhstan, *J. Ecological Modeling*, vol. 277, pp. 57–67.
289. Pavlova V., 2015. Regional agroclimatic monitoring and evaluation of climate change impact on Russia's agriculture, *Forum «Agriculture and climate change*

in transition economies», 17–19 June Halle (Saale), Germany.
<http://projects.iamo.de/forum/2015/abstracts-and-presentations/>.

290. Pavlova Vera, Shkolnik Igor, Pikaleva Anastasia, Efimov Sergey, Karachenkova Anna, Kattsov Vladimir., 2018. Future changes in spring wheat yield in the European Russia as inferred from a large ensemble of high-resolution climate projections. *Environ. Res. Lett.* <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaf8be>.

291. Pearch, R.W. and Bjorkman, O., "Physiological effects", in Lemon, E.R. (ed.), *Cdeg.2 and Plants: The Response of Plants to Rising Levels of Atmospheric Cdeg.2* (Boulder, Colorado: Westview Press, 1983), pp. 65-105.

292. Peters G. P. et al., 2012. *Nature Clim. Change* 3, 4–6.

293. Poluektov R. A., Fintushal S. M., Oparina I. V., Shatskikh D. V., Terleev V. V., Zakharova E. T., 2002. Agrotool — a system for crop simulation, *Arch Agron Soil Sci*, vol. 48(6), pp. 609–635.

294. Pope V. D., Gallani M. L., Rowntree P. R., Stratton R. A., 2000. The impact of new physical parameterizations in the Hadley Centre climate model – HadAM3. *Climate Dynamics*, vol. 16 (2–3), pp. 123–146. doi:10.1007/s003820050009. Archived from the original on 7 July 2001.

295. Popova V. V., Zolotokrylin A. N., Cherenkova E. A., Titkova T. B., 2015. Droughts in North Eurasia and Climate Warming: Regional Changes and Consequences. *Enviromental Change and the Social Response in the Amur River Basin*. Eds, S.Haruyama, T.Shiraiwa, Springer, vol. 5, pp. 129–148. DOI 10.1007/978-4-431-55245-1-6.

296. Racsko P., Szeidl L., Semenov M. A., 1991. A serial approach to local stochastic weather models, *Ecol. Model*, vol. 57, pp. 27–41.

297. Ray D. K., Ramankutty N., Mueller N. D., West P. C., Foley J. A., 2012. Recent patterns of crop yield growth and stagnation, *Nat. Commun*, vol. 3, 1293 p. DOI:10.1038/ncomms2296.

298. Rosenzweig C., Iglesias A., Yang X., Epstein P. and Chivian E., 2000. *Climate Change and U. S. Agriculture: The Impacts of Warming and Extreme Weather Events on Productivity, Plant Diseases and Pests*, Center for Health and the Global Environment, Harvard Medical School, Boston, 46 pp.

299. Rosenzweig C. et al. 2013. The Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project (AgMIP): Protocols and pilot studies. *Agr. Forest Meteorol.* 170, pp. 166–182.

300. Rosenzweig C., Parry M. L. Potential impact of climate change on world food supply. *Nature* 367, 133–138 (1994).

301. Rummukainen M., Rockel B., Barring L., Christensen J. H., Reckermann M., 2015. Twenty-first-century challenges in regional climate modeling, *Bull Am Meteorol Soc*, vol. 96(8), pp. 135–138.

302. Sirotenko O. D., Abashina E. V., Pavlova V. N., 1997. Sensitivity of the Russian agriculture in climate, CO₂ and tropospheric ozone concentrations and soil fertility, *Climatic change*, vol. 36, pp. 217–234.

303. Schirehorn F., Muller D., Prishchepov A., Faramarzi M., Balmann A., 2014. The potential of Russia to increase its wheat production through cropland expansion and intensification, *Global Food Security*, vol. 3, No. 3–4, pp. 133–141.

304. Schierhorn F., Faramarzi M., Prishchepov A. V., Koch F., Müller D., 2014. Quantifying yield gaps in wheat production in Russia, *Environmental Research Letters*, vol. 9, pp. 1–12.
305. Schlenker W., Roberts M. J., 2009. Nonlinear temperature effects indicate severe damages to U.S. crop yields under climate change, *PNAS*, vol. 106, pp. 15594–15598.
306. Semenov M. A., Porter J. R., 1995. Climatic variability and the modelling of crop yields, *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 73, pp. 265–283.
307. Semenov M. A., Barrow E. M., 1997. Use of a stochastic weather generator in the development of climate change scenarios, *Climatic Change*, vol. 35, pp. 397–414.
308. Semenov M. A., Wolf J., Evans L. G., Eckersten H., Iglesias A. Comparison of wheat simulation models under climate change. 2. Application of climate change scenarios. *Clim. Res.* 7, 271–281 (1996).
309. Sherstyukov Boris et al., 2012. Changes in Impacts of Climate Extremes: Human Systems and Ecosystems. Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaption. Special Report of the Intergovernment Panel on Climate Change, Chapter 4. – Cambridge University press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 582 p.
310. Shukla J., DelSole T., Fennessy M., Kinter J., Paolino D., 2006. Climate model fidelity and projections of climate change, *Geophys Res Lett*, vol. 33, L07702, doi: 10.1029/2005GL025579.
311. Shkolnik I., Pavlova T., Efimov S., Zhuravlev S., 2017. Future changes in peak river flows across northern Eurasia as inferred from an ensemble of regional climate projections under the IPCC RCP8.5 scenario, *Climate Dynamics*. DOI: 10.1007/s00382-017-3600-6.
312. Sitnov S. A., Mokhov I. I., Lupo A. R., 2017. Ozone, water vapor, and temperature anomalies associated with atmospheric blocking events over Eastern Europe in spring - summer 2010, *Atmospheric Environment*, издательство Elsevier BV (Netherlands), vol. 164, pp. 180–194.
313. Sommer R. et al., 2013. Impact of climate change on wheat productivity in Central Asia, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, vol. 178, pp. 78–99.
314. Stockle C. O., Donatelli M., Nelson R., 2003. CropSyst, a cropping system simulation model, *European Journal of Agronomy*, vol. 18, pp. 289–307.
315. Tao F., Zhang Z., Liu J., Yokozawa M. Modelling the impacts of weather and climate variability on crop productivity over a large area: A new super-ensemble-based probabilistic projection. *Agric. Forest Meteorol.* 149, 1266–1278 (2009).
316. Taylor K. E., Stouffer R. J., Meehl G. A., 2012. An Overview of CMIP5 and the experiment design, *Bull Am Meteor Soc*, vol. 93, pp. 485–498. doi:10.1175/BAMS-D-11-00094.1.
317. Tchebakova N. M., Parfenova E. I., Soja A. J., 2009. Effects of climate, permafrost and fire on vegetation change in Siberia in a changing climate, *Environ Res Lett* 4:045013. doi:10.1088/1748-9326/4/4/045013.
318. Tchebakova N. M., Chuprova V. V., Parfenova E. I., Soja A. J., Lysanova G. I., 2016. Evaluating the Agroclimatic Potential of Central Siberia. In: Mueller L., Sheudshen A., Eulenstein F. (eds) *Novel Methods for Monitoring and*

Managing Land and Water Resources in Siberia, Springer Water, Springer, Cham, pp. 287–305. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24409-9_11.

319. Trnka M., Rötter R. P., Ruiz-Ramos M., Kersebaum K. C., Olesen J., Žalud Z., Semenov M. A., 2014. Adverse weather conditions for European wheat production will become more frequent with climate change, *Nature Climate Change* vol. 4, pp. 637–643.

320. Trnka M., 2012. Simulation of spring barley yield in different climatic zones of Northern and Central Europe: a comparison of nine crop models, *Field Crops Res.*, vol. 133, pp. 23–36.

321. USDA-FAS, 2016. Grain: World Markets and Trade. United States Department of Agriculture, Foreign Agricultural Service. <http://www.fas.usda.gov>, accessed 15 July 2017.

322. Van Vuuren D. P., Edmonds J. A., Kainuma M., Riahi K., Thomson A. M., Hibbard K., Hurtt G. C., Kram T., Krey V., Lamarque J-F., Masui T., Meinshausen M., Nakićenović N., Smith S. J., Rose S., 2011. The representative concentration pathways: an overview, *Clim Change*, vol. 109, pp. 5–31. doi:10.1007/s10584-011-0148-z.

323. Wheeler, T.R., Batts, G.R., Ellis, R.H., Hadley, P., Morison, J.I.L., 1996. “Growth and yield of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) crops in response to CO₂ and temperature”. *J. Agric. Sci.* 127, 37–48.

324. White J. W., Hoogenboom G., Kimball B. A., Wall G. W. 2011. Methodologies for simulating impacts of climate change on crop production. *Field Crops Res.* 124, 357–368.

325. Wechsung F., Gerstengarbe F.-W., Lasch P., Lüttger A., 2008. Die Ertragsfähigkeit ostdeutscher Ackerflächen unter Klimawandel, PIK Report № 112, Potsdam, p. 3–16.

326. Wenkel K-O., Wieland R., Mirschel W., Schultz A., Kampichler C., Kirilenko A., Voinov A., 2008. Regional models of intermediate complexity (REMICs): a new direction in integrated landscape modelling. In: *Environmental modelling, software and decision support: state of the art and new perspective*, Amsterdam (Elsevier), pp. 285–295.

327. Zolotokrylin A. N., Titkova T. B., Cherenkova E. A., 2014. Humidification of Drylands in European Russia the Present and Future, *Arid Ecosystems*, vol. 4, No. 2, pp. 49–54.