

Федеральная служба по гидрометеорологии
и мониторингу окружающей среды
(РОСГИДРОМЕТ)

И. Г. Грингоф, В. Н. Павлова

ОСНОВЫ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ МЕТЕОРОЛОГИИ

Том III

ОСНОВЫ АГРОКЛИМАТОЛОГИИ

**ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА
НА ЭКОСИСТЕМЫ, АГРОСФЕРУ
И СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЕ ПРОИЗВОДСТВО**

Допущено

*Учебно-методическим объединением по образованию в области
гидрометеорологии в качестве учебного пособия для студентов
высших учебных заведений, обучающихся по направлениям
«Гидрометеорология» и «Прикладная гидрометеорология»
и специальностям «Метеорология» и «Агрономия»*

Под редакцией
докторов географических наук, профессоров,
заслуженных метеорологов Российской Федерации
Г.Н. Чичасова и А.Д. Клещенко

Обнинск
2013

И. Г. Грингоф, В. Н. Павлова. Основы сельскохозяйственной метеорологии. Том III. Часть 1. Основы агроклиматологии. Часть 2. Влияние изменений климата на экосистемы, агросферу и сельскохозяйственное производство. **Обнинск: ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2013. – 384 с.**

ISBN 978–5–901579–33–6 (Обнинск, ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД»)

ISBN 978–5–901579–50–3 (том III)

Рецензенты:

член учебно-методического объединения вузов РФ по образованию в области гидрометеорологии, заместитель директора по науке ФГБУ «Гидрометцентр России», канд. физ.-мат. наук Г. В. Елисеев;

главный научный сотрудник ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» доктор географических наук, заслуженный метеоролог РФ, профессор кафедры географии Калужского государственного университета им. К. Э. Циолковского В. А. Семенов;

заведующий лабораторией последствий изменения климата ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» доктор географических наук Б. Г. Шерстюков.

Пособие представляет собой продолжение опубликованных «Основ сельскохозяйственной метеорологии», том I «Потребность сельскохозяйственных культур в агрометеорологических условиях и опасные для сельскохозяйственного производства погодные условия» (2011); том II (в двух книгах) «Методы расчётов и прогнозов в агрометеорологии» (2012).

Настоящий – третий – том учебного пособия состоит из двух частей: первая – «Основы агроклиматологии»; вторая – «Влияние изменений климата на экосистемы, агросферу и сельскохозяйственное производство».

В первой части (главы 1–7) изложены основные направления и достижения российской агроклиматологии, развивавшейся в России с конца XIX столетия, и особенно интенсивно – в советские годы до последней четверти XX века, когда начался период глобального потепления. В этой части определены предмет и задачи агроклиматологии, её место среди других дисциплин наук о Земле; описаны основные методы агроклиматической обработки массовых материалов наблюдательной сети, принципы и методы сельскохозяйственной оценки климатов и агроклиматических ресурсов России, агроклиматического районирования; особенности формирования водного и теплового балансов сельскохозяйственных полей и перезимовки озимых культур; изложены физические основы формирования микроклимата и фитоклимата, пути и методы улучшения микроклимата полей; рассказано о закономерностях водно-теплового режима различных типов почв, особенно о климате почв в тёплое и холодное полугодия, о принципах и методах районирования климата почв. Здесь подчеркнуто значение научного наследия поколений выдающихся агроклиматологов, без знания которого происходящие на рубеже XX и XXI столетий изменения климата и их последствия на агроклиматические условия и аграрный сектор страны могут оказаться не достаточно понятными и убедительными.

Во второй части (главы 8–12) изложены современные научные представления о глобальном изменении климата, парниковом эффекте, о генезисе изменений климата и причинно-следственных связях в системе «климат–почва–агросфера». Описаны методы анализа временных рядов сетевых наблюдений, дана оценка наблюдаемых и ожидаемых изменений агроклиматических условий, биоклиматического потенциала и продуктивности посевов. Рассмотрены возможные последствия изменений климата для агросферы по различным современным сценариям изменения климата: изменения в уровне влагообеспеченности посевов и засушливости территории страны, в размещении посевов и ожидаемые изменения в их продуктивности. Обсуждаются вопросы использования данных об изменении климата в экономической деятельности аграриев страны, возможности прогнозирования продуктивности земледелия и рисков на основе пространственно-временных связей урожайности культур и климатических факторов и обеспечения продовольственной безопасности государства.

Учебное пособие рассчитано на студентов географических факультетов университетов и вузов, обучающихся по направлениям «Гидрометеорология» и «Прикладная гидрометеорология» и специальностям «Метеорология» и «Агрономия». Пособие может быть полезным специалистам сельского хозяйства и экологам.

This guide is the continuation of published «Principles of agricultural meteorology», volume I, «Crop demand for agrometeorological conditions and weather conditions dangerous for agricultural industry» (2011); volume II (in two books) «Calculation and forecast techniques in agrometeorology» (2012).

This third volume of the guide consists of two parts: the first part is «Principles of agroclimatology», the second one is «Climate change impact on ecosystems agrosphere and agriculture». The first part (chapters 1–7) states the principal directions and achievements of agroclimatology being advanced in Russia from the end of the 19th century and most intensively in Soviet years of the last quarter of the 20th century at the beginning of global warming. This part defines the subject and problems of agroclimatology, its place among other disciplines about the Earth; described are the basic procedures of agroclimatic network data processing, the principles and methods for agricultural assessment of climate and Russian agroclimatic resources, agroclimatic zoning and the peculiarities of crop water and heat balance and conditions of crop wintering; stated are the physical foundations of microclimate, mesoclimate and phytoclimate formation, the ways and methods for improving field climate; considered are the regularities of a water-heat regime for different soil types, especially, soil climate during warm and cold half-year periods, the principles and methods of soil climate zoning. Special emphasis is laid on the scientific legacy of prominent agroclimatologists without knowledge of which the climate change observed at the turn of the 20th and 21th centuries and its consequences for agroclimatic conditions and agriculture may happen to be insufficiently clear and convincing.

The second part (chapters 8–12) presents the current concepts of global climate warming, greenhouse effect, climate change genesis and cause-effect relations in the system «soil–climate–agrosphere». Described are the methods for analyzing network data time-series, assessed are the observed and expected changes in agroclimatic conditions, bioclimatic potential and crop capacity. Considered are the expected consequences of climate change for the agricultural sector according to different scenarios: changes in water supply and territory aridness, crop distribution and expected changes in crop capacity. Discussed are the problems of using climate change data in economy, country food safety assurance, agriculture productivity and risk forecasts based on space-time relationships between crop yield and climatic factors.

The guide is meant for University and agricultural Institute students trained in the fields of «Hydrometeorology», «Meteorology» and «Agronomy» The guide will be also of great use in agriculture and ecology.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Представленное учебное пособие является продолжением опубликованных двух томов «Основы сельскохозяйственной метеорологии»: том I «Потребность сельскохозяйственных культур в агрометеорологических условиях и опасные для сельскохозяйственного производства погодные условия» (2011); том II «Методы расчётов и прогнозов в агрометеорологии» (2012), книга 1 – «Математические модели в агрометеорологии» и книга 2 – «Оперативное агрометеорологическое прогнозирование». Настоящий – третий – том учебного пособия посвящён изложению «Основ агроклиматологии» (часть 1) и «Влиянию изменений климата на экосистемы, агросферу и сельскохозяйственное производство» (часть 2).

Как известно, сельскохозяйственное производство базируется на биопродукционном потенциале природной среды. Важнейшим из природных факторов, определяющим величину и качество урожая сельскохозяйственных культур, является климат (агроклимат). В коллективной монографии «Развитие сельскохозяйственной метеорологии в России» (2009, глава 6) подробно изложены основные вехи становления и развития агроклиматических исследований, их практическая значимость для аграрного сектора страны. Фундаментальные научные основы агроклиматологии, разработанные многими поколениями выдающихся учёных и специалистов – от А. И. Воейкова и П. И. Броунова до Г. Т. Селянинова, П. И. Колокова, С. А. Сапожниковой, А. М. Шульгина, И. А. Гольцберг, Ф. Ф. Давитая, Ю. И. Чиркова, М. И. Будыко и многих других, стали золотым фондом сельскохозяйственной метеорологии, в частности её важнейшей составляющей – агроклиматологии. Несмотря на то, что большинство исследований в области агроклиматологии было выполнено 40–60 лет тому назад, практически все они не потеряли своей научной значимости. По существу, эти работы стали «классикой агроклиматологии», к которым всегда обращаются все, кто работает в этой области знания и в наши дни. Без понимания этих основ, описывающих принципы и методологию обработки массовых материалов наблюдательной сети, получения агроклиматических показателей, методов оценки агроклиматических условий и ресурсов, агроклиматического районирования территории, подходов к изучению микроклимата и фитоклимата невозможно получение количественных оценок современных изменений климата и влияния их на экосистемы, агросферу и продуктивность сельскохозяйственных культур.

Сельскохозяйственное производство относится к наиболее зависимым отраслям экономики от погоды и климата, особенно в условиях земледелия Российской Федерации. Суровость этих условий для выращивания культур в России связана с тем, что основные массивы пахотных земель страны расположены в зоне рискованного земледелия. Ежегодный риск земледельца связан также с высокой повторяемостью неблагоприятных и опасных погодных условий, наблюдаемых во все сезоны года (засухи, суховеи, сильные ветры, переувлажнение почвы, суровость условий для зимующих культур и т. п.).

В связи с быстрым изменением глобального климата, инструментально зафиксированного в последние десятилетия XX столетия и в начале XXI века, бытовавшее представление о «постоянстве» климата стало недопустимым.

В течение трёх последних десятилетий наблюдался значительный прогресс в разработке глобальных климатических моделей, связанный с достижениями в исследованиях физических процессов, определяющих изменчивость климатической системы Земли. При этом в научном мире на отечественном и международном уровнях была развёрнута широкая дискуссия не только по проблеме происходящих и предполагаемых в будущем изменениях климата, но и в области количественных оценок влияния его глобальных изменений на различные отрасли экономики. Большой вклад в исследование проблем изменения климата вносят учёные Росгидромета, институтов системы Академии наук России, МГУ им. М.В. Ломоносова и др. Назовём лишь некоторых зарубежных учёных: Brohan P. et al. (2006), Alcamo J. (2007), Smith J.U. et al. (2007), Frolov I.E. et al. (2009), Lobell D.B. et al. (2011), Brohan P. et al. (2012) и др. Эта дискуссия выявила наличие нескольких различных точек зрения.

Основные положения, выработанные Международной группой экспертов по изменению климата (МГЭИК), были включены в нормативный документ «Стратегический прогноз изменений климата Российской Федерации на период 2010–2015 гг. и их влияние на отрасли экономики России» (2005). Обобщённые оценки, выполненные ведущими отечественными климатологами и экологами, были опубликованы в двухтомном издании «Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации» (2008) и реализованы в «Климатической доктрине Российской Федерации», утверждённой Президентом страны 17 декабря 2009 года.

В условиях потепления климата происходит существенное изменение агроклиматических ресурсов и биоклиматического потенциала страны. В этой связи особое значение приобретает создание и ведение агроклиматического мониторинга для обеспечения устойчивого развития сельскохозяйственного производства и содействия продовольственной

безопасности страны. Эти функции выполняют оперативные и научные подразделения Росгидромета.

Настоящее учебное пособие, ориентированное на студентов вузов, обучающихся по специальностям «Метеорология» и «Агрономия», подготовлено доктором биологических наук, заслуженным метеорологом РФ, профессором **И. Г. Грингофом** и заведующей отделом математического моделирования продуктивности агроэкосистем ФГБУ «ВНИИСХМ» кандидатом технических наук **В. П. Павловой**.

Авторы благодарны научным редакторам – докторам географических наук, заслуженным метеорологам РФ, профессорам **Г. Н. Чичасову** и **А. Д. Клещенко** за сделанные замечания и рекомендации по улучшению содержания учебного пособия.

Авторы признательны рецензентам – члену учебно-методического объединения вузов РФ по образованию в области гидрометеорологии, заместителю директора по науке ФГБУ «Гидрометцентр России» канд. физ.-мат. наук **Г. В. Елисееву**, профессору кафедры географии Калужского государственного университета им. К. Э. Циолковского, главному научному сотруднику ФБГУ «ВНИИГМИ-МЦД» доктору географических наук **В. А. Семенову** и заведующему лабораторией последствий изменения климата ФБГУ «ВНИИГМИ-МЦД» доктору географических наук **Б. Г. Шерстюкову** за их замечания и предложения, направленные на улучшение содержания учебного пособия.

Авторы благодарны также сотрудникам ФГБУ «ВНИИСХМ», кто прямо или косвенно содействовал подготовке этой книги.

Авторы

ЧАСТЬ 1

ОСНОВЫ АГРОКЛИМАТОЛОГИИ

Метеорологические условия имеют огромное значение для сельского хозяйства; человеку нужно изучать климат, чтобы обратить его хорошие стороны в свою пользу и по возможности устранить влияние вредных условий, но для этого необходима продолжительная и напряжённая научная работа; нужно много изучить для того, чтобы достигнуть успеха.

А.И. Воейков

ВВЕДЕНИЕ

Агроклиматология как наука

В своей повседневной жизни – трудовой деятельности, в быту и в отдыхе – человек и его здоровье в значительной мере связаны с климатом и условиями погоды. Физические процессы и явления, происходящие в атмосфере и в приземном слое воздуха, очень динамичны: они изменяются во времени – ото дня ко дню и от года к году, а в пространстве – по территории, в зависимости от сложного комплекса природных условий. Хорошо известно, что одна и та же погода благоприятна для одного вида хозяйственной деятельности человека и оказывается неблагоприятной для другого. Например, дождливая погода обеспечивает посевы влагой, но препятствует в определённой мере проведению строительных работ, массовым спортивным мероприятиям или отдыху на природе.

Обильные снегопады способствуют накоплению атмосферной влаги на полях и в горной местности (будущая влага в реках и оросительных системах), но создают потенциальную опасность схода снежных лавин на горных дорогах для людей, живущих в горных селениях, а также усложняют передвижение транспорта на современных магистралях. Особенно опасны интенсивные и широкомасштабные метеорологические явления, такие как обширные засухи, длительные периоды с высокой температурой, увеличивающие вероятность возникновения лесных и степных пожаров; экстремальный холод в малоснежные зимы, наводнения, ливни, грозы, град, селевые потоки в горах, шквалистые ветры, а также экстремальные природные катастрофы и катаклизмы – землетрясения, цунами, тайфуны и т. п.

Рост повторяемости *неблагоприятных* и *опасных* погодных условий на планете, в частности в России (рис. 1), наблюдаемый в последние два-три десятилетия в связи с потеплением климата, ухудшает условия безопасности населения и снижает устойчивость функционирования различных отраслей экономики, в том числе и сельскохозяйственного сектора.

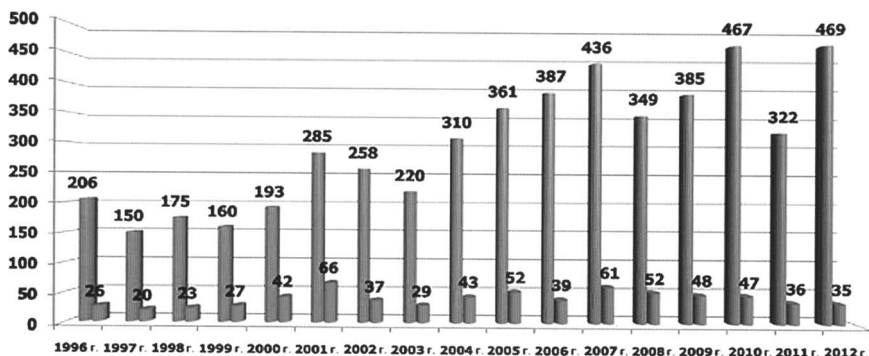


Рис. 1. Распределение опасных гидрометеорологических явлений на территории Российской Федерации.

Общее количество ОЯ по годам (длинные столбцы), количество непредусмотренных ОЯ (короткие столбцы). Источник – «Росгидромет: погода для всех». ООО «Изд. СК-Столица», 2013

Все эти экстремальные явления в зависимости от интенсивности и охвата территории наносят большой экономический и социальный ущерб, исчисляемый миллиардами долларов США (рис. 2).

Физическое состояние атмосферы у земной поверхности и в нижних её слоях (30–40 км) в данный момент времени называется погодой. В обыденной жизни понятие «климат» воспринимается как «средняя погода», характерная для конкретной территории, т.е. это многолетний режим погоды, обусловленный её географическим положением. *Климатом* называют также закономерную последовательность атмосферных процессов, которая создается в результате взаимодействия солнечной радиации, атмосферной циркуляции и подстилающей поверхности.

Климат любой территории прежде всего определяется средней высотой Солнца днём над горизонтом. Благодаря наклону земной оси земного шара к плоскости эклиптики $23^{\circ} 27'$ средняя высота Солнца над горизонтом различна: на севере она ниже, на юге – выше. Само слово «*клима*» в переводе с греческого – *klima* – означает наклон Солнца. Но климат зависит и от других условий природной среды. По П. И. Колоскову (1971), климат есть метеорологический компонент географической среды. Он характеризуется как средними, так и типичными или наиболее часто

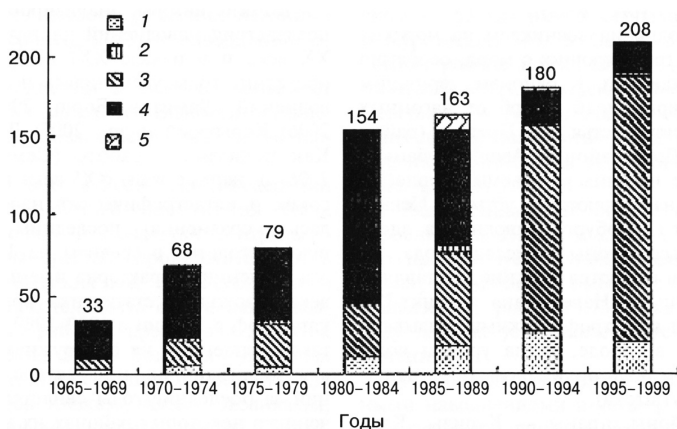


Рис. 2. Глобальный экономический ущерб (млрд долларов США) от различных природных катастроф за период 1965–1999 гг. (средние годовые значения за пятилетние периоды) (Осипов В. И., 2001): 1 – от тайфунов и штормов; 2 – от землетрясений; 3 – от наводнений; 4 – от засух; 5 – от других опасных природных явлений

повторяющимися выражениями метеорологических явлений, атмосферных процессов, особенностей воздушных масс, а также связанных с климатом географических процессов.

Учёные называют климатом «совокупность всех погодных условий, наблюдавшихся на конкретной территории за некоторый продолжительный промежуток времени» (Монин А.С., 1982). Межправительственная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК) под климатом понимает «статистическое описание в терминах средних значений и изменчивости соответствующих гидрометеорологических величин в пределах некоторого периода времени – от месяцев до тысячелетий». Понятие климата было расширено в межправительственном документе – Рамочной конвенции об изменении климата (РКИК) Организации Объединённых Наций, принятом в 1992 г. и подписанном 150 странами на высшем уровне: «Климатическая система Земли есть совокупность атмосферы, гидросферы, биосферы и геосферы и их взаимодействие» (Статья 1).

Согласно рекомендациям Всемирной метеорологической организации (ВМО) классический период для оценки климата должен составлять не менее тридцати лет. В качестве таких величин чаще всего фигурируют параметры температуры, осадков и ветра в приповерхностном слое атмосферы (см. Оценочный доклад, том II. 2008. С. 7).

По существу, вся природная среда представляет собой климатическую систему (рис. 3). Перечисленные составляющие климатической

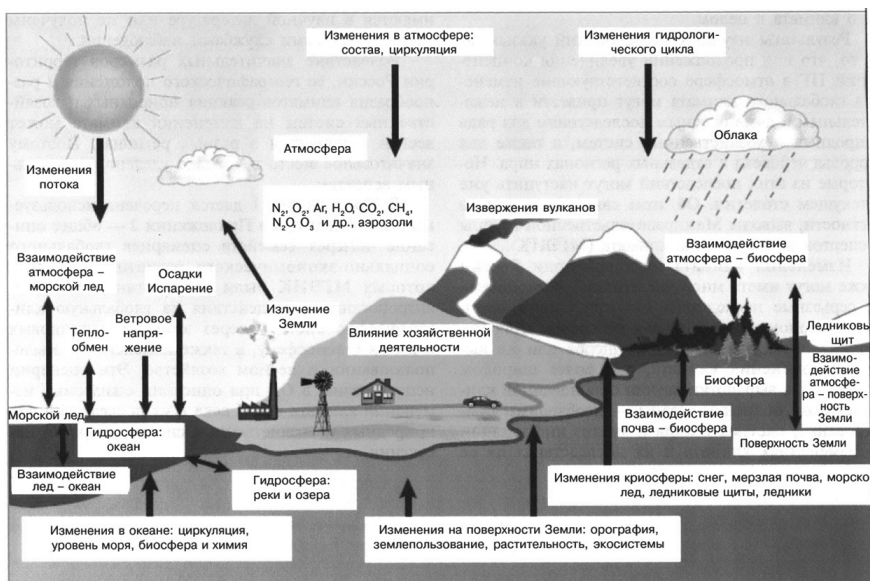


Рис. 3. Схематическое представление составляющих климатической системы, основных климатообразующих процессов и их взаимодействия (Оценочный доклад об изменениях климата на территории РФ. Техническое резюме. 2008)

системы постоянно находятся в состоянии тесного взаимодействия друг с другом путём обмена энергией и массой (например круговорот воды в природе).

Масса и теплоёмкость составляющих климатической системы различны. Так, масса атмосферы, вертикального слоя грунта 10 м и поверхностного слоя океана толщиной 240 м находятся в пропорции 1 : 5 : 15, а их суммарные теплоёмкости (тепловая инерция) соотносятся как 1 : 11 : 70 (Кароль И.Л., Катцов В.М. и др., 2008). Следовательно, океаны, моря и материковые льды образуют медленно изменяющиеся составляющие климатической системы, а атмосфера, поверхность суши и морские льды с относительно малой массой и низкой теплоёмкостью находятся в ряду быстро меняющихся составляющих климатической системы. Распределение основных климатических характеристик в пространстве и во времени связано с суточной (вращение Земли вокруг своей оси) и сезонной (вращение Земли вокруг Солнца) периодичностью.

Согласно С.П. Хромову и М.А. Петросянцу (2004), различают *локальный климат* и *глобальный климат*. Локальный климат определяется совокупностью атмосферных условий, осреднённых за многолетний

период, характерных для конкретной местности и зависящих от географических условий. В понятие «*географические условия*» входят не только географические координаты (долгота, широта, высота над уровнем моря), но и характер подстилающей поверхности, рельеф (орография), почвенный покров, соотношение поверхностей воды и суши, снежный покров, морские льды и т. п.

Глобальный климат определяется астрономическими и географическими факторами. К астрономическим факторам относятся светимость Солнца (т.е. количество и распределение солнечной энергии, поступающей на Землю), положение и движение Земли в Солнечной системе, наклон оси вращения Земли к плоскости орбиты и скорость вращения Земли вокруг своей оси и др.

К географическим факторам относятся размеры и масса нашей планеты, масса и состав атмосферы, географическое распределение материков и океанов, орографические особенности поверхности суши, масса и состав воды Мирового океана, океанические течения и т. п.

Существует три основных цикла атмосферных процессов, которые участвуют в формировании погоды и определяют климат. Это так называемые климатообразующие процессы: *теплооборот*, *лагооборот* и *атмосферная циркуляция*.

Практически единственным источником энергии атмосферных процессов является солнечное излучение (солнечная радиация). **Теплооборот** представляет собой сложные процессы получения, передачи, переноса и потери тепла в системе «Земля–атмосфера». Земля, как «серое тело», получает солнечную энергию, поглощает её и часть её излучает. Эти процессы определяют температуру подстилающей поверхности и нижних слоёв атмосферы.

Земля поглощает коротковолновую солнечную радиацию с длиной волны λ от 0,17 до 4 мкм ($1 \text{ мкм} = 10^{-6} \text{ м}$), а излучает длинноволновую радиацию с длиной волны λ от 4 до 120 мкм. На каждый квадратный метр поверхности приходится поток солнечной энергии, равный 1370 Вт, называемый солнечной постоянной. Если же мысленно построить сферу, проходящую по верхней границе атмосферы, то на 1 м^2 её поверхности будет попадать приблизительно 342 Вт солнечной энергии. Примерно 31 % солнечной энергии отражается атмосферой и подстилающей поверхностью и лишь около 170 Вт/м² достигает поверхности Земли и поглощается ею. Остальные 19 % поглощаются в атмосфере главным образом облаками.

На рис. 4 представлен глобальный среднегодовой баланс энергии в климатической системе Земли.

Учёными было подсчитано, что если бы всё тепловое излучение беспрепятственно покидало атмосферу, то среднегодовая температура воздуха у поверхности земли по всему земному шару была бы равна -19°C ,

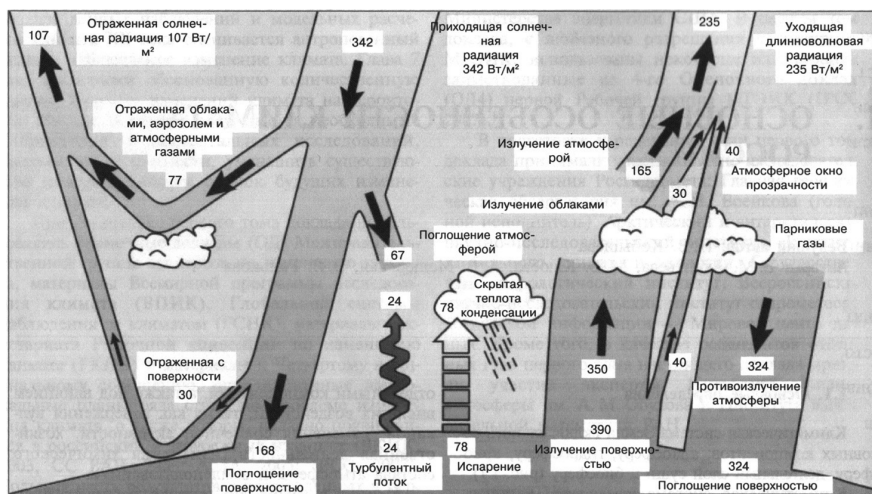


Рис. 4. Средний за год глобальный баланс энергии в климатической системе Земли (Вт/м^2) («Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории РФ». Том 1. 2008)

тогда как в действительности она составляет 14°C . Такая добавка тепла в 33°C для жизни всех организмов на Земле обеспечивается способностью атмосферы, её газов, облаков задерживать и поглощать уходящую длинноволновую (тепловую) радиацию. Таким образом, в радиационном режиме системы «Земля–атмосфера» облака, с одной стороны, сокращают приток солнечной радиации, отражая её, а с другой – благодаря поглощению ими солнечного и особенно длинноволнового излучения происходит столь заметный нагрев атмосферы. В среднем за год количество энергии, полученной и отданной системой «Земля–атмосфера», примерно одинаково. В противном случае среднегодовая среднеглобальная температура воздуха у подстилающей поверхности имела бы сохраняющуюся тысячелетиями тенденцию либо к повышению, либо к понижению.

Между поверхностью Земли и атмосферой постоянно происходят процессы влагообмена, или **влагооборота**. Этот процесс состоит из нескольких циклов: испарения воды, переноса водяного пара в атмосфере, его конденсации (образование облаков и туманов), выпадения осадков (в виде дождя, снега и града), фильтрации в почвогрунты и стока с континентов в реки, моря и океаны. С любых водных поверхностей – океанов и морей, рек и озёр, а также с поверхности влажных почвогрунтов и растительности – непрерывно происходит испарение влаги в атмосферу. На испарение затрачивается большое количество тепла из почвы и верхних слоёв воды. Для испарения 1 г воды при температуре 0°C

затрачивается 2,50 кДж тепла (597 кал), а льда – 2,84 кДж (677 кал)¹. Количественно испарение характеризуется *скоростью испарения* – массой воды (мм), испаряющейся в единицу времени с единицы поверхности. Количество и особенности распределения осадков по сезонам года определяют формирование типов растительности и почвенного покрова, при этом следует подчеркнуть, что образование различных типов почв генетически связано с растительным покровом². Количество выпадающих осадков в целом уравнивает величину испарения в системе «Земля–атмосфера». Более подробная информация о влагообороте в системе «Земля–атмосфера» представлена нами в работе «Основы сельскохозяйственной метеорологии» (2011. Том I, глава 2, раздел 2.3).

Атмосферная циркуляция. В результате неравномерного распределения тепла в атмосфере происходят изменения в распределении атмосферного давления, вызывающего движение воздуха относительно земной поверхности, – ветер, воздушные течения. В нижних слоях атмосферы на движение воздуха влияет подстилающая поверхность – рельеф местности, характер растительного покрова и другие препятствия. На крупномасштабное движение воздуха влияет также суточное вращение Земли.

«Систему крупномасштабных воздушных течений на Земле называют *общей циркуляцией атмосферы*. Основными элементами общей циркуляции атмосферы являются циклоны и антициклоны, т.е. волны и вихри размером в несколько тысяч километров, постоянно возникающие и разрушающиеся в атмосфере» (Хромов С.П., Петросянец М.А., 2004). Именно с воздушными течениями в системе общей циркуляции атмосферы связаны изменения в погоде: воздушные массы при перемещении приносят с собой на территорию изменения в температуре и увлажнении. Помимо воздушных течений общей циркуляции атмосферы на формирование погоды оказывают влияние *местные циркуляции* (например горно-долинные ветры, бризы и т.п.). Они формируются под влиянием особенностей строения рельефа – абсолютной высоты над уровнем моря, расположения горных поднятий (и характера их расчленённости) по отношению к преобладающим воздушным течениям. В контрастных условиях температуры и атмосферного давления формируются погодные явления локального масштаба – смерчи, торнадо, и крупного масштаба – тропические циклоны.

Климатообразующие процессы в сочетании с географическими условиями (широта, долгота, высота над уровнем моря, соотношение

¹ 1 Вт/м² = 1 Дж/м²; 1 кал/ м² = 4,19 Дж/ м².

² В своей книге «Русский чернозём» (1883) великий русский почвовед В. В. Докучаев отмечал, что почвы являются «результатом чрезвычайно сложного взаимодействия местного климата, растительности и животных организмов, состава и строения материнских горных пород, рельефа местности и, наконец, возраста страны...».

площадей суши и крупных водных поверхностей, влияние океанических течений, характер растительного покрова и т.п.) называются *климато-образующими* или *климатическими факторами*. Сочетания климатических факторов за многолетний период, характерных для конкретной территории, называются *климатическими условиями* (ГОСТ 17713–89). Существует ещё одно понятие – *климатические элементы*, или *элементы климата* – это метеорологические величины, которыми характеризуется климат, т. е. по которым составляются климатические показатели (Хромов С. П., Мамонтова Л. И., 1974).

Совокупность количественных значений климатических элементов (солнечная радиация, температура, осадки, испаряемость и др.) конкретной территории, используемых человеком в различных отраслях экономики, называется *климатическими ресурсами* (Толковый словарь ..., 2002). Климатические ресурсы являются важными природными факторами, определяющими условия развития сельского хозяйства. Климатический ресурс представляет в основном количество тепла и влаги и их различные сочетания. В него входят также ресурсы солнечной радиации и ветра, которые можно использовать для энергетических и некоторых других целей.

Предмет и задачи агроклиматологии

Жизнедеятельность всякого растительного и животного организма протекает в теснейшей связи и взаимодействии с окружающей его внешней средой. Существование организма, его развитие и рост, формирование продуктивности немыслимы в отрыве от среды, вне этой среды. В основе земледелия лежит использование ресурсов солнечного света, тепла и атмосферной влаги, которые в свою очередь составляют материальную основу климата.

По мнению Д. И. Менделеева, сельское хозяйство представляет собой «страшную сложность задач». Суть в том, что оно имеет дело с лучистой энергией Солнца, землёй, водой и воздухом, живыми организмами, капиталом и трудом. При этом сельский хозяин больше раб, стеснённый в своих действиях, чем большинство других промышленников. Они свободнее, властительнее владеют огнём, колесом и паром, чем хозяин может владеть даже почвою, хотя ею уже начали более или менее распоряжаться с давних пор, вводя обработку и удобрения (Работы по сельскому хозяйству и лесоводству. М.: Изд-во АН СССР. 1954).

Согласно С. А. Сапожниковой (1958), многие годы «...основным природным фактором, определяющим продуктивность земледелия, считалось плодородие почвы; роль климата незаслуженно игнорировалась. Но атмосфера, содержащая углекислый газ, является также питательной средой, атмосферные осадки представляют собой единственную влагу, доступную растениям, а солнечная радиация – источник энергии,

которую растения используют в процессе своей жизнедеятельности. Не вызывает никакого сомнения то, что изменение продуктивности земледелия в зональном разрезе является следствием изменения климата. Даже естественное зональное плодородие почв – подзола, чернозёма и других – непосредственно связано с климатическими условиями...

...Продолжительность вегетационного периода является одним из ведущих факторов, определяющих продуктивность земледелия. Чем продолжительнее вегетационный период, тем более позднеспелые и, следовательно, более урожайные культуры можно возделывать; кроме того, открывается больше возможностей для пожнивных посевов и получения двух и даже трёх урожаев в год с одного поля. Не менее важна роль увлажнения. Недостаток влаги делает почти бесплодными значительные территории СССР. Всё это даёт основание наряду с плодородием почвы ввести понятие «плодородие климата», под которым понимают естественные свойства климата, обеспечивающие сельскохозяйственные растения в период вегетации светом, теплом и влагой. Чем благоприятнее сочетания этих факторов, тем климат плодороднее.

Климатические ресурсы и погодные условия конкретного года в сочетании с почвенным плодородием характеризуют территориальную специализацию сельского хозяйства, в значительной мере определяя урожаи возделываемых культур, качество их продукции, уровень материальных затрат на её производство. Режим естественного увлажнения территории в известной степени способствует формированию систем земледелия, приспособленных к местным условиям обеспеченности теплом возделываемых культур, а также влияет на применение того или иного комплекса агротехнических и мелиоративных мероприятий.

Использованные растениями тепло и влага (в естественных условиях увлажнения) возмещаются поступающей солнечной радиацией и атмосферными осадками и их преобразованиями в природе. При этом количество тепла и влаги распределяется неравномерно как в пространстве, так и во времени. Таким образом, сельскохозяйственное производство и климат связаны между собой органически и представляют диалектическое единство.

Известно, что затраты труда и технических средств на единицу произведенной продукции, наличие трудовых и энергетических ресурсов, территориальная разобщенность хозяйств, удаленность от промышленных центров и потребителей продукции и многие другие экономические, социальные и природные факторы определяют уровень сельскохозяйственного производства. Однако ни одно плановое и оперативно-хозяйственное мероприятие в аграрном секторе не может проводиться без учёта климатических (агроклиматических) условий. Следствием их игнорирования обычно становятся большие материальные убытки, связанные с недобором продукции или её низким качеством.

*Раздел сельскохозяйственной метеорологии, изучающий климатические условия в их взаимодействии с процессами и объектами сельскохозяйственного производства, называется **агроклиматологией**, или **сельскохозяйственной климатологией** (ГОСТ 17713–89), это учение о климате как о факторе земледелия или сельскохозяйственного производства вообще.*

Одним из важнейших результатов Всемирной конференции по климату (Женева, Швейцария, февраль 1979 г.) был вывод о том, «что в грядущем десятилетии научно-технический взрыв в сельском хозяйстве произойдёт не в области биологии или техники, а в области совершенствования путей получения информации о климате и его влиянии на сельскохозяйственное производство». Агроклиматические ресурсы любой территории представляют собой совокупность агроклиматических факторов: световых, термических, увлажнения, перезимовки растений, создающих условия для формирования продуктивности культур, а также общей биологической продуктивности посевов при определённом технико-экономическом уровне сельскохозяйственного производства.

*«**Агроклиматические ресурсы** – это совокупность агроклиматических условий, определяющих величину получаемой сельскохозяйственной продукции на конкретной территории» (ГОСТ 17713–89).*

К числу основных задач науки агроклиматологии относятся:

- изучение степени благоприятности климатических условий для сельскохозяйственных культур;
- выявление климатических особенностей территории в целях рационального размещения объектов сельскохозяйственного производства;
- изучение биологических потребностей возделываемых культур, их сортов и гибридов в условиях освещённости, количества тепла, влаги и условий перезимовки с целью разномасштабного агроклиматического районирования территорий;
- агроклиматическое обоснование агротехнических способов и приёмов обработки посевов, выбора оптимальных условий для работы сельскохозяйственной техники;
- изучение влияния агроклиматических условий на качество урожая;
- исследование агроклиматических условий неблагоприятных и опасных для сельскохозяйственного производства явлений (засух, заморозков, переувлажнения, града, низких температур при отсутствии снега на полях и т. п.), их повторяемости и интенсивности;
- исследования возможностей изменения микроклиматических условий сельскохозяйственных полей с целью улучшения условий возделывания культур;
- количественный учёт изменений, вносимых в микроклимат созданием полезащитных лесных полос, орошением и агротехническими мероприятиями;

– агроклиматическое обоснование особенностей распространения вредителей и болезней сельскохозяйственных культур и мер борьбы с ними;

– исследование агроклиматических условий естественных фитоценозов и ландшафтов в различных почвенно-климатических зонах;

– исследование биоклиматического потенциала территории страны и её регионов в условиях изменения климата;

– разработка методов прогнозов изменения агроклиматических условий и ресурсов при изменении климата.

Таким образом, проведение агроклиматических исследований необходимо для эффективного использования потенциальных возможностей природы изучаемой территории, для снижения возможного ущерба в растениеводстве (и животноводстве) от неблагоприятных и опасных гидрометеорологических явлений, от вредителей и болезней сельскохозяйственных культур и животных.

Место агроклиматологии среди научных дисциплин о Земле

Как одно из научных направлений сельскохозяйственной метеорологии, агроклиматология представляет собой научно-практическую, междисциплинарную область знаний, и в то же время самостоятельную по методам исследования научную дисциплину, входящую в состав географических наук. Объектами исследований агроклиматологии являются *растение и климат*.

Предметом изучения агроклиматологии является *взаимодействие растений с климатом в географическом разрезе* при условии, что организм и условия его существования рассматриваются как неразрывное целое, как единство формы и содержания.

Агроклиматология развивается на стыке достижений таких наук, как метеорология, климатология, агрономия, физиология растений, почвоведение, статистика и экология.

Основные принципы и методы исследования в агроклиматологии описаны в работе «Основы сельскохозяйственной метеорологии», 2011, том I, пункт 4.1. Коротко перечислим их ниже.

Первый принцип. Наземные агрометеорологические наблюдения проводятся сопряжённо (т.е. параллельно) за условиями погоды, состоянием почвы, за ростом, развитием и формированием продуктивности сельскохозяйственных культур и естественной растительности.

Второй принцип. Агрометеорологические наблюдения проводятся в единые сроки, по единым методикам, единым формам записи и правилам обработки материалов наблюдений, которые регламентируются действующими нормативными и руководящими документами. Этим обеспечивается сопоставимость результатов наблюдений.

Третий принцип. Наблюдения проводятся на репрезентативных участках полей, типичных для территории сетевых наблюдательных организаций (станций). Эти три первые основополагающие принципы были разработаны профессорами А. И. Воейковым и П. И. Броуновым.

Четвёртый принцип. Все инструментальные измерения проводятся типовыми средствами измерений, поверенными в метрологических организациях Росгидромета.

Пятый принцип. Результаты наблюдений (измерений) оперативно передаются в центры сбора информации в контрольные сроки.

Шестой принцип. Предусматривает возможность использования результатов наземных наблюдений в сочетании с данными дистанционных (самолётных, космических) измерений состояния почвы и растительного покрова.

Основными методами агрометеорологических (агроклиматических) наблюдений являются:

- *метод сопряжённых (параллельных) наблюдений* за состоянием системы «погода–почва–посев» (естественная растительность), предложенный П. И. Броуновым;

- *метод географических посевов* в различных почвенно-климатических зонах страны или стран мира, предложенный акад. Н. И. Вавиловым;

- *метод учащённых сроков сева* – используется для получения массовых материалов наблюдений за ростом и развитием растений, выращиваемых в различных агрометеорологических условиях в пределах одного вегетационного периода, за счёт смещения сроков посева (предложен проф. Г. Т. Селяниновым);

- *дистанционный метод* инструментального, неконтактного (самолётного и спутникового) определения параметров подстилающей поверхности, почвы и растительного покрова;

- *картографический метод* исследования – используется при разработке климатических, агроклиматических, фенологических, агрогидрологических карт, при проведении климатического и агроклиматического районирования;

- *метод математической статистики* при обработке материалов массовых наблюдений и измерений;

- *метод физико-математического моделирования* при выявлении физических закономерностей среды обитания растений, физиологических процессов жизнедеятельности растений, при исследовании процессов обмена теплом, влагой и энергией в системе «почва–растение–атмосфера»;

- *сравнительно-исторический метод* при анализе климатических, агроклиматических условий прошлых лет (временных периодов) в сравнении с текущими условиями.

Глава 1

МЕТОДЫ АГРОКЛИМАТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ МНОГОЛЕТНИХ МАТЕРИАЛОВ НАБЛЮДЕНИЙ

1.1. Общие вопросы агроклиматической обработки материалов наблюдений

Важнейшим разделом проблемы изучения климата и агроклиматических условий, их изменчивости является сбор и накопление информации о природной среде за весь период инструментальных наблюдений и получение обобщённых данных о режиме изменений климатических параметров. Оценки статистических характеристик, вычисляемых по данным метеорологических наблюдений, публикуются в форме различных справочно-климатических пособий, атласов, различающихся большим разнообразием по набору расчётных параметров и объёму обработки исходной информации (Научно-прикладной справочник «Климат России». 2011. ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД»).

Обработка массивов метеорологических, агрометеорологических, фенологических и других наблюдений проводится для получения числовых агроклиматических характеристик, которые могут быть использованы при решении разнообразных задач в системе «климат–почва–сельскохозяйственная культура». Например, контроль наблюдений, вычисление средних величин, устранение неоднородности в рядах наблюдений, приведение данных к многолетнему периоду и другие действия осуществляются на основе принятой методологии обработки общих метеорологических данных. Основной целью такой обработки данных является получение средних многолетних агроклиматических величин, их изменчивости, повторяемости, вероятностных характеристик проявления какого-либо природного события в исследуемом ряду данных.

Теория климатологической обработки многолетних рядов наблюдений разрабатывалась многими климатологами и агроклиматологами, работавшими в XIX–XX вв.: А.А. Каминским, Е.С. Рубинштейн, О.А. Дроздовым, Г.Т. Селяниновым, Ф.Ф. Давитая, С.А. Сапожниковой, И.А. Гольцберг, Л.Н. Бабушкиным, З.А. Мищенко и многими другими. В частности, вопросам обработки материалов наблюдений посвящены монография О.А. Дроздова «Основы климатологической обработки метеорологических наблюдений» (1961), методическое пособие Л.С. Кельчевской «Методы обработки наблюдений в агроклиматологии» (1971) и учебное пособие для студентов гидрометеорологических техникумов Н.В. Гулиновой «Методы агроклиматической обработки наблюдений» (1974). Применению статистических методов в агроклиматологии посвящены также специализированные

монографии (Уланова Е.С., Сиротенко О.Д., 1968; Уланова Е.С., Забелин В.Н., 1990).

По мере накопления больших объёмов данных первоначально используемые «ручные» технологии обработки материалов наблюдений (канцелярские счёты, логарифмические линейки) постепенно заменялись методами механизированной обработки различными арифмометрами типа «Феликс», «Рейнметалл» и др.

В 1954 г. впервые в России П.К. Евсеевым была применена счётно-аналитическая машина при получении агроклиматических характеристик развития яровой пшеницы по материалам многолетних наблюдений на трёх метеорологических станциях. В 1959–1963 гг. Г.З. Венцкевич использовал макеты агрометеорологических перфокарт при разработке обоснований оптимальных сроков уборки картофеля в Подмосковном регионе. В последующие годы стали широко использоваться счётные микрокалькуляторы различных модификаций, первые типы персональных компьютеров типа «Robotron» и др.

В 70–90-е гг. XX столетия методика автоматизированной обработки режимной агрометеорологической информации совершенствовалась благодаря внедрению различных типов ЭВМ и разработки для них автоматизированных программ СОАМИ – системы оперативной обработки агрометеорологической информации (В.А. Горбачев, М.А. Королёв, В.А. Жуков и др.). Суть такой технологии заключается в автоматизированном сборе, контроле (обнаружении источников и причин ошибок), раскодировании информации, поступающей с сети станций, переводе её в формат языка описания данных (ЯОД) и далее – на технические носители; затем передача информации в центры сбора и обработки информации, после которой – выдача её потребителю в виде специальных таблиц и карт. Важной задачей, решаемой с помощью СОАМИ, стало накопление информации на внешнем запоминающем устройстве для хранения и использования в качестве резерва пополнения режимно-справочного банка данных – РСБД «Агрометеорология».

В климатологии и агроклиматологии обычно используются *средние многолетние значения* \bar{x} , рассчитываемые путём осреднения измеренных величин x_i за ряд лет n . Средняя арифметическая величина может быть средней во времени или в пространстве. Например, средней арифметической величиной во времени является средняя суточная температура воздуха, вычисленная по данным наблюдений за все сроки наблюдений в течение суток в одном пункте. Или средней арифметической величиной в пространстве может служить средняя районная (областная) сумма осадков за какой-либо период (декада, месяц, вегетационный период), полученная по всем станциям, расположенным в исследуемой территории. Средняя месячная многолетняя температура вычисляется из

средних месячных значений одноименных месяцев за длительный ряд лет. Если ряд лет наблюдений ≥ 30 лет, то такие средние величины называют *климатическими нормами*. Для их получения используют обычно данные наблюдений за одинаковые периоды наблюдений.

Важным этапом обобщения материалов многолетних наблюдений является их группировка. *Интервал величин*, по которым группируются данные метеорологического (или иного) ряда величин, называется *градацией* (P_i). Для выбора градаций рекомендованы принципы их выбора (Гулинова Н.В., 1974).

Тип 1. *Градации числовые и равные по величине*. Например, сумма температур воздуха выше 10°C может быть сгруппирована по следующим градациям: 1001...1200, 1201...1400, 1401...1600 и т.д., т.е. интервал везде равен 200°C .

Тип 2. *Градации числовые и не равные по величине*. Например, градации запасов продуктивной влаги в почве: ≤ 50 , 51...80, 81...100, 101...120, 121...160, т.е. интервалы составляют 50, 30, 20, 20 и 40 мм.

Тип 3. *Градации нечисловые* (выраженные словами). Например, число суток с различным состоянием верхнего слоя почвы: мёрзлое, текущее, липкое, мягкопластичное, сухое.

При этом выбранные градации не должны перекрываться, поскольку каждое наблюдение может быть включено только в одну градацию. Выбор малого числа градаций обычно нивелирует важные детали в распределении изучаемого элемента. Выбор большого числа «мелких» градаций затрудняет обобщение. В принципе, число градаций (или групп) может быть различным, но рекомендуется руководствоваться правилом: *число градаций не должно превышать десятичного логарифма числа наблюдений, умноженного на 5* ($5 \lg n$, где n – число случаев наблюдений):

Число наблюдений	50	100	500
Максимальное число градаций	8	10	13.

Далее все наблюдения выбранного ряда распределяют по соответствующим градациям. Число случаев m_i , вошедших в каждую градацию, называют *частотой*. Сумма частот всех градаций всегда равна числу наблюдений n : $\sum_{i=1}^n m_i = n$. Отношение частоты (числа случаев) данной градации к общему числу наблюдений исследуемого ряда, выраженное в долях единицы (m_i/n) или в процентах $[(m_i/n)] \cdot 100$, в климатологии (агроклиматологии) называют *повторяемостью* данной градации (P_i). Средняя многолетняя величина очень редко наблюдается в отдельный конкретный год и оказывается сильно «сглаженной». Например, в ряду лет наблюдений за весенними заморозками всегда имеют место крайние ранние и крайние поздние сроки их наступления. Поэтому необходима расшифровка такой средней многолетней величины в виде повторяемости,

вероятности и обеспеченности (суммарной вероятности) явления, представляющих его изменчивость во времени и пространстве.

Обеспеченность или суммарная вероятность характеризует наступление какого-либо явления выше или ниже среднего уровня, раньше или позже среднего срока. Например, в исследуемом пункте в ряду лет наблюдений никогда не наблюдались годы с суммой температур выше 10 °С, равной 1800 °С, самой низкой в данном пункте. То есть набор суммы 1800 °С обеспечен ежегодно (100 %), когда все фактически наблюдаемые суммы температур были равны или были выше этой величины. Если из всего ряда наблюдений эта сумма была отмечена, например, в шести годах из десяти лет, то её суммарная вероятность составляет 60 %, а в четырёх годах из десяти сумма температур оказалась выше 1800 °С, т.е. суммарная вероятность равна 40 %.

Хороший урожай новой культуры, полученный в конкретном районе в тёплый и влажный год, вероятность повторения которого не превышает 20...30 % (т.е. 2–3 года из 10), ещё не даёт основания для внедрения его в производственные посевы в этом районе.

В климатологии и агроклиматологии расчёты вероятностей различных явлений производятся различными способами, в зависимости от характера изменчивости элемента, который определяет форму кривой вероятности. Наиболее часто используют следующие эмпирические формулы:

$$P_i = (m_i/n) \cdot 100, \quad (1.1)$$

$$P_i = (m_i/n + 1) \cdot 100, \quad (1.2)$$

$$P_i = (m_i - 0,3)/(m + 0,4) \cdot 100, \quad (1.3)$$

где P_i – вероятность (обеспеченность), %; m_i – порядковый номер члена статистического ряда $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$; n – число случаев наблюдений в ряду.

Накопленные повторяемости (обеспеченность) отдельных градаций вместе со значениями исследуемого элемента являются важной характеристикой распределения. Оно показывает разброс или рассеяние отдельных значений элемента по обе стороны от среднего. Интегральное распределение метеорологического или агрометеорологического элемента и его средняя величина позволяют выявить закономерность многолетнего режима элемента, т.е. его временную структуру. В симметричном, или нормальном, распределении число наблюдений выше среднего равно числу наблюдений ниже среднего (рис. 1.1).

Например, для симметричных кривых, к которым относятся кривые дат перехода температуры воздуха через определённые уровни, дат заморозков, сумм температур, продолжительностью периодов с температурой разного уровня и т.п., используют формулу среднего квадратического отклонения:

$$\sigma = \sqrt{\sum d^2/n}, \text{ или } \sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2/n}, \quad (1.4)$$

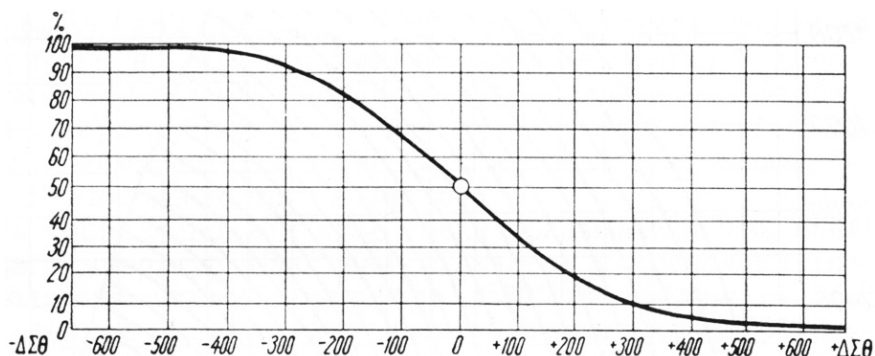


Рис. 1.1. Кривая обеспеченности вегетационного периода суммами температур выше 10 °С в климатах неустойчивого типа

где $\sum d^2$ – сумма квадратов отклонений от средней величины; x_i – отдельные значения элементов; \bar{x} – среднее значение элементов; n – число лет наблюдений.

В симметричном или нормальном распределении число наблюдений выше среднего равно числу наблюдений ниже среднего. Симметричное распределение вероятности может искажаться вследствие непропорционально малого или большого числа наблюдений в области, лежащей около среднего значения. Это искажение называется эксцессом. Мера эксцесса, или коэффициент эксцесса, C_ϵ выражается формулой:

$$C_\epsilon = \sum \left[(x_i - \bar{x})^4 / n\sigma^4 \right] - 3. \quad (1.5)$$

Нарушение симметричности кривой распределения вероятности называется *асимметрией*. При положительно асимметричном распределении положительные отклонения в общем имеют большую величину, чем отрицательные. Например, положительная асимметрия характерна для распределения сумм осадков, которые ограничены нулевым значением слева, но не ограничены справа, т.е. оно может быть двух видов – положительным и отрицательным. Распределение минимальной температуры стремится к отрицательной асимметрии. Статистическая величина асимметрии характеризуется коэффициентом асимметрии C_s :

$$C_s = \left[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3 \right] / n\sigma^3. \quad (1.6)$$

Для асимметричных кривых (например, кривые количества осадков, ГТК Селянинова, число суток с каким-либо явлением) используют формулу Г.А. Алексева

$$P = (m_i - 0,25) / (n + 0,55) \cdot 100 \quad (1.7)$$

(обозначения см. в формулах 1.1–1.3).

Для расчёта вероятностей аналитическим способом используют основные статистические параметры в зависимости от типа распределения: среднее арифметическое значение \bar{x} , среднее квадратическое отклонение σ , коэффициент асимметрии C_s или коэффициент вариации C_v :

$$C_v = \sigma / \bar{x} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i / \bar{x} - 1)^2} / n - 1. \quad (1.8)$$

Например, для характеристики термических ресурсов территории используется показатель суммы средних суточных активных температур выше 10°C . В отдельные годы эта сумма может отличаться от средней многолетней величины на несколько сотен градусов. Поэтому при оценке термических ресурсов территории наряду со средними значениями необходимо располагать данными о вероятности и обеспеченности сумм температур в отдельные годы. На рис. 1.2 представлен график, на оси абсцисс которого отложены отклонения сумм от многолетней средней величины, а по оси ординат – обеспеченность P (%), показывающую во сколько раз из ста сумм температур отклоняются от средней многолетней на определённую величину. Здесь изображены три кривые: 1 – для неустойчивого типа климата (европейская часть России, Западная Сибирь); 2 – для устойчивого типа (центральная часть Сибири); 3 – для особо устойчивого типа климата (Восточная Сибирь и Дальний Восток).

Теоретическая кривая обеспеченности при построении в прямоугольной системе координат имеет изогнутую верхнюю и нижнюю части кривой, приближающуюся к осям координат. Типовые кривые распределения рассматриваемого элемента в отклонении от средней многолетней позволяют определить любые вероятностные характеристики изучаемого элемента. Для того чтобы установить, насколько обеспечена изучаемая сельскохозяйственная культура теплом в конкретной территории, следует

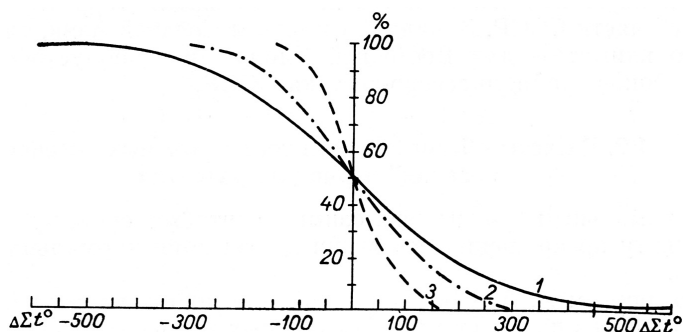


Рис. 1.2. Кривая обеспеченности вегетационного периода суммами температур для разных климатических зон:

- 1 – зона с неустойчивым типом климата; 2 – зона с устойчивым типом;
3 – зона с особо устойчивым типом

определить обеспеченность необходимой для культуры суммы температур. Потребность растений в тепле принято выражать *суммой активных, эффективных или положительных температур воздуха*. Об этих терминах и показателях рассказано в работе «Основы сельскохозяйственной метеорологии», том I, 2011, раздел 15.2.

Поскольку сумма температур, рассчитанная за весь вегетационный период, не отражает динамику накопления сумм температур в течение периода, известный агроклиматолог Ф. Ф. Давитая предложил номограмму для определения величины сумм температур выше 10°C на заданную дату (рис. 1.3). На номограмме крайняя левая кривая, соответствующая сумме температур 0°C , указывает начало периода с температурой выше 10°C , а замыкающая кривая – на конец вегетационного периода. По оси абсцисс отложены декады вегетационного периода и шкала накопления сумм температур выше 10°C к любой искомой дате, по оси ординат – средние многолетние суммы температур за вегетационный период. Зная среднюю многолетнюю сумму активных температур для конкретной территории (такие данные публикуются в агроклиматических справочниках) или пункта, по номограмме можно определить дату накопления искомой суммы активных температур, например, средняя многолетняя сумма активных температур выше 10°C в исследуемом районе составляет 2460°C .

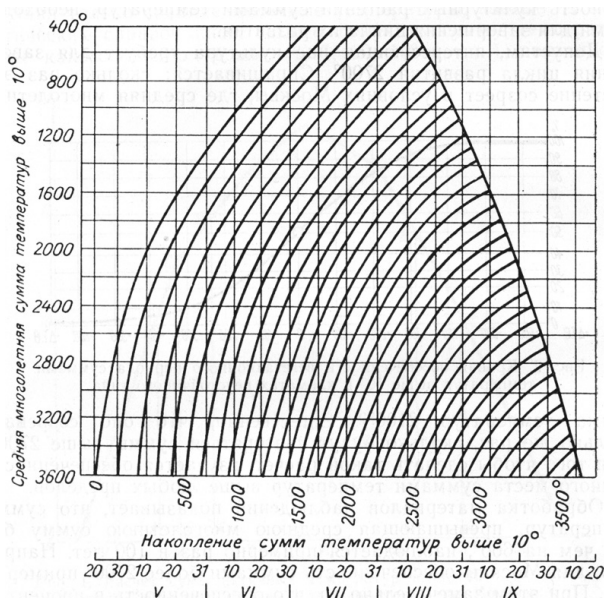


Рис. 1.3. Номограмма для определения сроков накопления сумм эффективных температур выше 10°C в зависимости от многолетних сумм

Для наступления фазы восковой спелости поздневесеннего сорта проса необходима сумма активных температур 1900°C . Чтобы определить дату созревания проса, на оси ординат находим значение 2460°C , от которого проводим прямую, параллельную оси абсцисс, до пересечения с кривой температур 1900°C . Из точки пересечения опускаем перпендикуляр на шкалу декад вегетационного периода и определяем искомую дату восковой спелости зерна проса (т.е. его полного созревания), в данном примере – 11.08. Ещё пример. Требуется определить дату накопления суммы активных температур воздуха, равную 1000°C . Средняя многолетняя сумма активных температур для Астрахани составляет 3500°C . На оси ординат находим отметку суммы температур, равную 3500°C , и проводим прямую параллельно оси абсцисс до пересечения с кривой накопления суммы температур 1000°C . Из точки пересечения опускаем перпендикуляр до пересечения со шкалой дат накопления температур. Для пункта Астрахани эта дата – 16 июня.

По этой номограмме можно рассчитать и продолжительность периода активной вегетации, определить средние сроки наступления различных фаз развития сельскохозяйственных культур в различных географических районах России. Многолетнее использование этой номограммы показало, что она позволяет рассчитывать суммы температур с точностью до 50°C (реже до 100°C), а даты накопления искомых сумм температур могут быть определены с точностью до 2–3 суток. По средним многолетним суммам температур для исследуемых районов возможен расчёт продолжительности вегетационного периода в сутках (рис. 1.4).

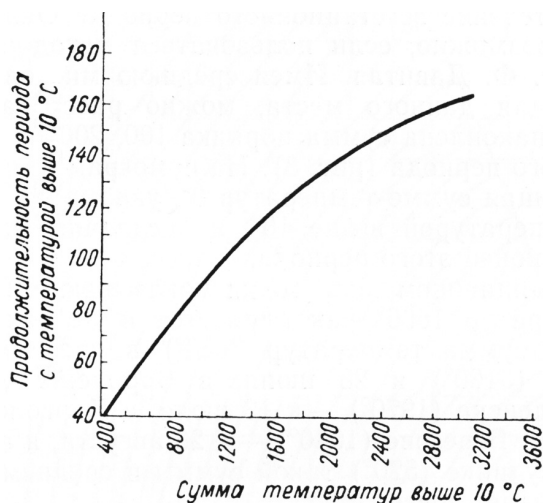


Рис. 1.4. Зависимость средней продолжительности вегетационного периода (сутки) от сумм температур выше 10°C

Известно, что суммами температур можно пользоваться как важным показателем роста и развития сельскохозяйственных культур и естественной растительности. Однако, помимо этого показателя, необходимо знать и условия увлажнения, обеспечивающие биологические возможности использования тепла растениями.

1.2. Методы агроклиматической обработки метеорологических и агрометеорологических рядов наблюдений

Качество наземных метеорологических и агрометеорологических наблюдений (измерений) на сети станций и постов, выполняемых наблюдателями, достигается тщательностью сбора и записи первичных материалов в полевые книжки, трёхступенчатым контролем и соблюдением стандартных видов обработки полученных результатов.

Технический контроль осуществляется на станции лицом, не проводившим наблюдение, сразу после получения записей в полевых книжках. *Локальный контроль* проводится с целью обнаружения возможных ошибок при первичной обработке материалов наблюдений (например, при расчётах влажности почвы, фенологических наблюдений и т. п.). *Критический контроль* проводится инженером-агрометеорологом на агрометеорологической станции или в ЦГМС, участвующих в подготовке и составлении агрометеорологических ежегодников. Основой критического контроля является сопоставление полученных данных с материалами аналогичных наблюдений близлежащих станций. При необходимости обнаруженные погрешности исправляются.

В первичной агроклиматической обработке обычно необходимо приведение материалов наблюдений к однородному периоду. Приведение средних многолетних величин какого-либо наблюдаемого элемента (количества осадков за n -й период, дат фаз развития и т. п.) осуществляется методом разностей по формуле:

$$\bar{B}_N = [(B_1 - A_1) + (B_2 - A_2) + \dots + (B_n - A_n)] / n, \quad (1.9)$$

где \bar{B}_N – приведённая к длинному ряду ($N_{\text{лем}}$) средняя многолетняя дата фазы развития изучаемой культуры по станции B с коротким рядом наблюдений за n лет; \bar{A}_N – средняя многолетняя дата фазы развития по длиннорядной станции A ; n – число лет с параллельными наблюдениями за изучаемой культурой на этих станциях.

Хорошо известно, что средние многолетние величины любого элемента климата не отражают их изменчивости, обычно наблюдаемой в природе. Поэтому в климатологии и агроклиматологии применяют статистический аппарат: расчёты среднего квадратического отклонения σ , коэффициента вариации C_v , вероятности и обеспеченности изучаемого элемента, которые раскрывают более полно структуру изменения изучаемого элемента.

Для агроклиматической оценки тепловых ресурсов вегетационного периода (или его отдельных подпериодов) обычно используют такие показатели, как суммы температур, продолжительность (в сутках) со средней температурой выше величины биологического минимума конкретной культуры, средней декадной, месячной температуры, их амплитуды, экстремальных температур, их повторяемости и т.п. Недостаток использования средних температур заключается в том, что средняя величина может быть одной и той же при разной продолжительности периода и, следовательно, иметь разное значение для развития растений. Показатель суммы температур является интегральной величиной, поскольку включает в себя и уровень температуры, и продолжительность её воздействия на растение, т.е. характеризует в определённой мере тепловую ёмкость периода.

Длительность вегетационного периода для различных сельскохозяйственных культур ограничивается датами со средней суточной температурой, равной нижнему пределу роста и развития (биологическому минимуму) изучаемой культуры. Например, для группы ранних яровых зерновых культур, гороха, подсолнечника и др. нижним температурным пределом считается 5°C ; для поздних зерновых культу, кукурузы и др. – 10°C ; для теплолюбивых культур – риса, хлопчатника и др. – 15°C . Даты устойчивого перехода температуры воздуха через 0, 5, 10 и 15°C весной в сторону повышения и осенью – в сторону понижения являются температурными показателями начала и конца их вегетационного периода.

Как определить даты устойчивого перехода температуры через эти пороговые величины? Такие определения производятся по средней суточной температуре воздуха, а также по средней декадной и средней месячной температурам.

Даты устойчивого перехода температур через тот или иной предел определяются путем сопоставления положительных и отрицательных отклонений сумм средних суточных от искомого предела температур. Положительным отклонением считается тогда, когда средняя суточная температура превышает искомый предел. Если температура ниже данного предела – отклонение отрицательное. Например, температура $3,5^{\circ}\text{C}$ по отношению к пределу 0°C имеет положительное отклонение ($3,5^{\circ}\text{C}$); температура $8,7^{\circ}\text{C}$ по отношению к пределу 10°C имеет отрицательное отклонение, равное $-1,3^{\circ}\text{C}$. За дату устойчивого перехода температуры через 0, 5, 10, 15°C весной считается первый день периода, сумма положительных отклонений которого превышает сумму отрицательных любого из последующих периодов с отрицательными отклонениями. За дату устойчивого перехода через 15, 10, 5, 0°C осенью принимается первый день того периода, сумма отрицательных отклонений которого превышает сумму положительных отклонений любого из последующих периодов с такими отклонениями.

При расчёте даты устойчивого перехода температуры воздуха весной через искомый предел по средней декадной или средней месячной температуре (графическим способом) просматриваются средние декадные (месячные) температуры и из них выбираются две декады (месяца), температура одной из которых меньше искомого предела, а второй – больше. По температурам двух декад (месяцев) строится график: на оси абсцисс откладывается шкала декад (месяцев), а на оси ординат – шкала средних температур воздуха за декады (месяцы). В поле графика (рис. 1.5) проставляются точки, соответствующие температуре воздуха декад (месяцев). На примере этого рисунка средняя температура за первую декаду мая составила 3,5 °С, а за вторую – 9,4 °С. Искомая дата устойчивого перехода температуры воздуха через 5 °С приходится на 8 мая.

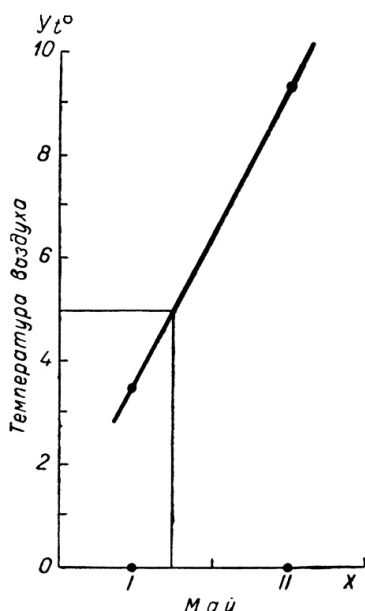


Рис. 1.5. График для определения даты перехода температуры воздуха через 5 °С по средней месячной температуре

Расчёт сумм температур (ΣT) производится путём умножения средних температур искомого периода (за вычетом биологического нуля – температуры, при которой начинается активный рост культуры) на число суток периода:

$$\Sigma T = (t_{\text{сред}} - t_0) \cdot n, \quad (1.10)$$

где $t_{\text{сред}}$ – средняя температура периода, °С; t_0 – нижний предел температур для данной культуры или для её межфазного периода.

Более подробно эти вопросы с примерами расчёта рассмотрены в специальных учебно-методических пособиях (Кельчевская Л.С., 1971; Гулинова Н.В., 1974; Лосев А.П., 1988).

Таким образом, продолжительность вегетационного периода, ограниченная температурой выше определённых пороговых значений, определяет жизнедеятельность и формирование продуктивности посевов. Обеспеченность продолжительности того или иного периода рассчитывается по отклонениям от средней многолетней величины или по интегральной кривой. При подсчёте по отклонениям необходимо знать среднюю многолетнюю продолжительность и отклонения продолжительности от этой средней по годам. Затем подсчитывается число случаев с положительными и отрицательными отклонениями по годам, а результаты представляют в процентах (рис. 1.6).

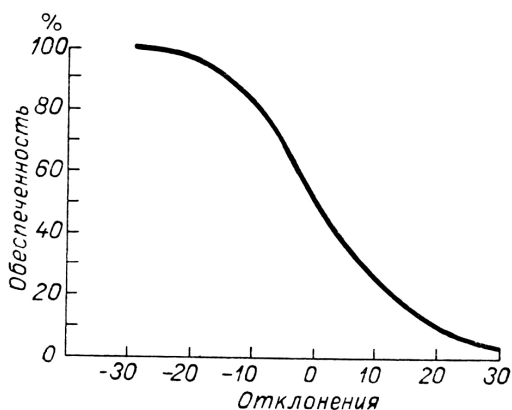


Рис. 1.6. Обеспеченность продолжительности периода с температурой выше 10 °C

Продолжительность вегетационного периода лимитируется датами наступления поздних весенних и ранних осенних заморозков. Поэтому при оценке теплообеспеченности вегетационного периода необходимо учитывать среднюю продолжительность беззаморозкового периода, а также её обеспеченность или повторяемость опасных заморозков для конкретной территории.

Методика учёта повторяемости заморозков по материалам многолетних наблюдений разработала И.А. Гольцберг (1961). Она установила, что окончание поздних весенних или начало ранних осенних заморозков, наступивших раньше или позже средних многолетних дат, имеет повторяемость около 50 %. Распределение вероятностей отклонений от средней даты выражено кривой на рис. 1.7. По кривой вероятности, полученной на многолетних материалах наблюдений сети станций конкретной

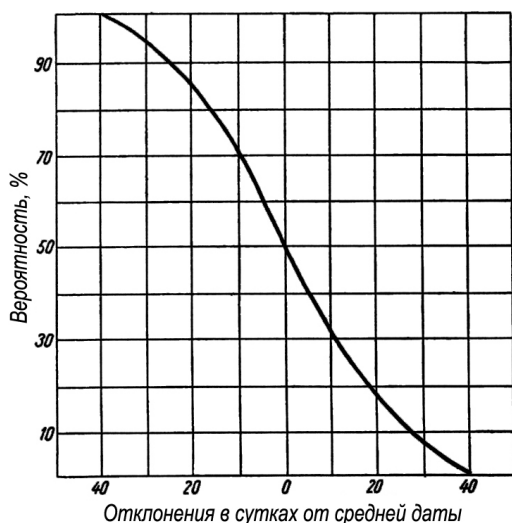


Рис. 1.7. Кривая вероятности наступления заморозков

территории, вычисляют вероятность наступления заморозков в более ранние или более поздние сроки, чем средняя многолетняя дата.

Простейшим показателем поступления влаги на сельскохозяйственные угодья является сумма выпавших осадков (мм) за тот или иной период вегетации или в средних многолетних величинах. При необходимости величина осадков в мм может быть рассчитана на площадь, исходя из соотношения: 1 мм осадков составляет 10 м^3 или 10 т воды на 1 га. Среднее многолетнее количество осадков, выпавших на конкретной территории, означает, что такая сумма имеет обеспеченность около 50 %. Для расчёта вероятности (%) выпадения осадков того или иного количества (мм) по многолетним материалам наблюдений сети станций, расположенных на конкретной территории, пользуются интегральной кривой вероятности выпадения осадков (рис. 1.8).

Для составления таблицы вероятностей в зависимости от средней величины предварительно строится номограмма (рис. 1.9), для которой необходимо иметь подсчёт вероятностей ряда станций с различным средним количеством осадков. Номограмма обеспеченности строится в прямоугольных координатах. По оси ординат откладываются среднее многолетнее значение количества осадков (мм), на оси абсцисс наносятся данные по осадкам за весь период наблюдений. Для соответствующего значения вероятностей проводится прямая или плавная кривая.

С построенной номограммы снимаются соответствующие значения обеспеченности элемента (осадков), используемые для составления таблицы (табл. 1.1) или в текущей работе.

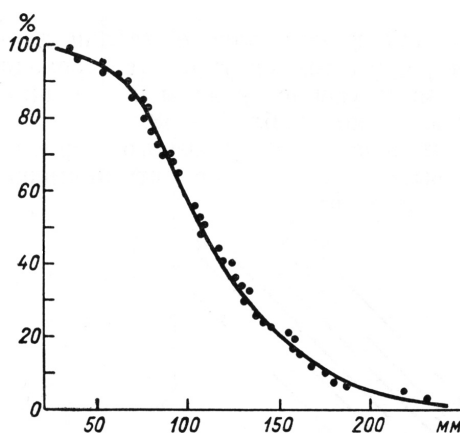


Рис. 1.8. Интегральная кривая вероятности выпадения осадков

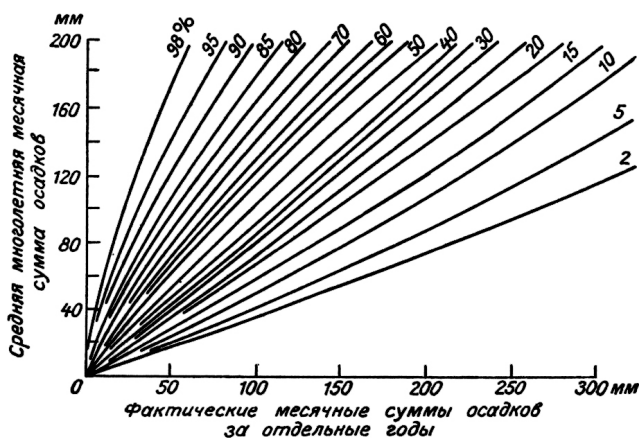


Рис. 1.9. Обеспеченность месячных сумм осадков в зависимости от их средних многолетних величин

Таблица 1.1

**Возможное количество осадков (мм) в отдельные годы
при различном их среднем количестве (мм)
(Синицина Н.И., Гольцберг И.А., Струнников Э.А., 1973)**

Среднее	Вероятность, %						
	95	90	80	50	20	10	5
60	8	12	25	50	95	120	180
100	20	30	45	95	150	190	260
140	30	45	65	130	210	265	345
180	40	60	90	170	270	340	425

Преимущество такой номограммы заключается в возможности получения характеристик на одном графике структуры средних многолетних величин для большой территории во времени и пространстве. Длина наклонных линий показывает, как исследуемый элемент изменяется по территории, а диапазон в границах 5...95 % обеспеченности указывает на изменчивость элемента во времени.

Подобные номограммы, построенные для большой территории, но имеющие одинаковый тип климата, дают возможность по средней величине оценивать изменчивость исследуемого элемента для любой метеорологической станции, расположенной на данной территории.

1.3. Методы обработки материалов наблюдений за влажностью и промерзанием почвы

Почвенная влага относится к важнейшим компонентам почвы, процессу почвообразования и формирования почвенного плодородия. Она также относится к числу основных факторов *почвенного климата*, поскольку это особая среда, в которой в специфических условиях преломляется и проявляется климат атмосферы (Шульгин А.М., 1972). Формирование почвенного профиля происходит в результате передвижения различных веществ, растворённых в воде, в почвенной толще. Всесторонние исследования законов поведения почвенной влаги представлены в фундаментальных трудах Г.Н. Высоцкого, А.А. Роде, С.А. Вериги, Л.А. Разумовой, А.В. Мещерской, Л.С. Кельчевской и др.

Зоны умеренного и субтропического климата характеризуются большим разнообразием типов, подтипов и разновидностей почв, обладающих неодинаковыми агрогидрологическими (водно-физическими) свойствами.

Почвенная влага, находящаяся в корнеобитаемом слое, является почти единственным источником водоснабжения растений и важнейшим фактором их продукционного процесса. В этой связи многолетние, систематические наблюдения за влажностью почвы, осуществляемые на сети метеорологических станций, расположенных в основных растениеводческих регионах страны, стали уникальным достоянием системы Гидрометеорологической службы СССР и России.

Массовые инструментальные наблюдения за влажностью почвы, равно как и материалы сетевых метеорологических наблюдений, должны проходить три ступени контроля после получения результатов измерения. Обработка первичных материалов наблюдений за влажностью почвы из КСХ-3 начинается с заполнения сводных таблиц ТСХ-1 (летний период) и ТСХ-1 (зимний период), включающих данные по влажности почвы (%) и о запасах продуктивной влаги (мм) по слоям 0...10, 0...20, 0...50, 0...100 и 0...150 см.

Затем более подробные сведения о влажности почвы и о запасах продуктивной влаги заносятся в специальную таблицу ТСХ-6м «Влажность почвы (массовая) и запасы продуктивной влаги», согласно «Наставлению гидрометеорологическим станциям и постам», вып. 11. Часть I, книга 2, Приложение 25. М., 2000.

Критический контроль проводят на станциях для определения возможности дальнейшего использования материалов о влажности почвы. В основе контроля лежит известная физическая закономерность взаимобусловленности метеорологических элементов с показателями роста и развития растений. Изменения влажности почвы увязывают с режимом температуры и осадков, при обязательном учёте глубины залегания грунтовых вод. Проводится проверка данных, включённых в таблицы влажности почвы, по глубинам отдельных повторностей. Затем сопоставляют величины запасов продуктивной влаги с водоудерживающей способностью почвы (наименьшей полевой влагоёмкостью).

При критическом контроле материалов по промерзанию и оттаиванию почвы используют данные по температуре почвы на разных глубинах и высоте снежного покрова. Для этого используют номограмму зависимости глубины промерзания почвы от суммы отрицательных средних суточных температур и высоты снежного покрова (рис. 1.10).

Обработку материалов наблюдений за влажностью почв начинают с составления сводных таблиц запасов продуктивной влаги за отдельные годы и по слоям 0...10, 0...20, 0...50 и 0...100 см. В случае обнаружения пропусков в материалах наблюдений пользуются номограммами, разработанными С. А. Вериго, Л. А. Разумовой и С. Б. Мاستинской (рис. 1.11).



Рис. 1.10. Номограмма для расчёта глубины (см) промерзания почвы (изолинии в поле графика) для районов с глубоким залеганием грунтовых вод

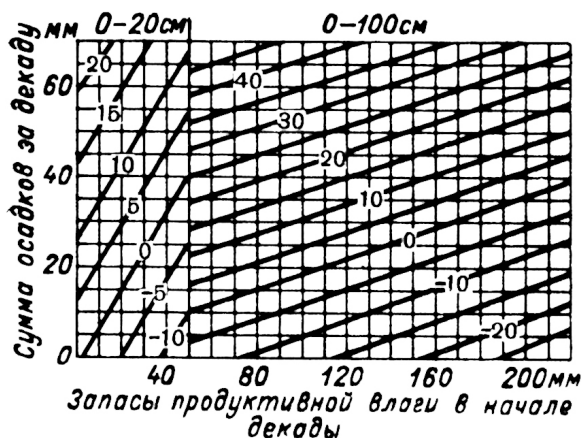


Рис. 1.11. Изменение запасов продуктивной влаги (мм) на примере чернозёмных почв с посевом яровой пшеницы в период формирования всходов и листьев (до выхода в трубку) в слоях 0...20 и 0...100 см

Для восполнения пропущенного срока наблюдений за влажностью почвы необходимо знать запасы влаги в почве на начало декады, осадки и среднюю за декаду температуру воздуха.

Сравнимость средних многолетних запасов влаги в почве возможна только в том случае, когда данные по запасам влаги, а также по температуре и осадкам получены на основе однородного по годам и количеству лет исходного материала. Ошибки расчётов влагозапасов по номограммам не выходят за пределы точности измерений влажности почвы термостатно-весовым способом.

Для расчёта обеспеченности используется формула:

$$P = (m - 0,3) / (n + 0,4) \cdot 100, \quad (1.11)$$

где P – обеспеченность, %; m – порядковый номер члена ряда; n – число наблюдений в ряду.

Для получения надёжных средних многолетних величин влажности почвы, для расчёта их вероятности и обеспеченности в отдельные годы достаточен ряд лет наблюдений, равный 20–25 годам. Средние многолетние запасы влаги в почве по заданным слоям рассчитывают по общепринятой формуле:

$$\bar{W}_N = (W_1 + W_2 + \dots + W_{N-1} + W_N) / N = \sum_{i=1}^N W_i / N, \quad (1.12)$$

где \bar{W}_N – средние многолетние влагозапасы; $W_1, W_2, \dots, W_{N-1}, W_N$ – декадные запасы за N лет. В случаях недостаточной длины ряда фактических наблюдений за влажностью почвы средняя величина влагозапасов отличается от её истинного среднего значения \bar{W}_N при $N \rightarrow \infty$ на

некоторую величину $\sigma_{\bar{W}_n}$, т.е. $\bar{W}_N = \bar{W}_n \pm \sigma_{\bar{W}_n}$, где \bar{W}_n – средняя многолетняя величина влагозапасов за ограниченный ряд наблюдений n ; $\sigma_{\bar{W}_n}$ – средняя квадратическая ошибка, определяемая по формуле:

$$\sigma_{\bar{W}_n} = \pm \sigma_{\bar{W}} / \sqrt{n}. \quad (1.13)$$

В районах избыточного и достаточного увлажнения, а также в ранневесенний период в зоне полного весеннего промачивания ошибки декадных величин влагозапасов не превышают 5...10 %. В засушливых районах ошибки средних декадных величин достигают 15...20 % в слое почвы 100 см, а в пахотном слое (0...20 см) при расчёте средней величины за период менее 10 лет – 30...40 %. Обычно большие ошибки наблюдаются при запасах влаги, приближающихся к нулевым значениям, однако для практических целей они уже не имеют значения, т.к. критическими для сельскохозяйственных культур являются влагозапасы менее 10 мм.

Необходимо иметь в виду, что ошибки средней многолетней величины, полученные по формуле (1.13), характеризуют лишь точность метода, а не фактическую ошибку в каждом конкретном расчёте, поскольку не учитываются положения ряда наблюдений относительно изменения влагозапасов в течение длительного периода – до 100 лет и более (Справочник..., 1979).

Статистические параметры рассчитываются по следующим формулам:

- ошибка средней многолетней величины влагозапасов $S_{\bar{W}}$ (в мм или %)

$$S_{\bar{W}} = 100C_v / \sqrt{n} \quad \text{и} \quad S_{\bar{W}} = \pm \sigma_{\bar{W}} / \sqrt{n}; \quad (1.14)$$

- среднее квадратическое отклонение декадных запасов продуктивной влаги $\sigma_{\bar{W}}$ (мм)

$$\sigma_{\bar{W}} = \sqrt{\sum (W - \bar{W})^2 / n - 1}; \quad (1.15)$$

- ошибка среднего квадратического отклонения

$$S_{\sigma_{\bar{W}}} = \sigma_{\bar{W}} / \sqrt{\sum 2n - 1}; \quad (1.16)$$

- коэффициент вариации статистического ряда влагозапасов C_v (%)

$$C_v = \sigma_{\bar{W}} / \bar{W}; \quad (1.17)$$

- ошибка коэффициента вариации S_{C_v} (%)

$$S_{C_v} = \sqrt{\frac{3}{2n(3 + C_v^2)}} \cdot 100. \quad (1.18)$$

Об изменчивости декадных влагозапасов в конкретном пункте судят по величине среднего квадратического отклонения $\sigma_{\bar{W}}$, а сравнительная оценка изменчивости влагозапасов по территории проводится по коэффициенту вариации C_v , т.е. по относительному значению среднего квадратического отклонения. Чем значительно различаются влагозапасы по

годам, тем коэффициенты вариации больше. Наименьшие величины C_v отмечаются в период максимума влагозапасов, а наибольшие – в период их минимума. Коэффициент вариации более или менее устойчив для различных зон увлажнения: наименьшие величины характерны в течение всего периода вегетации для зоны обводнения и капиллярного увлажнения, а наибольшие – для засушливой и сухой зоны слабого весеннего промачивания.

Основные методы контроля и обработки наблюдений за влажностью почвы разработаны С. А. Вериги и Л. А. Разумовой (1973).

1.4. Методы обработки материалов фенологических наблюдений

Фенологические наблюдения дают возможность познания сезонных явлений, происходящих в природе, а также позволяют судить о сроках и темпах наступления и окончания фаз развития в мире растений (фито-фенология) и периодов (этапов) жизни в мире животных (зоофенология). Информация о применении фенологии и её значении в практической деятельности людей помещена в работе «Основы сельскохозяйственной метеорологии», том I, раздел 11.3 (2011). В частности, материалы многолетних фенологических наблюдений после статистической обработки используются в оперативной работе подразделений системы Гидрометеорологической службы России.

Обработка материалов наблюдений за фазами развития растений заключается в нахождении средних многолетних сроков наступления наблюдаемых фаз (и явлений в природе), средних многолетних самых ранних и самых поздних сроков их наступления, вычислении вероятности наступления фаз развития в различные годы, в составлении фенологических карт и других справочно-информационных материалов.

Коротко поясним некоторые термины и понятия, используемые в фенологии. Первичными величинами при фенологической обработке данных являются даты наступления (окончания) в конкретном географическом пункте сезонных явлений живой и неживой природы, называемые *фенологическими явлениями (феноявлениями)*, а даты наступления (окончания) явления – *фенологическими датами (фенодатами)*.

Многолетние фенологические наблюдения, проведённые в зоне умеренного климата России, показали, что большинство родов и видов естественной растительности проходят своё развитие из года в год в *определённой, постоянной последовательности*. Отклонения фенодат от средних многолетних сроков, наблюдаемые в отдельные годы, называются *феноаномалиями*. Явления, запаздывающие по отношению к средним срокам, называются *положительными феноаномалиями*, а явления,

наступающие раньше средних сроков, называются *отрицательными феноаномалиями*.

В обработку включаются фенодаты, которые должны быть сравнимыми, т.е. проведёнными над однородными объектами наблюдений, на одних и тех же наблюдательных участках по единообразно регистрируемым признакам.

Основными географическими координатами, определяющими сроки сезонного развития природы, и в частности растений, являются *широта, долгота и высота местности над уровнем моря*. Многочисленными наблюдениями установлено, что изменения в сроках наступления сезонных явлений на единицу (градус) широты и долготы или высоты (на каждые 100 м подъёма), так называемые *градиенты*, не остаются постоянными, изменяясь в зависимости от географического положения пункта наблюдений. Например, на Европейской территории России между 45 и 60° с.ш. величина широтного градиента для фитофенологических дат в разгар весны составляет в среднем 2–3 суток на 1° широты. Тогда средняя скорость продвижения весны с юга на север в этом поясе составляет от 35 до 55 км в сутки. К юго-востоку скорость продвижения весны увеличивается, к северу – уменьшается. Осенние широтные градиенты на этой территории в растительном мире распространяются с севера на юг быстрее, чем весенние с юга на север.

Средняя многолетняя величина запаздывания времени наступления сезонных явлений в растительности на европейской части России с запада на восток, т.е. долготный градиент непостоянен. В период «разгара» весны на территории между 54–72° в.д. этот градиент варьирует от 0,2 до 0,8 суток на 1° долготы (или 0,4–1,4 суток на 100 км).

Величина высотного градиента также варьирует в зависимости от особенностей горного рельефа (расположение главных хребтов по отношению к солнечным лучам и влагонесущим потокам) и времени года. В среднем для весеннего сезона он равен примерно трём суткам на каждые 100 м подъёма вверх. Однако в условиях горного рельефа растительность на дне долин начинает своё развитие несколько позже, чем на склонах южных экспозиций на высоте 100...200 м выше дна долины. На склонах выше отметки 200 м этот высотный градиент проявляется более чётко. Максимальный по продолжительности вегетационный период оканчивается на высоте 750...1000 м над уровнем моря. Ниже и выше этих высот его продолжительность сокращается. У границ вечного снега (более 2000 м в европейской части страны) и выше 3000 м над уровнем моря (в азиатской части России), где практически исчезают температурные условия для жизни растений, этот градиент отсутствует.

Для условий Урала В.А. Батманов (1966) определил, что разница на один градус в средней температуре воздуха за период апрель–июнь

соответствует четырём суткам разницы в сроках развития естественного растительного покрова в разгар весны.

Как показывает опыт, распределение фенодат любого сезонного явления (при условии 30-летних и более наблюдений) оказывается близким к нормальному распределению случайных отклонений. Основным показателем изменчивости случайных величин служит среднее квадратичное отклонение (σ), показывающее средний размах погодичных колебаний фенодат. Эта мера определяет часто встречающиеся отклонения от более редко встречающихся отклонений в анализируемом ряду данных. Концентрация случаев наблюдений около x (медианы) находит своё выражение в том, что примерно около 95 % их находится в интервале $x \pm 2\sigma$; вне интервала $x \pm 3\sigma$ находится только 0,26 % всех наблюдений. Например, если установлено, что стандартное отклонение (σ) погодичных сроков зацветания яблони от x – среднего многолетнего срока 26 мая составляет ± 7 суток, то это означает, что в 68 % лет отклонения от 26 мая будут не более ± 7 суток, а в 32 % лет – более 7 суток. Если не учитывать очень редко наступающие случаи (не более 5 %), то амплитуда равна $x \pm 2\sigma$. Для многих практических случаев такая степень точности оказывается достаточной. Более полной, охватывающей почти 100 % наблюденных случаев мерой амплитуды погодичных колебаний, является величина $x \pm 3\sigma$. На рис. 1.12 представлена схема нормального распределения случайных отклонений (кривая Гаусса) .

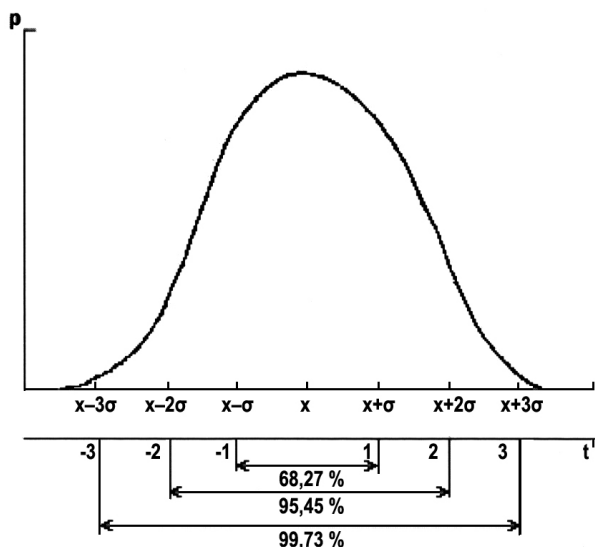


Рис. 1.12. Нормальная кривая распределения вариантов вариационного ряда (кривая Гаусса): x – медиана, средняя величина вариантов; σ – среднее квадратическое отклонение

В системе Росгидромета сетевые фенологические наблюдения за развитием основных возделываемых культур и естественной растительности производятся через день по чётным числам или два раза в декаду по четвёртым дням (4, 14, 24) и в последний день декады (Наставление ..., вып. 11, книга 1, раздел 10. 2000. С. 110–190).

Фенологический вариационный ряд может быть выражен графически. Чаще всего в фенологических исследованиях применяется эмпирическая кривая – огиба или *кумулята*, которые используются при характеристике многолетних фенологических процессов (рис. 1.13). Кумулята – это распределение учётных единиц в форме кривой, ординаты которой пропорциональны накопленным частотам вариационного ряда.

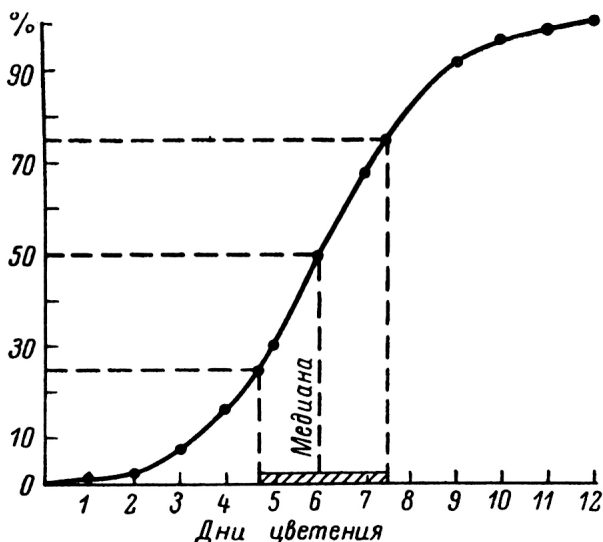


Рис. 1.13. Кумулята, % – средний многолетний нарастающий итог зацветания колосьев озимой ржи на Среднем Урале:

▨ 1 – интерквартильная область

Для расчёта средних многолетних температур за отдельные дни используют специальные графики – *гистограммы* – вариационный ряд, представленный в виде тех или иных площадей, в которых величина частот изображается различной высотой условных «столбиков» (рис. 1.14). Основание столбиков – отрезок по оси абсцисс, соответствующий конкретному месяцу, а их высота, отложенная на оси ординат, – средняя температура месяца. Тогда площадь столбика соответствует сумме температур за все сутки месяца.

Чтобы лучше рассмотреть особенности изменения температуры воздуха в период её минимума, график начинают не с января, а с октября

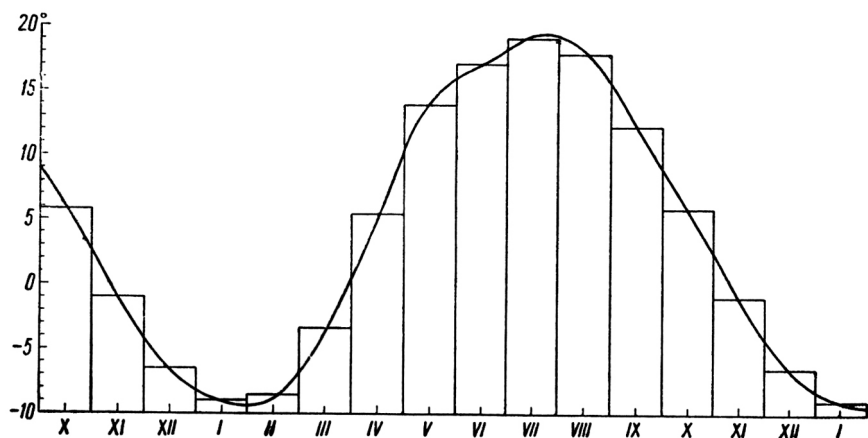


Рис. 1.14. Гистограмма динамики средней месячной температуры воздуха в г. Курске

предшествующего года и далее все 12 месяцев последующего года. Кривая строится таким образом, чтобы площадь, «отрезаемая» с одной стороны столбика, была бы равна таковой, «прирезаемой с другой стороны». Тогда площадь между кривой и осью абсцисс будет равна площади столбика, и, следовательно, сумма температур за месяц не изменится. После построения кривой годовой динамики можно снять с неё среднюю многолетнюю температуру за любой день месяца. Для того чтобы найти дату наступления искомой средней температуры, нужно по оси ординат найти заданную температуру и по ней на графике находят соответствующую дату.

Для характеристики динамики фенологического процесса в пределах одного года используется эмпирическая кривая другого типа (Харин Н. Г., Кирильцева А. А., Грингоф И. Г., 1994; рис. 1.15). В качестве примера на этом рисунке приведена эмпирическая кривая фазы облиствения кустарника багрянника, произрастающего в южных регионах Средней Азии. Частоты на рисунке выражены в процентах, что даёт возможность сравнивать несколько рядов, различающихся по числу учётных единиц. Здесь приведены основные элементы эмпирической кривой. Всю совокупность учётных единиц кривая делит на две части: левую и правую. Левая часть включает учётные единицы, не вступившие в фенофазу, правая – учётные единицы, перешедшие между и, следовательно, вступившие в фенофазу. На кривой выделена так называемая *интерквартильная область*, являющаяся наиболее информативной частью. Она охватывает период массового развития фенофазы в сутках. Тангенс угла наклона кривой в интерквартильной области показывает чёткость выраженности фенофазы: чем

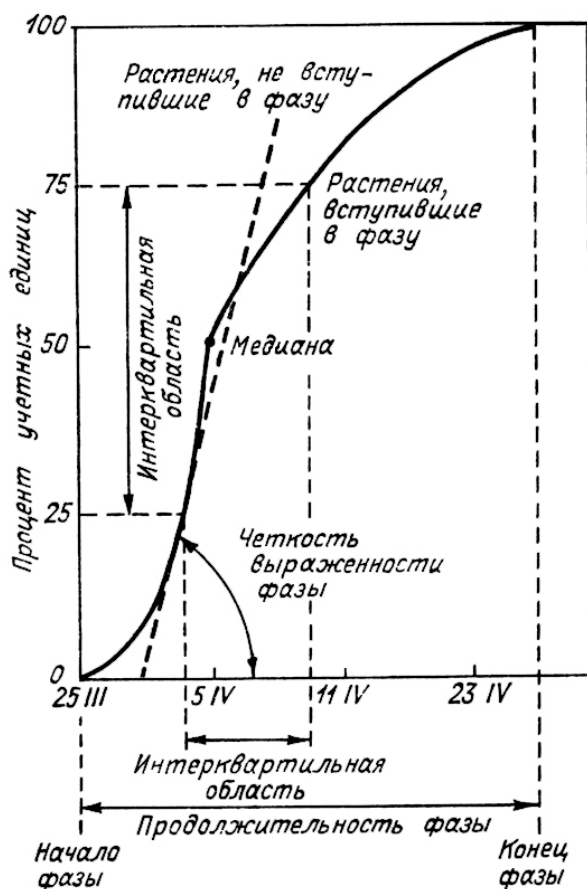


Рис. 1.15. Эмпирическая кривая облиствения кустарника — багрянника

больше угол, тем фенофаза выражена чётче. Часть кривой от 0 до 25 % характеризует начало фенофазы; её конец характеризует часть кривой в пределах 75...100 %.

Эти части кривой подвержены наибольшей изменчивости. Фенологами давно отмечено, что отдельные экземпляры растений могут вступать в фенофазу или очень рано, или очень поздно, эти отклонения могут выражаться десятками суток. Поэтому точки начала и конца фенофазы, показанные на кривой, не могут служить надёжными критериями в фенологических исследованиях.

Важнейшей характеристикой эмпирической кривой является *медиана* — относительная точка, показывающая время вступления в фазу 50 % учётных единиц. Медиана является показателем массового развития

фенофазы. Медианы должны выражаться в тех же единицах, в которых выражен исследуемый вариационный ряд, т. е. иметь тот же смысл, который был заложен при проведении фенологических наблюдений. Чаще всего интервал в фенологических наблюдениях выражается в сутках, следовательно, и медиана должна быть выражена в сутках.

Для нормального распределения исследуемых данных наблюдений медиана совпадает со средним значением ряда. Однако, по сравнению со средним значением, медиана имеет преимущество, поскольку на её величину не влияют крайние (большие или маленькие значения признака) или очень ранние и очень поздние даты вступивших в фазу растений.

Нередко в практике фенологических наблюдений по тем или иным причинам происходят пропуски в сроках наблюдений. Отдельные пропущенные даты наблюдений можно восстановить методом интерполяции, если для исследуемого района построить карты наступления фаз развития в данном году.

Другим способом является использование наблюдений за прошлые годы. Например, в текущем году не проводились наблюдения за озимой рожью, а в предыдущие годы были синхронные наблюдения за озимыми рожью и пшеницей. В этом случае по данным прошлых лет составляют графики сопоставления дат наступления определенных фаз в развитии этих культур и по ним восстанавливают пропуски наблюдений данного года.

Для восстановления пропущенных материалов фенологических наблюдений по яровым культурам используют график, на оси ординат которого наносят даты наступления определенной фазы изучаемой культуры, а по оси абсцисс – даты наступления этой же фазы другой культуры. Для приведения к длинному ряду средних величин короткорядных фенологических материалов возможно использование формулы (1.9).

Другой способ пополнения пропущенных материалов наблюдений заключается в составлении графика согласования дат наступления фаз развития наблюдаемого растения по двум станциям, расположенным в близких условиях. По материалам параллельных наблюдений на этих станциях строится график, на оси абсцисс которого откладываются даты наблюдений одной станции, а на оси ординат – даты другой станции. При пополнении пропущенных сроков наблюдений по такому графику определяется дата одной станции, если известна дата другой станции (рис. 1.16). Для большей точности целесообразно строить несколько графиков, например, для станций *А* и *Б* один график, а для станций *А* и *В* – другой. В этом случае для станции *А* снимается пропущенная дата с первого и второго графиков и берется средняя арифметическая величина из двух дат.

Модель нормального распределения наиболее часто применяется в биологических исследованиях. Например, лесоводы давно установили,

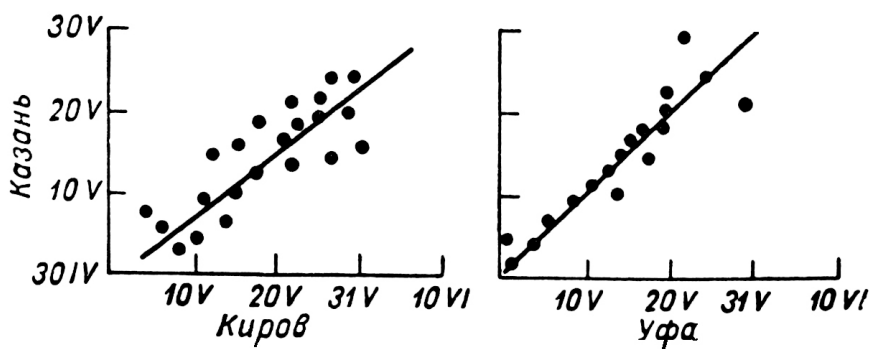


Рис. 1.16. Связь между датами цветения черемухи по данным станций А и Б (Гулинова Н. В., 1974)

что распределение деревьев по толщине стволов в пределах одного элемента леса подчиняется закону нормального распределения. Многолетние фенологические процессы, особенно у древесно-кустарниковых форм, близки к нормальному распределению.

При обработке многолетних рядов фенологических наблюдений обычно применяется модель нормального типа распределения. Если нормальное распределение, характеризуемое симметричной кривой Гаусса, и не является всеобщим законом природы, то оно во всяком случае представляет наиболее удобную модель статистической обработки. Во многих случаях отклонения от нормального распределения могут рассматриваться как аномалии, вызванные влиянием метеорологических условий или других факторов. Например, резкое повышение температуры вызывает ускоренное развитие растений или, наоборот, его постепенное отмирание (высыхание). В таком случае фенологический вариационный ряд приобретает выраженную асимметрию. Максимум кривой смещается влево; при замедлении процесса кривая имеет правую асимметрию (Харин Н. Г., Кирильцева А. А., Грингоф И. Г., 1994; рис. 1.17).

Важным разделом обработки фенологических материалов наблюдений является составление фенологических карт и календарей природы. Согласно мнению известного фенолога страны Г. Э. Шульца (1973): «Фенологические карты – это научно-справочные документы, представляющие пространственные закономерности сезонной динамики отдельных частей компонентов географической оболочки Земли или их комплексов, вплоть до целых ландшафтов». Однако, помимо чисто справочной значимости фенологических карт, они являются универсальным методом сравнения природных явлений в хронологическом и динамическом отношении.

Динамика сезонных процессов на фенологических картах обычно изображается изолиниями – изофенами, соединяющими территории с

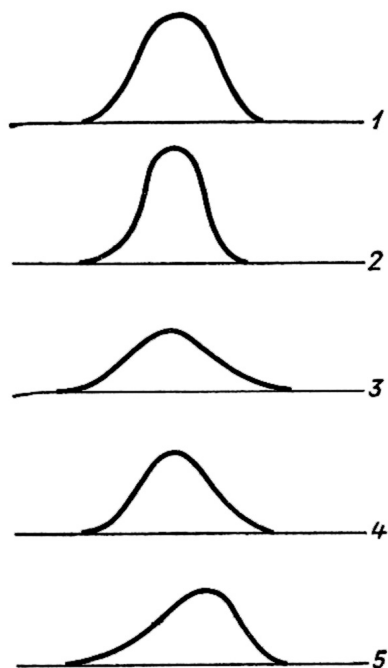


Рис. 1.17. Изменения фенологической кривой распределения под влиянием метеорологических условий: 1 – нормальное распределение; 2 – ускоренный процесс распределения; 3 – замедленный процесс; 4 – процесс, ускоренный в начале фазы; 5 – процесс, ускоренный в конце фазы

одинаковыми датами (сроками) наступления сезонных явлений или одинаковыми значениями других фенологических показателей. Фенологами и агрометеорологами в разные годы были составлены многочисленные и разнообразные фитофенологические карты, раскрывающие сроки прохождения основных фаз развития сельскохозяйственных и плодовых культур, естественной растительности и сеяных трав, а также сроков проведения хозяйственных мероприятий в растениеводстве; часть таких карт опубликована в «Справочнике агронома по сельскохозяйственной метеорологии» (1986). Помимо фенокарт в Справочнике даны номограммы, позволяющие рассчитать обеспеченность (%) дат наступления фаз развития возделываемых культур, проведения агротехнических мероприятий на полях конкретных территорий. По существу, фенологические материалы, имеющие такую форму, представляют собой рекомендации агрономам в их оперативно-хозяйственной, практической работе. Приведём несколько примеров (рис. 1.18–1.21).

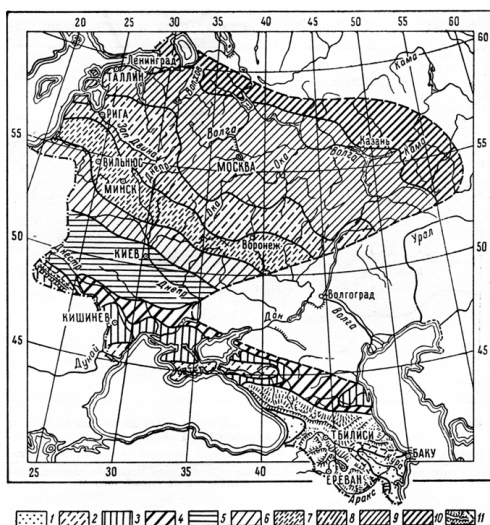


Рис. 1.18. Карта-схема начала пыления орешника (по Шульцу Г.Э. и Хариной С.Д., 1972): 1 – до 30.I; 2 – 31.I – 15. III; 3 – 16–20.III; 4 – 21–25.III; 5 – 26–30.III; 6 – 31.III – 5.IV; 7 – 6–10.IV; 8 – 11–15.IV; 9 – 16–20.IV; 10 – позже 20.IV; 11 – горные районы

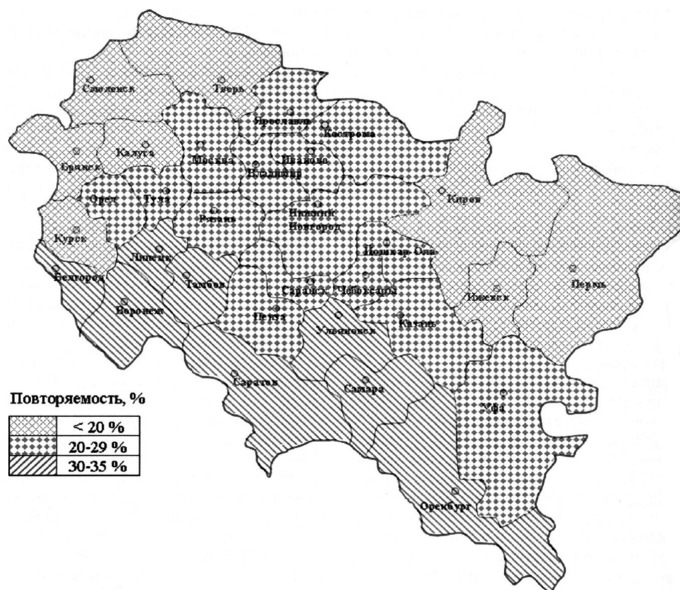


Рис. 1.19. Повторяемость, % (риски засушливых условий) в период сева и вегетации озимых культур осенью в Центральном и Приволжском федеральных округах в среднем за период 1981–2010 гг. (Вильфанд Р.М. и Страшная А.И., 2011)

На примере этого рисунка заметны изменения фенологических событий у дикорастущих растений: произошёл сдвиг весенних сроков распускания листьев в сторону более ранних дат, что расценивается специалистами как ожидаемый отклик на потепление климата.

Календари природы представляют собой специализированные справочники, содержащие сведения о сезонных ритмах в природе конкретной территории. Сезонные ритмы в явлениях живой природы регулируются явлением фотопериодизма растительных организмов на изменения времени года, связанные в свою очередь с годовой динамикой условий освещения – высотой Солнца над горизонтом и продолжительностью светлой части суток. Для растительных организмов лучшим критерием деления года на сезоны являются температурные условия, определяемые по притоку солнечной радиации на единицу площади. В календарях обычно описываются средние многолетние сроки наступления фенологических явлений, изложенные по сезонам года или в хронологическом порядке (от начала до окончания календарного года).

Таким образом, в этой главе изложены основные методы агроклиматической обработки различных рядов наблюдений и измерений, выполняемых сетевыми подразделениями системы Росгидромета. Более детально методы наблюдений и контроля за качеством первичных материалов изложены в действующих руководящих документах (РД) – наставлениях, руководствах и специальных методиках.

Глава 2

АГРОКЛИМАТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ, ПРИНЦИПЫ И МЕТОДЫ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ КЛИМАТОВ

2.1. Агроклиматические показатели

Оценка степени благоприятности климатических условий для возделываемых сельскохозяйственных культур возможна только при знании потребностей растения в освещённости, тепле, влажности почвы и её плодородии в течение онтогенеза или его отдельных периодов. Без знания этих потребностей и учёта биологических особенностей культуры агроклиматические описания территории превращаются в обычную климатическую сводку, малоприменимую для агрономов-практиков. Ещё в 1897 г. К. А. Тимирязев в одной из своих лекций говорил: *«В последнее время много говорится и пишется о сельскохозяйственной метеорологии и в особенности почвоведения, но все эти знания интересуют земледельца лишь настолько, насколько они касаются растений. Климатические условия представляют интерес лишь тогда, когда нам рядом с ними известны требования, предъявляемые им растением; без этих последних сведений бесконечные вереницы цифр метеорологических дневников останутся только бесплодным балластом»* (Тимирязев К. А. Физиология растений как основа рационального земледелия. М.: Изд-во АН СССР. Избр. соч., т. II, 1948). Обычные метеорологические данные, характеризующие, например, динамику и уровень температуры в вегетационный период, не могут дать представления о состоянии, ходе развития и роста возделываемой культуры. В то же время рассчитанные по этим же метеорологическим материалам даты наступления фаз развития растений оказываются полезными для оценки текущего и ожидаемого состояния посевов и принятия при необходимости агротехнических мер по улучшению условий для формирования будущего урожая (подкормка, полив, прополка посевов и т. п.).

При разработке конкретных агроклиматических показателей и методов оценки агроклиматических ресурсов необходимо использовать основные биологические и экологические законы, подробно описанные в работе «Основы сельскохозяйственной метеорологии», 2011, том I, раздел 4.2. Назовём только два из них: *Закон неравноценности факторов среды для растений* – не все факторы окружающей среды оказывают одинаковое воздействие на организм растения; по своему влиянию на растение их подразделяют на *основные* и *второстепенные*. На каждое растение

и происходящие в нём процессы жизнедеятельности оказывают совместное влияние основные и второстепенные факторы. Свет, тепло, влага, питательные вещества (плодородие почвы) и воздух являются основными факторами жизни растений. При сельскохозяйственной оценке климата в первую очередь оценивается ресурс каждого из этих факторов. Полное же представление об агроклиматических ресурсах даёт всесторонняя оценка основных и анализ корректирующего влияния второстепенных факторов, таких как облачность, скорость ветра, влажность воздуха и т.п. В процессе агроклиматической оценки территории второстепенные факторы могут оказаться основными только в тех случаях, когда их интенсивность и длительность воздействия отрицательно влияют на растения, его состояние, рост, развитие и формирование продуктивности. Например, сильный, шквалистый ветер, длительный период с плотной облачностью, снижающей интенсивность прихода к посевам солнечной радиации, и т.п.

Смысл закона *равнозначности (или незаменимости) основных факторов жизни* гласит, что ни один из факторов не может быть заменён никаким другим: фактор света не может заменить увлажнения почвы, а влажность – температуру и т.п. Для роста и развития растений необходимо одновременное и совместное наличие таких факторов, как освещённость (свет), тепло, влага, наличие питательных веществ и воздух. Из газов, составляющих атмосферный воздух, оценивают обычно количество кислорода (O_2), углекислого газа (CO_2) и азота (N_2). Напомним, что кислород используется при дыхании растений, в процессе которого происходит окисление накопленных в растениях питательных веществ и образуется энергия, необходимая для всех жизненных процессов растительного организма. CO_2 представляет собой источник образования органического вещества в процессе фотосинтеза; известно, что сухое вещество растений на 45–50 % состоит из углерода. Азот необходим растениям как элемент питания, без которого невозможен синтез белковых веществ, формирующихся в клетке.

В лабораторных и полевых исследованиях агробиологов, физиологов, экологов, селекционеров для большинства видов и сортов возделываемых культур установлены биологические показатели предельных для жизни растений температур: от начала развития растений до фазы их полного созревания; определена потребность растений во влаге, особенно в критические периоды их развития. Коэффициенты завядания однолетних растений позволяют установить отношение исследуемых культур к увлажнению почвы. С помощью биологических показателей выявляют степень благоприятности температурного режима холодного периода года для зимующих растений и оценивают условия перезимовки посевов и плодово-ягодных культур и т.п.

Биологические показатели используются в агрометеорологии и агроклиматологии. Однако в ряде случаев их использование приводит к ошибочным заключениям. Например, для оценки прорастания семян использование средней суточной температуры воздуха (стандартная температура в метеорологической будке на высоте 2 м от поверхности почвы) не учитывает несколько факторов:

- температуру в слое почвы, где находится семя;
- влияние на семя динамики температуры воздуха в течение светлого и тёмного времени суток;
- в условиях низких средних суточных температур растение всё-таки может использовать в своем развитии положительные температуры светлой части суток;
- на сроках развития растений сказывается и «пестрота» почвенного покрова, имеющего различные тепловые и влажностные характеристики;
- широкая изменчивость микроклиматических условий во времени и пространстве, зависящая также и от применяемой агротехники, и т. п.

Следовательно, не все биологические показатели пригодны для использования в агрометеорологических и агроклиматических работах. В то же время агрометеорологические и агроклиматические показатели должны быть биологически обоснованными, т.е. выражающими известные отношения между физическими процессами в атмосфере (и в почве) и физиологическими процессами, происходящими в растениях под влиянием складывающихся внешних условий.

В процессе филогенеза (исторического развития) у растений сформировались определённые потребности в факторах окружающей среды. Потребность растений в климатических условиях обычно выражается количественно через *агроклиматические показатели*. Эти показатели выражают количественные связи роста, развития, состояния и формирования продуктивности сельскохозяйственных культур с факторами климата, а также реакцию растений на отдельные (климатические) элементы или их комплексы (температура, осадки, число часов солнечного сияния, испаряемость, показатели почвенного увлажнения и др.). Например, агроклиматическими показателями перезимовки озимых и плодовых культур являются абсолютный минимум температуры воздуха и почвы, средний из абсолютных минимумов температуры воздуха и почвы, суммы отрицательных температур воздуха за периоды ниже 0, -5, -10, -15 °С, а также высота снежного покрова, повторяемость и продолжительность зимних оттепелей и др.

Выбору системы показателей обычно предшествует исследование количественных связей между гидрометеорологическими факторами и показателями роста, развития и формированием продуктивности растений (посевов).

В чём разница между агрометеорологическими и агроклиматическими показателями? *Агрометеорологический показатель* – это количественное выражение агрометеорологических условий, характеризующих потребность сельскохозяйственных растений и отражающих физические процессы в атмосфере, в почве и жизненные функции растений в процессе их роста и развития. *Агроклиматический показатель* – это количественное выражение агроклиматических условий, характеризующих потребность сельскохозяйственных растений (ГОСТ 17713–89). Очевидно, что различие их выражается в их целевом назначении. В процессе оперативного обеспечения отраслей сельскохозяйственного производства обычно используют *агрометеорологические показатели*, отражающие влияние сложившихся и ожидаемых условий погоды (агрометеорологических условий) определённого промежутка времени текущего или предшествующего вегетационного периода. При изучении агроклиматических ресурсов применяют *агроклиматические показатели*, которые получают путём осреднения многолетних данных за вегетационные периоды или их отдельные временные интервалы.

Для практического использования агроклиматические показатели должны быть достаточно просты. В то же время они должны быть комплексными, отражающими совместное действие нескольких метеорологических элементов. Примерами таких комплексных агроклиматических показателей являются гидротермический коэффициент Селянинова (ГТК Селянинова); величина дефицита влажности воздуха, характеризующая совместным действием температуры и влажности воздуха, а в некоторых случаях и скоростью ветра. Суммы активных (эффективных) температур отражают сочетание общего уровня температуры воздуха и длительности периода вегетации или его временных отрезков.

Комплексными показателями в известной мере могут быть и средние многолетние значения влажности почвы (или запасов продуктивной влаги в почве), как результат естественного взаимодействия процессов выпадения атмосферных осадков, поверхностного стока, просачивания в почвенные горизонты, испарения с поверхности почвы и транспирации растительного покрова. К ним также относятся различные показатели увлажнения, критические значения влажности почвы, вызывающие повреждения или гибель растений.

Некоторые интегральные агроклиматические показатели учитывают совместное воздействие физических условий окружающей среды и биологические особенности сельскохозяйственных культур. Обычно это эмпирические коэффициенты увлажнения, представляющие собой отношение прихода влаги к её возможному расходу, для конкретной культуры или её сорта (например показатели увлажнения Д. И. Шашко, А. М. Алпатьева и др.). Кроме основных агроклиматических показателей, используются

и многие другие: средние, оптимальные и критические (высокие и низкие) температуры воздуха и почвы, продолжительность безморозного и беззаморозкового периодов, показатели морозостойкости растений, глубина промерзания и оттаивания почвы, глубина весеннего промачивания почвы и др. Сопоставление агроклиматических показателей с ресурсами климата позволяет установить, насколько климатические условия конкретной географической территории благоприятны или неблагоприятны для возделывания испытываемых сельскохозяйственных культур.

Для оценки агроклиматических ресурсов территории недостаточно осреднённых во времени и пространстве значений выбранных показателей. Необходимы ещё и вероятностные оценки этих показателей (особенно тех их значений, при которых растения испытывают угнетение), что позволяет судить об обеспеченности посевов основными компонентами климата по годам. Кроме того, осреднённые показатели, как правило, сглаживают временную динамику процесса. Например, средние суточные температуры воздуха (почвы) и их суммы сглаживают суточный ход, имеющий свой максимум и минимум, амплитуду. На это обращали внимание многие учёные (Г.Т. Селянинов, Л.Н. Бабушкин, П.И. Колосков, З.А. Мищенко и др.), внёсшие серьёзный вклад в развитие агроклиматологии. Они, в частности, отмечали, что средние показатели оказываются не чувствительными к оценке степени континентальности климата и микроклимата. Под оценкой агроклиматических ресурсов понимается выявление климатических возможностей конкретной территории для получения той или иной сельскохозяйственной продукции. Агроклиматические ресурсы выражаются посредством агроклиматических показателей.

2.2. Принципы и методы сельскохозяйственной оценки климата

Как было отмечено во введении, климатообразующие процессы Земли в различной географической обстановке создают различные локальные климаты. При их изучении климатологи выделили определённые географические закономерности в распределении климатических элементов на Земле: средние температуры воздуха, суммы осадков и их распределение в течение года и др. Эти закономерности изменяются в зависимости от географической широты изучаемой территории, степени её континентальности, влияния морей и океанов, условий орографии и т.п. Сочетания таких характеристик в выбранных интервалах их значений названы *типами климата*, распределение которых по земному шару происходит не хаотически, а упорядоченно, в зависимости от тех же факторов (Хромов С.П., Петросянц М.А., 2004).

В распределении климатов более или менее ясно выражена *зональность*, нарушаемая в отдельных регионах влиянием *азональных факторов*, т.е. не характерных для комплекса природных свойств зоны,

изменяющих присущие ей закономерности. На основе установленных закономерностей строится классификация климатов и проводится *климатическое районирование*: определяются границы распространения отдельных типов климата. Учёными предложено большое количество классификаций климатов, в основу которых положены различные критерии: В. Кёппена, Л. С. Берга, А. И. Кайгородова, Б. П. Алисова, А. А. Григорьева и М. И. Будыко (и др.), как для всего земного шара, так и для его отдельных континентов, государств и территорий. Методы климатического районирования, предложенные и реализованные в различных картах и атласах, изложены в специальной климатологической литературе и нами не рассматриваются.

Общеклиматические классификации малоприспособлены для целей практического использования в сельскохозяйственной отрасли. Это объясняется тем, что многие важные показатели климата, например облачность, атмосферное давление, оптические явления и др., не связаны напрямую с объектами и процессами возделывания сельскохозяйственных культур, различающихся по биологическим особенностям, потребностям в условиях освещения, тепла, влаги и свойствами почвы.

Агроклиматические исследования в России начали развиваться в последней четверти XIX столетия. Научно-методологические основы этих исследований были разработаны профессорами А. И. Воейковым и П. И. Броуновым и впоследствии получили развитие в других странах. С 20-х гг. XX столетия принципы сельскохозяйственной оценки климата активно разрабатывались в трудах Г. Т. Селянинова, П. И. Колоскова, Р. Э. Давида, затем были продолжены в работах И. А. Гольцберг, Ф. Ф. Дави-тая, С. А. Сапожникова, Д. И. Шашко, А. М. Шульгина, Л. Н. Бабушкина, Ю. И. Чиркова, Л. С. Кельчевской, В. А. Жукова, Е. К. Зойдзе и многих других учёных. За рубежом значительный вклад в развитие агроклиматических исследований внесли Б. Ливингстон (1921), Дж. Ацци (1926), Е. Николс, Х. Пенман, С. Торнтвейт и др.

Подробно вопросы истории развития агроклиматических исследований и практического их применения изложены в коллективной монографии «Развитие сельскохозяйственной метеорологии в России» (2009), глава 9.

Агрометеорологические факторы и их сочетания, оказывающие существенное влияние на объекты и процессы сельскохозяйственного производства, осреднённые за многолетний период наблюдений, называются *агроклиматическими условиями*. А совокупность агроклиматических условий, определяющих величину получаемой сельскохозяйственной продукции на конкретной территории, называют *агроклиматическими ресурсами* (ГОСТ 17713–89).

В развитие этого определения схема сельскохозяйственной характеристики климата складывается из оценки ряда условий и ресурсов:

- радиационных ресурсов вегетационного периода;
- термических ресурсов территории;
- условий влагообеспеченности вегетационного периода и его под-
периодов;
- условий перезимовки озимых и плодовых культур;
- повторяемости и интенсивности неблагоприятных и опасных явлений для возделываемых культур.

Климатические факторы – тепло и влага и их соотношения во времени и пространстве – имеют решающее значение в жизнедеятельности растений. Однако их влияние на растения проявляется не только непосредственно, но и через обусловленные ими режимы тепло- и влагообмена и микробиологические процессы в почвенном покрове. По мнению Ф. Ф. Давитая, располагая такими агроклиматическими показателями и знаниями об их распределении по территории с учётом её микроклиматических особенностей, с большой достоверностью можно рассчитать и предвидеть возможности возделывания тех или иных культур, темпы их развития, возможную продуктивность и направление специализации сельскохозяйственного производства.

При сельскохозяйственной оценке климата используются не только средние многолетние значения величин метеорологических и агроклиматических факторов, но и их экстремальные величины холодного и тёплого периодов, их повторяемость, суммы температур вегетационного периода и отдельных фаз развития возделываемых культур, амплитуды суточных величин температуры воздуха и многие другие. Поэтому сельскохозяйственная оценка климата заключается в комплексном, максимально тщательном исследовании агроклиматических условий изучаемой территории и возделываемых сельскохозяйственных культур.

Методика исследования климата применительно к сельскохозяйственному производству представляет собой ряд взаимосвязанных этапов (Синицына Н. И., Гольцберг И. А., Струнников Э. А., 1973):

- определение агроклиматических показателей;
- изучение агроклиматических ресурсов территории;
- определение степени соответствия агроклиматических ресурсов потребностям изучаемых сельскохозяйственных культур;
- изучение микроклимата (см. главу 6) и определение его влияния на общие агроклиматические ресурсы;
- проведение агроклиматического районирования территории;
- определение рентабельности возделывания исследуемых культур (или их комбинаций) на конкретной территории.

Если плодородие почвы регулируется в известной степени комплексом агротехнических методов, таких как механическая обработка, применение системы паров, внесение удобрений, обработка ядохимикатами,

мелиорация и т.п., то регулировать климат сельскохозяйственных полей, занимающих обширные пространства, практически невозможно.

По аналогии с плодородием почвы можно было бы говорить и о плодородии климата, но правильнее пользоваться терминами «*продуктивность климата*» или его «*сельскохозяйственный бонитет*», понимая под ним степень благоприятствования климата сельскохозяйственному производству и прежде всего растениеводству, причём в качестве показателя благоприятствования принимать *урожайность* (С.А. Сапожникова). Первые определения продуктивности климата производились графическим методом (С.А. Сапожникова, М.М. Мель и др.), несколько позднее Д.И. Шашко предложил для расчёта продуктивности климата (Π_{κ}) формулу:

$$\Pi_{\kappa} = \Pi_y \cdot 0,01 \sum t_{>10^{\circ}\text{C}}, \quad (2.1)$$

где Π_y – продуктивность увлажнения, т.е. урожайность в ц/га, приходящаяся на единицу термических ресурсов ($\sum t = 100^{\circ}\text{C}$); $\sum t_{>10^{\circ}\text{C}}$ – сумма средних суточных температур за период с температурой выше 10°C .

В последующие годы в советской и зарубежной агроклиматологии были выполнены обширные исследования по сельскохозяйственному бонитету, с помощью которого проводились оценки агроклиматических ресурсов применительно к основным возделываемым культурам. Обзор исследований по агроклиматологии опубликован в коллективной монографии «Развитие сельскохозяйственной метеорологии в России» (2009) и в монографии В.А. Жукова, А.Н. Полевого, А.Н. Витченко, С.А. Даниелова «Математические методы оценки агроклиматических ресурсов» (1989).

Близким по смыслу к понятию «сельскохозяйственный бонитет» является термин «*сельскохозяйственный потенциал климата*» (СПК), под которым понимают максимальные сельскохозяйственные возможности природной среды по ресурсам климата (Зоидзе Е.К., Овчаренко Л.И., 2000). При этом имеется в виду, что такие компоненты природной среды, как почва, рельеф (ландшафт), также вносят существенный вклад в формирование среды обитания растений и, следовательно, в создание всего сельскохозяйственного потенциала.

По существу, сельскохозяйственный потенциал климата, равно как и сельскохозяйственный бонитет климата, являются функцией взаимодействия климата, почвы и рельефа. Сельскохозяйственный потенциал климата относится к числу немногих видов практически неисчерпаемых природных ресурсов, которые постоянно, естественно возобновляются, особенно при смене сезонов года, являются бесплатными и доступны для использования в хозяйственной деятельности человека. Для практического использования СПК проводится его оценка применительно к каждой конкретной территории, поскольку количественные различия и соотношения составляющих его факторов в пределах Российской Федерации

достаточно велики. Необходимым условием оценки СПК является учёт неблагоприятных и опасных гидрометеорологических явлений, интенсивность и повторяемость которых заметно снижают сельскохозяйственный потенциал климата территории. Основным условием успешного возделывания сельскохозяйственных культур являются такие агроклиматические ресурсы, которые обеспечивают их жизнедеятельность и формирование хозяйственно-ценной продукции.

В настоящее время для характеристики условий роста, развития и формирования продуктивности сельскохозяйственных культур используют многие агроклиматические показатели, представленные в новой концепции сельскохозяйственной бонитировки климата в Российской Федерации (Зоидзе Е. К., Овчаренко Л. И., 2000). При формировании системы бонитировочных показателей авторы руководствовались:

- названными выше законами равнозначности факторов жизни и неравноценности факторов среды и биологическими потребностями растений в факторах среды обитания;
- необходимостью наиболее полного описания вегетационного периода по показателям радиационного режима, теплообеспеченности, влагообеспеченности, агроклиматических условий проведения полевых работ и перезимовки сельскохозяйственных культур, неблагоприятных и опасных гидрометеорологических явлений, а также описания основных характеристик почвы и рельефа. На рис. 2.1 представлена блок-схема оценки сельскохозяйственного потенциала климата.

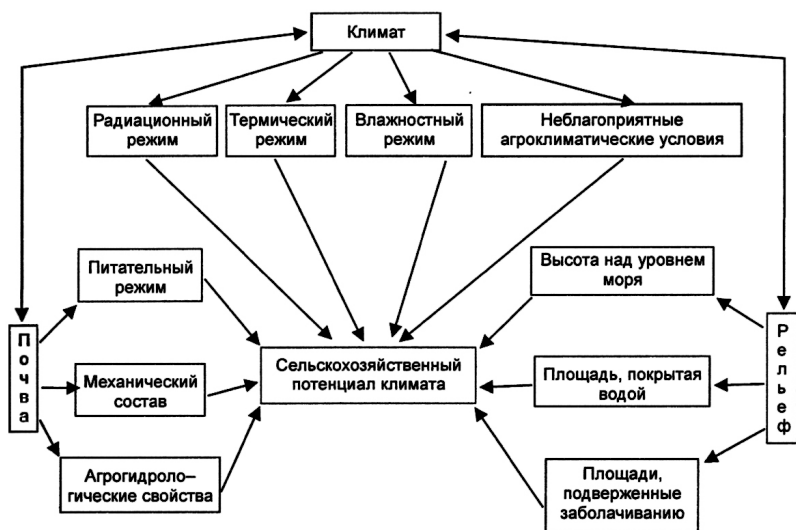


Рис. 2.1. Блок-схема оценки сельскохозяйственного потенциала климата (Зоидзе Е. К., Овчаренко Л. И., 2000)

Предложенная авторами методика сельскохозяйственной бонитировки климата предусматривает использование во всех блоках, приведённых на рисунке, включение более 100 показателей: почвенное плодородие описывается 19 показателями, рельеф – шестью, агроклиматический потенциал (радиационный, термический, влажностный режимы и неблагоприятные агроклиматические условия) – 78 показателями.

В качестве примера приведём только фрагмент шкалы (системы) бонитировочных показателей для описания СПК (табл. 2.1), представленной в работе Е. К. Зоидзе и Л. И. Овчаренко (2000).

Таблица 2.1

Фрагмент шкалы бонитировочных показателей для описания СПК

Показатель	Весовой коэффициент $K_{j,\delta}$	Диапазон оптимальных значений, возможных для территории РФ	
		φ_{ij}^I *)	φ_{ij}^{II} **)
1. Блок термического режима	1,2		
1.1. Средняя температура воздуха (°C) годовая	1,0	10,0	14,0
1.2. То же самого тёплого месяца	1,0	20,0	25,0
1.3. То же самого холодного месяца	1,0	3,0	5,0
1.4. Средний минимум температуры воздуха (°C) за ноябрь–март	1,0	3,0	5,4
1.5. То же за год	1,0	7,0	11,2
1.6. Средняя из абсолютных минимумов температуры воздуха за ноябрь–март	1,0	-3,0	-1,2
1.7. То же за год	1,0	-7,0	-5,0
1.8. Число суток со средней температурой воздуха 15–20 °C	1,3	75,0	78,0
1.9. То же 20,1–25,0 °C	1,8	80,0	83,0
1.10. Сумма положительных температур воздуха (°C) за период с температурой выше 0 °C	1,0	4900,0	5150,0
1.11. То же выше 5 °C	1,0	4800,0	5000,0
1.12. То же выше 10 °C	1,3	3900,0	4200, 0
1.13. То же выше 15 °C	1,8	3000,0	3370,0
1.18. Продолжительность (сутки) периода с температурой воздуха выше 0°C	1,0	355	360
1.38. Глубина промерзания почвы (см)	1,0	2,0	5,0
1.39. Средняя продолжительность (сутки) безморозного периода в воздухе	1,0	285	289
1.42. То же на поверхности почвы	1,0	248	252

Пояснение: *) – абсолютное минимальное значение показателя;

**) – абсолютное максимальное значение показателя.

Как видно, в этом фрагменте нами пропущен ряд показателей, касающихся обеспеченности и вероятности явлений на 90 и 75 %, с целью сокращения объема таблицы.

Аналогичная информация в разработанной авторами шкале показателей приведена для блоков радиационного, влажностного режимов и блока неблагоприятных явлений погоды. Все показатели, приведённые в шкале авторов, отражают практически все грани среды обитания растений в виде их оптимальных, средних многолетних и абсолютных значений, их интенсивности, вероятностей и обеспеченности. Кроме того, для всех показателей приведены значения в их диапазоне (от минимума φ_{ij}^I до максимума φ_{ij}^{II}), а также определены весовые коэффициенты $K_{j,\delta}$ для каждого показателя (или блока), исходя из информационной ёмкости показателя или блока.

Результатом такого комплексного описания является синтез оценок всех видов ресурсов, наиболее полно отражающих сельскохозяйственный потенциал климата, каждого блока и показателя, используемых для сравнительной оценки.

Оценка СПК по субъектам Российской Федерации предполагает их сравнение по показателям и классификацию результатов. Поскольку показатели измеряются в разных единицах, их сопоставление производится с помощью функции расстояния, т.е. *меры близости* показателей от установленных для каждого из них эталонного значения. В качестве эталона использован класс оптимальных значений показателей, обеспечивающих возможную в РФ максимальную производительность продукционного процесса растений в конкретных условиях. Класс оптимальных значений бонитировочных показателей был сформирован авторами на основе обширной литературы и экспертным путём.

За модельный субъект Российской Федерации условно была принята территория, СПК которой обеспечивал бы возможную для РФ максимальную производительность продукционного процесса растений. Максимальные значения показателей в этом субъекте были приняты равными 100 баллам (или 100 %). Тогда значения оценок СПК существующих субъектов РФ при сравнении с этим эталоном будут меньше или в лучшем случае равными 100 баллам. В основу такого подхода был положен *метод распознавания образов*, применённый в агрометеорологии и опубликованный в ряде работ сотрудниками ФГБУ «ВНИИСХМ» Росгидромета (Даниелов С. А. и Борисова О. А., 1981; Даниелов С. А. и Жуков В. А., 1984; Жуков В. А., Полевой А. Н., Витченко А. Н., Даниелов С. А., 1989).

Балловая оценка сельскохозяйственного бонитета климата (Q_L) на уровне субъекта РФ определяется из соотношения:

$$Q_L = P_L \cdot 100 / P', \quad (2.2)$$

где P_L – суммарная мера близости (суммарное расстояние) значений всех показателей по всем блокам L -го субъекта; P' – суммарная мера близости (суммарное расстояние) значений всех показателей модельного субъекта к классу оптимальных значений по всем блокам; L – порядковый номер субъекта; $l = 1, l'$; l' – количество субъектов.

Для определения P_L и P' используются следующие зависимости:

$$P_L = \sum_{j=1}^N K_j \rho_j^l (X_j^l, H_j), \quad (2.3)$$

$$P^l = \sum_{j=1}^N K_j \rho_j^1 (X_j^1, H_j), \quad (2.4)$$

где K_j – весовой коэффициент j -го блока; ρ_j^l, ρ_j^1 – мера близости между векторами $X_j^l (x_1^l, x_2^l, \dots, x_n^l)$ и $X_j^1 (x_1^1, x_2^1, \dots, x_n^1)$ j -го блока, соответственно, L -го и модельного субъектов, с одной стороны, и вектором оптимальных значений H_j – с другой; X_j^l, X_j^1 – векторы показателей j -го блока, соответственно L -го и модельного субъектов; x_i – показатель оценки СПК; i – порядковый номер показателя; n – количество показателей, $i = 1, \bar{n}$; j – порядковый номер блока; N – количество блоков; $j = 1, \bar{N}$.

$$\rho_j^l (X_j^l, H_j) = 1 / n \sum_{i=1}^n a_{ij}^l \delta_{ij}^l, \quad (2.5)$$

$$\rho_j^1 (X_j^1, H_j) = 1 / n \sum_{i=1}^n a_{ij}^1 \delta_{ij}^1, \quad (2.6)$$

где a_{ij}^l, a_{ij}^1 – метрики, характеризующие меры близости фактических значений i -го показателя блока, соответственно, L -го и модельного субъектов с их эталонными значениями; $\delta_{ij}^l, \delta_{ij}^1$ – информационные веса i -го показателя, соответственно, L -го и модельного субъектов.

Метрика a_{ij} рассчитывается по следующим формулам:

$$a_{ij} = 1 - (x_{ij} - \varphi_{ij}^1) / (\varphi_{ija}^{11} - \varphi_{ija}^1), \quad \text{если } x_{ij} < \varphi_{ij}^1; \quad (2.7)$$

$$a_{ij} = 1 - (x_{ij} - \varphi_{ij}^{11}) / (\varphi_{ija}^{11} - \varphi_{ija}^1), \quad \text{если } x_{ij} > \varphi_{ij}^{11}; \quad (2.8)$$

$$a_{ij} = 1, \quad \text{если } \varphi_{ij}^1 \leq x_{ij} \leq \varphi_{ij}^{11}, \quad (2.9)$$

где x_{ij} – i -й показатель j -го блока. Если он характеризует L -й субъект, то записывается в виде x_{ij}^l , а если модельный субъект, то в виде x_{ij}^1 ; $\varphi_{ij} (\varphi_{ij\min} = \varphi_{ij}^1, \varphi_{ij\max} = \varphi_{ij}^{11})$ – диапазон оптимальных значений показателя; $\varphi_{ija}^1, \varphi_{ija}^{11}$ – абсолютные минимальные и максимальные значения показателей.

Далее методика расчёта балловой оценки СПК на уровне субъектов РФ проводится путём формирования значений системы показателей по форме (табл. 2.2).

Таблица 2.2

**Исходные данные для балловой оценки СПК субъектов РФ
с помощью методов распознавания образов**

Показатель	Весовой коэффициент K_{ij}, δ_{ij}	Диапазон оптимальных значений показателя		Диапазон абсолютных значений показателя		Значения показателя в модельном субъекте РФ
		мин. φ_o^1	макс. φ_o^{11}	мин. φ_a^1	макс. φ_a^{11}	

Для оценки СПК массив средних значений показателей по каждому субъекту РФ формируют в табл. 2.3. Для этого используют информационно-справочную агроклиматическую, агрогидрологическую и географическую литературу, которая достаточно полно освещает территорию РФ.

Таблица 2.3

Фактические средние значения показателей для оценки СПК по субъектам РФ

Субъект РФ	Показатели для оценки СПК по баллам (x_{ij}) из табл. 2.1					
	термического режима $j = 1;$ $i = 1 \dots 42$	режима увлажнения $j = 2;$ $i = 1 \dots 16$	радиационного режима $j = 3;$ $i = 1 \dots 9$	неблагоприятных агроклиматических условий $j = 4;$ $i = 1 \dots 17$	почвенного плодородия $j = 5;$ $i = 1 \dots 13$	рельефа $j = 6;$ $i = 1 \dots 6$

Далее по формулам (2.7–2.9) рассчитывают метрики a_{ij} , характеризующие меру близости каждого показателя оценки СПК, соответственно, L -го и модельного субъектов РФ с учётом класса оптимальных значений. Расчет выполняется для каждого субъекта. По формуле (2.2) рассчитывают балловую оценку СПК по всем субъектам РФ, производят классификацию результатов оценки и заносят в отдельную таблицу. В этой методике предпочтение отдается блокам термического и влажностного режимов, далее – блоку неблагоприятных агроклиматических условий. Из отдельных показателей наибольшие весовые коэффициенты установлены для сумм положительных температур воздуха выше 10 и 15 °С, продолжительности периодов с температурой воздуха 10 и 15 °С, числа суток со средней температурой воздуха 20, 1...25 °С, количества осадков и ГТК Селянинова за период с температурой воздуха выше 10 °С и некоторым другим.

Оценка сельскохозяйственного потенциала климата (СПК) базируется на оценке и учёте различных агроклиматических показателей, устойчиво коррелирующих с продуктивностью сельскохозяйственных культур. Как было показано, в классической агроклиматологии используются показатели обеспеченности посевов теплом и влагой, а для зимующих культур

учитываются условия перезимовки растений. Суть СПК заключается в комплексном изучении агроклиматических условий конкретной территории и сопоставлении её агроклиматических ресурсов с потребностями сельскохозяйственных культур в климате и с модельным субъектом, оценённым в 100 баллов или в 100 %.

Во второй половине XX столетия в Советском Союзе проводились крупномасштабные исследования с целью получения количественной оценки СПК основных растениеводческих территорий страны. В результате были получены различные показатели, характеризующие сельскохозяйственную продуктивность земель ведущих регионов. Несмотря на то, что большое количество работ было выполнено 40–60 лет назад, практически все они не потеряли своей научно-практической значимости.

Глава 3

АГРОКЛИМАТИЧЕСКИЕ РЕСУРСЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Агроклиматические ресурсы территории оцениваются агроклиматическими условиями (показателями), обеспечивающими рост, развитие и формирование продуктивности (количества и качества) однолетних и многолетних сельскохозяйственных культур. Уровень обеспеченности возделываемых культур необходимым количеством в первую очередь солнечной радиации, теплом и влагой определяет хозяйственную и экономическую целесообразность их выращивания на конкретной территории. Известно, что при недостатке влаги использование ресурсов солнечной радиации и тепла оказываются ограниченным и тем больше, чем меньше их влагообеспеченность посевов, что определяет в конечном счёте их продуктивность.

3.1. Методы оценки радиационных ресурсов территории

Солнечная коротковолновая энергия Солнца, как единственного источника освещённости и тепла на Земле, превращается в тепло на земной поверхности, где она расходуется на нагревание верхних слоёв почвы и воды, которые в свою очередь нагревают нижние слои атмосферы. Поскольку земная поверхность и нижние слои атмосферы излучают длинноволновую инфракрасную радиацию, эти поверхности охлаждаются. Таким образом, приход тепла от Солнца уравнивается его потерей в космическое пространство, что определяет условия теплового равновесия планеты Земля. Эти вопросы изложены более подробно в работе «Основы сельскохозяйственной метеорологии», 2011, том I, глава 2.

Как известно, энергетической основой растениеводства является солнечная радиация, особенно её часть – фотосинтетически активная радиация (ФАР), находящаяся в интервале длин волн 0,38...0,71 мкм. Напомним, что наиболее интенсивно растения (особенно их листья) поглощают сине-фиолетовые (0,40...0,48 мкм) и оранжево-красные (0,65...0,69 мкм) лучи. Количество ФАР ($Q_{ФАР}$) приблизительно составляет 0,52 приходящей суммарной радиации (Q):

$$Q_{ФАР} = 0,52 Q. \quad (3.1)$$

На территории Российской Федерации и сопредельных государств прослеживается широтное изменение количества ФАР: с северо-запада на юго-восток (рис. 3.1).

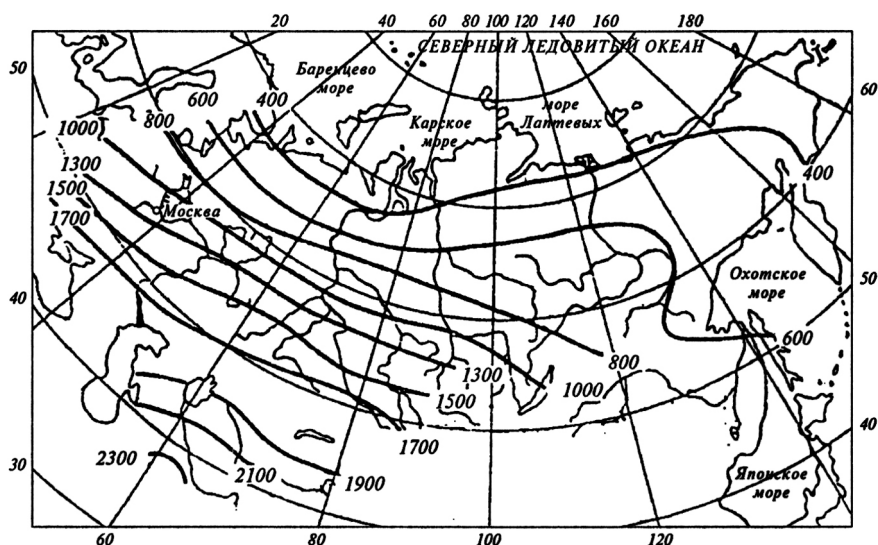


Рис. 3.1. Распределение средних многолетних сумм ФАР за период активной вегетации, МДж/м²

Для жизнедеятельности растений большое значение имеют не только продолжительность светлой части суток (освещённость), но и интенсивность солнечной радиации. Световые ресурсы (число часов солнечного сияния, продолжительность светового дня) определяются географической широтой территории и сезоном года. На территории России и сопредельных государств число часов солнечного сияния за вегетационный период в среднем изменяется от 500 ч в северных регионах до 2000 ч – в южных, с максимумом в июле и минимумом – в декабре. В некоторых регионах, как в Дальневосточном, максимум продолжительности солнечного сияния смещается на март, т.к. в июле там преобладают пасмурные дни, обусловленные летним муссоном.

Для некоторых пунктов РФ приведены месячные суммы суммарной ФАР в табл. 3.1.

Разность между поглощённой радиацией и эффективным излучением (уходящими от Земли потоками лучистой энергии) называют *радиационным балансом (B) земной поверхности*. Радиационный баланс описывается уравнением (М. И. Бudyко, 1971):

$$B = (S \sin h_{\odot} + D)(1 - A) - E_e, \quad (3.2)$$

где S – энергетическая освещённость прямой радиацией; h_{\odot} – высота Солнца над горизонтом; D – энергетическая освещённость рассеянной радиацией; A – альбедо подстилающей поверхности; E_e – эффективное излучение.

Таблица 3.1

Месячные суммы суммарной ФАР, МДж/ (м² · мес) для различных пунктов европейской части России

Пункт	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	Вегетац. период	
									t > 5°C	t > 10°C
Архангельск	113	205	264	302	285	201	96	38	1031	708
Екатеринбург	172	235	293	323	302	235	142	71	1316	1073
Смоленск	163	168	243	276	293	205	234	71	1253	1081
Москва	159	188	272	281	285	243	142	67	1399	1198
Мичуринск	162	194	246	301	298	262	166	76	1453	1238
Нижний Новгород	180	265	314	348	324	268	159	88	1571	1399
Махачкала	155	239	331	318	318	285	180	155	1886	1684

В светлые часы суток основной составляющей радиационного баланса является суммарная радиация, зависящая от высоты Солнца над горизонтом, наличия облачного покрова и состояния атмосферы. Ночью, когда суммарная радиация отсутствует, величина радиационного баланса отрицательна и определяется эффективным излучением и температурой подстилающей поверхности. В течение ночи эта величина изменяется незначительно и только в зависимости от облачности.

После восхода солнца при его высоте 10...15° радиационный баланс переходит от ночных отрицательных значений к дневным, положительным. Переход положительных значений радиационного баланса к отрицательным происходит при заходе солнца при той же высоте солнечного диска. Средние полуденные значения радиационного баланса, например в г. Москве, составляют летом при ясном небе около 0,51 кВт/м², при средних значениях облачности – 0,3 кВт/м². В зимние месяцы его величина снижается до 0,03 кВт/м², а при средней облачности эти величины близки к нулю (Хромов С.П., Петросянц М.А., 2004). На рис. 3.2 представлена карта средних многолетних значений годового радиационного баланса земной поверхности, МДж/(м² · год).

Физиологическое влияние света на растения изложено нами в работе «Основы сельскохозяйственной метеорологии», 2011, том I, часть II, глава 7 и в части III – глава 15.

В агроклиматологии воздействие солнечной энергии оценивается обычно продолжительностью освещения, интенсивностью и спектральным составом света. При оптимальных для конкретной культуры продолжительностях дня и ночи значение спектрального состава света в развитии растений считается минимальным. Поэтому ресурсы света применительно к спектральному составу отдельно не оцениваются (Синицина Н.И., Гольцберг И.А., Струнников Э.А., 1973). Продолжительность светлой части суток (в научной литературе широко используется термин

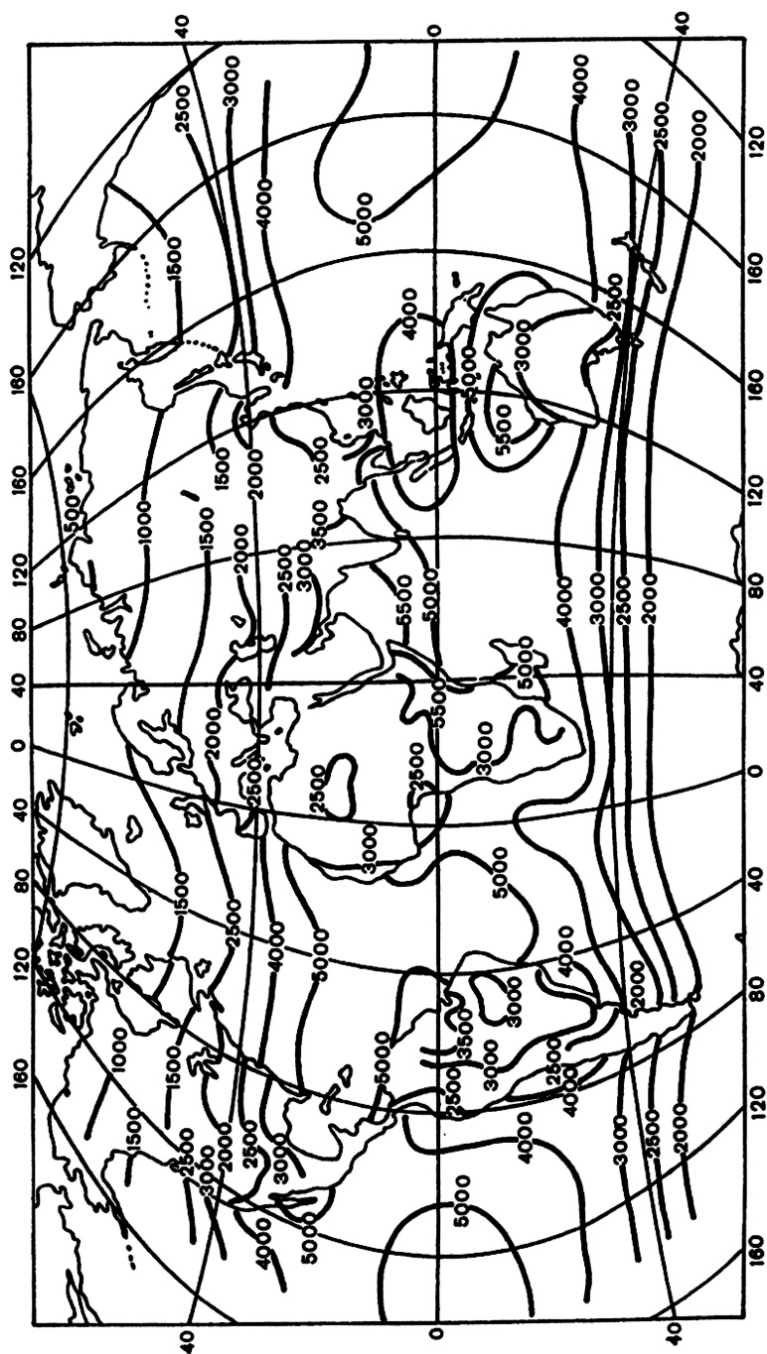


Рис. 3.2. Радиационный баланс земной поверхности за год, $\text{МДж/м}^2 \cdot \text{год}$
(Хромов С. П., Петросянец М. А., 2004)

«длина дня», растения «короткого» и «длинного» дня), как известно, определяет продолжительность работы фотосинтетического аппарата растений. Поэтому оценка продолжительности дня (его «длины»), а точнее, климатическая продолжительность солнечного сияния (ч/год), является надёжным агроклиматическим показателем для растений, возделываемых в различных почвенно-климатических условиях (природных зонах).

Известно, что суточные количества общей солнечной радиации, падающей на посевы в течение вегетационного периода в разных почвенно-климатических зонах, существенно различаются и могут быть объективно оценены (Шульгин И. А., 1973, 2009; Мищенко З. А., 2009).

Ф. Ф. Давитая предложил комплексный фототермический индекс (FT), учитывающий одновременно термические и световые ресурсы:

$$FT = \sum_{i=D_n}^{D_k} \left[c \left(\phi + \Delta t_{p-g} - \phi_0 \right) \right] L, \quad (3.3)$$

где D_n – дата начала фазы развития растения; D_k – дата конца фазы; c – коэффициент, учитывающий влияние дневного максимума температуры и «тормозящих температур»; ϕ – средняя суточная температура, ϕ_0 – биологический ноль культуры, Δt_{p-g} – разность температур растения и воздуха; L – множитель, учитывающий влияние продолжительности светлой части суток.

Однако широкого распространения этот комплексный показатель не получил из-за сложности количественного определения коэффициентов, предложенных автором.

3.2. Методы оценки термических ресурсов территории

Агроклиматические границы возможного возделывания конкретных сельскохозяйственных культур определяются их теплообеспеченностью в соответствии с потребностями растений в тепле. В условиях достаточной теплообеспеченности урожай культуры определяется в основном условиями их влагообеспеченности. Агротехнические и мелиоративные мероприятия оказывают большое влияние на тепловые и водные ресурсы вегетационного периода и, следовательно, на формирование конечной продуктивности возделываемых культур.

Тепловые ресурсы вегетационного периода характеризуются широким диапазоном, определяющим возможность произрастания многих видов и сортов сельскохозяйственных культур – от холодостойких до исключительно теплолюбивых, сроки вегетации которых от семени до семени охватывают от одного месяца до возделываемых в течение круглого года (в тропических регионах мира). В зависимости от уровня теплообеспеченности в большинстве регионов умеренного климата собирают один, реже – два (или более) урожая в год. Например, продолжительность периода с температурой воздуха выше 10 °С в России и сопредельных

странах изменяется от 60 до 240 суток. В умеренных широтах период со средней температурой выше 10 °С соответствует вегетационному периоду основных культур. Ограничивающим фактором являются заморозки. Беззаморозковый период, исчисляемый средними датами самых поздних весенних и самых ранних осенних заморозков, на севере этой территории составляет 40...50, а на юге – 250...300 суток.

Картирование сумм температур позволяет судить о распределении ресурсов тепла по территории. На территории Российской Федерации и сопредельных других стран СНГ сумма активных температур воздуха изменяется в широких пределах, например, на севере страны (г. Дудинка) она менее 500 °С, а на юге Туркменистана превышает 5000 °С (рис. 3.3).

В европейской части изменчивость сумм несколько меньшая, например, на севере Кольского полуострова она составляет 500...550 °С, а на юге, в Краснодарском крае, – 2000...2500 °С. Суммы активных температур, отображённые авторами на этом рисунке, обеспечены на 50 %, т.е. в пяти годах из десяти суммы ниже приведённых средних многолетних величин не наблюдаются.

Для более полной оценки возможности возделывания конкретных сельскохозяйственных культур рассчитывают обеспеченность определённых величин сумм температур исследуемой территории. Расчётная формула для определения обеспеченности (Р, %) отклонений сумм температур от климатических величин (норма) имеет вид:

$$P = 50,333 - 7,545(\sigma_T/50) + 0,002(\sigma_T/50)^2 + 0,243(\sigma_T/50)^3, \quad (3.4)$$

где σ_T – среднее квадратическое отклонение от средней многолетней суммы температуры воздуха выше 10 °С.

Изучая изменчивость сумм активных температур по многим станциям, Ф. Ф. Давитая построил кривые обеспеченности сумм активных температур за период с температурой выше 10 °С для трёх типов климата в умеренной зоне страны. Эти кривые обеспеченности представлены нами на рис.1.1 и 1.2 в главе 1 «Методы агроклиматической обработки многолетних материалов наблюдений».

Тип I характерен для районов с неустойчивым климатом, при котором наблюдается большая изменчивость сумм температур. Этот тип отображает изменчивость сумм температур на европейской части страны, в Республиках Средней (ныне Центральной) Азии и в Западной Сибири.

Тип II характерен для районов с более устойчивым климатом (центральная часть Сибири).

Тип III характерен для районов с устойчивым климатом (Восточная Сибирь и Дальний Восток).

Погрешность расчётов не превышает 2...4 %, что считается вполне допустимым в агроклиматологии. Используя кривые обеспеченности

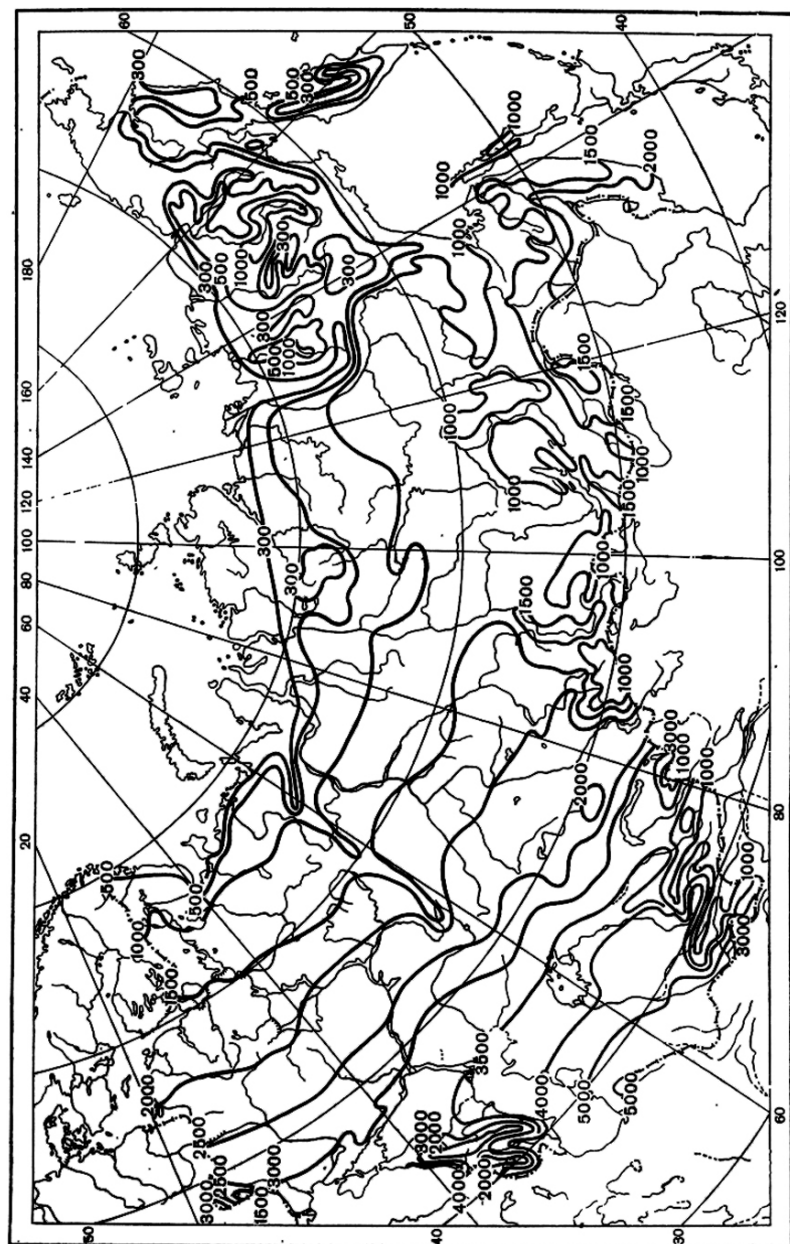


Рис. 3.3. Распределение средних многолетних сумм активных температур выше 10 °С на территории Российской Федерации и сопредельных стран СНГ (Синицина Н.И., Гольцберг И.А., Струнников Э.А., 1973)

вегетационного периода суммой температур выше 10 °С, можно определить, какие суммы температур обеспечены в 90, 70 % лет (и т.п.) для вызревания изучаемой культуры в исследуемом районе.

Для удобства расчётов используют кривые обеспеченности и составляют таблицы 3.2.

Таблица 3.2

Обеспеченность сумм температур выше 10 °С в зависимости от многолетней средней для кривой I, по рис. 1.2 (Синицина Н.И., Гольцберг И.А. и др., 1973)

Средние многолетние $\sum T_{>10^{\circ}C}$	Обеспеченность, %											
	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0	
3600	3000	3280	3400	3500	3580	3640	3680	3730	3780	3860	4200	
3400	2800	3080	3200	3300	3380	3440	3480	3530	3580	3660	4000	
3200	2600	2880	3000	3100	3180	3240	3280	3330	3380	3460	3800	
3000	2400	2680	2800	2900	2980	3040	3080	3130	3180	3260	3600	
2800	2200	2480	2600	2700	2780	2840	2880	2930	2980	3060	3400	
2600	2000	2280	2400	2500	2580	2640	2680	2730	2780	2860	3200	
2400	1880	2080	2200	2300	2380	2440	2480	2530	2580	2660	3000	

Например, в конкретном районе средняя сумма активных температур 3600 °С изменяется в отдельные годы от 3000 до 4200 °С (первая строка в табл.), т.е. в этом районе не бывает лет с суммой температур менее 3000 °С и более 4200 °С. На 70 % обеспечена сумма более 3500 °С, следовательно, в семи годах из десяти в этом районе наблюдаются суммы не ниже этой величины.

Другой подход к оценке термических ресурсов предложил Д. И. Шашко (1967). Он детализировал понятие показателя сумм активных температур. При оценке теплообеспеченности и установлении климатических границ сельскохозяйственных культур автор различает суммы климатических, биологических и биоклиматических температур.

Суммы климатических температур выражают общие ресурсы тепла в конкретной местности. Они слагаются из средних суточных температур за период возможной вегетации культур, т.е. за период в пределах лимитных температур развития растений.

Суммы биологических температур выражают потребности растений в тепле и состояются из средних суточных температур непосредственно за период конкретного вида и сорта растения.

Суммы биоклиматических температур выражают количество тепла, обеспечивающее ежегодное (или достаточно частое) созревание растений или наступление хозяйственно-ценных фаз развития. Численно сумма биоклиматических температур равна сумме биологических температур, увеличенной на определённое число для гарантии наступления хозяйственно нужных фаз развития.

Суммы климатических температур, соответствующие по своим величинам биоклиматическим, указывают на климатические границы возможного возделывания культуры. Целесообразно суммы климатических и биоклиматических температур определять за период с температурой выше 10 °С. Определения суммы биоклиматических температур выше 10 °С выполняются по формуле:

$$\sum tbk_{>10^{\circ}\text{C}} = \sum tb + P_k + \Pi_{ш} + \Pi_{м} + \Pi_{к} + 200^{\circ} (250, 300^{\circ}\text{C}), \quad (3.5)$$

где $\sum tbk_{>10^{\circ}}$ – сумма биоклиматических температур выше 10 °С; $\sum tb$ – сумма биологических температур; P_k – разность сумм температур в пределах лимитных температур развития растений и за период с температурой выше 10 °С; $\Pi_{ш}$ – поправка на широту местности; $\Pi_{м}$ – поправка на микроклиматические особенности местоположения; $\Pi_{к}$ – поправка на континентальность; 200 °С (250, 300 °С) – отклонения сумм климатических температур, соответствующие обеспеченности 90 %.

Величины климатических разностей (P_k) для некоторых культур приведены в табл. 3.3.

Таблица 3.3

**Климатические разности между суммами температур выше 10 °С
и в пределах лимитных температур (Шашко Д.И., 1967)**

Культура	Лимитные температуры, °С		Средние климатические разности ($\sum pk$)
	всходов	созревания	
Пшеница, рожь, овёс, ячмень, горох, чечевица, лён	5	10	- 150
Кукуруза, просо	10	10	0
Подсолнечник, картофель	8	10	- 50
Капуста (высадка в грунт)	10	5	- 150
Томаты (высадка в грунт), огурцы	12	10	+ 100
Лук, морковь	5	8	- 200
Свёкла	8	8	- 150
Хлопчатник	13	15	+ 500

Поправки на широту местности ($\Pi_{ш}$) составляют примерно 10...15 °С на 1° широты. Величина поправки на микроклиматические особенности местности ($\Pi_{м}$) определяется преимущественно заморозкоопасностью местоположения посевов. Например, в Якутии заморозки в холодных местоположениях наступают на 18–20 суток раньше, чем в тёплых. Это соответствует увеличению суммы биоклиматических температур примерно на 200 °С. В тёплых местоположениях температурный эффект может быть выше на такое же количество градусов, что приводит к снижению суммы температур. Поправку на микроклиматические особенности местности можно в среднем принять для северных широт (55...65°) $\pm 100... 200$ °С, для средних (45...55°) $\pm 200...300$ °С и для горных районов

южных широт $\pm 300...400\text{ }^{\circ}\text{C}$ (знак плюс для относительно холодных и минус – для тёплых местоположений). Применяя описанную методику, Д.И. Шашко определил ареалы основных видов и сортов сельскохозяйственных культур на карте агроклиматического районирования территории России и сопредельных государств (1967).

Установлено, что при обеспеченности теплом возделываемых культур менее чем на 50 % размещение посевов на такой территории не целесообразно. При обеспеченности теплом на 50...70 % выращивание культур возможно, хотя неизбежно проведение дополнительных агротехнических мероприятий для создания лучших термических условий для растений. Обеспеченность посевов теплом на 80...90 % считается хорошей, поскольку экономический риск составляет всего 10...20 %.

Для характеристики обеспеченности культуры теплом, помимо показателя средних сумм температур выше 5 или 10 $^{\circ}\text{C}$ за вегетационный период в агроклиматической практике используют такие показатели за отдельные межфазные периоды развития растений или за декады, месяцы, сезоны. Информативной характеристикой термического режима исследуемой территории является средняя многолетняя температура самого тёплого месяца года (обычно это июль), часто используемая в качестве показателя сельскохозяйственных возможностей района.

Применение современных агротехнических мероприятий на полях, направленных на повышение теплообеспеченности посевов, способствует увеличению сумм температур на 200...400 $^{\circ}\text{C}$ по сравнению с полями, где такие мероприятия не проводятся. Это происходит благодаря изменению микроклимата приземного слоя воздуха и верхних горизонтов почвы. Вопросам мезоклимата, микроклимата и фитоклимата посвящена глава 6.

Суточный ход температуры воздуха является важным климатическим и агроклиматическим показателем. В качестве основных характеристик суточной динамики температуры используются: максимальная и минимальная температура воздуха (T_{\max} , T_{\min}), суточная амплитуда температуры воздуха (A_T), средняя дневная и средняя ночная температура воздуха ($T_{\text{д}}$, $T_{\text{н}}$). Наиболее детально характеристики суточного хода температуры воздуха были исследованы З.А. Мищенко (Суточный ход температуры воздуха и его агроклиматическое значение, 1962; Биоклимат дня и ночи, 1976, и др.) и дано агроклиматическое обоснование их использования при сельскохозяйственной оценке климата. Ею были построены агроклиматические карты распределения суточной амплитуды температуры воздуха на территории бывшего СССР для летних месяцев; количественно оценена микроклиматическая изменчивость амплитуды температуры; выполнена агроклиматическая оценка тепловых ресурсов дня и ночи.

З.А. Мищенко установила, что при одинаковых суммах средних суточных температур ($\sum T_C$) могут наблюдаться различные сочетания сумм дневных и ночных температур выше 10 °С ($\sum T_D$) и ($\sum T_H$). Эти изменения происходят под влиянием географических факторов – степени континентальности климата, высоты над уровнем моря, особенностей рельефа и т.п. В приведённом фрагменте таблицы, заимствованной из монографии З.А. Мищенко (1984), находим подтверждения этим зависимостям (табл. 3.4).

Таблица 3.4

Суммы средних суточных $\sum T_C$, дневных $\sum T_D$ и ночных $\sum T_H$ температур воздуха за период с соответствующими температурами выше 10 °С

Метеорологическая станция	Высота над уровнем моря, м	$\sum T_C$	$\sum T_D$	$\sum T_H$	$\sum T_D - \sum T_H$
Степень континентальности климата					
Чардара (Казахстан)	240	4300	5760	2620	3140
Ленкорань (Азербайджан)	37	4310	4980	3740	1240
Влияние форм рельефа					
Пятигорск (РФ)	498	3092	3522	2555	967
Красная Поляна (РФ)	564	3158	3812	2003	1809

В более континентальных районах $\sum T_D$ на 300...700 °С больше, а $\sum T_H$ на 400...1000 °С меньше, чем в западных и особенно приморских районах СНГ. Для выявления географических закономерностей распределения тепловых ресурсов дня и ночи З.А. Мищенко построила ряд агроклиматических карт. Наибольшие значения сумм дневных температур воздуха выше 10 °С, естественно, наблюдаются в южных районах России и особенно в регионе Средней Азии, где они достигают 4000 и 6400 °С соответственно. Значения $\sum T_H$ возрастают в направлении с севера, северо-востока на юг территории СНГ от 400 до 4400 °С.

На обширной территории стран СНГ изменчивость сумм дневных и ночных температур велика, достигает десятикратной величины. В северных районах прибавка тепла за счёт дневного нагрева на уровне метеорологической будки составляет не более 100...200 °С, а ночью уменьшение сумм тепла достигает 300...500 °С (рис. 3.4 и 3.5).

В средней полосе России дополнительное тепло, которое растения могут использовать в дневные часы, возрастает до 300...700 °С, при соответствующем снижении тепла в ночные часы до 600...900 °С. В южных районах Средней (Центральной) Азии прибавка тепла днём достигает 900...1100 °С при снижении тепловых ресурсов ночью на 1100...1500 °С. Поскольку показатели тепловых ресурсов дня и ночи чувствительны к микроклиматическим условиям конкретных территорий, их использование

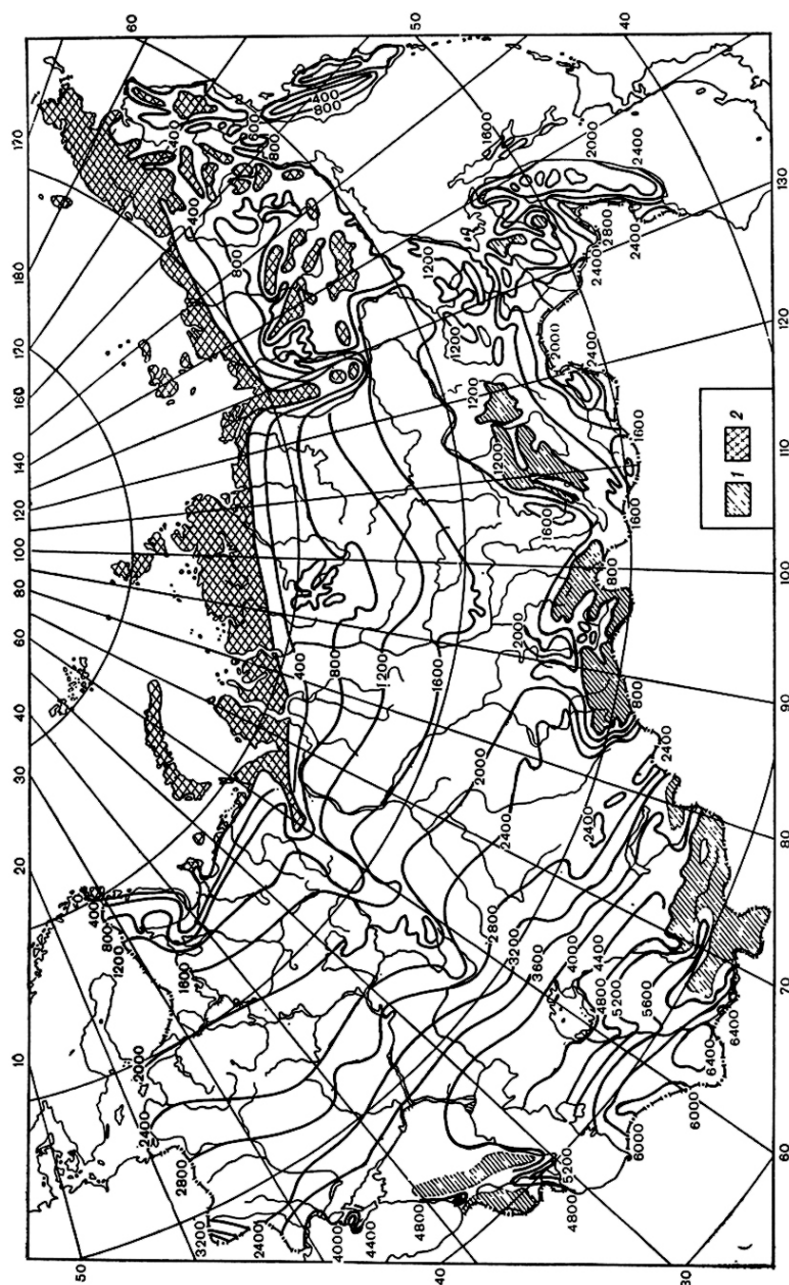


Рис. 3.4. Суммы дневных температур воздуха за период с температурой выше 10 °С на территории России, сопредельных государств СНГ и стран Балтии: 1 – горы выше 1500 м; 2 – районы, где отсутствуют $\Sigma T > 10^\circ\text{C}$

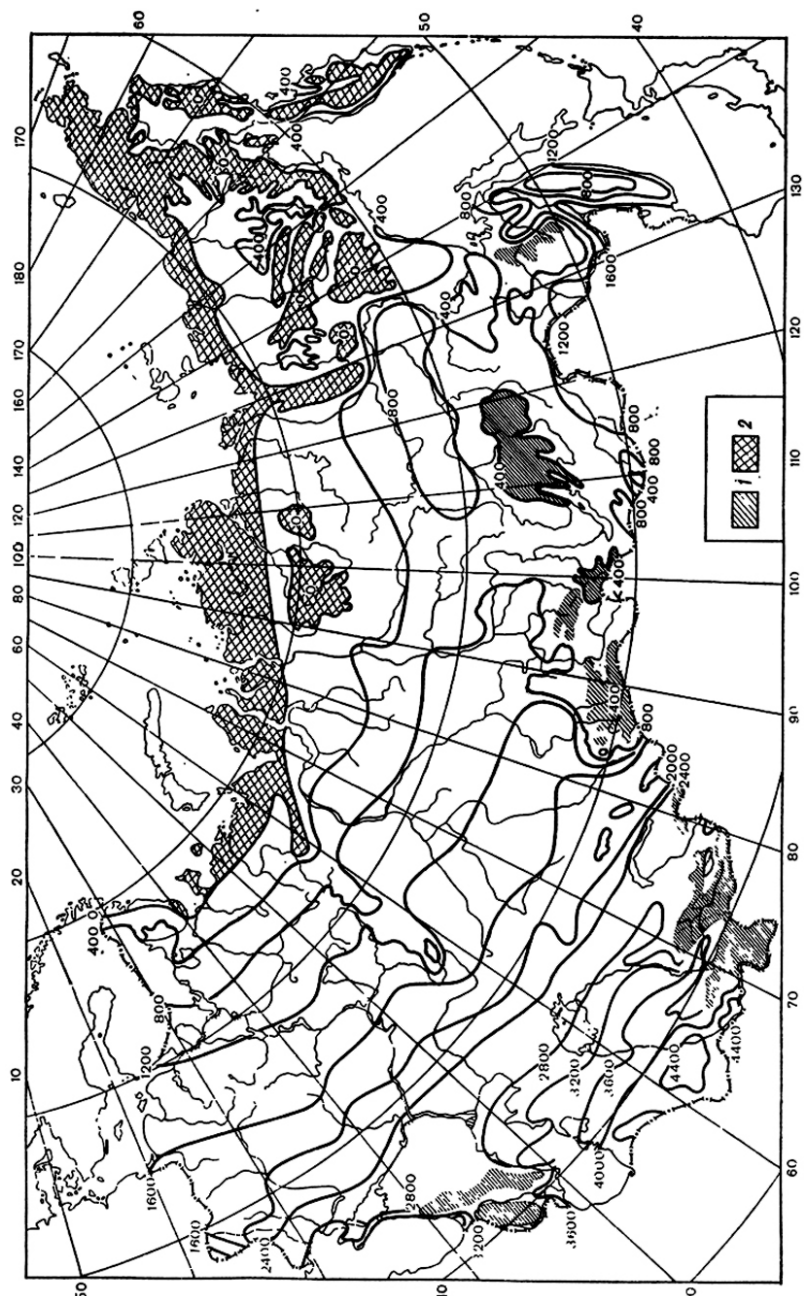


Рис. 3.5. Суммы ночных температур за период с температурой выше 10°C на территории России, сопредельных стран СНГ и стран Балтии: 1 и 2 — см. рис. 3.4

перспективно для региональной оценки агроклиматических ресурсов на ограниченных территориях административных районов и отдельных хозяйств (Мищенко З.А. Агроклиматология, 2009).

Таким образом, агроклиматическая оценка термических ресурсов той или иной территории производится на основе многих климатических и агроклиматических характеристик, в частности: средние многолетние суммы температур выше 0, 5, 10, 15 °С, обеспеченность этих сумм и динамика их накопления, уровень средних температур воздуха, продолжительность безморозного и беззаморозкового периодов с внесением микроклиматических поправок.

3.3. Методы оценки ресурсов увлажнения территории

Эффективное использование земельных ресурсов территории возможно лишь при условии учёта ресурсов её естественного увлажнения. Известно несколько источников увлажнения почвы, как элементов приходной части водного баланса: основной – атмосферные осадки, а также внутripочвенная конденсация атмосферной влаги и процесс внутripочвенной сорбции атмосферной влаги (Колосков П.И., 1971). Значение влаги в жизнедеятельности растений достаточно подробно изложено в работе «Основы сельскохозяйственной метеорологии», 2011, том I, главы 9 и 15. Отметим лишь одну особенность почвенных процессов – антагонизм между воздухом и влагой, находящихся в почвенных горизонтах. В условиях избыточного и длительного переувлажнения почвы происходит вытеснение почвенного воздуха водой, следствием которого становится нарушение процессов газообмена в корневой системе сельскохозяйственных культур. Такие условия затрудняют (и даже исключают) возможность их возделывания, поскольку исключается естественное регулирование самим растением потребления воды.

Атмосферные осадки. Простейшим показателем ресурсов естественного увлажнения являются данные многолетних наблюдений за осадками, осуществляемые на всех метеорологических станциях. Для оценки условий увлажнения территории осадками используют их средние суммы за год (рис. 3.6), за холодный или тёплый его периоды, за вегетационный период или отдельные его временные подпериоды, за месяц и декаду по конкретной территории.

Внутripочвенная конденсация атмосферной влаги, т.е. переход водяных паров в жидкое состояние сопровождается образованием водяного налёта, если почва достаточно пориста. Это явление отмечено в дневное время под пологом растительного покрова при температурной инверсии в припочвенном слое воздуха и при его высокой влажности. Однако количество влаги в таких случаях незначительно и не имеет существенного значения для растений.

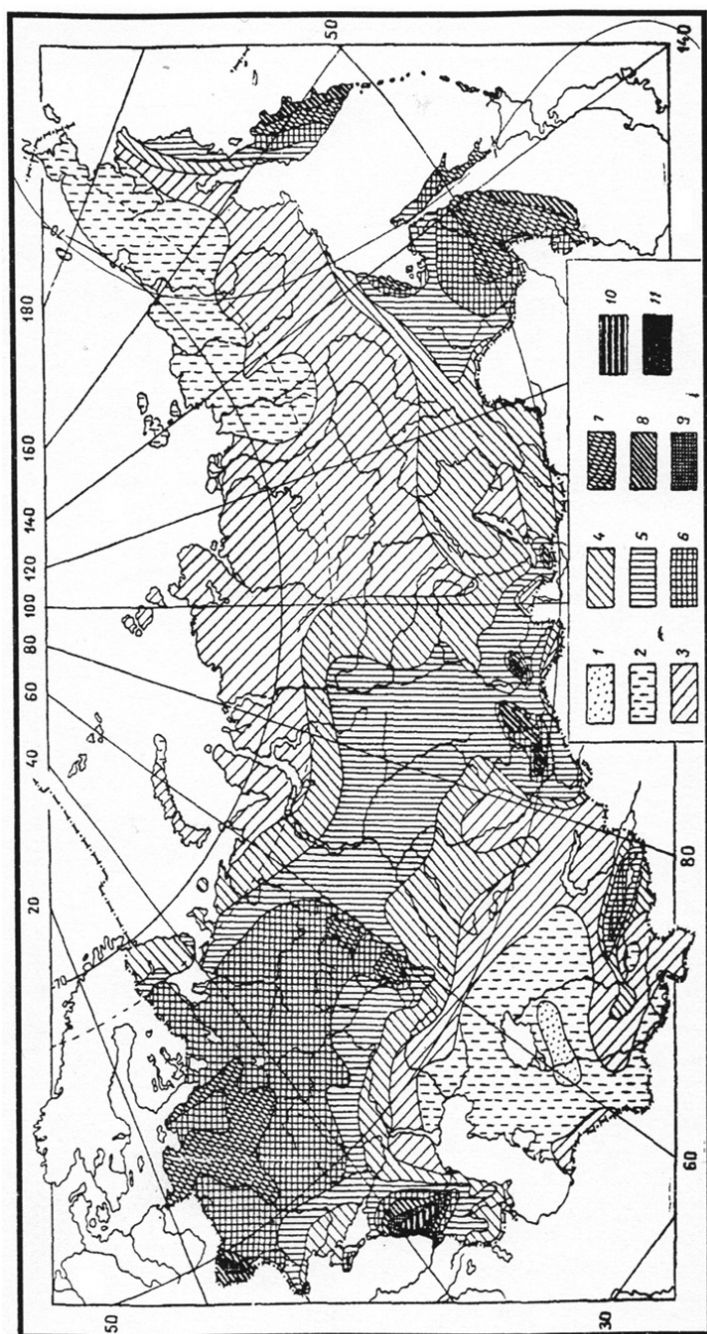


Рис. 3.6. Среднее многолетнее количество осадков (мм) на территории России, сопредельных государств СНГ и стран Балтии: 1 – менее 100; 2 – 100...200; 3 – 200...300; 4 – 300...400; 5 – 400...500; 6 – 500...600; 7 – 600...700; 8 – 700...800; 9 – 1000...1500; 10 – 1500...2000; 11 – более 2000 (Дроздов О.А., 1980)

Внутрипочвенная сорбция атмосферной влаги (поглощение водяного пара почвой, как твёрдым пористым телом) происходит в случаях, когда припочвенный слой воздуха насыщен парами воды, т.е. с относительной влажностью не менее 98...100 %. Это отмечается в условиях приземного тумана большой длительности, выпадения росы или образования водяного налёта на подстилающей поверхности под пологом травяного или древесно-кустарникового полога и заболоченной почвы, но не открытыми болотами.

Таким образом, важнейшей приходной частью водного баланса являются атмосферные осадки. Для формирования благоприятных условий *вагообеспеченности растений*, т.е. степени обеспеченности их потребности во влаге, большое значение имеет характер выпадения осадков. Хорошо известно, что определённое количество воды, выпавшее в течение длительного времени в виде дождя слабой интенсивности, увлажняет почву сильнее, чем то же самое количество воды, выпавшее в течение короткого дождя высокой интенсивности. Основная причина различий заключается не только в поверхностном стоке при ливнях, но и в том, что при моросящих, не интенсивных дождях почва благодаря сорбционным процессам получает воды значительно больше, чем попадает в дождемеры.

Обеспеченность сельскохозяйственных культур влагой обычно оценивают средними многолетними значениями атмосферных осадков. В связи с изменчивостью количества осадков от года к году, от сезона к сезону на конкретных территориях среднее многолетнее их количество даёт лишь представление о 50 %-ной обеспеченности посевов. Для оценки обеспеченности сельскохозяйственных культур необходимо рассчитать количество осадков различной обеспеченности по номограмме, предложенной А. Н. Лебедевым. На графике (рис. 3.7) по оси ординат отложены значения средних многолетних сумм осадков за год, по оси абсцисс – возможные суммы осадков в отдельные годы, в поле графика – линии, отражающие различную обеспеченность (%). Зная среднюю многолетнюю сумму осадков по климатическим (агроклиматическим) справочникам, по номограмме несложно определить обеспеченность выпадения различного количества осадков. Например, чтобы определить сколько осадков в год выпадает с 80 %-ной обеспеченностью при средней многолетней норме 560 мм, нужно опустить перпендикуляр параллельно оси абсцисс до пересечения в поле графика с прямой 80 %. Получаем 430 мм.

Подобные графики полезно построить и для оценки вегетационного периода, месячных, декадных периодов применительно к конкретным культурам, возделываемым в различных почвенно-климатических зонах.

Располагая знаниями о потребности возделываемых культур в осадках за определённый период вегетации и обеспеченности такого

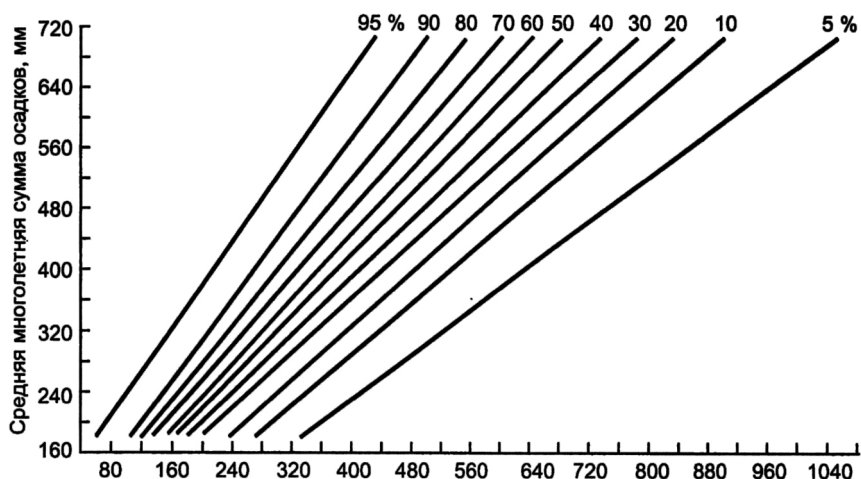


Рис. 3.7. Номограмма для расчёта годовых сумм осадков, мм

количества осадков за этот же период, оценивают влагообеспеченность посевов. Однако для оценки условий увлажнения вегетационного периода по вероятностным характеристикам увлажнения посевов только осадками недостаточно.

В различных регионах России и сопредельных стран СНГ суммы осадков могут быть одинаковыми, например, в Узбекистане и на Кольском полуострове выпадают близкие суммы годовых осадков 300...350 мм. Но испаряемость, зависящая от прихода солнечной радиации и обусловленная этим температурным режимом в этих территориях, различается почти в 4 раза: в Узбекистане – 1200 мм/год, на Кольском полуострове – 300 мм/год.

В агроклиматических исследованиях для оценки условий увлажнения сельскохозяйственных территорий используются различные показатели, представляющие собой отношение количества влаги, поступающей с осадками, или сформировавшиеся запасы продуктивной влаги в корнеобитаемых горизонтах почвы (приход), к её расходу (испаряемости) за конкретный период времени. Перечислим некоторые из показателей, наиболее часто используемые для этих целей.

Гидротермический коэффициент Г.Т. Селянинова представляет собой относительный показатель увлажнённости территории – отношение суммы осадков (R) в мм со средней температурой выше 10°C к сумме средних суточных температур, уменьшенных в 10 раз, за этот же период, что весьма близко характеризует испаряемость:

$$ГТК = \sum R / 0,1 \sum T_{>10^{\circ}\text{C}} \quad (3.6)$$

Согласно Г.Т. Селянинову, суммарное значение ГТК за период июнь–август больше 1,6 соответствует избыточно влажной зоне; 1,6...1,3 – лесной влажной зоне; 1,3...1,0 – зоне недостаточного увлажнения (лесостепь); 1,0...0,7 – засушливой зоне (степи); 0,7...0,4 – очень засушливой зоне (сухой степи); коэффициент 0,4...0,3 характеризует полупустыню, менее 0,2 – пустыню. Для упрощённой оценки режима увлажнения «внутри» вегетационного периода автор предложил рассчитывать начало и конец засушливых и сухих периодов и их продолжительность. За засушливый период автор принял ГТК, равный менее 1,0, а за сухой – менее 0,5. Начало и конец этих периодов рассчитывают по интерполяционной формуле:

$$P = \left[(K - b) / (a - b) \right] \cdot d + 15, \quad (3.7)$$

где K – пороговое значение ГТК (1,0 или 0,5); b – среднее месячное значение ГТК ниже порогового; a – соответствующее значение ГТК выше порогового; d – число суток в месяце с ГТК = b .

Однако ГТК Селянинова не применяют для оценки условий увлажнения весной и осенью, когда средняя суточная температура воздуха ниже 10 °С. Поскольку условия увлажнения в отдельные годы могут существенно отличаться от средних многолетних величин, автор определил их вероятность различно увлажнённых лет (табл. 3.5).

Таблица 3.5

Вероятность различно увлажнённых лет по природным зонам

Природная зона	ГТК с $T > 10^{\circ}\text{C}$	Вероятность различно увлажнённых лет, %					
		сухих	очень засушливых	засушливых	слабо засушливых	влажных	избыточно влажных
Тайга	> 1,6	0	0	5	10	25	60
Тайга и лиственные леса	1,6...1,3	0	5	10	25	30	30
Лесостепь	1,3...1,0	0	15	25	30	20	10
Типичная степь	1,0...0,7	10	25	35	20	5	5
Степь на южных чернозёмных и каштановых почвах	0,7...0,4	35	45	15	5	0	0
Полупустыня	0,4...0,2	75	20	5	0	0	0
Пустыня	< 0,2	98	2	0	0	0	0

При оценке условий увлажнения вегетационного периода необходимо учитывать также повторяемость засух и засухе в зонах, где эти явления природы встречаются. Г.Т. Селянинов отмечал высокую устойчивость значений ГТК на границах основных почвенно-климатических (природных) зон. Например, граница леса и степи совпадает с изолинией ГТК за июнь–август, равной 1,0; северная граница пустыни – с изолинией 0,2 и т. п.

Показатель увлажнения (k), предложенный Н. Н. Ивановым:

$$k = R/E, \quad (3.8)$$

где R – годовая сумма осадков (мм); E – испаряемость за год (мм), определяемая по испарению с поверхности испарителей на метеорологических площадках или с поверхности водоёмов.

Согласно Д.И. Шашко (1967), показатель увлажнения Md представляет собой отношение суммы осадков (мм) за год (ΣP) к годовой сумме средних суточных значений дефицитов насыщения воздуха водяным паром $\Sigma(E-e)$ в гПа за тот же период:

$$Md = \Sigma P / \Sigma (E - e). \quad (3.9)$$

Согласно автору, на территории бывшего СССР избыточно влажная зона характеризуется величиной $Md > 0,60$, влажная зона – $0,45 < Md < 0,60$, умеренно-влажная – $0,25 < Md < 0,45$, засушливая – $0,15 < Md < 0,45$ и сухая – $Md < 0,15$. Эти зоны автором разбиты на более мелкие таксономические категории – подзоны по уровню атмосферного увлажнения.

М.И. Будыко предложил оценивать условия увлажнения территории с помощью радиационного индекса сухости (I), представляющего собой отношение радиационного баланса (R) к скрытой теплоте испарения (L) и годовой сумме осадков (r):

$$I = R/L_r. \quad (3.10)$$

Он также показал, что испаряемость (E_0) за год можно приближённо оценивать по формуле:

$$E_0 = 0,18 \Sigma T, \quad (3.11)$$

где ΣT – сумма температур за период со средними суточными температурами выше 10°C .

Испарение – одно из основных звеньев в круговороте воды на земном шаре, важнейший фактор тепло- и влагообмена растительных и животных организмов. Количественно испарение характеризуется *скоростью испарения* (V) – массой воды, испарившейся с единицы поверхности в единицу времени. Испарение выражается высотой слоя воды (мм), испарившейся за определённый промежуток времени: сутки, декада, месяц, год. Согласно закону Дальтона, скорость испарения прямо пропорциональна разности между давлением насыщенного водяного пара, вычисленного по температуре испаряющей поверхности, и фактическим давлением водяного пара в воздухе ($E_s - e$) и, согласно формуле Августа, обратно пропорциональна атмосферному давлению (p):

$$V = k(E_s - e)f(v)/p, \quad (3.12)$$

где k – коэффициент пропорциональности, зависящий от скорости ветра; $f(v)$ – функция ветра.

Следовательно, скорость испарения будет возрастать по мере увеличения дефицита влажности воздуха ($E_s - e$), вычисленного по температуре

испаряющей поверхности. Чем меньше эта разность, тем медленнее идёт испарение – меньшее количество водяного пара переходит в воздух в единицу времени. Масса испарившейся влаги слоем 1 мм с площади 1 м² равна 1 кг. На рис. 3.8 приведена карта среднего годового испарения (см) на территории бывшего СССР.

Наиболее простым способом расчёта суммарного испарения (испаряемости) E_S в мм с поверхности сельскохозяйственного поля является использование данных о количестве выпавших осадков R (мм) за выбранный период времени и разности начальных W_H и конечных W_K запасов влаги (мм):

$$E_S = R + (W_H - W_K). \quad (3.13)$$

При оптимальном увлажнении почвы удобно определять по графику (рис. 3.9) связи величины E_S с температурой воздуха и парциальным давлением (упругостью) водяного пара, предложенному А.Р. Константиновым (1968).

Большое практическое значение имеют методы оценки влагообеспеченности посевов различных сельскохозяйственных культур. Назовём некоторые из них.

Для оценки влагообеспеченности посевов сельскохозяйственных культур А.М. Алпатьев разработал *коэффициент влагообеспеченности (KB)*, получивший широкое применение в практической работе агроклиматологов:

$$KB = (W_1 - W_2) + P / 0,65 \sum d, \quad (3.14)$$

где W_1 и W_2 – запасы продуктивной влаги в метровом слое почвы в начале и конце вегетации (мм); P – количество осадков за период вегетации, мм; $\sum d$ – сумма средних суточных дефицитов насыщения за этот же период, мм.

Кроме этого показателя, А.М. Алпатьев разработал биофизический метод оценки величины оптимального водопотребления растений (или оптимального суммарного испарения). В качестве основного элемента этого показателя он выбрал дефицит влажности воздуха, являющегося функцией температуры и влажности воздуха, т.е., по существу, показателем условий суммарного испарения. Вторым компонентом в расчётное уравнение введён так называемый биологический коэффициент испарения. В физической основе этого коэффициента, по словам автора, *«лежит сложившийся в филогенезе наследственный ритм развития растений, связанный с сезонным ритмом климата, ход накопления растительной массы одновременно с качественным изменением самого растения, степень затенения почвы и устойчивость фитолимата»*.

$$E = K \sum d, \quad (3.15)$$

где E – оптимальная величина водопотребления фитоценоза (мм); K – биологический коэффициент конкретной культуры (безразмерная величина); $\sum d$ – сумма дефицитов влажности воздуха.

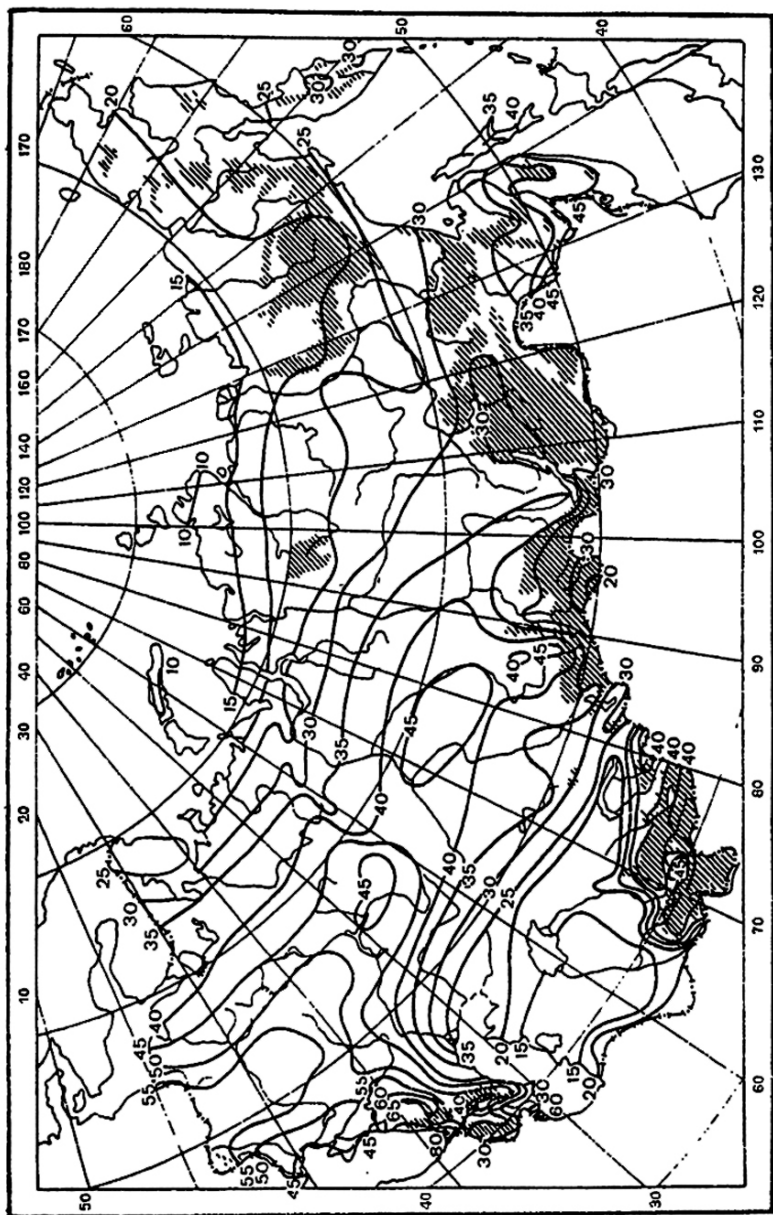


Рис. 3.8. Среднее годовое испарение (см) на территории Российской Федерации и сопредельных государств СНГ (Зубенок Л. И., 1976). Штриховкой отмечены горные районы

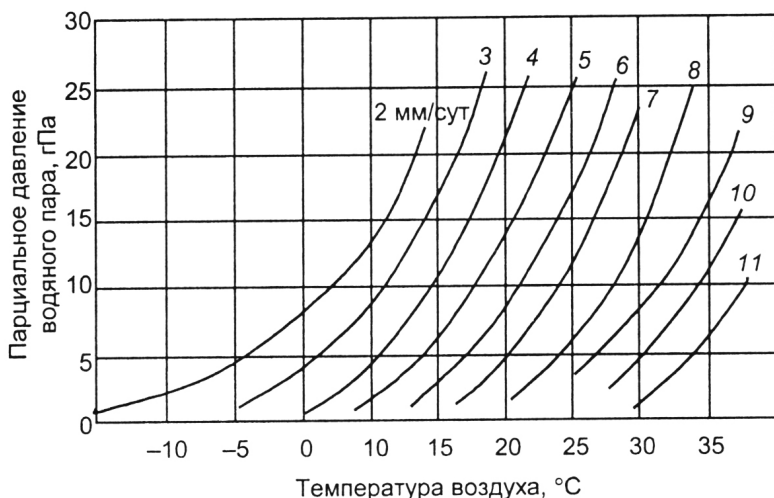


Рис. 3.9. Зависимость максимально возможного испарения с сельскохозяйственного поля при оптимальном увлажнении почвы от температуры воздуха и парциального давления водяного пара (в поле графика значения возможного испарения (испаряемости) в мм/сут)

Численные значения величины K устанавливают путём осреднения данных за 4–5 лет частных от деления фактических расходов влаги данной культурой на Σd за тот же период (при оптимальном увлажнении почвы). Поэтому оптимальное водопотребление, близко совпадающее с испаряемостью (3.11), может быть представлено в виде

$$E = 0,65 \Sigma d, \quad (3.16)$$

где 0,65 – биологический коэффициент испарения, принятый автором постоянной величиной. Остальные обозначения, как в формуле (3.15).

Ю.И. Чирков (1969) для оценки степени влагообеспеченности (K) посевов кукурузы в степной зоне предложил показатель ГТК Селянинова в уточнённом виде, включив в неё учёт осадков, выпавших во вневегетационный период:

$$K = 0,5P_{X-III} + P_{IV-VIII} / 0,18 \Sigma T_{IV-VIII}, \quad (3.17)$$

где P_{X-III} – сумма осадков (мм) за октябрь–март; $P_{IV-VIII}$ – то же за апрель–август; $\Sigma T_{IV-VIII}$ – сумма средних суточных температур воздуха за период апрель–август (°C).

Для оценки влагообеспеченности посевов сахарной свёклы Л.С. Кельчевской предложена следующая формула:

$$K = 0,63 \Sigma P_1 + \Sigma P_2 / \Sigma T_{>10^\circ C}, \quad (3.18)$$

где ΣP_1 – сумма осадков (мм) вневегетационного периода; ΣP_2 – то же за период вегетации этой культуры; $\Sigma T_{>10^\circ\text{C}}$ – сумма положительных температур воздуха ($^\circ\text{C}$) за период активной вегетации.

Для культуры подсолнечника аналогичная формула была предложена Ю. С. Мельником (1972).

Различные подходы к расчёту потребности растений (или фитоценозов) во влаге предложены многими исследователями. Например, Х. Л. Пенман (1948) рекомендует рассчитывать суммарную потребность в воде фитоценоза по формуле

$$E_\phi = f E_0, \quad (3.19)$$

где E_0 – испарение с водной поверхности, мм; f – коэффициент, равный в среднем за год 0,7. Значение E_0 автор вычисляет из установленной им зависимости испарения от радиационного баланса, скорости ветра, температуры и влажности воздуха.

Несмотря на то, что показатели увлажнения, предложенные разными авторами, использовавшими различные метеорологические величины, их изменения при переходе от одной природной зоны к другой почти пропорциональные (Чирков Ю. И., 1986).

3.3.1. Методы оценки условий влагообеспеченности посевов по влагозапасам в корнеобитаемом слое почвы

Запасы продуктивной влаги в почве являются важнейшим комплексным агроклиматическим показателем увлажнения сельскохозяйственных посевов, поскольку представляют собой результат взаимодействия погодных, почвенных условий, особенностей естественного растительного покрова и проводимых агротехнических мероприятий на полях. Этот интегральный показатель включает атмосферные осадки, их количество и режим выпадения, различные виды стока, испарение и влагообмен в почве по вертикали характеризует реальные ресурсы влаги, доступные для растений. Напомним, что *влага продуктивная* – это часть почвенной влаги, используемой растением в процессе жизнедеятельности, синтеза органического вещества и формирования урожая. Нижним пределом продуктивной влаги является величина влажности устойчивого завядания. Количество продуктивной влаги или её запасы принято выражать в мм толщины водного слоя. В таком виде они сопоставимы с данными по осадкам и испарению (Толковый словарь по сельскохозяйственной метеорологии, 2002).

Запасы продуктивной влаги ($W_{\text{прод}}$) вычисляют по формуле, предложенной С. А. Вериги и Л. А. Разумовой (1973):

$$W_{\text{прод}} = 0,1 dh (W - k), \quad (3.20)$$

где d – плотность почвы, г/см³; h – мощность (толщина) слоя почвы, см; W – влажность почвы (процент массы абсолютно сухой навески почвы); k – влажность устойчивого завядания (%) абсолютно сухой почвы; 0,1 – коэффициент для перевода запасов влаги в мм водного слоя).

Количественные значения продуктивной влаги (обычно в слоях почвы 0...10, 0...20, 0...50, 0...100 и 0...150 см), как комплексный агроклиматический показатель увлажнения, используют при характеристиках:

- условий обеспеченности возделываемых культур;
- исходных запасов влаги весной;
- исходных запасов влаги осенью;
- критических периодов растений по отношению к влаге в онтогенезе.

Сев яровых зерновых культур производится весной после устойчивого перехода средних суточных температур воздуха через 5 °С в сторону повышения. Более того, для начала сева необходима так называемая спелость почвы, т.е. когда пахотный горизонт полностью оттаёт и освободится от талых вод, без этих условий нормальная заделка семян невозможна.

На территории России время массового сева озимых культур обычно определяется сроками устойчивого перехода средних суточных температур воздуха через 15 °С осенью, т.е. в сторону понижения. В условиях достаточных запасов влаги в пахотном горизонте осенний рост и развитие озимых продолжается до времени устойчивого перехода средней суточной температуры воздуха через 5 °С. Поздняя вегетация озимых зерновых носит прерывистый характер за счёт дневного прогрева воздуха выше 5 °С или в условиях кратковременного возврата волн тепла. Однако воздействие такого тепла, как правило, не вносит существенных изменений в состояние посевов.

В критический период яровых зерновых культур, наблюдаемый в период фаз развития злаков (выход в трубку – цветение), условия увлажнения в виде запасов продуктивной влаги в метровом слое почвы определяют озёрность колоса, а, следовательно, и урожай. Для оценки условий обеспеченности влагой яровых посевов в этот критический период их жизни целесообразно проводить сравнение фактических запасов продуктивной влаги в конкретном году со средними многолетними их значениями (рис. 3.10).

Влагообеспеченность посевов обычно характеризуется влажностью почвы, выраженной в процентах полевой влагоёмкости, или запасами продуктивной влаги в корнеобитаемых слоях почвы. Другим способом определения влагообеспеченности являются расчёты процентного отношения фактического суммарного испарения за период вегетации сельскохозяйственных культур к оптимальному суммарному испарению. Количественные значения влагообеспеченности растений используют при оценке

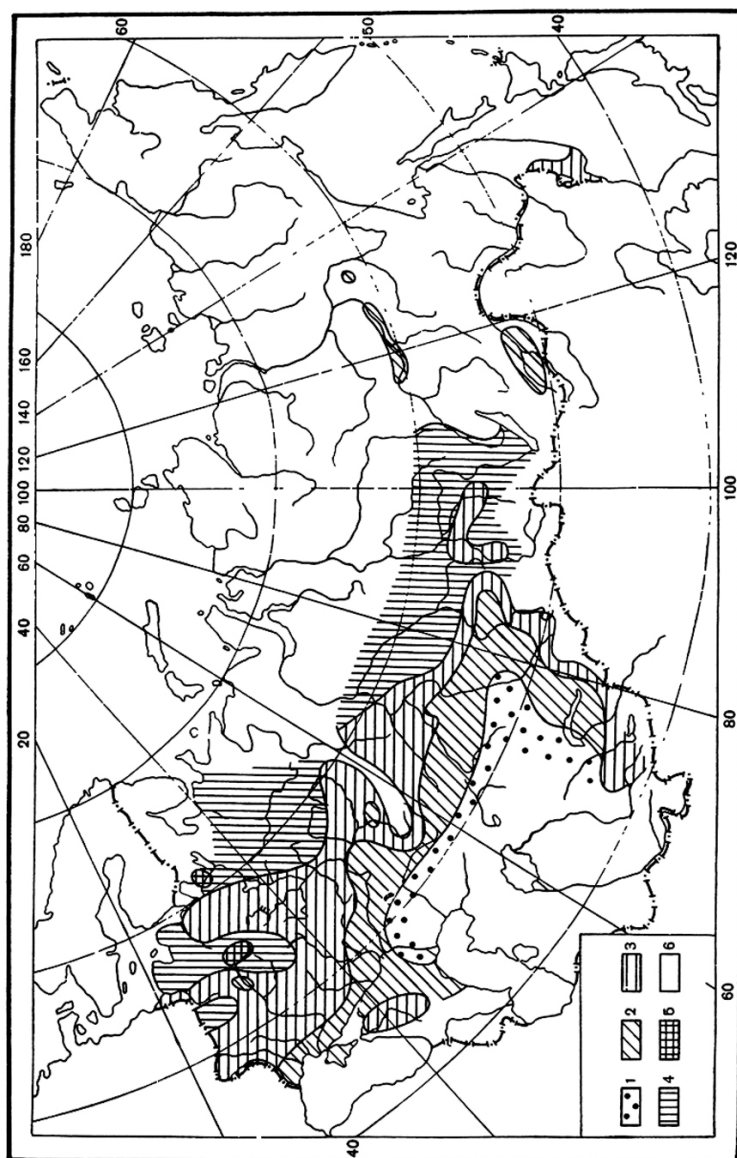


Рис. 3.10. Средние многолетние запасы продуктивной влаги (мм) в метровом слое почвы в период формирования колоса (выход в трубку) и фазы цветения яровой пшеницы: 1 – менее 0...50; 2 – 50...100; 3 – 100...150; 4 – 150...200; 5 – более 200; 6 – районы горные, поливные и слабо изученные в отношении влажности почвы
(Вериго С.А. и Разумова Л.А., 1973)

условий развития возделываемых культур за вегетационный период, отдельные межфазные периоды или календарные промежутки времени.

В многочисленных работах агрометеорологов и агроклиматологов отражены количественные зависимости между величинами запасов почвенной влаги, состоянием растений и уровнем их продуктивности. Например, установлено, что при средних запасах продуктивной влаги в слое почвы 0...20 см менее 5 мм всходы зерновых культур, как правило, не появляются. На оподзоленных супесчаных почвах всходы появляются при запасах влаги 12 мм, на чернозёмных почвах – около 15 мм. В период от кущения до выхода в трубку злаков запасы влаги в почве меньше 10 мм в слое 0...20 см вызывают резкое ухудшение состояния посевов за счёт слабого развития корневой системы. Это приводит к уменьшению числа колосоносных стеблей и числа колосков в колосе. Частичное ухудшение состояния посевов наблюдается при средних за декаду запасах продуктивной влаги меньше 20 мм. При запасах 30...40 мм отмечается хорошее состояние растений. В фазу выход в трубку–цветение ухудшение состояния посевов отмечается при запасах продуктивной влаги 80 мм в метровом слое почвы. Хорошее состояние посевов озимых зерновых культур и высокие урожаи формируются в условиях, когда запасы продуктивной влаги весной в чернозёмной зоне России составляют 140...180 мм (табл. 3.6).

Таблица 3.6

Запасы продуктивной влаги (мм) в слое почвы 0...100 см в основные периоды весенне-летней вегетации озимой пшеницы (Уланова Е. С., 1975)

Фаза развития растений	Градации оценки запасов влаги, мм			
	хорошие	удовлетворительные	недостаточные	плохие
Возобновление вегетации	150...200	120...150	100...120	< 100
Выход в трубку	140...180	100...140	80...100	< 80
Колошение	80...140	60...80	40...60	< 40
Налив зерна	80...100	40...80	30...40	< 25

Наиболее тесная связь урожаев зерновых культур с запасами влаги в метровом слое почвы наблюдается в период формирования элементов продуктивности колоса (выход в трубку–цветение). Максимальные урожаи отмечаются в годы при запасах продуктивной влаги 100...125 мм (табл. 3.7).

Как видно из этих данных, при очень высоких запасах влаги создаются условия переувлажнения почвы, затрудняющие дыхание корневой системы растений, ослабление удержания колосоносных стеблей, что приводит к полеганию посевов и поражению растений грибковыми заболеваниями, а, в конечном итоге – к значительному снижению урожая.

В ареале возделывания яровой пшеницы в России урожайность яровой пшеницы находится в прямой зависимости от условий увлажнения

(запасов продуктивной влаги) вегетационного периода этой культуры. В условиях недостаточного увлажнения состояние растений ухудшается, что приводит к снижению озернённости. Повторяемость таких неблагоприятных лет с запасами влаги менее 50 мм составляет на этой территории 30 %, а благоприятных лет с запасами больше 100 мм – всего 10 % (табл. 3.8).

Таблица 3.7

Зависимость урожая зерновых культур от условий влагообеспеченности посевов за период колошение–цветение (Чирков Ю. И., 1986)

Средние запасы влаги (мм) в слое 0...100 см	Урожай (% от оптимального)
1...25	18
26...50	46
51...75	70
76...100	86
101...125	100
126...150	74
> 150	68

Таблица 3.8

Повторяемость лет (%) с различными запасами продуктивной влаги в метровом слое почвы в период выход в трубку–цветение яровой пшеницы

Средние многолетние запасы продуктивной влаги (мм)	Запасы влаги (мм) в отдельные годы			
	0...50	50...100	100...150	150...200
0...50	90	10	< 5	
50...100	30	60	10	< 5
100...150		30	50	20
150...200		< 5	30	40

Л.А. Разумова и С.А. Вериго установили основные закономерности формирования влажности почвы и годовой динамики запасов продуктивной влаги в различных почвенно-климатических зонах бывшего СССР. Они выделили четыре основные агрогидрологические зоны.

Схематическая карта основных агрогидрологических зон представлена на рис. 3.11.

- **Зона обводнения** охватывает северные районы европейской части России и таежные районы Западной Сибири. Зона характеризуется большим количеством легкодоступной для растений влаги в корнеобитаемых горизонтах почвы в течение вегетационного периода. В зимний период в промерзающем слое происходит накопление влаги за счёт её подтягивания из неглубоко лежащих грунтовых вод. Максимум запасов влаги отмечается в конце зимы – 300 мм в метровом слое. Весной избыток влаги регулируется поверхностным стоком. Наименьшие запасы наблюдаются

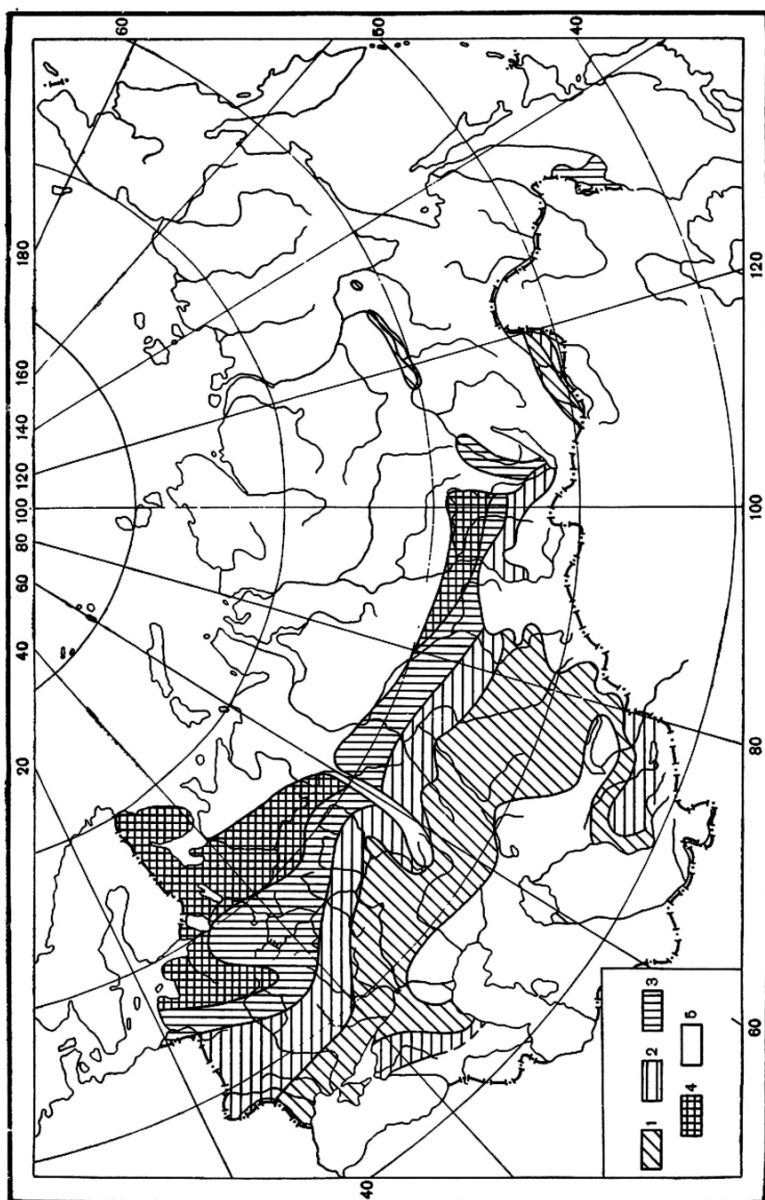


Рис. 3.11. Агрогидрологические зоны Российской Федерации и сопредельных стран СНГ:

1 – зона слабого весеннего промачивания; 2 – зона полного весеннего промачивания; 3 – зона капиллярного увлажнения; 4 – зоны горные, поливные и слабо изученные в отношении влажности почвы

в середине лета (около 150 мм), но уже к периоду уборки зерновых колосовых культур почвы нередко переувлажнены.

- **Зона капиллярного увлажнения** расположена к югу от зоны обводнения и проходит по линии Калининград–Ливны–Тобольск–Кемерово. Зона характеризуется тем, что грунтовые воды достигают корнеобитаемого горизонта почвы лишь в периоды наивысшего стояния. В течение большей части года наблюдается капиллярный подток воды снизу. Максимальные запасы влаги формируются в конце зимы – начале весны и достигают в среднем на суглинистых почвах 200 мм и более, на супесчаных – 150 мм. Самые низкие запасы влаги в метровом слое отмечаются летом – около 100 мм. В засушливые годы урожайность сельскохозяйственных культур обычно значительно снижается из-за недостаточной влагообеспеченности.

- **Зона полного весеннего промачивания** располагается южнее предыдущей зоны; с юга её граница проходит по линии Оренбург–Ишим–Мариинск. Эта зона отличается от двух предыдущих, расположенных севернее, глубоким залеганием грунтовых вод. Легкоподвижная почвенная влага наблюдается только в весенний период, когда вследствие снеготаяния отмечаются её максимальные запасы. Весной почва промокает до глубины 100 см и несколько более; запасы влаги составляют 170...200 мм. Минимальные запасы влаги отмечаются в конце вегетационного периода – 50...100 мм; в засушливые годы они могут быть израсходованы полностью.

- **Зона слабого весеннего промачивания** охватывает степную часть Северного Кавказа, юг Среднего и Нижнего Поволжья и юг Западной Сибири. Эта зона характеризуется глубоким залеганием грунтовых вод в течение всего года. Только в ранневесенний период снеготаяния в верхних горизонтах почвы наблюдается легкоподвижная влага. Глубина промачивания почвы весной, как правило, около 50 см и лишь во влажные годы несколько больше. Весна – период максимальных запасов продуктивной влаги, составляющих 50...70 мм. Даже в периоды выпадения летних и ранних осенних осадков отмечается минимум запасов почвенной влаги за счёт высоких дневных температур воздуха и высокого испарения.

Среднее многолетнее содержание продуктивной влаги в природных условиях России существенно изменяется в географическом разрезе, определяемое комплексом факторов: климатических, почвенных, применяемой агротехники на полях и особенностей естественного растительного покрова.

В табл. 3.9 приведены зоны и подзоны увлажнения с краткой их характеристикой и вероятностью лет с различным увлажнением. Под сухим понимается год, в котором осадки не обеспечивают формирования минимально приемлемого урожая в производственных условиях (в среднем

Таблица 3.9

Зоны и подзоны увлажнения на территории России и сопредельных государств СНГ

Зона увлажнения	Подзона увлажнения	Широтная зона с хорошо выраженной зональностью	ГТК _{VI–VIII}	Вероятность различно увлажнённых лет, %					
				сухих	очень засушливых	засушливых	слабо засушливых	избыточно влажных	
Влажная	Избыточно влажная	Тайга, преимущественно на глеево-подзолистых и подзолистых почвах	> 1,6	0	0	5	10	25	60
	Влажная	Тайга и лиственные леса на подзолистых почвах	1,6–1,3	0	5	10	25	30	30
	Слабо засушливая	Лесостепь	1,3 (1,6)–1,0 (1,3)	0	15	25	30	20	10
Засушливая	Засушливая	Типичная степь на обыкновенных чернозёмах	1,0 (1,3)–0,7 (1,0)	10	25	35	20	5	< 5
	Очень засушливая	Степь на южных чернозёмах и тёмно-каштановых почвах	0,7–(0,4)	35	45	15	5	< 5	0
	Сухая	Полупустыня на светло-каштановых почвах	0,4–0,2	75	20	< 5	0	0	0
Сухая	Очень сухая	Пустыня на серо-бурых почвах	< 0,2	100	< 5	0	0	0	0

Примечание. Цифры в скобках соответствуют территории Забайкалья и Дальнего Востока.

менее 10...15 % от урожая, выросшего в условиях оптимального увлажнения).

В очень засушливые и засушливые годы недостаток влаги приводит к снижению урожая на 50 и 30 % соответственно. Наибольший урожай соответствует влажным, а для некоторых культур (например подсолнечник) – слабо засушливым годам. При избыточном увлажнении урожай может снижаться из-за развития грибковых заболеваний, полегания и других причин.

Для земледелия большое значение имеет динамика увлажнения в течение года. Показателем динамики годового хода осадков служит отношение осадков тёплого полугодия (апрель–сентябрь) к осадкам холодного полугодия (октябрь–март).

На европейской части России и сопредельных стран СНГ количество осадков тёплого полугодия превышает осадки холодных месяцев, но не более чем в два раза. В Сибири в тёплое полугодие выпадает в 2–3 раза больше осадков, чем в холодное, а в Забайкалье и на юге Дальнего Востока – в 4 раза. Из-за небольшого количества зимних осадков высота снежного покрова обычно незначительна, благодаря чему к началу весны запасы влаги в почве невелики. В результате при одинаковом соотношении количества осадков и испаряемости в летние месяцы в Забайкалье влагообеспеченность вегетационного периода в целом оказывается значительно ниже, чем в соответствующих регионах Европейской территории бывшего СССР. Это отражается в изменении величин $ГТК_{VI-VIII}$ на границах засушливой зоны и её подзон. Подобный же ход осадков характерен и для муссонного типа климата, чётко представленного в южных районах Дальнего Востока, где значительные летние осадки в сочетании с преобладанием облачности и высокой влажностью воздуха создают особые условия для земледелия, отличающиеся от европейской части страны (Сапожникова С.А., 1966).

В Среднеазиатском регионе, в отдельных районах Закавказья и на Южном берегу Крыма осадки холодного полугодия превышают осадки тёплого. В тёплый период преобладает солнечная сухая погода, благоприятная для возделывания теплолюбивых культур и формирования высококачественных плодов и винограда.

3.3.2. Водный баланс сельскохозяйственного поля

Согласно «Толковому словарю ...» (2002), *водным балансом почвы* называется алгебраическая сумма прихода и расхода воды (влаги) за выбранный промежуток времени для определённого слоя почвы (обычно 0...50 или 0...100 см) и выражается уравнением водного баланса (в мм водного слоя или в м³). Приходную часть водного баланса составляют атмосферные осадки в виде дождя в тёплое полугодие и накопления снега в холодное полугодие с последующим снеготаянием, поверхностный

приток (сток), конденсация влаги в почве, приток влаги при орошении или за счет неглубокого залегания зеркала грунтовых вод. Расходная часть складывается потерями воды при испарении с поверхности почвы (или снежного покрова), при транспирации влаги растениями, за счёт поверхностного стока, оттока подземных вод за пределы изучаемой территории поля или участка.

Количество осадков, попадающих на поверхность почвы, не всегда соответствует их количеству, зафиксированному осадкомерами или плювиографами. Это количество зависит от рельефа и микрорельефа местности, состояния поверхности поля, глубины и характера промерзания почвы. Заметное влияние на этот показатель оказывает растительный покров: его структура, степень сомкнутости (плотности), размеры листьев и смачиваемость листовых пластинок, их распределение по площади и по высоте. По экспериментальным данным А.А. Скворцова, при хорошо развитом стеблестое зерновых культур (пшеницы) при каждом дожде на смачивание стеблей расходуется 2–3 мм. По некоторым исследованиям, выполненным в Великобритании, в зависимости от степени развития и типа растительности на её поверхности при каждом дожде может задержаться от 10 до 55 % осадков. По наблюдениям на сельскохозяйственных полях с посевами кукурузы и озимой пшеницы (Северный Кавказ), при незначительном ветре и осадках, не превышающих 20 мм, задерживается 3–4 % осадков. При сильном ветре это количество снижается вдвое.

Осадки, достигшие поверхности почвы, впитываются ею и под влиянием микрорельефа перераспределяются по её поверхности. Влияние рельефа и микрорельефа на перераспределение выпавших осадков зависит от водопроницаемости почвы и интенсивности осадков. По данным Валдайской научно-исследовательской гидрологической лаборатории максимальный слой воды, аккумулированной в микропонижениях, в различные годы составлял на зяби 10...12 мм, на стерне – 5...8 мм, на лугу – 2...4 мм. В среднем аккумуляцию в понижениях можно принять равной 4...6 мм.

Скорость впитывания атмосферной влаги определяется характером проницаемости (порозностью) всех почвенных горизонтов и интенсивностью дождя. При длительном дожде и незначительном растительном покрове минимальная скорость инфильтрации составляет: на глубоких песках и хорошо агрегированных почвах – 8...11 мм/ч, на лёгких суглинках – 4...8 мм/ч, на тяжёлых суглинках и почвах, бедных органическими веществами, – 1...4 мм/ч, на солонцеватых, сильно набухающих почвах – менее 1 мм/ч. В большинстве случаев скорость инфильтрации не превышает 15 мм/ч, а при дождях низкой интенсивности практически вся вода впитывается в почву.

В районах с высоким залеганием почвенно-грунтовых вод, где капиллярная кайма достигает почвенной толщи, существенным источником

пополнения запасов корнеобитаемого слоя является капиллярная подача влаги из грунтовых вод. Этот процесс осуществляется при наличии разницы капиллярного натяжения верхних и нижних слоёв почвы. Разница потенциалов¹ возникает в тех случаях, когда из верхних слоёв влага расходуется либо путём транспирации растений, либо путём перехода воды в кристаллы льда при замерзании. Причём вертикальное передвижение воды вверх будет осуществляться до тех пор, пока градиент сосущей силы превышает градиент гравитационного потенциала по величине, и когда он противоположен по знаку, т. е. когда сосущая сила у поверхности почвы, выраженная в сантиметрах водного столба, больше, чем глубина залегания зеркала грунтовых вод. Когда эти градиенты уравновешены, вода в почве будет неподвижной (Вериго С. А. и Разумова Л. А., 1973).

Водный баланс может быть составлен за любой интересующий отрезок времени: календарный год, отдельные сезоны, за вегетационный период или тот или иной его подпериод. В агрометеорологической практике обычно пользуются упрощённым уравнением водного баланса:

$$W_K - W_H = R - E_{\Pi} - E_T, \quad (3.21)$$

где W_K – конечный запас влаги, мм; W_H – начальный запас влаги, мм; R – сумма осадков, достигших поверхности почвы за исследуемый период, мм; E_{Π} – испарение влаги с поверхности почвы, мм; E_T – транспирация растений, мм.

Например, начальные запасы влаги составили 108 мм в слое почвы 0...50 см, конечные запасы влаги оказались равными 74 мм; за исследуемый период выпало 36 мм осадков. Подставляя эти данные в формулу (3.21), получим значение суммарного испарения на данном поле за исследуемый период: $E = 70$ мм. При делении этой величины на число дней периода (например две декады) получим, что суммарное испарение за сутки равно 3,5 мм.

Смена холодного и тёплого сезонов года является одним из основных факторов, определяющих динамику водного режима и условия формирования запасов влаги в почве. В холодный период влага не расходуется на транспирацию; при наличии снежного покрова основные изменения запасов влаги происходят за счёт испарения с поверхности снега и внутрипочвенного перемещения под влиянием кристаллизации в процессе промерзания почвы, а также путём пополнения запасов влаги талой водой в периоды оттепелей. С наступлением весны процессы перемещения

¹ Водный потенциал почвы – это алгебраическая сумма сил, которыми почвенная влага удерживается и перемещается на поверхности частиц почвы (грунта). Это силы адсорбционные, осмотические, капиллярные и гравитационные. Численно водный потенциал равен работе, которую нужно совершить, чтобы перевести единицу объёма связанной влаги в свободное состояние. Это количество работы на единицу массы чистой воды (Дж/кг).

воды по поверхности почвы (снега) и в почвенных горизонтах активизируются, особенно за счёт талых вод. Степень этой активизации зависит от уровня насыщения почвы влагой, глубины её зимнего промерзания, наличия ледяных корок и прослоек в почвенных горизонтах и интенсивности процессов таяния.

Потери талых вод за счёт стока в свою очередь зависят от рельефа местности и состояния поверхности почвы. Сильно и умеренно промерзшая почва мало проницаема для воды, а по поверхности ледяной корки вода стекает, не проникая в почву. При слабом промерзании почвы и большом дефиците влаги в ней большая часть талой воды просачивается в почву, создавая весенний запас влаги. Верхний слой почвы (до глубины мёрзлого слоя) насыщается талой водой до капиллярно-подпёртого состояния. В таких условиях испарение определяется разностью парциальных давлений водяного пара в прилегающем слое воздуха и у поверхности почвы. Испарение с тёмной и шероховатой поверхности почвы значительно превышает испарение с водной поверхности. Потери на испарение с поверхности почвы компенсируются капиллярным поднятием влаги. При полном оттаивании почвы избыточная влага может просачиваться (в зависимости от влагоёмкости почвы) до грунтовых вод. Одновременно с повышением температуры воздуха и пополнением запасов почвенной влаги увеличивается испарение с прогреваемых солнечными лучами поверхностей.

В районах с ненасыщенной влагой почвами по мере их оттаивания избыток влаги расходуется на насыщение нижележащих слабо увлажнённых слоёв, при слабом капиллярном поднятии верхние слои почвы начинают подсыхать. С началом вегетации растений запасы влаги в корнеобитаемых горизонтах почвы изменяются в результате совокупного влияния комплекса погодных условий, жизнедеятельности растений и уровня грунтовых вод. С повышением температуры воздуха и почвы усиливаются процессы суммарного испарения – физического испарения с поверхности почвы и транспирации растений, называемого в зарубежной научной литературе *эвапотранспирацией*.

В насыщенных влагой почвах испаряющаяся влага пополняется влагой, поступающей по капиллярам; количество поступающей влаги может достигать 10...15 мм в сутки. При снижении запасов влаги капиллярный подток воды замедляется; в таких условиях испарение воды с поверхности почвы определяется не только погодными условиями, но и скоростью поднятия влаги к испаряющей поверхности.

В ненасыщенных почвах легкоподвижная влага практически отсутствует, поэтому скорость испарения зависит от скорости диффузии пара через сухие слои, лежащие сверху. Расходы влаги на испарение с поверхности почвы в летний период на полях, занятых посевами, после

смыкания растений заметно снижаются. Например, под зерновыми культурами в зависимости от складывающихся погодных условий и состояния растений они составляют 40...70 % суммарного испарения, под пропашными культурами – 70...80 %, а под хорошо развитыми сеянными травами – 10...25 %. В районах с глубоким залеганием уровня грунтовых вод наибольшее количество влаги расходуется на транспирацию (рис. 3.12).

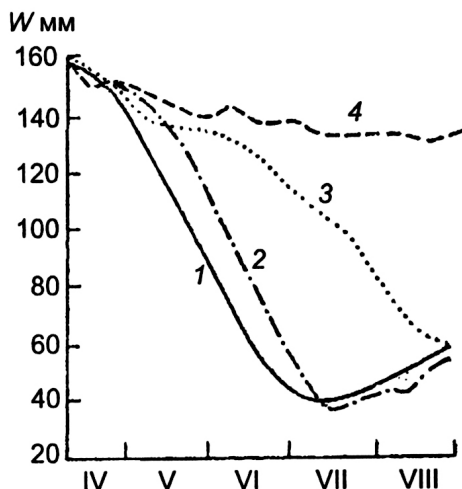


Рис. 3.12. Средние многолетние запасы продуктивной влаги в слое 0...100 см под различными культурами в зоне полного весеннего промачивания и глубокого залегания грунтовых вод: 1 – озимая пшеница; 2 – яровая пшеница; 3 – кукуруза; 4 – чёрный пар (Вериго С. А., Разумова Л. А., 1973)

Как видно на этом рисунке, в начале вегетационного периода, до начала транспирации, запасы влаги под всеми культурами и на чёрном пару одинаковы и составляют 160...165 мм. С началом роста и развития растений, с повышением интенсивности транспирации и испарения с поверхности почвы, влагозапасы под этими культурами заметно различаются. В начале июля, в период созревания озимой пшеницы, расходы на транспирацию резко уменьшаются и запасы продуктивной влаги на озимом поле начинают медленно увеличиваться. То же происходит и на полях с другими культурами. При отсутствии атмосферных осадков (на полях без орошения) происходит иссушение пахотных и нижележащих почвенных горизонтов, которое в экстремальных случаях жарких и засушливых месяцев приводит к почвенной засухе.

Таким образом, влияние погодных условий на изменение запасов продуктивной влаги различно в течение года и в значительной степени

определяется особенностями почвенно-климатических зон, наличием, состоянием возделываемых культур и применяемых на полях агротехнических приёмов.

3.4. Методы оценки условий перезимовки сельскохозяйственных культур

В холодный период года зимующие сельскохозяйственные, в том числе плодовые культуры и виноград подвергаются воздействию неблагоприятных и опасных гидрометеорологических явлений, которые могут вызвать частичную или полную гибель посевов, садов и виноградников. Степень повреждения зимующих культур зависит от интенсивности и продолжительности неблагоприятных условий, особенностей периода закаливания растений перед уходом в зиму, от биологических свойств самих культур: их зимостойкости и морозостойкости. Для территории Российской Федерации и сопредельных стран СНГ и Балтии в зимний период характерны не только различные виды неблагоприятных условий, имеющих различную повторяемость, но и большие контрасты их интенсивности и пространственной изменчивости.

В учебном пособии «Основы сельскохозяйственной метеорологии», 2011, том I, глава 19 дана подробная характеристика неблагоприятных и опасных гидрометеорологических условий холодного периода года и их влияние на зимующие культуры и описаны хозяйственные меры борьбы с такими явлениями. В той главе приведены основные понятия, используемые при агрометеорологической оценке условий перезимовки культур в конкретные годы, объяснены главные причины гибели посевов, плодовых культур, винограда и сеяных трав. Поэтому в настоящем разделе рассмотрены только агроклиматические аспекты перезимовки возделываемых культур и сеяных трав.

Агроклиматические условия перезимовки озимых культур обычно характеризуются следующими показателями: *средней температурой воздуха самого холодного месяца (январь), суммой отрицательных температур воздуха за холодный период, средним из абсолютных годовых минимумов температуры воздуха и почвы на глубине залегания узла кущения, продолжительностью зимнего периода (сезона), высотой и числом суток с устойчивым снежным покровом.*

Разница в сроках начала и окончания периода зимовки и в продолжительности его на севере и юге страны значительна. На севере европейской части страны этот период начинается на полтора-два месяца раньше, а заканчивается на столько же времени позже, чем в южных регионах. Продолжительность периода зимовки в северных областях (180 суток) в два с лишним раза больше, чем в южных (80 суток). Средняя многолетняя продолжительность периода с отрицательной температурой

воздуха на азиатской территории страны увеличивается в направлении с юго-запада на северо-восток (рис. 3.13).

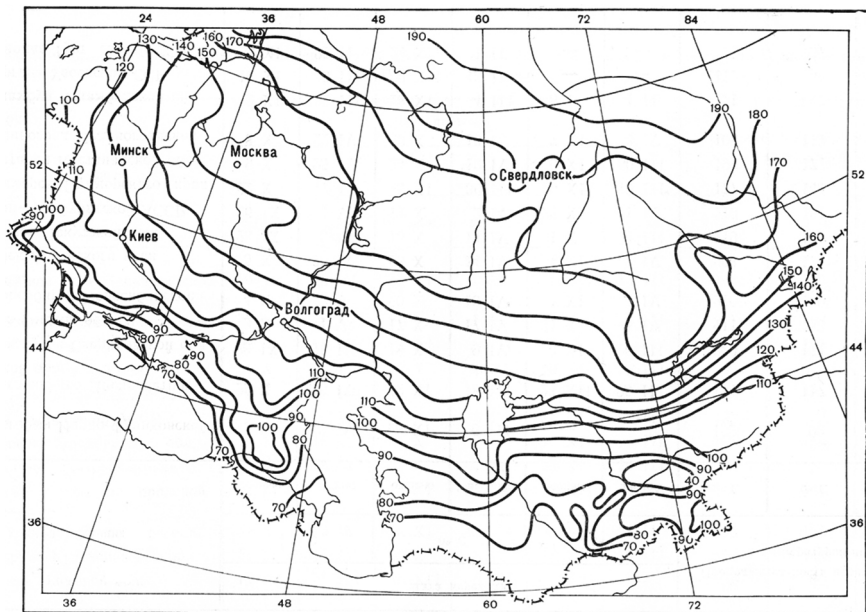


Рис. 3.13. Средняя многолетняя продолжительность периода (сутки) с отрицательной температурой воздуха (Моисейчик В. А., 1975)

Суровость зимы принято характеризовать *средней многолетней суммой отрицательных температур воздуха*; этот показатель также увеличивается с юго-запада на северо-восток страны (рис. 3.14). Например, в Пермской и Свердловской областях сумма отрицательных температур в 20 раз больше, чем на юге Краснодарского края. В северных областях Казахстана и в Западной Сибири она достигает $-2000 \dots -2300^\circ\text{C}$, тогда как в Республиках Средней Азии – $-100 \dots -300^\circ\text{C}$.

В качестве показателя морозоопасности холодного периода года для зимующих культур многие исследователи используют показатель – *средний из абсолютных минимумов температуры воздуха* (Г.Т. Селянинов, С.А. Сапожникова, Ф.Ф. Давитая, Д.И. Шашко и др.) (рис. 3.15).

Устойчивый снежный покров – естественная защита озимых посевов от вымерзания – устанавливается на европейской части России и сопредельных стран СНГ с конца октября на севере территории и до середины конца декабря – на юге. В южных районах Украины, Краснодарского края, в равнинных частях Закавказья и Средней Азии устойчивый снежный покров отмечается на полях менее чем в 50 % зим.

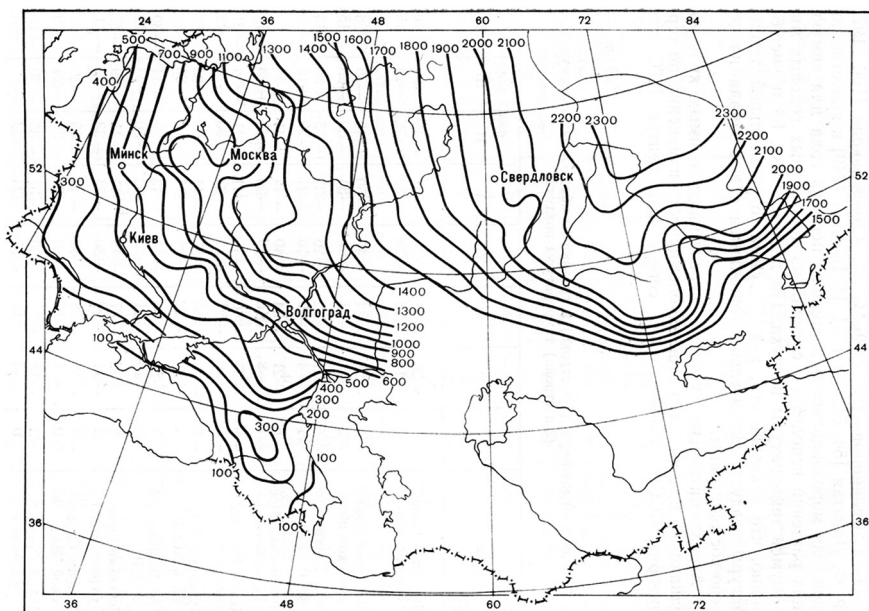


Рис. 3.14. Суровость зимы: средняя многолетняя сумма отрицательных температур воздуха, °С

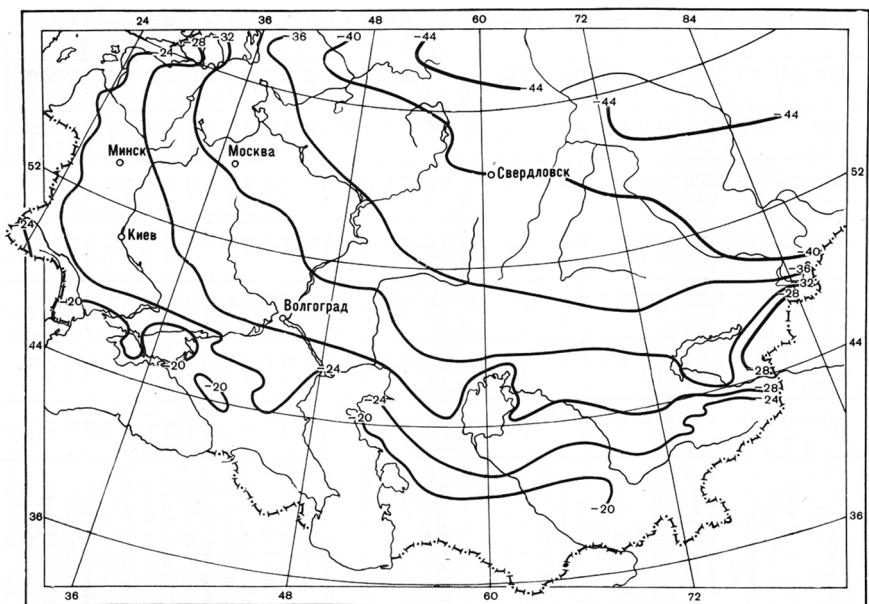


Рис. 3.15. Средняя многолетняя величина из абсолютных минимумов температуры воздуха, °С (Моисейчик В. А., 1975)

В степной и лесостепной зонах при позднем установлении устойчивого снежного покрова увеличивается вероятность повреждения озимых культур морозами. В лесной зоне опасно раннее образование мощного снежного покрова и длительное его залегание на полях, благодаря чему увеличивается повреждение посевов выпреванием.

Наибольшая продолжительность периода со снежным покровом высотой более 30 см, равная 80...120 суткам, наблюдается северо-восточнее условной линии Петрозаводск–Вологда–Уфа. В центральных областях Нечернозёмной зоны она составляет 60...80 суток (рис. 3.16).

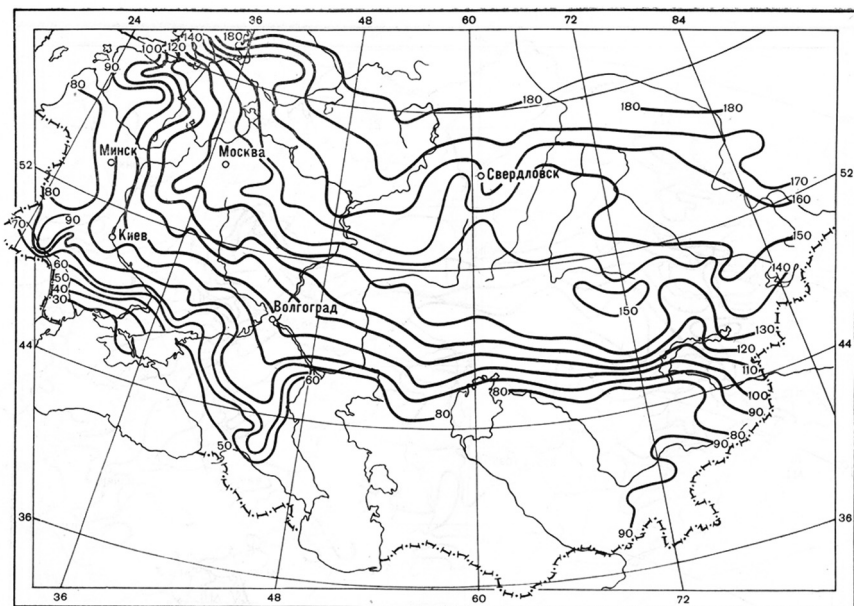


Рис. 3.16. Средняя многолетняя продолжительность залегания устойчивого снежного покрова, сутки (Моисейчик В.А., 1975)

Повторяемость максимальной высоты снежного покрова в Нечернозёмной зоне европейской части страны определяют с помощью графика, рассчитанного автором по многолетним материалам наблюдений более двух десятков станций (рис. 3.17).

На европейской части России значительные морозы (до -25°C и ниже) при полном отсутствии снежного покрова отмечаются в 10...20 % лет, а в Центральной чернозёмной зоне, в Среднем и Нижнем Поволжье (при снеге высотой 1...5 см) – в 15...25 % лет. Средняя многолетняя высота снежного покрова за зиму варьирует от 10 см на юго-западе Украины до 50 см в Пермской области (рис. 3.18).

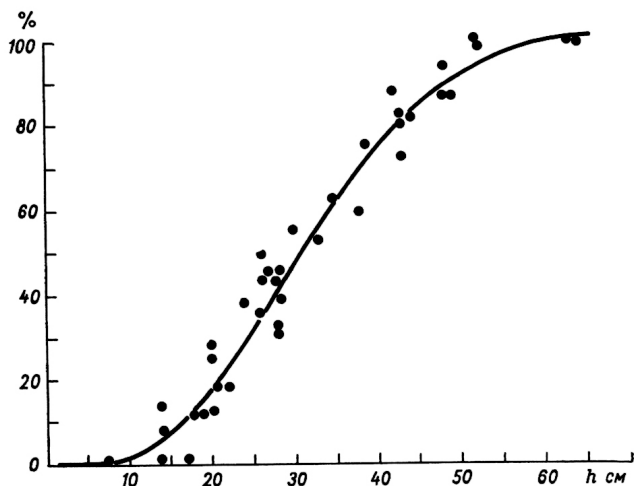


Рис. 3.17. Повторяемость лет (%) с максимальной за зиму высотой снежного покрова, равной 30 см и более, на полях с озимыми культурами (Моисейчик В.А., 1975)

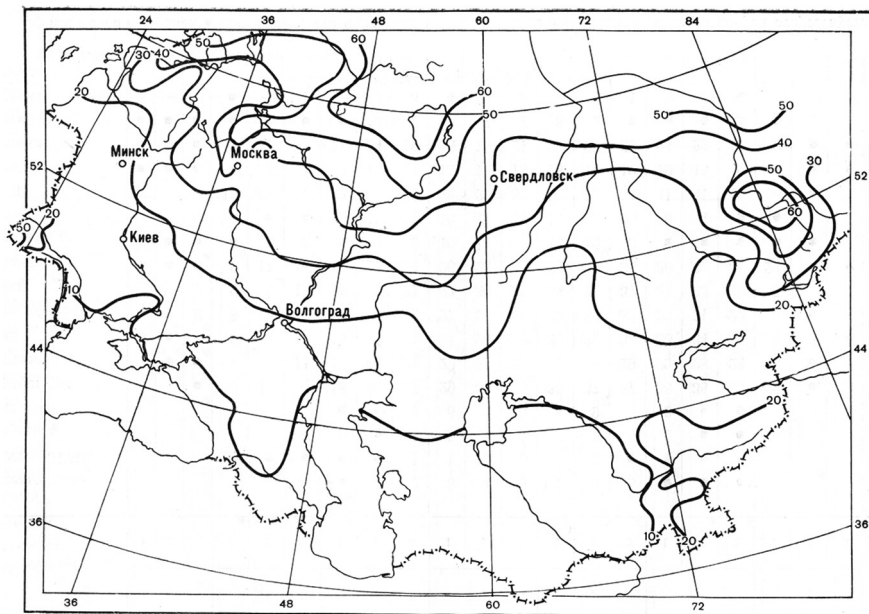


Рис. 3.18. Средняя из максимальных за зиму высот снежного покрова (см) на полях с озимой культурой (Моисейчик В. А., 1975)

Следующим важным показателем перезимовки озимых культур является *глубина промерзания почвы*. Величина его прежде всего зависит от высоты и продолжительности залегания снежного покрова. В северо-западных и центральных районах европейской части страны (ЕЧС), где преобладают годы с высоким снежным покровом, почва промерзает на меньшую глубину, чем в Чернозёмной зоне, в Среднем и Нижнем Поволжье и на юге Урала. В Нечернозёмной зоне в отдельные годы промерзание достигает 150 см и более. На севере Западной Сибири её глубина составляет 90...100 см, на юге Западной Сибири – 140...180 (200) см. В Нечернозёмной зоне ЕЧС повторяемость зим с максимальной глубиной промерзания почвы, равной и менее 50 см (1) и 80 см (2), рассчитывают по среднему многолетнему значению максимальной глубины промерзания (рис. 3.19).

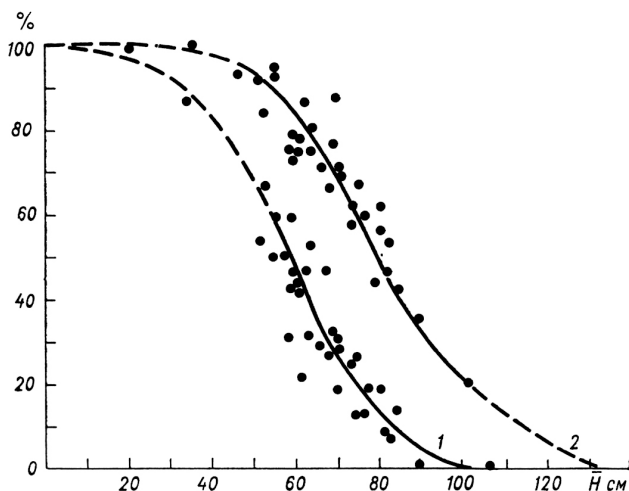


Рис. 3.19. Повторяемость лет (%) с максимальной глубиной промерзания почвы, равной 50 см и менее (1) и 80 см (2), при различном значении средней из максимальных глубин промерзания почвы за зиму H (см) (В. А. Моисейчик, 1975)

Минимальная температура почвы на глубине залегания узла кущения злаков и корневой шейки зимующих многолетних бобовых культур (3 см) была принята в качестве комплексного агроклиматического показателя условий перезимовки озимых культур. Наиболее благоприятными условиями для растений в период зимнего покоя является температура почвы на глубине залегания узла кущения $-7, -8^{\circ}\text{C}$. При более высоком её значении в течение длительного периода (более 60...80 суток) растения подвергаются выпреванию, а при более низкой температуре, особенно близкой к критической, — вымерзанию.

На материалах многолетних наблюдений в условиях Алтайского края А. М. Шульгин предложил эмпирический график (рис. 3.20), позволяющий определять минимальную температуру почвы на глубине залегания узла кущения (3 см) по минимальной температуре воздуха, измеренной в метеорологической будке.

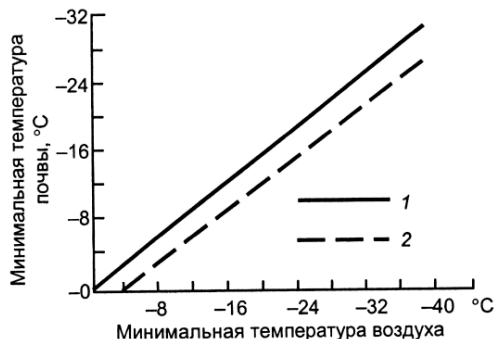


Рис. 3.20. Зависимость минимальной температуры почвы на глубине 3 см от минимальной температуры воздуха при отсутствии снежного покрова: 1 — при промерзании почвы более 30 см; 2 — при промерзании почвы менее 30 см

Защитная роль снежного покрова в перезимовке озимых культур находится в тесной зависимости от уровня минимальных температур воздуха и высоты снежного покрова. Для условий Западной Сибири А. М. Шульгин разработал номограмму (рис. 3.21).

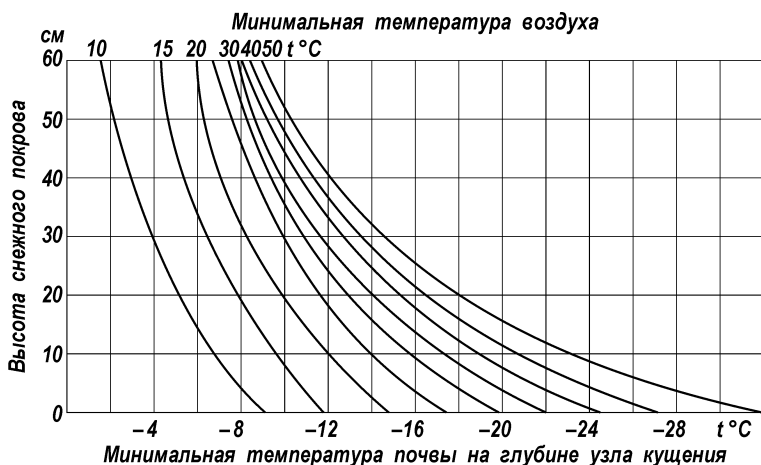


Рис. 3.21. График для расчёта минимальной температуры воздуха на глубине залегания узла кущения злаков (3 см) по минимальной температуре воздуха и различной высоте снежного покрова

На территории европейской части России и сопредельных государств СНГ *ледяная корка* зачастую является причиной значительного повреждения и даже гибели озимых посевов. Максимальная продолжительность залегания притёртой ледяной корки достигала 18 декад. При длительном залегании (4 декады и более) и её толщине 1...5 см и более происходит массовая гибель посевов. Чаще всего она образуется в годы с неустойчивым зимним режимом в феврале и марте и очень редко в ноябре и апреле. Повторяемость притёртой ледяной корки в различных районах этой территории различна.

Эффективными мерами защиты от ледяной корки являются снегозадержание, осушение полей и отвод талых вод. Для ускорения таяния ледяной корки проводят зачернение её поверхности торфом, перегноем или минеральными удобрениями, выполняющими одновременно функции подкормки посевов.

3.4.1. Комплексная оценка агроклиматических условий перезимовки озимых культур

Перезимовка озимых культур оценивается несколькими показателями: минимальной температурой воздуха, высотой и продолжительностью залегания на полях снежного покрова, глубиной промерзания почвы и минимальной температурой почвы на глубине залегания узла кущения растений, наличием и толщиной ледяной корки и т.п. Между ними имеется определённая связь. Например, между глубиной промерзания почвы и минимальной температурой на уровне залегания узла кущения злаков установлена прямолинейная зависимость – коэффициент корреляции ($r = 0,88$).

При разработке комплексного показателя агроклиматических условий В.А. Моисейчик (1975) учитывала особенности почвенного покрова различных природных зон в ареале возделывания озимых культур.

Для степной зоны страны агроклиматический показатель, средний по каждой административной области, получил следующее аналитическое уравнение:

$$\bar{K} = 0,4844(\bar{T}/t_k) + 1,3081(\bar{H}/\bar{n}) - 0,6071, \quad R = 0,97, \quad (3.22)$$

где \bar{K} – комплексный показатель; \bar{T} , \bar{H} , \bar{n} , – осреднённые по области средние многолетние значения: минимальной температуры воздуха, максимальной глубины промерзания почвы, продолжительности периода со снежным покровом; t_k – критическая температура вымерзания возделываемых сортов озимых культур на территории области (края, республики).

Уравнение действительно при значениях $\bar{T} = -15...-30^\circ\text{C}$; $\bar{H} = 10...100$ см; $\bar{n} = 25...120$ суток.

Для лесной и лесостепной зон подобное уравнение имеет вид:

$$\bar{K} = 0,4934(\bar{T}_k/t_k) + 1,4181(\bar{H}/\bar{n}) - 0,7015. \quad (3.23)$$

Условные обозначения те же. $R = 0,94$; уравнение действительно при значениях $\bar{T} = -18 \dots -45^\circ\text{C}$; $\bar{H} = 10 \dots 150$ см; $\bar{n} = 35 \dots 200$ суток.

При $\bar{n} < 35$ суток, \bar{T} выше -16°C и $\bar{H} \leq 50$ см минимальная температура почвы на глубине узла кущения обычно выше критической температуры вымерзания даже слабозимостойких озимых культур, а короткий период нахождения растений под снегом исключает их выпревание. Такие агроклиматические условия считаются хорошими для перезимовки озимых культур и оцениваются баллами 4 или 5.

Комплексный показатель агроклиматических условий перезимовки является безразмерной величиной, характеризующий также площадь по территории области (края, республики), на которой отмечена гибель посевов озимых культур в холодный период (рис. 3.22).

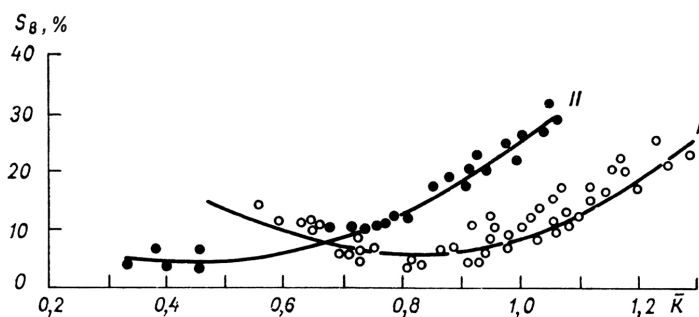


Рис. 3.22. Зависимость между средними многолетними значениями коэффициента \bar{K} и фактической площадью с погибшими посевами по данным ЦСУ РФ (\bar{S}_c , % общей посевной площади)

Зависимость между средними многолетними величинами площади с погибшими озимыми (\bar{S}_c , % общей посевной площади по области) с показателем агроклиматических условий перезимовки выражается следующими уравнениями:

– для лесной и лесостепной зон (рис. 3.22, кривая I):

$$\bar{S}_c = 84,63 \bar{K}^2 - 137,25 \bar{K} + 61,53, \quad (3.24)$$

$\eta = 0,92$; $E_S = \pm 3,0$ %; уравнение действительно при \bar{K} в пределах от 0,55 до 1,30;

– для степной зоны (рис. 3.22, кривая II):

$$\bar{S}_c = 63,37 \bar{K}^2 - 54,40 \bar{K} + 16,07, \quad (3.25)$$

$\eta = 0,98$; $E_S = \pm 5,2$ %; уравнение действительно при \bar{K} в пределах от 0,33 до 1,20.

Таким образом, получена высокая корреляционная связь между искомыми величинами, при этом правая часть кривой I для лесной и лесостепной зон относится к случаям вымерзания, а левая – к случаям

вызревания озимых культур. Площадь с погибшими посевами оказывается наименьшей при \bar{K} , равном 0,75...0,90. При увеличении показателя \bar{K} площадь гибели увеличивается в результате вымерзания, а при уменьшении – вызревания. В степной зоне (кривая II), где вызревание посевов не наблюдается, наилучшие условия перезимовки создаются при значении показателя \bar{K} менее 0,70; при увеличении его средняя многолетняя площадь гибели озимой пшеницы увеличивается.

Комплексная количественная оценка агроклиматических условий перезимовки озимых культур, рассчитанная по величине среднего многолетнего показателя \bar{K} (по уравнениям (3.24 и 3.25) в баллах по всем областям, краям и республикам, кроме крайних северных районов страны, приведена на рис. 3.23.

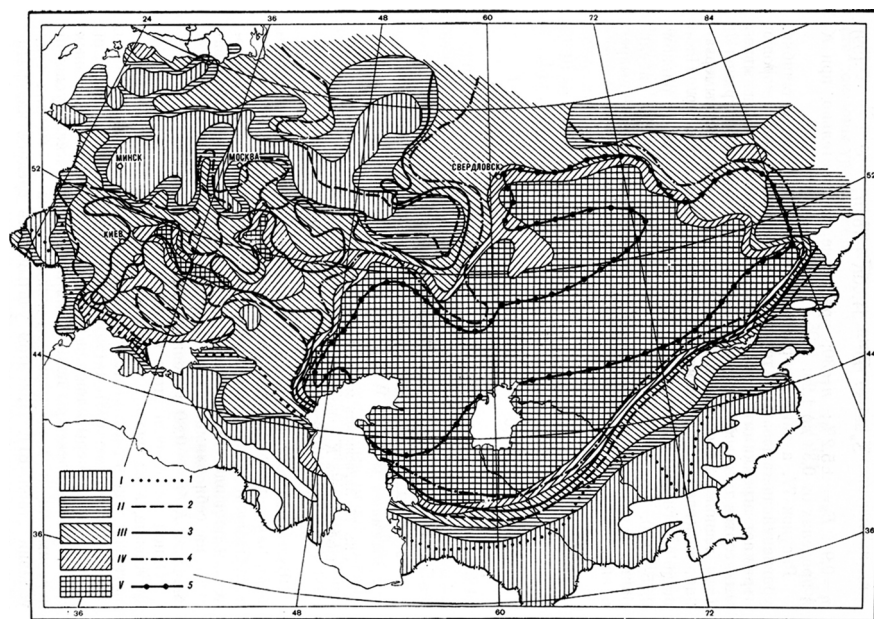


Рис. 3.23. Комплексная оценка агроклиматических условий перезимовки озимых культур. Оценка условий в баллах: I – отличные; II – хорошие; III – удовлетворительные; IV – плохие; V – очень плохие.

Границы районов с благоприятными условиями перезимовки озимых культур с различной морозостойкостью: 1 – слабоморозостойких сортов озимого ячменя, с критической температурой вымерзания $T_{кр} = -14^{\circ}\text{C}$; 2 – высокоморозостойких сортов ячменя, слабоморозостойких сортов озимой пшеницы с $T_{кр} = -16^{\circ}\text{C}$; 3 – среднеморозостойких сортов озимой пшеницы и слабоморозостойких сортов озимой ржи с $T_{кр} = -18^{\circ}\text{C}$; 4 – высокоморозостойких сортов озимой пшеницы, среднеморозостойких сортов озимой ржи с $T_{кр} = -20^{\circ}\text{C}$; 5 – высокоморозостойких сортов озимой ржи с $T_{кр} = -24^{\circ}\text{C}$

К районам с отличными условиями перезимовки возделываемых сортов озимых культур относятся центральные и юго-западные районы европейской части страны и большинство районов Краснодарского края и Северного Кавказа.

По среднему многолетнему значению \bar{K} , осреднённом по территории областей, В.А. Моисейчик (1975) рассчитала повторяемость гибели озимых возделываемых сортов на площади 25 % и более посевов в степной и лесостепной зонах (рис. 3.24).

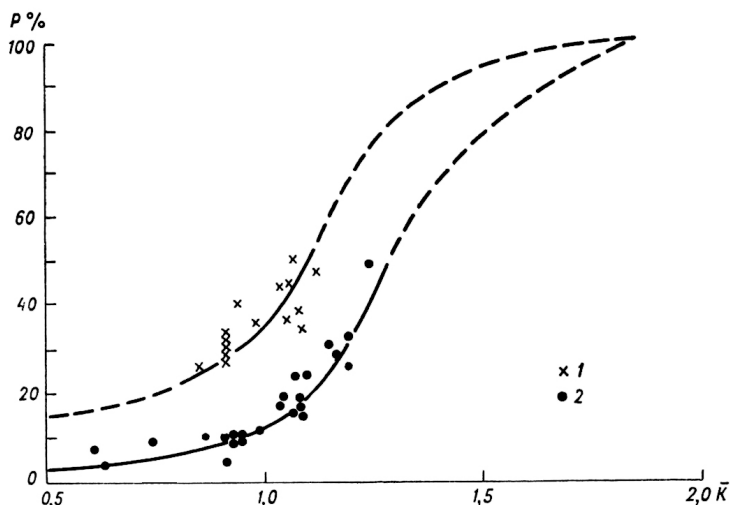


Рис. 3.24. Повторяемость гибели посевов районированных сортов озимых культур на площади более 25 % в степной зоне (1) и более 16 % — в лесостепной и степной зонах (2)

Таким образом, рациональное размещение посевов озимых культур, имеющих различную морозостойкость, необходимо проводить только с учётом научно обоснованной агроклиматической оценки условий для их перезимовки и основных причин зимней гибели посевов.

3.4.2. Методы оценки перезимовки плодово-ягодных культур

Плодовые культуры, представленные обычно древесно-кустарниковыми формами, также подвержены влиянию неблагоприятных зимних условий. Кроны плодовых культур, обычно не защищённые от воздействия низких температур воздуха, усиленных зимними ветрами, солнечных ожогов в холодные ясные дни, наиболее подвержены влиянию таких условий. Комплекс неблагоприятных условий зимнего периода в первом приближении можно охарактеризовать уровнем отрицательной температуры воздуха. Кроны плодовых культур и кустарников имеют различную

морозоустойчивость в зависимости от биологических особенностей каждого вида и сорта, степени их акклиматизации к условиям территории, на которой они выращиваются. В табл. 3.10 в качестве примера представлены критические температуры выживания в зимних условиях некоторых плодовых температур.

Таблица 3.10

**Критические температуры перезимовки плодовых культур
в Нечернозёмной зоне (Побетова Т.А., 1986)**

Культура	Температура воздуха, °С			Температура почвы, °С; для корневой системы
	Кроны	Ростовые почки	Цветочные почки	
Яблоня (средне-русские сорта)	-30...-40	-40	-35...-40	-10...-15
Груша	-25...-30	-30...-35	-25...-30	-8...-10
Вишня	-30...-35	-25...30	-25...-30	-10...-15
Слива	-30	-25...-30	-25...-30	-8...-10
Земляника	—	—	—	-7...-9
Смородина	—	—	—	-15...-16

Яблони южных сортов повреждаются и гибнут при более высоких температурах, чем приведены в этой таблице. Критические температуры теплолюбивых плодовых культур имеют следующие значения: абрикос – -25...-28 °С, персик – -20...-25 °С, виноград – -18...-20 °С, мандарин – -9...-10 °С, лимон – -7...-8 °С. Морозоустойчивость плодовых культур резко снижается в период длительных зимних оттепелей, при значительном повышении температуры воздуха на фоне устойчивой морозной погоды. В центральных районах Нечернозёмной зоны наибольшее число дней с оттепелями приходится на декабрь–март (табл. 3.11).

Таблица 3.11

Среднее многолетнее число суток с оттепелью в зимний период по месяцам

Метеорологическая станция	Ноябрь	Декабрь	Январь	Февраль	Март	Апрель	Ноябрь–апрель
Калуга	5	7	4	4	14	—	34
Владимир	4	8	4	4	15	1	36
Москва (МСХА им. К.А. Тимирязева)	4	8	5	5	16	2	40

Серьёзное повреждение коры плодово-ягодных культур от прямых солнечных лучей наблюдается в ясные морозные дни. Под действием солнечной радиации поверхностные слои коры стволов и крупных ветвей сильно нагреваются, несмотря на морозную погоду. Известно, что альбе́до свежевыпавшего снега составляет 80...95 %, тогда как отражательная способность почвы, стволов и ветвей плодовых культур не превышает 12...20 %.

В соответствии с количеством солнечной радиации, падающей на кроны деревьев, изменяется и температура поверхности коры (табл. 3.12).

Таблица 3.12

Температура поверхности коры ствола яблони в зависимости от состояния небосвода в марте и освещённости ствола (Константинов Л.К., 1987)

Состояние небосвода	Температура, °С		
	воздуха	стороны ствола	
		солнечной	теневой
Ясно	-3,0	14,6	0,5
Пасмурно	-5,5	-4,7	-4,8
Ясно	-1,5	25,7	1,5
Ясно	2,0	16,1	3,3
Пасмурно	0,5	0,8	0,9

По данным Г.Г. Белобородовой (1982), в предгорной зоне на юге Казахстана в январе-феврале на южную сторону стволов плодовых культур (на высоте 50...70 см от почвы) поступает солнечная радиация в полдень 568...935 Вт/м², что на 147...489 Вт/м² больше, чем на подстилающую поверхность (снег). В зимние месяцы северная сторона стволов и ветвей плодовых деревьев и кустарников получает в 4–6 раз меньше солнечной энергии, чем южная. Следствием периодического оттаивания и замерзания верхних слоёв коры и камбия становится их частичное отмирание, заметное по появлению тёмных пятен, называемых солнечными ожогами или морозобоинами.

Большое влияние на устойчивость плодовых культур к низким температурам оказывают такие факторы, как уровень плодоношения текущего года, время созревания плодов и опадения листьев, сроки прохождения двух фаз закалки (как и у озимых зерновых культур), время наступления осенних заморозков и их интенсивность. Своевременное вызревание древесины молодых побегов и сроки окончания их роста осенью являются необходимыми условиями подготовки плодовых к зимнему периоду. Наибольшая устойчивость плодовых культур отмечается в период глубокого покоя растений.

Суровость зимних условий для плодовых культур возрастает с юго-запада на северо-восток, параллельно с ростом зимних холодов. Перезимовка ягодных культур, обычно зимующих под снегом, и виноградников, укрываемых на зиму, зависит от температуры верхнего слоя почвы, которая корректируется высотой снежного покрова, возрастающего к северу и северо-западу на европейской части страны. Наиболее низкие температуры верхних слоёв почвы наблюдаются в Южном Заволжье и в степях Казахстана, отличительной чертой которых являются малоснежные, с сильными ветрами зимы.

В большинстве случаев губительное действие на растения оказывают не средний уровень зимних температур, а сильные и кратковременные морозы. Показателями таких температур являются средние из абсолютных годовых минимумов температуры воздуха и почвы ($T_{ср.мин.в.}$ и $T_{ср.мин.п.}$). Они вычисляются как средние из абсолютных минимумов отдельных лет. Характеристика условий перезимовки плодовых культур в зависимости от этих температур на территории бывшего СССР представлена в табл. 3.13

Таблица 3.13

**Условия перезимовки плодовых деревьев на территории стран СНГ
(Сапожникова С. А., 1966)**

Типы зим по средним многолетним данным	Бывший СССР (кроме Дальнего Востока)		Дальний Восток, $T_{ср.мин.в.}$	Культуры, обеспеченные благоприятной перезимовкой
	$T_{ср.мин.в.}$	Вероятность зим, %		
Очень мягкая	> -10	0	—	Субтропические культуры
Мягкая	-10, -20	0	—	Грецкий орех, персик, виноград без укрытия в более тёплых районах
Умеренно мягкая	-20, -25	0...10	—	Абрикосы, южные сорта яблонь, груш и слив, холодостойкие сорта персиков
Умеренно-холодная	-25, -30	10...50	—	Среднехолодостойкие сорта яблонь, груш и слив, холодостойкие сорта абрикосов
Холодная	-30...-35	50...70	> -25	Среднерусские и мичуринские сорта яблонь, груш; абрикосы более холодостойких сортов
Очень холодная	-35, -40	70...100	-25, -30	Холодостойкие сорта яблонь, вишен, слив
Суровая	-40, -45	100	-30, -40	Яблоки ранетки, более холодостойкие сорта вишен и слив, стелющиеся сорта яблонь
Очень суровая	> -45	100	> -40	Наиболее холодостойкие сорта тех же культур с применением специальной агротехники

Морозоустойчивость корневой системы плодовых культур значительно ниже, чем надземных органов. В течение зимы морозоустойчивость корней постепенно возрастает, но в начале зимы при резком наступлении холодов и невысоком снежном покрове (или при его отсутствии) корневая система может полностью погибнуть. Гибель наступает из-за иссушения тканей в результате разрывов проводящих сосудов кристаллами льда.

Одним из важных средств защиты плодовых культур и виноградников от опасных гидрометеорологических условий зимнего периода является

учёт микроклиматических условий местности при закладке новых садов и плантаций: посадки нельзя располагать в низких, морозоопасных формах рельефа, на склонах возвышенностей, подверженных ветрам господствующих направлений. В районах с суровыми и малоснежными зимами проводят снегозадержание или мульчирование приствольных кругов сыпучими материалами (торфом, перепревшей соломой, навозом и т. п.).

3.4.3. Методы оценки зооклиматических условий зимнего периода в пастбищном животноводстве

Круглогодичное содержание сельскохозяйственных животных на пастбищах ставит продуктивность животноводства в зависимость от складывающихся погодных условий каждого сезона и от урожайности пастбищной растительности предшествующего и текущего вегетационных периодов. Критическим периодом в пастбищном животноводстве считается холодное полугодие, охватывающее позднюю осень, зимние и ранневесенние месяцы. В различных регионах бывшего СССР пастбищное животноводство получило наибольшее развитие в Среднеазиатском регионе, в Казахстане (южное овцеводство) и в России в зоне тундры и лесотундры (северное оленеводство). На этой обширной территории продолжительность зимнего периода в различных почвенно-климатических зонах варьирует от 300...325 суток на севере и до 110...140 суток – в южных регионах.

В истории ведения пастбищного животноводства известно множество катастрофических зим, суровые условия которых стали причиной массовой гибели животных от сильных морозов и недоступности подножного корма. В зимний период продолжительность и периодичность выпаса скота определяется текущими погодными условиями, степенью заснеженности пастбищ и доступностью пастбищных растений. Эти условия, представляющие собой сочетания мощного и плотного снежного покрова, нередко с ледяными прослойками, большой повторяемостью суток с метелями, сильными ветрами и очень низкими температурами воздуха, лишают возможности выпаса животных в течение нескольких суток.

К числу неблагоприятных и опасных для выпасаемого поголовья гидрометеорологических условий относятся низкие температуры воздуха в сочетании с ветрами. Известно, что сильные морозы в условиях штиля переносятся животными лучше, чем при слабых и особенно при сильных ветрах (метели). На многочисленных материалах наблюдений за метеорологическими условиями на станциях и за состоянием овец на выпасе, выполненных в экспедиционных условиях зоометеорологами, были установлены критерии неблагоприятных и опасных суток для выпасаемого поголовья овец в зимний период. На рис. 3.25 представлено влияние комплекса неблагоприятных зимних условий для выпаса овец.

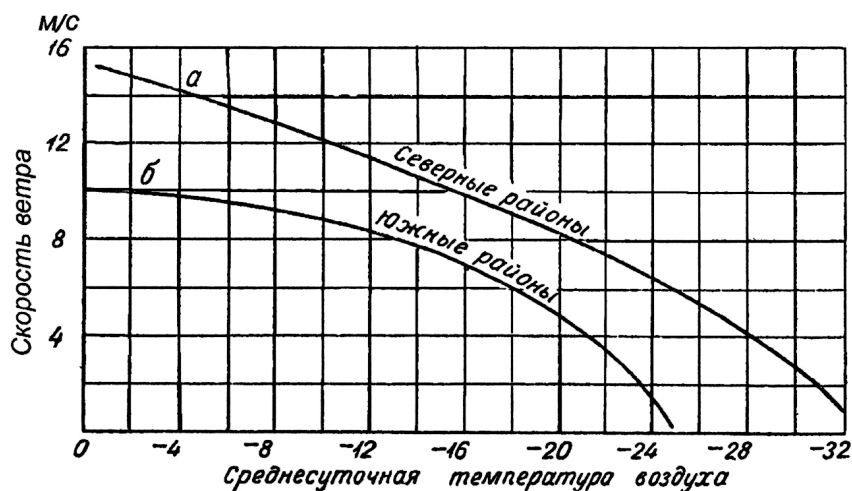


Рис. 3.25. Сочетания скорости ветра с низкими температурами воздуха, при которых условия для выпаса овец неблагоприятны (поле выше кривых): а – для северной половины Казахстана; б – для Западного Прикаспия

Установлено, что выпас овец становится невозможным при следующих высотах и плотности снежного покрова (при отсутствии ледяных прослоек и наста на поверхности снега (табл. 3.14)).

Таблица 3.14

Критические величины высоты и плотности снега, при которых выпас овец невозможен

Высота снега, см	5	10	15	20	25	30
Плотность снега, г/см ³	≥ 0,34	≥ 0,32	≥ 0,30	≥ 0,25	≥ 0,20	При любой плотности

На потребление корма животными оказывают влияние не только высота доступных животным растений, но и плотность снега (табл. 3.15).

Таблица 3.15

Влияние плотности снежного покрова на потребление подножного корма (кг) при выпасе овец на зимних пастбищах Казахстана (Иванов И.Г., 1986)

Возраст животных	Плотность снежного покрова, г/см ³										
	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30	0,31	0,32	0,33	0,34	0,35
Взрослые	2,0	1,66	1,40	1,18	1,0	0,82	0,67	0,53	0,40	0,30	0,20
Молодняк	1,80	1,36	1,04	0,80	0,63	0,47	0,36	0,27	0,18	—	—

К числу других неблагоприятных и опасных для выпаса животных зимних условий относятся обледенения растений, наблюдаемые после дождей и резкого понижения температуры воздуха, гололёд, покрывающий

поверхность почвы и растения, глубокий снежный покров в сочетании с ледяными прослойками и образование ледяных корок на поверхности снега. Сутки называются *невыпасными*, когда из-за неблагоприятных метеорологических условий сельскохозяйственные животные находятся на стойловом содержании или оказываются не способными добывать подножный корм, т.е. выпас нецелесообразен. Критериями невыпасных суток являются также сильные ветры. Например, при ветре скоростью более 15 м/с при любых отрицательных температурах овцы не выпасаются. Неблагоприятны ветры силой 10 м/с при средних температурах воздуха от -16 °С и ниже; при ветре 5 м/с и температуре -27 °С; морозы ниже -32 °С независимо от силы ветра препятствуют выпасу животных в северных районах Казахстана. А в южных районах Казахстана температурным пределом для выпаса овец являются морозы ниже -25 °С независимо от силы ветра. Такие различия объясняются неодинаковой приспособленностью местных пород к неблагоприятным условиям погоды.

На рис. 3.26 представлено среднее многолетнее число невыпасных суток за зимний период, оно варьирует от 15...30 суток на юге территории Казахстана до 90 и более суток на севере этой республики. Наибольшее количество невыпасных суток в северных районах приходится на январь – март, в центральных районах республики – на февраль – март, в южных – на январь – февраль.

При расчётах кормовых запасов кормов на зимний период для овцеводческих ферм важной информацией становится агроклиматическая вероятность периодов с различным числом невыпасных суток (табл. 3.16).

Таблица 3.16

**Вероятность зим (%) с разными периодами невыпасных суток
в зависимости от их среднего многолетнего числа
(Федосеев А. П., 1959)**

Продолжительность невыпасных периодов (сутки)	Среднее многолетнее число невыпасных суток												
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
≥ 30	5	20	45	60	70	80	85	90	95	100			
≥ 60	0	10	15	25	40	50	60	70	80	90	100		
≥ 90	0	0	5	10	15	20	30	40	50	65	80	90	100

Для зимнего выпаса северных оленей установлены критерии опасных и неблагоприятных условий зимнего периода (табл. 3.17).

Подробно эти вопросы рассмотрены в монографии И.Г. Грингофа и О.Л. Бабушкина (2010).

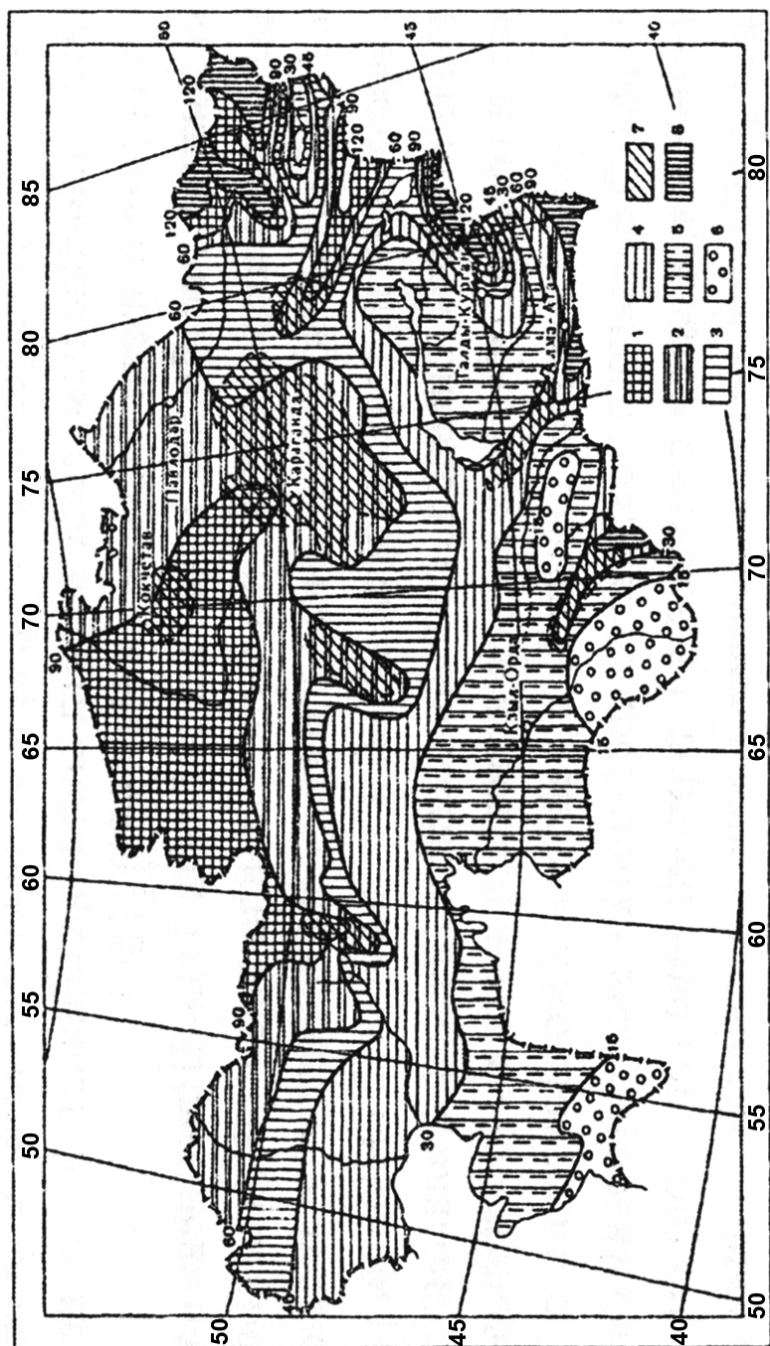


Рис. 3.26. Среднее число невыпасных суток для овец по погодным условиям зимы в Казахстане:

1 – более 90; 2 – 61...90; 3 – 46...60; 4 – 31...45; 5 – 16...30; 6 – менее 15;

7 – комплексные районы низкогорий; 8 – высокогорья

Таблица 3.17

**Критерии опасных и неблагоприятных условий зимнего периода
(Наставление ..., 2007)**

Явление	Критерии и параметры явления	Период. Характер воздействия на оленей
Очень сильный мороз	Минимальная температура воздуха за сутки $\geq -40^{\circ}\text{C}$ в течение ≥ 9 суток подряд	Зима. Понижается упитанность, появляются простудные заболевания.
Очень высокий (h) и плотный снежный покров (d)	h = 80 см при d = 0,32 г/см ³ h = 60 см при d = 0,36 г/см ³ h = 40 см при d = 0,38 г/см ³ h = 20 см при d = 0,45 г/см ³	Холодный период года. Затруднено кормодобывание под снегом и передвижение оленей.
Очень толстая снежная корка	На снегу, в толще снега или на поверхности почвы	Холодный период года. Затруднено кормодобывание под снегом и передвижение оленей.
Очень сильное обледенение кормов	На поверхности растений ледяная корка не менее 5 мм, покрывающая не менее 30 % площади пастбища	Холодный период года. Ухудшается кормодобывание под снегом и передвижение оленей. Простудные заболевания животных.
Очень сильный снег	Количество осадков не менее 22 мм за период не более 12 часов	Холодный период года. Затруднено кормодобывание под снегом и передвижение оленей.
Сильная метель	Общая или низовая метель продолжительностью сутки и более при средней скорости ветра не менее 15 м/с при дальности видимости не более 500 м	Холодный период года. Затруднено кормодобывание под снегом и передвижение оленей.
Очень сильный ветер	В течение суток и более при максимальной скорости ветра не менее 25 м/с, на побережье морей и в горных районах – не менее 35 м/с	Холодный период года. Затруднено кормодобывание под снегом, простудные заболевания

3.5. Биоклиматический потенциал территории Российской Федерации

Российская Федерация располагает выдающимися природными ресурсами в мире, в том числе земельными, водными, энергетическими и др. В условиях интенсивно увеличивающейся численности населения на планете Россия способна стать крупнейшим производителем сельскохозяйственных продуктов и продовольствия путём применения современных, научно обоснованных технологий возделывания и оптимального размещения отраслей сельского хозяйства. В последние десятилетия, благодаря интенсификации использования основных природных ресурсов – земли, воды, атмосферного воздуха для производства продовольствия – обострились проблемы сохранения этих ресурсов и их рационального использования.

Оценка сельскохозяйственного потенциала природной среды по климатическим ресурсам (сельскохозяйственная оценка климата) и агроклиматическим показателям рассмотрена в главе 2. Показатель сравнительной производственной оценки продуктивности климата, степени благоприятствования климата земледелию называется *сельскохозяйственным бонитетом*¹ климата. В качестве сопоставимого показателя благоприятствования климата приняты баллы или урожайность (т/га). Современная сельскохозяйственная *бонитировка климата*² проводится в два этапа:

1. Оценивается общий потенциал природной среды по ресурсам климата на основе показателей радиационного режима, тепло- и влагообеспеченности, неблагоприятных агроклиматических условий, уровня плодородия почвы и особенностей рельефа. При этом результаты оценки могут быть представлены в виде обобщённых баллов бонитета по всем видам ресурсов, а также по отдельным бонитировочным показателям.

2. Оценивается потенциал среды применительно к отдельным сельскохозяйственным культурам или их группам, например таким, как: зерновые, технические, плодовые и т. п. (Толковый словарь по сельскохозяйственной метеорологии, 2002).

Одним из важнейших факторов повышения эффективности сельскохозяйственного производства, при условии бережного отношения к природным ресурсам, является квалифицированное применение в практической работе знаний о биоклиматическом потенциале земледелия (Гордеев А. В. и др., 2006).

Биоклиматический потенциал (БКП) – это агроклиматический показатель биологической продуктивности, выраженный в баллах и характеризующий природное богатство определённых территорий. На основе БКП проводится сравнительная межрегиональная оценка общей биологической продуктивности и продуктивности конкретных сельскохозяйственных культур, почвенного плодородия и др.

Впервые понятие «биоклиматический потенциал» было введено в науку и практику П. И. Колосковым (1962, 1971). Он считал, что этот комплексный показатель характеризует общую потенциальную продуктивность земли и влияние на неё таких важных климатических факторов, как температура, увлажнённость и инсоляция³. Автор рассматривал

¹ Бонитет – от лат. *bonitas* – добротность.

² Бонитировка – это качественная оценка (обычно в баллах или классах) отдельных природных ресурсов (земель, лесов, пастбищ и т.п.), их территориальных сочетаний или совокупности (сельскохозяйственных угодий, биогеоценозов, ландшафтов) или отдельных категорий хозяйств. Является основой землеустройства, мелиораций и экономического планирования (Реймерс Н.Ф., 1990; Сытник К.М. и Брайон А.В. и др., 1994).

³ Инсоляция – от лат. *insolatio* – выставляю на Солнце. Это прямая или суммарная радиация на данной поверхности. Обычно говорят об инсоляции склонов (Хромов С. П., Мамонтова Л. И., 1974).

разность между соответствующими значениями БКП, т.е. прирост биоклиматического потенциала, в условиях, когда увлажнённость возрастает от фактической до уровня достаточной (например вследствие искусственного орошения). Если верхнюю границу достаточной увлажнённости, определяемую как отношение осадков к испаряемости $\{P/(E - e) = 32\}$, принять за единицу, то при других значениях показателя увлажнённости биологическая продуктивность будет равна величине БКП, делённой на 32.

Согласно П.И. Колоскову, *биоклиматический потенциал при естественной (фактической) увлажнённости* на крайнем севере европейской части России БКП равен менее 1. В западной части России БКП более 2; на Северном Кавказе – до 2–3 и более, на Черноморском побережье Кавказа в районе г. Сочи БКП достигает 6; в предгорных районах Алтайского края – до 2 и несколько более; в остальной части территории Западной Сибири – около 1,5; в Восточной Сибири БКП менее 1, а в большей части территории Дальнего Востока БКП более 1.

Биоклиматический потенциал при достаточном увлажнении (БКП_д), как разность между максимальной его величиной при условии достаточного увлажнения и его фактической величиной, характеризует существующий дефицит увлажнения в единицах БКП. На северо-западе ЕТС прирост БКП составляет менее 1, а местами – менее 0,5, что свидетельствует об отсутствии применения искусственного орошения, а в районе Сочи прирост БКП уменьшается до 0. В Алтайском крае биоклиматический дефицит увеличивается до 2,5, в южной части Барабинской степи он составляет 1,5–2. В Восточной Сибири, в районах земледелия этот дефицит составляет более 1, в отдельных районах достигает 2 и более. В южных регионах Средней Азии биоклиматический дефицит, как правило, 7–8, а на самом юге Узбекистана – 9 и более.

Рассмотрим подробнее расчёт БКП, предложенный Д.И. Шашко (1985). Относительные значения биоклиматического потенциала (БКП) рассчитываются по формуле:

$$БКП = K_{p(кy)} \left(\sum t_{ак} / \sum t_{ак(баз)} \right), \quad (3.26)$$

где $K_{p(кy)}$ – коэффициент роста по годовому показателю атмосферного увлажнения; $\sum t_{ак}$ – сумма средних суточных температур воздуха за период активной вегетации в исследуемом пункте; $\sum t_{ак(баз)}$ – базисная (средняя многолетняя) сумма средних суточных температур воздуха за период активной вегетации, т.е. сумма, относительно которой проводится сравнительная оценка.

В качестве базисных принимаются суммы: 1000 °С – для сравнения с продуктивностью на границе возможного полевого земледелия; 1900 °С – для сравнения со средней по стране продуктивностью, характерной для

южно-таёжной зоны; 3100 °С – для сравнения с продуктивностью в оптимальных условиях роста и развития посевов культур, возделываемых, например, в предгорных районах Краснодарского края.

В формуле (3.26) коэффициент роста ($K_{p(кУ)}$) представляет собой отношение урожайности в конкретных условиях влагообеспеченности к максимальной урожайности в условиях оптимальной влагообеспеченности. Изменение эмпирических значений коэффициента роста характеризует сложная функция (логарифмическая основная и параболическая вспомогательная). Значения этого расчётного коэффициента аппроксимируют выражением:

$$K_{p(кУ)}' = 1,5 \lg (20 KУ) - 0,21 + 0,63 KУ - KУ^2, \quad (3.27)$$

где $KУ$ – коэффициент годового атмосферного увлажнения, равный отношению количества осадков (P) к сумме средних суточных дефицитов влажности воздуха ($\sum d$).

При значении $KУ = 0,50$ создаются оптимальные условия для влагообеспеченности растений. Относительно этих условий $K_{p(кУ)}$ принимает значение единицы. Характер связи продуктивности культуры с показателем годового атмосферного увлажнения приведён на рис 3.27.

Расчётная кривая по функции (3.27) вполне удовлетворительно совпадает с эмпирической (рис. 3.28).

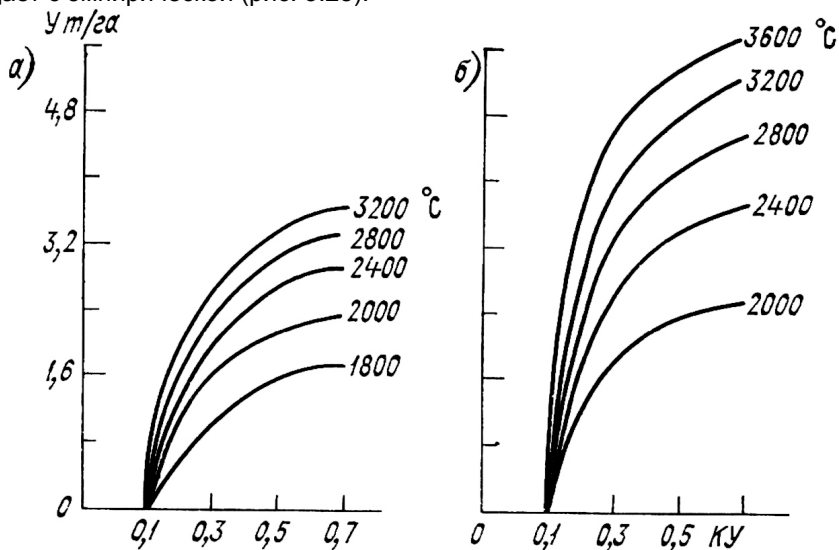


Рис. 3.27. Связь урожайности озимой пшеницы (а) и кукурузы (б) с влагообеспеченностью и суммой температур. $KУ$ – коэффициент годового атмосферного увлажнения, равный отношению количества осадков к сумме средних суточных значений дефицита влажности воздуха.

Урожайность (y , т/га) – по данным госсортоучастков

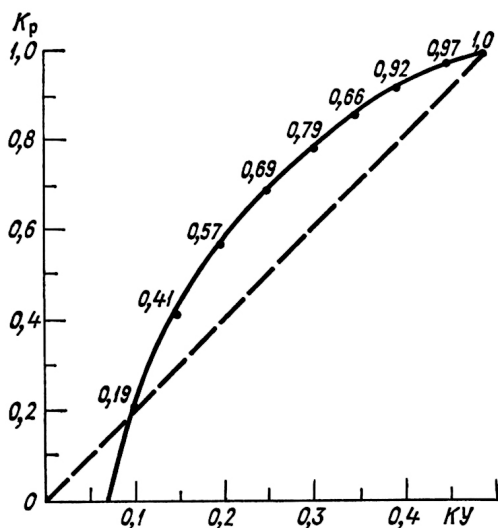


Рис. 3.28. Связь коэффициента роста (K_p) со значениями коэффициентов атмосферного увлажнения ($KY = P/\sum d$)

Допустимое сходство эмпирических и вычисленных значений коэффициентов роста позволяет использовать логарифмическую и параболическую функцию (3.27) для определения относительной биологической продуктивности возделываемых культур в различных почвенно-климатических условиях.

В табл. 3.18 приведены средние эмпирические и расчетные значения коэффициентов роста для различных зон увлажнения. Средние эмпирические значения коэффициентов роста $K_{p(э)}$ определены по данным урожайности различных типов сельскохозяйственных культур – зерновых колосовых, кукурузы, сахарной свёклы, подсолнечника, люцерны и др.

Формулы для сравнительной оценки (в баллах) биологической продуктивности (B_k) относительно средней для страны продуктивности и продуктивности, сформировавшейся в оптимальных условиях роста, следующие:

$$B_k = K_{p(ky)} (\sum t_{ак} \cdot 100/1900) = 55 B_{КП}, \quad (3.28)$$

$$B_{k(on)} = K_{p(ky)} (\sum t_{ак} \cdot 100/3100) = 0,6 B_k. \quad (3.29)$$

Для решения практических задач важна сравнительная межрегиональная оценка биологической продуктивности, определяемая комплексом климатических факторов. Такая оценка, по мнению Д.И. Шашко, может быть выполнена на основе относительных значений биоклиматического потенциала по предложенной им шкале (табл. 3.19).

Таблица 3.18

**Значения коэффициентов роста для различных зон увлажнения
(Шашко Д. И., 1985)**

Зона увлажнения	Коэффициент увлажнения					
	$KY = P / \sum d$	относительная величина	$K_{p(э)}$	$K_{p(кy)}$	$K_{p(кy)'}$	$K_{p(э)} - K_{p(кy)}$
Влажная зона	> 0,50	10	1,00	1,00	1,00	0,00
Полувлажная лесостепная	0,45	9	0,97	0,95	0,87	0,00
	0,40	8	0,93	0,90	0,92	0,01
Полузасушливая степная на обыкновенных чернозёмах	0,35	7	0,86	0,85	0,86	0,00
	0,30	6	0,78	0,78	0,79	0,01
Засушливая степная на южных чернозёмах и тёмно-каштановых почвах	0,25	5	0,69	0,70	0,69	0,00
	0,20	4	0,56	0,60	0,57	0,01
Сухая полупустынная	0,15	3	0,41	0,48	0,41	0,00
Сухая пустынная	< 0,10	2	0,00	0,30	0,19	-0,19

Примечание. $K_{p(кy)'}$ – расчётная величина по формуле (3.27).

Таблица 3.19

Шкала для оценки общей биологической продуктивности

Биологическая продуктивность	Группа	Показатель группы	
		B_k	Урожайность (т/га) зерновых при цене балла 0,023 (т/га)
Очень низкая (БКП = 0,8; $B_k < 40$)	I	< 40	< 0,9
Низкая (БКП = 0,8...1,2; $B_k = 41...60$)	II а	40...50	0,9...1,1; 1,1...1,4
	II б	51...60	
Пониженная (БКП = 1,2...1,6; $B_k = 61...85$)	III а	61...70	1,4...1,6; 1,6...1,9
	III б	71...85	
Средняя (БКП = 1,6...2,2; $B_k = 86...120$)	IV а	86...95	1,9...2,2; 2,2...2,4; 2,4...2,8
	IV б	96...105	
	IV в	106...120	
Повышенная (БКП = 2,2...2,8; $B_k = 121...155$)	V а	121...130	2,8...3,0; 3,0...3,2; 3,2...3,6
	V б	131...140	
	V в	141...155	
Высокая (БКП = 2,8...3,4; $B_k = 156...190$)	VI а	156...165	3,6...3,8; 3,8...4,0; 4,0...4,4
	VI б	166...175	
	VI в	176...190	
Очень высокая (БКП = >3,4; $B_k = > 190$)	VII а	191...200	4,4...4,6; 4,6...4,8; > 4,8
	VII б	201...210	
	VII в	> 210	

Примечание. БКП – относительное значение биоклиматического потенциала, учитывающее совместное влияние тепла и влаги на продуктивность возделываемых культур; $B_k = 55$ БКП – климатический индекс биологической продуктивности, баллы.

Шкала построена с учётом теплообеспеченности территории. По этому признаку выделяются зоны со следующими средними многолетними значениями: мало обеспеченные теплом – менее 1200 °С; недостаточно обеспеченные – 1200...1600 °С; обеспеченные ниже среднего – 1600...2200 °С; среднеобеспеченные – 2200...2800 °С; обеспеченные выше среднего – 2800...3400 °С; повышено обеспеченные теплом – более 3400 °С. Этим показателям соответствуют значения БКП (менее 1,2; 1,2; 1,6; 2,2; 2,8; 3,4), которые по шкале (табл. 3.19) характеризуют различную биологическую продуктивность.

Согласно этой шкале, автором выделены ареалы *очень низкой, низкой, пониженной, средней, повышенной, высокой и очень высокой* биологической продуктивности (рис. 3.29).

В научной агроклиматической литературе известны и другие характеристики бонитета климата (при естественном увлажнении), например, С.А. Сапожниковой (1979), сельскохозяйственной продуктивности климата Ф.З. Баталова (1980) и др.

Агроклиматические исследования, выполненные отечественными учёными, показали значительные различия в агроклиматических ресурсах, имеющиеся на территории страны.

Распределение биоклиматического потенциала по территории субъектов РФ подтверждает существенную пространственную неоднородность БКП. Так, БКП по приходу солнечной радиации и термическим ресурсам различается в пять и более раз, по условиям естественного увлажнения – в 1,5 раза, а по совокупному значению БКП – в 1,7 раза. При этом географические закономерности распределения БКП не носят строго широтного или долготного характера. Заметна лишь тенденция, при которой значение БКП в целом уменьшается в направлении с юго-запада России на север и северо-восток. Наиболее высокие баллы БКП отмечены на Северном Кавказе, в Центрально-Чернозёмных областях и в ряде районов Дальнего Востока, наименьшие – на Крайнем Севере и северо-востоке страны.

Схемы агроклиматического районирования, представленные различными авторами, имеют много общего. В их основе – выделение агроклиматических поясов, характеризующих термические условия территорий, выполнено всеми авторами по суммам активных температур; выделенные агроклиматические зоны (области) демонстрируют условия увлажнения. При их выделении авторы использовали разные показатели и единицы классификации. Например, П. И. Колосков выделил агроклиматические области, характеризующие температурные условия холодного периода года, и агроклиматические округа по мощности снежного покрова. Г. Т. Селянинов выделил агроклиматические провинции по степени континентальности климата; С.А. Сапожникова – агроклиматические области, характеризующие условия перезимовки озимых культур; Д.И. Шашко – агроклиматические секторы,

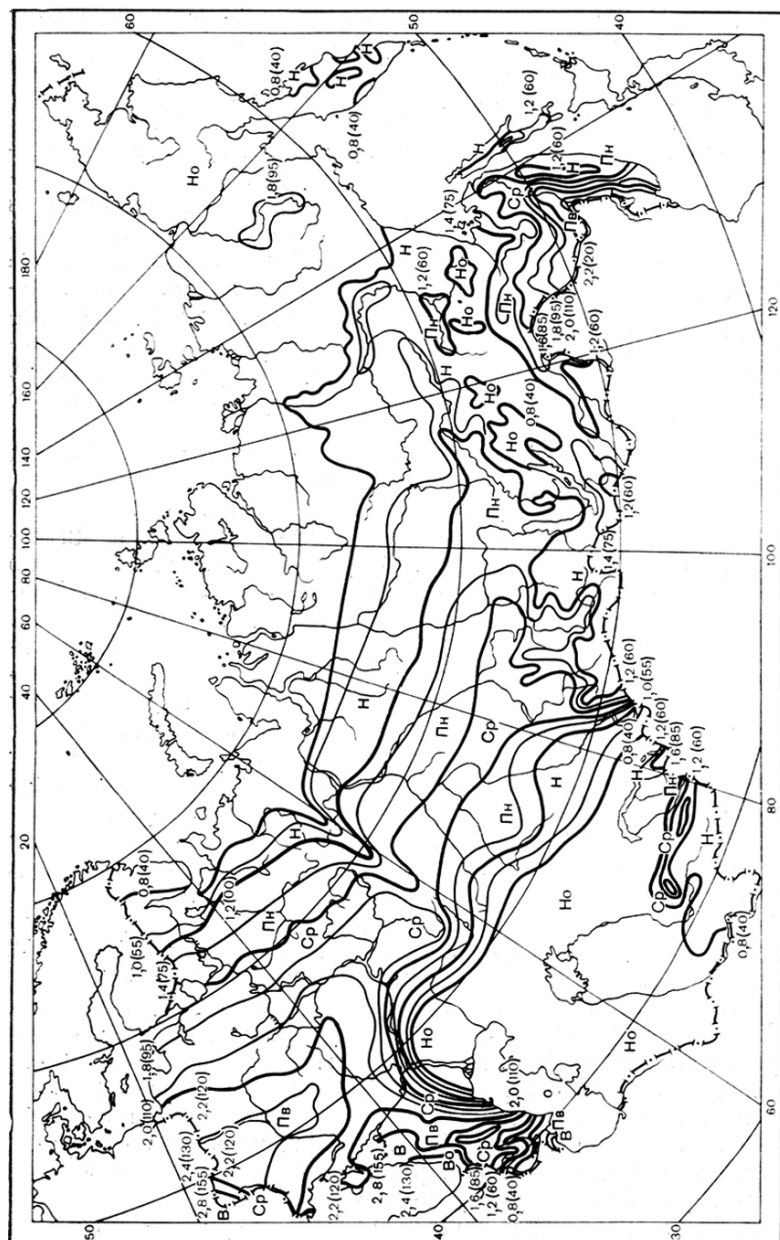


Рис. 3.29. Ареалы общей биологической продуктивности по климатическим БКП и Бк. Биологическая продуктивность: Но — очень низкая; Н — низкая; Пн — пониженная; Ср — средняя; Пв — повышенная; В — высокая; Во — очень высокая. Цифры у изолиний — значения БКП и баллов Бк (в скобках) при естественном увлажнении

описывающие комплекс условий обеспеченности растений теплом и влагой; А. М. Шульгин районировал различные типы зимнего климата почвы и проведения снежных мелиораций.

Эти исследования установили весьма существенные различия в величине биоклиматического потенциала природной среды по регионам РФ. Так, по данным П. И. Колоскова и С. А. Сапожниковой это различие достигает трёхкратной величины, а с учётом искусственного орошения ещё больше. По материалам Ф. З. Баталова и Д. И. Шашко, различия между регионами не превышают 2–2,5-кратной величины. В условиях изменения климата эти показатели могут получить ещё большие различия.

Вполне естественно, что различия в методиках и периодах исследования, а также в исходных агроклиматических данных сказались на границах выделенных агроклиматических объектов. Но эти различия в схемах и методических подходах различных авторов содержат главное – объективную оценку тепло- и влагообеспеченности посевов и условий перезимовки озимых зерновых и бобовых, а также плодовых культур. Результатом выполненных расчётов является составление серии карт, характеризующих сельскохозяйственный потенциал климата (баллы) субъектов РФ по термическим ресурсам (рис. 3.30), по степени благоприятности условий увлажнения (рис. 3.31) и др.

Итоговая карта характеризует общий сельскохозяйственный потенциал климата субъектов Российской Федерации (рис. 3.32).

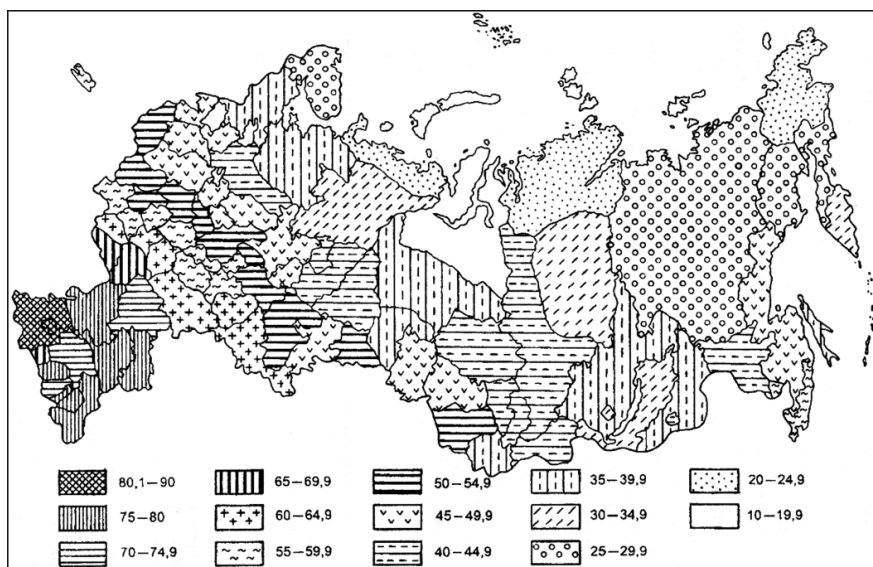


Рис. 3.30. Сельскохозяйственный потенциал климата по термическим ресурсам (баллы)

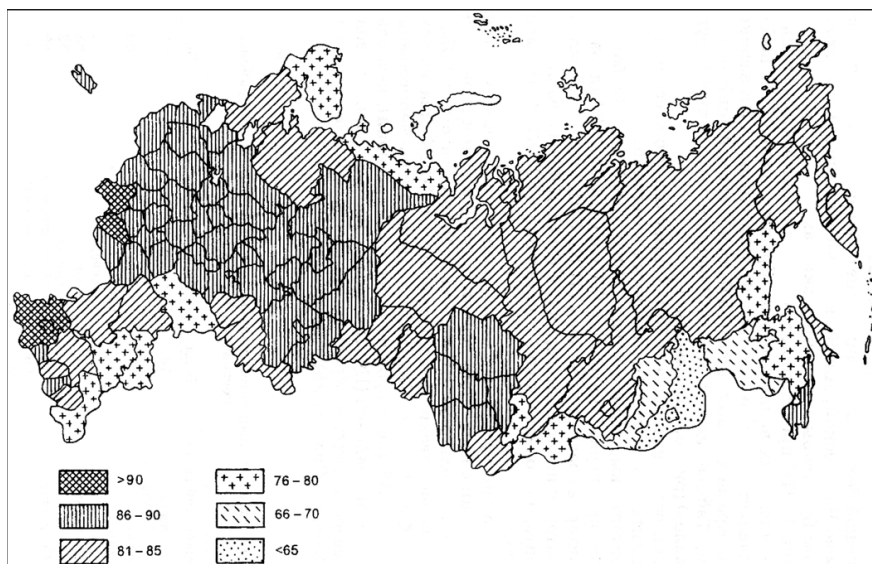


Рис. 3.31. Сельскохозяйственный потенциал климата по степени увлажнённости (баллы)

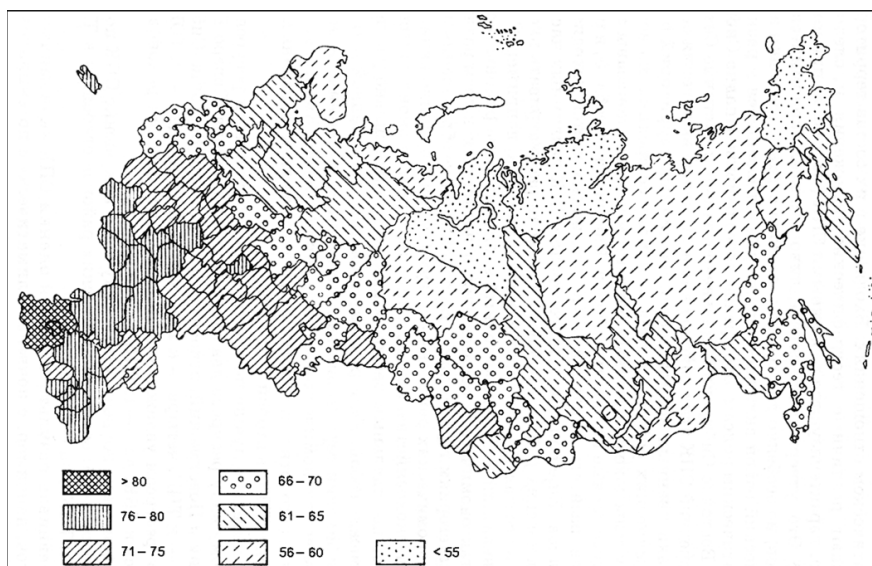


Рис. 3.32. Сельскохозяйственный потенциал климата субъектов РФ (баллы)

Таким образом, сельскохозяйственная оценка климата заключается в комплексном изучении агроклиматических условий конкретной территории и сопоставлении её агроклиматических ресурсов не только с потребностями сельскохозяйственных культур к климату, но и с модельным субъектом, оценённым в 100 баллов или в 100 % (Зоидзе Е.К., Овчаренко Л.И., 2000).

Глава 4

МЕТОДЫ АГРОКЛИМАТИЧЕСКОГО РАЙОНИРОВАНИЯ ТЕРРИТОРИИ

Изучение географии культурных растений отчётливо обнаруживает, что закономерное их распределение по земному шару находится в большой зависимости от климатических условий и что крайние их границы определяются почти исключительно климатом... Поэтому в основу районирования в качестве ведущего физико-географического признака необходимо положить условия климата, а затем учитывать прочие компоненты экологической среды в такой последовательности, в какой выявляется их значение в природе.

Академик АН Грузии Ф.Ф. Давитая

Различия в агроклиматических ресурсах определяют зональные особенности сельскохозяйственного производства. Изучение и оценка агроклиматических ресурсов любых территорий, связанных с сельскохозяйственным производством, относятся к задачам большой научной и практической значимости. Сравнительная оценка агроклиматических ресурсов по степени их благоприятности для объектов сельского хозяйства является сущностью агроклиматического районирования. *Агроклиматическое районирование* – это деление той или иной территории по признаку соответствия агроклиматических ресурсов потребностям возделываемых культур (ГОСТ 17713–89).

Главная задача такого районирования заключается в выделении территорий, характеризующихся агроклиматическими особенностями, выраженными агроклиматическими показателями и спецификой сельскохозяйственного производства. Результатом агроклиматического районирования является составление агроклиматических карт заданного масштаба различных территорий – от мировых до отдельных административных районов и хозяйств. Содержание агроклиматических карт представляет собой картографическое выделение различных таксономических агроклиматических единиц: поясов, провинций, зон, областей, районов, подрайонов, хозяйств, различающихся между собой по агроклиматическим показателям и установленными географическими границами. В процессе районирования можно выявить территории, находящиеся далеко друг от друга, но имеющие аналогичные агроклиматические ресурсы (глава 5 «Агроклиматические аналоги»).

Агроклиматическое районирование даёт научное обоснование для размещения современных видов и сортов сельскохозяйственных культур

и различных систем земледелия. Деление территории по степени однородности климатических условий применительно к различным отраслям животноводства – овцеводству, оленеводству и др., а также к различным породам животных, называется *зооклиматическим районированием*. При проведении зооклиматического районирования прежде всего учитывается сочетание неблагоприятных и опасных для сельскохозяйственных животных экстремальных метеорологических условий, их повторяемости на конкретной территории. Например, соотношение числа невыпасных суток в зимний период или неблагоприятных жарких дней летом для выпасаемого поголовья.

В трудах Г. Т. Селянинова, П. И. Колоскова, Ф. Ф. Давитая, С. А. Сапожниковой, И. А. Гольцберг, Д. И. Шашко, А. М. Шульгина, Л. Н. Бабушкина, Ю. И. Чиркова и др. была разработана методологическая основа *общего и специального* агроклиматического районирования. Оба вида агроклиматического районирования осуществляются на основе учёта потребностей культур к климатическим условиям и оценке соответствия климата этим потребностям.

4.1. Общее агроклиматическое районирование заключается в разделении территории по комплексу основных элементов климата, количественно выражающих степень благоприятности климата (по показателям обеспеченности теплом и влагой вегетационного периода, по условиям перезимовки и т.п.) для сельскохозяйственного производства в целом. Названными авторами были предложены различные схемы общего агроклиматического районирования, учитывающие разные подходы к классификации климатов. Схемы агроклиматического районирования развивались в работах учеников и последователей этих авторов, получившие широкое применение в научно-практической деятельности агроклиматологов и работников аграрного сектора страны. В качестве примера рассмотрим только некоторые схемы агроклиматического районирования и краткие характеристики основных агроклиматических поясов.

Г. Т. Селянинов опубликовал первую карту общего агроклиматического районирования территории СССР ещё в начале 30-х гг. прошлого века. При этом автор выполнил оценку условий теплообеспеченности территории по суммам температур выше 10 °С и на этой основе выделил четыре термических пояса – *арктический, полярный, умеренный и субтропический*, с разделением их на подпояса, различающиеся по сумме температур на 400 °С. Оценка влагообеспеченности произведена им по среднему значению ГТК за период июнь–август. Названия зон были даны автором по признакам преобладающей в посевах культуры (например, льняно-картофельная подзона со злаками, зерновая зона и т.п.) или по особенностям возделывания сельскохозяйственных культур (подзона сухого земледелия, хлопковая

неполивная подзона, зона ирригации). Этот первый опыт агроклиматического районирования был в дальнейшем усовершенствован путём расширения набора агроклиматических показателей.

Кратко охарактеризуем четыре термических пояса, описанные С.А. Сапожниковой (1958).

1. *Арктический пояс*. Средняя температура самого тёплого месяца (июль) ниже 10 °С, поэтому земледелие в открытом грунте не имеет смысла, учитывая, что даже на его южной границе в 50 % лет самый тёплый месяц имеет температуру ниже 10 °С. Это пояс развитого северного оленеводства и охоты.

2. *Полярный или субарктический пояс*. Граница с Арктическим поясом проведена по изотерме июля, равной 10 °С. Средняя температура июля ниже 15 °С, сумма активных температур воздуха более 10 °С на южной границе пояса составляет 1000...1200 °С. Вегетационный период менее 100 суток. Развито очаговое земледелие. Круглосуточный день в июне способствует ускоренному развитию растений. В открытом грунте возделывают не требовательные к теплу и скороспелые культуры: листовые овощи, капусту, ранний картофель. В закрытом грунте культивируют теплолюбивые овощи: огурцы, помидоры и др. Повсеместно развито северное оленеводство.

3. *Умеренный пояс* характеризуется наличием одного вегетационного периода, приуроченного к тёплому полугодю. Он охватывает почти всю территорию бывшего СССР, за исключением небольших территорий, занятых на самом юге субтропическим поясом, а на севере – арктическим и полярным поясами. Северная граница пояса проходит по изолинии суммы температур, равной 1000 °С, за исключением крайних восточных районов, ограниченных изолинией сумм температур 800 °С. Близко к северной границе умеренного пояса проходит изотерма июля, равная 15 °С. Период со средней температурой выше 10 °С продолжается более 2,5 месяцев, что в сочетании с продолжительным (длинным) днём позволяет выращивать обильные урожаи трав, кормовых, овощных и зерновых культур. Существенно другие термические условия на южной границе умеренного пояса. Здесь суммы температур превышают 4000 °С и даже 5000 °С, а период с температурой выше 15 °С достигает 6–7 месяцев. Однако и здесь зимние холода прерывают вегетационный период, что дало основание автору объединить всю эту территорию в один пояс.

Большое разнообразие термических условий внутри пояса и в продолжительности вегетационного периода послужило основанием для выделения подпоясов (табл. 4.1). Прохладный подпояс обеспечен теплом для возделывания разнообразных кормовых и овощных культур, а в более благоприятных условиях микроклимата возможно ежегодное выращивание ранних сортов зерновых культур. В умеренно-тёплом подпоясе

термический режим обеспечивает возделывание на больших территориях ранних яровых и озимых культур.

Таблица 4.1

Термические подпоояса в различных крупных территориях бывшего СССР

Подпоояса	Средние многолетние суммы температур за период с температурой выше 10 °С на южной границе подпоояса		
	Европейская часть бывшего СССР	Западная Сибирь и Средняя Азия	Восточная Сибирь и Дальний Восток
Прохладный	1600	1500	1400
Умеренно-тёплый	2200	2100	2000
Тёплый	3000	3000	–
Жаркий	4000	4000	–
Очень жаркий	–	5600	–

В тёплом подпооясе термический режим позволяет выращивать поздние яровые (просо, кукуруза, сорго), а также и пожнивные культуры.

Тепловые ресурсы жаркого подпоояса обеспечивают ежегодные урожаи средних и поздних сортов кукурузы и сорго. Очень жаркий подпоояс обеспечен теплом для выращивания различных по потребности в тепле сортов хлопчатника.

В тёплом и в двух жарких подпооясах с высокой обеспеченностью теплом возрастает не только разнообразие возделываемых культур, но и увеличивается их продуктивность и повышается качество конечной продукции.

4. Субтропический поояс. Его существенной особенностью является наличие двух вегетационных периодов: летнего и зимнего. Для этого поояса характерно отсутствие устойчивого снежного покрова. Средняя температура воздуха самого холодного месяца выше 0 °С, средний из абсолютных минимумов выше -10 °С. Зимой морозы носят характер заморозков умеренного поояса. Средняя температура самого тёплого месяца выше 20 °С. Суммы температур воздуха не бывают ниже 3500 °С и варьируют по территории в широких пределах – до 4000 °С и более. Этот поояс занимает территории, прилегающие к побережьям Чёрного и Каспийского морей, юго-западную часть Туркменистана. По термическим условиям земледелие в этом пооясе наиболее продуктивно. В некоторых частях этого поояса обильные осадки холодного периода сочетаются с сухим и тёплым периодом. В пооясе возделывается большее разнообразие культур, практически все культуры умеренного поояса, а также такие теплолюбивые культуры, как цитрусовые, чай, тунг и др.

В условиях широкого диапазона тепловых ресурсов и теплообеспеченности сельскохозяйственных культур на обширной территории бывшего СССР закономерно с северо-запада на юго-восток ухудшаются условия естественного увлажнения. На крайнем юге, в большинстве районов Среднеазиатского региона, на юге Европейской территории России

и в Закавказском регионе наиболее эффективным является орошаемое земледелие.

Дифференциация территории по уровню увлажнения была выполнена Г. Т. Селяниновым (1958), С. А. Сапожниковой (1958) и др. на основе выявленных закономерностей влияния естественного увлажнения на урожайность основных сельскохозяйственных культур. Были выделены три основные зоны: *влажная*, где возможно снижение урожая от избытка влаги; *засушливая*, где зачастую не хватает влаги для формирования среднего урожая; и *сухая*, в которой недостаточное увлажнение посевов может быть компенсировано только орошением.

Границей между влажной и засушливой зонами определена изолиния с ГТК, равным 1,3, что хорошо согласуется с северной границей зоны лесостепи на Европейской территории страны. Однако в Восточной Сибири северная граница лесостепи совпадает с изолинией ГТК = 1,6, т.е. соответствует большему увлажнению летних месяцев. Учитывая значительное разнообразие условий увлажнения внутри засушливой зоны, авторы выделили три подзоны, различающиеся по степени засушливости (табл. 4.2).

Таблица 4.2

Зоны увлажнения территории бывшего СССР и соответствующие им значения ГТК Селянинова за период июль–август

Названия зон и подзон	ГТК Селянинова	
	При влажной зиме и весне	При сухой зиме и весне
I. Влажная зона	> 1,3	> 1,6
II. Засушливая зона	1,3...0,4	1,6...0,7
Подзоны:		
незначительно засушливая	1,3...1,0	1,6...1,3
засушливая	1,0...0,7	1,3...1,0
очень засушливая	0,7...0,4	1,0...0,7
III. Сухая зона	< 0,4	–

При районировании по термическому режиму горные территории были исключены из рассмотрения, поскольку для них характерно изменение тепловых ресурсов по высотным поясам, для выделения которых не было достаточных материалов наблюдений. На рис. 4.1 представлена карта Агроклиматического районирования территории бывшего СССР, выполненная С. А. Сапожниковой (1958).

Д. И. Шашко (1967) предложил иную иерархию общего агроклиматического районирования: первая ступень – *макроклиматические образования*: агроклиматические пояса и подпояса; агроклиматические области и подобласти; агроклиматические зоны; агроклиматические провинции и сектора; вторая ступень – *мезоклиматические образования*: агроклиматические округа и районы; третья ступень – *микроклиматические образования*: агроклиматические типы местоположений.

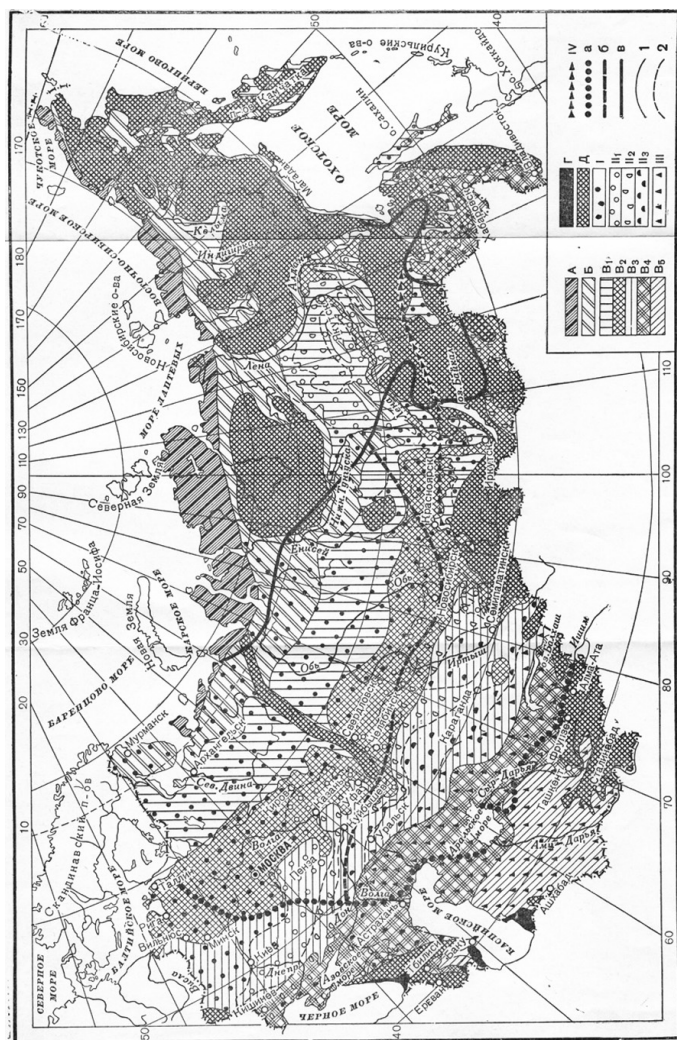


Рис. 4.1. Агроклиматическое районирование территории бывшего СССР.

Условные обозначения. Термические пояса и подпояса: А – Арктический, Б – Субарктический, В – Умеренный; подпояса умеренного климата: В₁ – прохладный, В₂ – умеренно-тёплый, В₃ – тёплый, В₄ – жаркий, В₅ – очень жаркий;

Г – субтропический; Д – районы вертикальной зональности. Зоны увлажнения: I – влажная; II – засушливая, подзоны засушливой зоны: II₁ – незначительно засушливая, II₂ – засушливая, II₃ – очень засушливая; III – сухая, IV – граница районов с сухой зимой и весной. Границы областей с различными условиями переизморозки: а – северная и северо-восточная границы области с мягкой зимой; б – граница подобласти с суровой зимой и особо низкой температурой почвы; в – южная и юго-западная границы области с очень суровой зимой и вечномёрзлой почвой. I – границы поясов и подпоясов; II – границы зон увлажнения

Агроклиматический пояс – высшая таксономическая единица агроклиматического районирования. Это природное образование со свойственными ему термическими типами растительности и почв, возможностями и типом сельскохозяйственного производства.

В *холодном поясе* средняя температура самого тёплого месяца года – июля – не достигает 15 °С. В поясе выделены два подпояса: *очень холодный* и *холодный*. В очень холодном возможно земледелие в закрытом или полужакрытом грунте, или выращивание скороспелой овощной зелени в грунте ($\sum t_{>10\text{ }^{\circ}\text{C}}$ = менее 400 °С). Тип хозяйства – охотопромысловый и рыболовецкий. Холодный подпояс соответствует примерно арктической и типичной тундре; используется для выращивания малотребовательных к теплу ранних овощных культур ($\sum t_{>10\text{ }^{\circ}\text{C}}$ = 400...1200 °С). Тип хозяйства – оленеводческий, охотопромысловый и рыболовецкий. Продолжительный, почти круглосуточный световой день позволяет возделывать овощные культуры под стеклом. Устойчивые урожаи ранних зерновых культур в южной половине подпояса наблюдаются только в более тёплых участках.

В *умеренном поясе* ярко выражены четыре сезона года. Средняя температура июля достигает 15 °С на северной границе подпояса и 26 °С – на южной границе. В силу большой протяжённости пояс характеризуется многообразием сочетаний тепла и влаги, благодаря которым для него характерны различные типы растительности – лесной, лесостепной, степной, полупустынной и пустынной. В этом поясе также выделены два подпояса.

В *холодно-умеренном* подпоясе возможно выращивание ранних культур со сравнительно пониженными потребностями в тепле: зерновые колосовые, зернобобовые, картофель, лён и др. Здесь преобладает животноводческий тип хозяйства, а на юге подпояса – хозяйства зернового и животноводческого направления ($\sum t_{>10\text{ }^{\circ}\text{C}}$ = 1200...2200 °С).

В *умеренном* подпоясе выращивают средние и поздние культуры умеренного пояса со сравнительно повышенными потребностями в тепле (кукуруза на зерно, подсолнечник на семена, сахарная свёкла на сахар, соя, рис и др.), $\sum t_{>10\text{ }^{\circ}\text{C}}$ = 2200...4000 °С.

Тёплый пояс занимает субтропические широты. Летом преобладают массы воздуха тропических широт, а в зимние месяцы – умеренных широт. Суммы температур выше 10 °С составляют 4000...8000 °С. В нём выделено два подпояса: *умеренно-тёплый* и *тёплый*. В умеренно-тёплом подпоясе $\sum t_{>10\text{ }^{\circ}\text{C}}$ = 4000...6000 °С. Ведущие отрасли в нём – хлопководство, виноградарство, тонкорунное животноводство и южное плодоводство. В тёплом подпоясе $\sum t_{>10\text{ }^{\circ}\text{C}}$ = 6000...8000 °С возделывают многолетние теплолюбивые культуры: цитрусовые, чай, кофе, какао, бананы и др.

В *жарком поясе*, лежащем за пределами границ бывшего СССР, средние многолетние суммы температур превышают 8000 °С. Изолиния этой суммы температур примерно соответствует изолинии средней температуры

самого холодного месяца 15 °С. Все выделенные автором агроклиматические пояса увязаны с широтными физико-географическими поясами.

Для оценки влагообеспеченности территорий Д.И. Шашко (1967, 1985) применил показатель увлажнения ($KУ$):

$$KУ = P / \sum (E - e), \quad (4.1)$$

где P – количество осадков за год (мм); $\sum (E - e)$ – сумма средних суточных дефицитов влажности воздуха за год (мм).

По этому показателю автор выделил три зоны с несколькими подзонами:

- Д – зона достаточного увлажнения включает подзону избыточно влажную ($KУ > 1,3$) и подзону достаточно влажную ($KУ$ от 1,0 до 1,33);
- Н – зона недостаточного увлажнения, которая включает подзону слабозасушливую ($KУ$ от 0,55 до 1,0) и подзону засушливую ($KУ$ от 0,33 до 0,55);
- С – зона незначительного увлажнения включает подзону сухую ($KУ$ от 0,12 до 0,33) и подзону очень сухую ($KУ < 0,12$).

Более мелкими таксономическими единицами, выделенными и количественно описанными автором, являются агроклиматические области, подобласти, зоны, провинции и т.п., которые в настоящем учебном пособии не рассматриваются.

На рис. 4.2 приведено агроклиматическое районирование территории России, стран СНГ и Балтии.

В 1967 г. Д.И. Шашко опубликовал «Агроклиматическую карту мира». Для оценки теплообеспеченности сельскохозяйственных культур автор принял суммы температур воздуха выше 10 °С. В целом автор выделил на агроклиматической карте мира четыре термических пояса, разделённые на подпояса (рис. 4.3).

Холодный пояс (X) – короткий период вегетации с летними заморозками. $\sum t_{>10\text{ }^{\circ}\text{C}} < 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$; овощеводство закрытого грунта; очаговое земледелие, малотребовательные к теплу овощные культуры – редис, шпинат, лук, репа, ранний картофель.

Умеренный пояс ($У$) – земледелие в тёплый период года. **Холодно-умеренный подпояс** – культуры с коротким вегетационным периодом – $\sum t_{>10\text{ }^{\circ}\text{C}} = 1000...2200\text{ }^{\circ}\text{C}$; серые хлеба, пшеница, зернобобовые, лён, картофель, плодовые, ягодники. **Умеренный подпояс** – $\sum t_{>10\text{ }^{\circ}\text{C}} = 2200...4000\text{ }^{\circ}\text{C}$; культуры со среднепродолжительным и длинным вегетационным периодом – поздние сорта зерновых, кукуруза на зерно, подсолнечник, сахарная свёкла, в южной части подпояса – хлопчатник, соя, арахис, виноград.

Тёплый (субтропический) пояс (T) – $\sum t_{>10\text{ }^{\circ}\text{C}} = 4000...8000\text{ }^{\circ}\text{C}$; теплолюбивые культуры с очень длинным вегетационным периодом – хлопчатник, кукуруза поздняя, маслины, цитрусовые, чай, табак, местами – финиковая пальма и др.

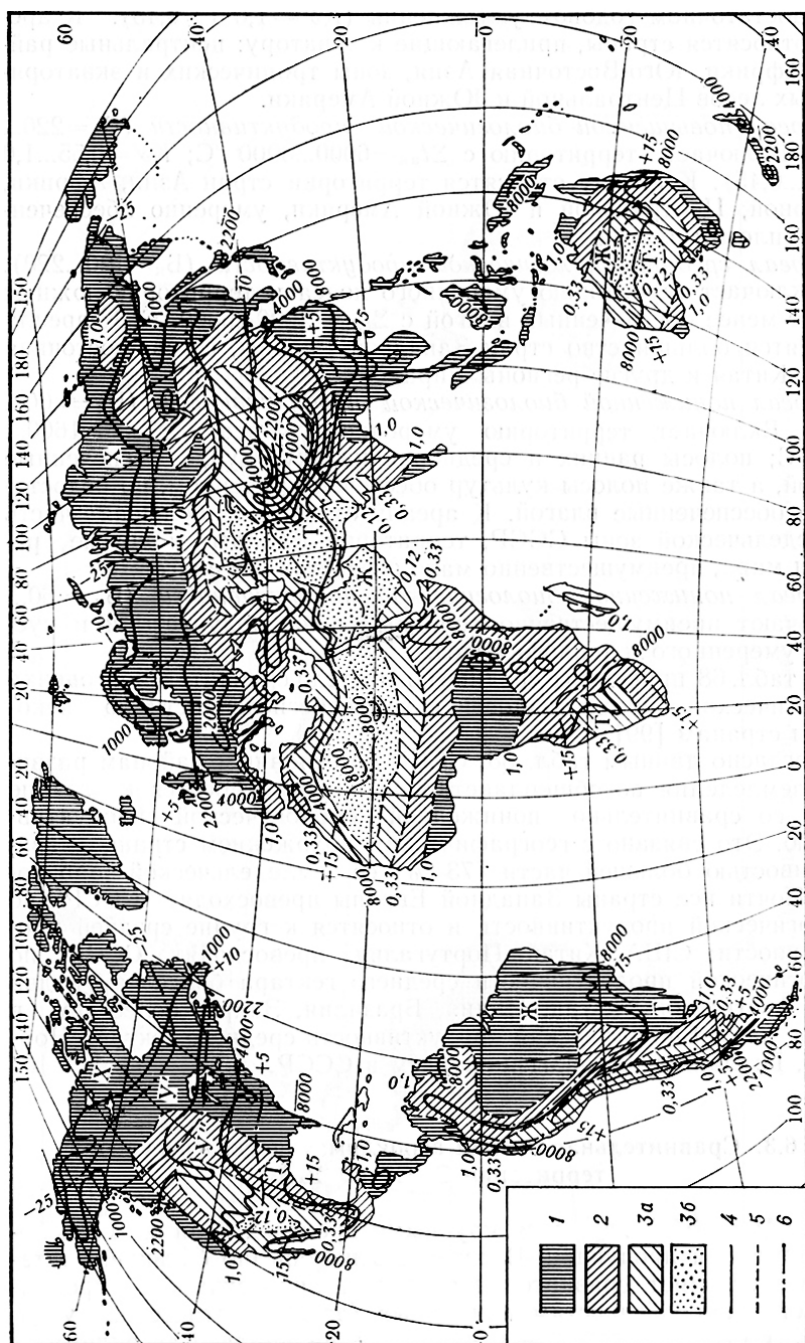


Рис. 4.3. Агроклиматическая карта мира (пояснения в тексте)

Жаркий (тропический) пояс (Ж) – $\sum t_{>10^{\circ}\text{C}} > 8000^{\circ}\text{C}$; непрерывная вегетация растений в течение всего года (может прерываться сухим периодом); сбор нескольких урожаев в год; теплолюбивые многолетние культуры с длинным периодом вегетации – сахарный тростник, кофе, какао, хинное дерево, каучуконосы и др.

Обеспеченность растений влагой выражена автором в трёх зонах увлажнения:

- **влажная зона (1)** – осадки за год превышают испаряемость или возможное испарение, $KУ > 1,0$;
- **засушливая зона (2)** – осадки меньше испаряемости, $KУ = 1,0 \dots 0,33$;
- **сухая зона (3)** – испаряемость значительно превышает количество осадков; $KУ < 0,33$ – полусухая и сухая зоны (3а) – $KУ = 0,12 \dots 0,33$; очень сухая зона (3б) – $KУ < 0,12$;
- 4 – суммы температур выше 10°C ;
- 5 – коэффициент годового атмосферного увлажнения ($KУ = P / \sum d$);
- 6 – температура самого холодного месяца.

Типы зимы (по температуре самого холодного месяца в году): зима отсутствует – $t < 15^{\circ}\text{C}$, тёплая зима – $t = 15 \dots 5^{\circ}\text{C}$, мягкая зима – $t = 5 \dots -10^{\circ}\text{C}$, холодная зима – $t = -10 \dots -25^{\circ}\text{C}$, суровая зима – $t = -25 \dots -40^{\circ}\text{C}$, очень суровая зима – $t > -40^{\circ}\text{C}$.

Для сравнения приведены показатели, использованные разными авторами (табл. 4.3).

Таблица 4.3

**Агроклиматические показатели,
принятые при районировании территории бывшего СССР
разными авторами**

Оценка	Г. Т. Селянинов	П. И. Колосков	С. А. Сапожникова	Д. И. Шашко
Ресурсы тепла	$\sum t_{>10^{\circ}\text{C}}$	$\sum t_{>0^{\circ}\text{C}}$	$\sum t_{>10^{\circ}\text{C}}$	$\sum t_{>10^{\circ}\text{C}}$
Ресурсы влаги	$\frac{ГТК_{июнь-август}}{= \sum r / 0,1 \sum t_{>10^{\circ}\text{C}}}$	$\frac{K_{зод}}{= r / \sum (E - e)}$	$\frac{ГТК}{= \sum r / 0,1 \sum t_{>10^{\circ}\text{C}}}$	$Md = r / \sum (E - e)$
Условия перезимовки	Средняя из абсолютных годовых минимумов температуры воздуха	$\sum t_{<0^{\circ}\text{C}}$	Средняя из абсолютных годовых минимумов температуры воздуха и почвы на глубине узла кущения (3 и 25 см)	Средняя температура самого холодного месяца. Средняя из абсолютных годовых минимумов температуры воздуха и почвы (3 и 25 см)

4.2. Специальное (или частное) агроклиматическое районирование

Специальное районирование выполняется для решения конкретных производственных задач размещения ведущих сельскохозяйственных культур либо для изучения отдельных небольших территорий. При этом используют агроклиматические показатели, выражающие потребность культур (их сортов и гибридов) в тепле, влаге, в условиях перезимовки в сравнении с условиями их произрастания, а также для определения специализации сельскохозяйственной продукции, агротехнических приемов и их эффективности в различных почвенно-климатических зонах. Взаимодействие данной культуры и природных условий территории (факторов климатических, эдафических¹ и биотических) определяет степень удаchi или неудачи продукции, ради получения которой данная культура возделывается. Пользуясь совокупностью указанных факторов, агротехника регулирует высоту урожая и раздвигает границы культуры. Что касается экономических условий, то они целиком предопределяют степень рентабельности культуры и, естественно, с учётом этих условий завершается процесс районирования (Ф. Ф. Давитая).

Особенностью таких исследований является детальный эколого-географический подход, комплексный учёт климатических, почвенных факторов жизнедеятельности конкретной культуры, оценка степени благоприятности условий её произрастания по величине урожайности и качеству продукции. Рассмотрим несколько примеров исследования и специального агроклиматического районирования, выполненных советскими агроклиматологами в 30–80-е гг. XX столетия.

В приведённые ниже карты агроклиматического районирования применительно к отдельным сельскохозяйственным культурам включены и карты, показывающие примеры районирования основных культур по уровню их урожайности. Влияние агрометеорологических условий на формирование продуктивности возделываемых культур рассмотрено нами в работе «Основы сельскохозяйственной метеорологии», 2011, том I, часть III, глава 17.

Впервые специальное (частное) агроклиматическое районирование выполнил Г.Т. Селянинов с целью научного обоснования размещения субтропических культур на Черноморском побережье Кавказа. Этому предшествовала большая работа по определению агроклиматических показателей для отдельных культур субтропической зоны и изучению пространственной изменчивости и распределения этих показателей.

На рис. 4.4 приведён фрагмент карты (масштаб 1:25 000), охватывающий всё Черноморское побережье Кавказа до верхней границы

¹ Эдафический, т.е. почвенный, от греч. *эдаф* – почва.

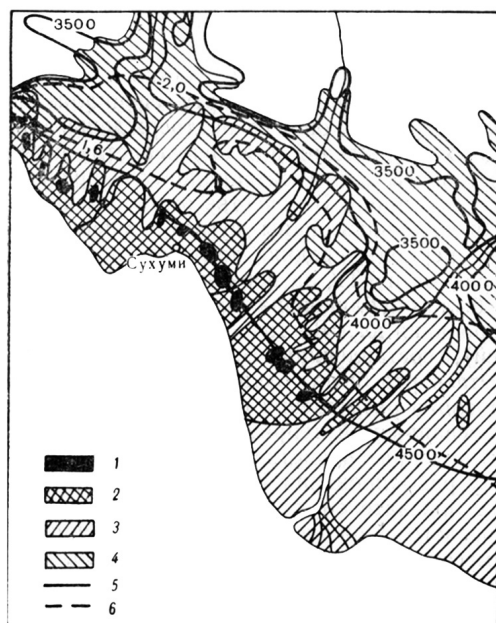


Рис. 4.4. Фрагмент карты агроклиматического районирования зон субтропиков Западного Закавказья. Зона цитрусовых, а также тунга, австралийской акации, эвкалиптов: 1 – подзона лимона и апельсина; 2 – подзона мандарина и тунга; 3 – зона лавра благородного; 4 – зона хурмы и пробкового дуба; 5 – сумма температур выше 10 °С; 6 – средний ГТК за июнь, июль, август

субтропической зоны (500...600 м над уровнем моря). Фактором, лимитирующим возможное распространение отдельных видов субтропических культур на этой территории, являются условия перезимовки. Поэтому границы отдельных зон определялись автором по средним абсолютным годовым минимумам температуры воздуха, территориальное распределение которых связано с формами рельефа (разноэкспонированными склонами гор), удалённостью от моря, условиями стока холодного воздуха по долинам рек и другими условиями.

Теплообеспеченность летнего вегетационного периода оценена по суммам температур выше 10 °С, а влагообеспеченность – по величине ГТК Селянинова. На карте чёрными пятнами выделены участки, благоприятные для культуры лимонов, апельсинов и мандаринов. Это был первый опыт детального агроклиматического, микроклиматического районирования территории со сложным рельефом, с учётом распространения, характерного для территории восточного сухого ветра, дующего в долине р. Риони.

Районирование *винограда* и климатическое обоснование специализации виноградно-винодельческой продукции впервые было разработано Ф. Ф. Давитая. В карте, приложенной к его монографии (1948), были определены границы возможного по теплообеспеченности возделывания сортов винограда для нескольких групп по скороспелости культуры – *очень ранних* ($\Sigma t_{>10^{\circ}\text{C}} \approx 2100 \dots 2500^{\circ}\text{C}$), *ранних* ($\Sigma t_{>10^{\circ}\text{C}} \approx 2500 \dots 2900^{\circ}\text{C}$), *средних* ($\Sigma t_{>10^{\circ}\text{C}} \approx 2900 \dots 3300^{\circ}\text{C}$), *поздних* ($\Sigma t_{>10^{\circ}\text{C}} \approx 3300 \dots 3700^{\circ}\text{C}$) и *очень поздних* ($\Sigma t_{>10^{\circ}\text{C}} \approx$ более 3700°C) для территории бывшего СССР и Европы. Приведены вероятностные характеристики их вызревания в различных районах этой обширной территории. В период зимнего покоя выделены группы различной морозостойкости: очень слабой ($-18, -19^{\circ}\text{C}$), слабой ($-19, -20^{\circ}\text{C}$), средней ($-20, -21^{\circ}\text{C}$), повышенной ($-21, -22^{\circ}\text{C}$). При этом учитывается, что корневая система культуры винограда повреждается при понижении температуры почвы на глубине 25 см до уровня $-7 \dots -9^{\circ}\text{C}$.

Автор установил, что при правильном подборе сортов, выборе благоприятных участков их возделывания и применения соответствующей агротехники в зональном разрезе промышленная культура винограда может быть продвинута к северу от её современной границы до 1000 км на европейской части страны и более чем на 1500 км в азиатской части страны, а в горах – до высоты 2000 м над уровнем моря. Составленная Ф. Ф. Давитая карта зон виноградарства в СССР по степени обеспеченности теплом урожая сортов разной скороспелости винограда в среднем за 10 лет, с учётом условий перезимовки и способам сохранности виноградной лозы зимой, представлена на рис. 4.5.

Кукуруза. Агроклиматическое районирование различных сортов культуры впервые было выполнено С.А. Сапожниковой, М.И. Мель и В.А. Смирновой. На карте, составленной авторами, было выделено семь зон по теплообеспеченности территории бывшего СССР, определена вероятность возможного достижения разных фаз развития культуры по зонам. Эта карта убедительно показала нецелесообразность посевов кукурузы на зерно севернее $57-58^{\circ}$, так как в этих районах обеспечено тепло развитие культуры только в фазе вымётывания метёлки для ранних и среднеспелых сортов, а вызревание зерна возможно лишь в 1–2 тёплых года из 10 и только на самых тёплых участках.

Более глубокие исследования культуры кукурузы и уточнение её агроклиматического районирования выполнил Ю.И. Чирков (1969). Выявленные им зависимости продуктивности кукурузы от факторов среды её возделывания были увязаны с этапами органогенеза этой культуры. Более того, при районировании различных сортов кукурузы автор учитывал такие информативные показатели, как запасы продуктивной влаги в почве, и фотосинтетическую деятельность посевов. Было установлено, что рациональное изменение густоты стояния растений на единице площади,

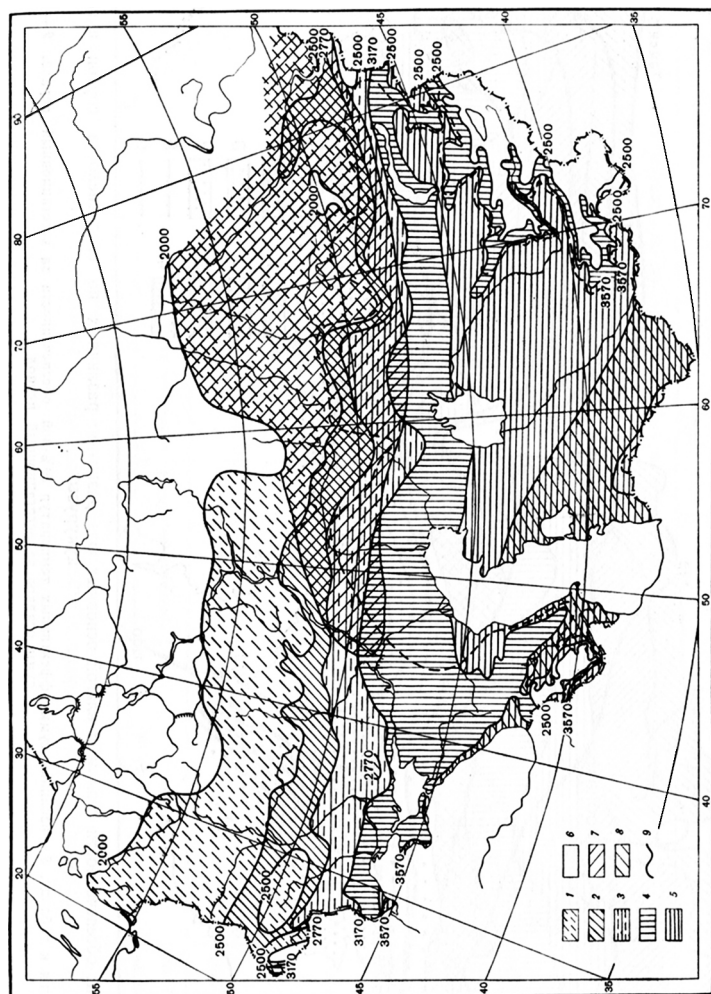


Рис. 4.5. Климатические зоны виноградарства на территории бывшего СССР.

Зоны выделены по степени обеспеченности теплом для формирования урожая винограда различной скороспелости в среднем за 10 лет. Ранние сорта: 1 – от 1 до 5 раз; 2 – от 5 до 9 раз; 3 – от 9 до 13 раз; 4 – от 13 до 17 раз; 5 – от 17 до 21 раз; 6 – от 21 до 25 раз; 7 – от 25 до 29 раз; 8 – от 29 до 33 раз; 9 – от 33 до 37 раз. Средние сорта: 1 – от 1 до 5 раз; 2 – от 5 до 9 раз; 3 – от 9 до 13 раз; 4 – от 13 до 17 раз; 5 – от 17 до 21 раз; 6 – от 21 до 25 раз; 7 – от 25 до 29 раз; 8 – от 29 до 33 раз; 9 – от 33 до 37 раз. Поздние сорта: 1 – от 1 до 5 раз; 2 – от 5 до 9 раз; 3 – от 9 до 13 раз; 4 – от 13 до 17 раз; 5 – от 17 до 21 раз; 6 – от 21 до 25 раз; 7 – от 25 до 29 раз; 8 – от 29 до 33 раз; 9 – от 33 до 37 раз. Полная обеспеченность теплом всех сортов; зоны по условиям перезимовки винограда (укрытия на зиму); 6 – с укрытием; 7 – с особым укрытием; 8 – без укрытия.

Прерывистой линией дана граница винограда с орошением

достигаемое агротехническими методами, способствует в различных термических зонах формированию оптимального фотосинтетического потенциала посева.

В процессе работы автор выявил информативный новый признак, оказавшийся весьма устойчивым для каждого сорта (гибрида) – число листьев на главном стебле кукурузы. Этот морфологический признак оказался хорошо связанным со скороспелостью сорта, а количественно – с суммой эффективных температур выше 10°C . В районах, где средняя температура июля не превышает 20°C , в среднем на один лист стебля приходится сумма температур выше 10°C , равная $30 \pm 2^{\circ}\text{C}$. Эта закономерность была подтверждена регрессионными связями ($r = 0,80 \dots 0,86$) между числом листьев, характеризующих скороспелость сорта с суммами эффективных температур, необходимых для наступления основных фаз развития этой культуры.

Детальная карта зон обеспеченности теплом и влагой разных по скороспелости сортов и гибридов кукурузы представлена на рис. 4.6 и в табл. 4.4, 4.5 и 4.6.

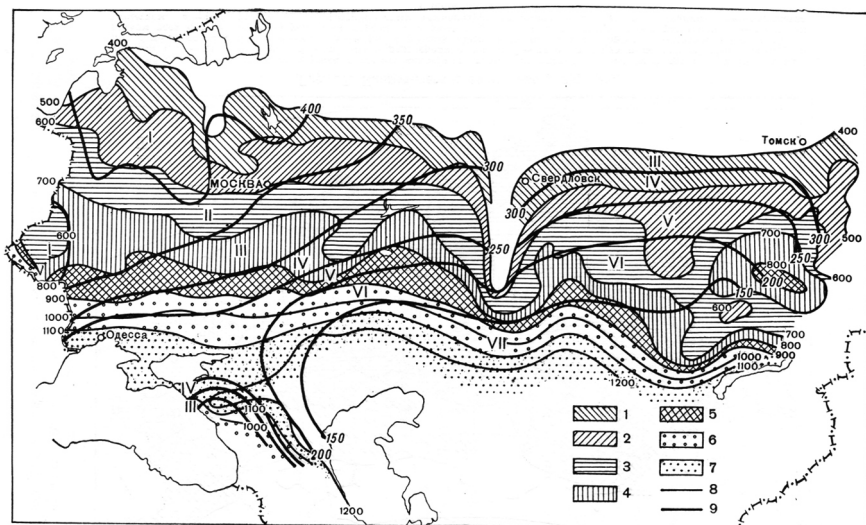


Рис. 4.6. Зоны обеспеченности теплом и влагой основных фаз развития различных по скороспелости сортов и гибридов кукурузы:

1–7 – поясения приведены в табл. 4.4–4.6;

8 – изолинии сумм эффективных температур $> 10^{\circ}\text{C}$ 80 %-ной обеспеченности за вегетационный период;

9 – изолинии сумм осадков за вегетационный период

Таблица 4.4

**Обеспеченность (%) теплом развития кукурузы
в зависимости от термической зоны и скороспелости**

Термические зоны (на рис. 4.6)	$\Sigma t_{>10^{\circ}\text{C}}$ обеспечен- ные в 80 % лет	Фазы развития	Скороспелость сортов и гибридов и собственное им число листьев			
			среднеран- ние, 13–14	среднесе- лые, 15–26	среднепозд- ние, 17–18,	позднесе- лые, 19–20
1	400...500	Вымётывание Молочная спелость Восковая спелость	80...90 15...40 5...10	55...80 8...20 5	45...70 3...10 –	35...55 5 –
2	500...600	Вымётывание Молочная спелость Восковая спелость	90...100 40...60 15...35	80...98 20...40 5...10	70...90 8...25 5	55...75 5...10 –
3	600...700	Вымётывание Молочная спелость Восковая спелость	100 60...80 35...60	98...100 40...65 10...35	90...100 25...50 5...15	75...95 10...30 5
4	700...800	Вымётывание Молочная спелость Восковая спелость	100 80...95 60...80	100 65...80 35...60	100 50...70 15...40	95...100 30...55 5...15
5	800...900	Вымётывание Молочная спелость Восковая спелость	100 95...100 80...95	100 80...98 60...82	100 70...90 40...55	100 55...75 15...40
6	900...1100	Вымётывание Молочная спелость Восковая спелость	100 100 100	100 100 82...100	100 90...100 55...90	100 75...100 40...80
7	>1100	Вымётывание Молочная спелость Восковая спелость	100 100 100	100 100 100	100 100 90	100 100 80

Таблица 4.5

**Ресурсы влаги, обеспеченные в 80 % лет (весенние запасы в слое 0...100 см
плюс осадки за период вегетации)**

Зоны	Ресурсы влаги (мм)
I	400
II	350...400
III	300...350
IV	250...300
V	200...250
VI	150...200
VII	150

Таблица 4.6

**Запасы продуктивной влаги в слое почвы 0...100 см, обеспечивающие
различные уровни увлажнения посева кукурузы**

Запасы влаги, мм	Качественная характеристика условий увлажнения
120...180	оптимальные
80...120	хорошие
40...80	удовлетворительные
< 40	плохие

Обеспеченность режима увлажнения кукурузы Ю.И. Чирков оценивал по запасам продуктивной влаги в почве и модифицированному автором значению ГТК Селянинова. Продуктивность кукурузы определяется (при оптимальном термическом режиме) запасами продуктивной влаги в период от IV этапа органогенеза (появление 2/3 всех листьев) до XI этапа органогенеза (фаза молочной спелости). Для этого периода режим увлажнения применительно к кукурузе оценивается по следующим градациям.

При отсутствии сведений о влажности почвы автор оценивал увлажнение по модифицированному значению гидротермического коэффициента K :

$$K = 0,5P_{X-III} + P_{IV-VIII} / 0,18 \sum t^{\circ C}_{IV-VIII}, \quad (4.2)$$

где P – сумма осадков за указанные месяцы, причём осадки за вневегетационный период учтены автором с коэффициентом 0,5 по шкале:

K	Оценка урожайности кукурузы по 5-балльной шкале
1,2 – 1,3	5
1,0 – 1,1	4
0,8 – 0,9	3
0,6 – 0,7	2
< 0,5	1

При оценке влагообеспеченности посева в 3 балла необходимы эпизодические поливы кукурузы, при оценке 1–2 балла возделывание этой культуры без орошения нецелесообразно.

Картофель. Известно, что наиболее благоприятными условиями для картофелеводства являются северо-западные регионы Европейской территории России и Беларуси, а неблагоприятными – регион Среднеазиатских республик (за исключением горных районов) и самых южных районов Украины. Условия тепло- и влагообеспеченности в период образования клубней определяет уровень урожайности в каждом конкретном году. Благоприятной температурой в этот период на глубине 20...30 см является 16...18 °С. При средней суточной температуре воздуха 24 °С и выше происходит так называемое экологическое (тепловое) вырождение этой культуры (Основы сельскохозяйственной метеорологии, 2011, том I, часть III, раздел 17.4).

Проблеме возделывания картофеля в центральных регионах России посвятил свою работу Е. К. Зоидзе (1978). Опираясь на полученные им количественные зависимости урожайности картофеля в Нечернозёмной зоне России от суммы осадков и суммы активных температур в период интенсивного клубнеобразования, автор построил карту климатической обеспеченности урожайности клубней картофеля 250 ц/га (рис. 4.7).

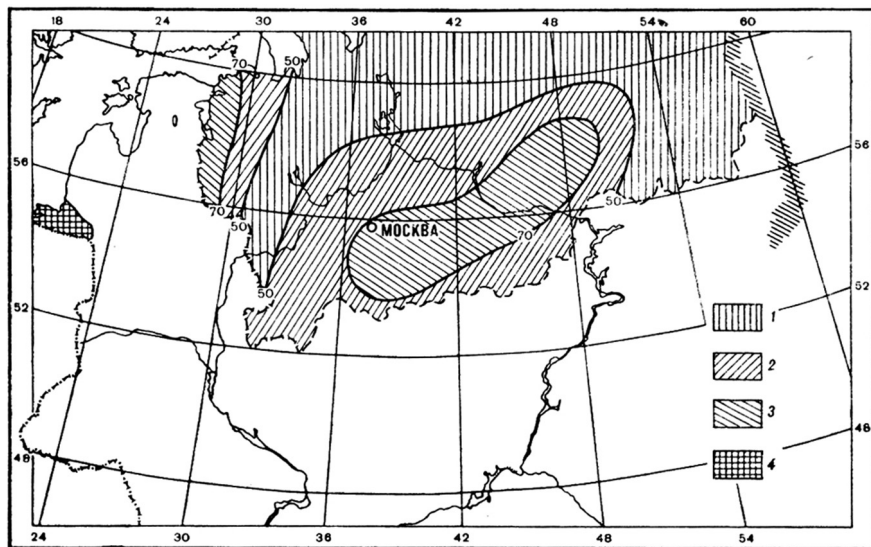


Рис. 4.7. Районы климатической обеспеченности урожайности клубней картофеля 250 ц/га:
1 – 50 %; 2 – 70...90 %; 3 – 50...70 %; 4 – Калининградская область – 50 %

В монографии А. Н. Полевого «Агрометеорологические условия и продуктивность картофеля в Нечерноземье» (1978), посвященной агрометеорологическому обеспечению картофелеводства, исследована пространственно-временная изменчивость урожайности этой культуры в связи с особенностями климата в Нечернозёмной зоне европейской части России. Климатическая изменчивость урожайности характеризуется величиной дисперсии σ_n^2 , рассчитанной по формуле:

$$\sigma_n^2 = \sigma_{об}^2 - \sigma_a^2, \quad (4.3)$$

где $\sigma_{об}^2$ – общая дисперсия урожайности; σ_a^2 – дисперсия урожайности, вызванная ростом культуры земледелия (агротехники).

Величины $\sigma_{об}^2$ и σ_a^2 находятся по следующим формулам:

$$\sigma_{об}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1}, \quad (4.4)$$

$$\sigma_a^2 = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 / n - 1, \quad (4.5)$$

где y_i – урожайность конкретного года; \bar{y} – средняя многолетняя урожайность; \hat{y}_i – динамическая средняя величина урожайности; n – длина ряда наблюдений.

Известно, что агроклиматические ресурсы различных субъектов и районов Российской Федерации неодинаковы, они отличаются фактическим уровнем агротехники и продуктивностью районированных сортов. Поэтому для корректной оценки изменчивости урожайности, помимо дисперсии необходимо учитывать уровень урожайности в каждом исследуемом районе. Для этого используют коэффициент вариации (C_n):

$$C_n = 1/\bar{y} \sqrt{\sum_{i=1}^n [(y_i - \bar{y})^2 - \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2] / n - 1}. \quad (4.6)$$

Для каждого субъекта, области или района по формуле (4.6) рассчитывают величины C_n и наносят их на карту изменчивости урожайности, отражающей агроклиматические особенности территории, на которой формируется продуктивность культуры (рис. 4.8).

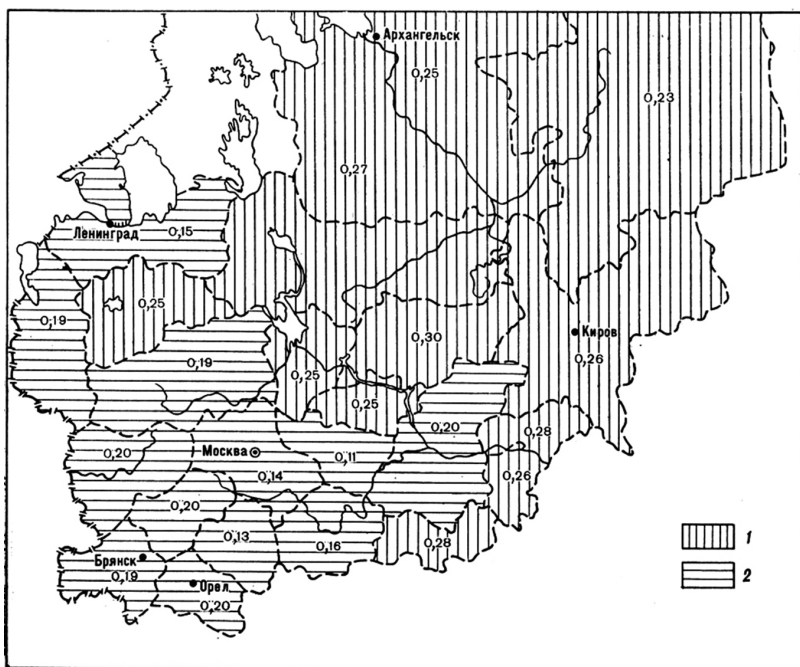


Рис. 4.8. Климатическая изменчивость урожайности картофеля в Нечернозёмной зоне России:

1 – $C_n > 0,20$; 2 – $C_n \leq 0,20$ (Полевой А. Н., 1978)

Коэффициент вариации C_n отражает устойчивость искомой величины (в данном случае) урожайности картофеля. На большей части Нечернозёмной зоны европейской части России агроклиматические условия обеспечивают получение стабильных урожаев этой культуры. Коэффициент вариации колеблется по территории от 0,11 до 0,30 с заметной тенденцией роста с запада на восток. Минимальные величины этого коэффициента (0,11...0,16) характерны для Владимирской, Московской, Тульской, Рязанской и Ленинградской областей. На этой карте выделены две зоны: зона наиболее устойчивой урожайности $C_n \leq 0,20$ и зона среднеустойчивой урожайности $C_n > 0,20$. Границы выделенных зон изменчивости урожаев картофеля выделены с точностью до размера области.

Подсолнечник. Агроклиматическое районирование этой культуры по условиям тепло- и влагообеспеченности было выполнено в 1972 году Ю.С. Мельником (рис. 4.9). Теплообеспеченность выражена автором по сумме температур выше 10 °С в вегетационный период, а влагообеспеченность – по показателю увлажнения K :

$$K = 0,6 \sum x_1 + \sum x_2 / 0,1 \sum t, \quad (4.7)$$

где $\sum x_1$ – сумма осадков за вневегетационный период, считая от даты перехода средней суточной температуры воздуха через 5 °С осенью до даты перехода температуры воздуха через 10 °С весной следующего года с коэффициентом 0,6; эта величина является средним многолетним коэффициентом усвоения почвой зимних осадков на конкретной территории; $\sum x_2$ – сумма осадков за вегетационный период, считая от даты её устойчивого перехода через 10 °С весной до даты созревания подсолнечника; $\sum t$ – сумма средних суточных температур воздуха за период вегетации, считая от даты её устойчивого перехода через 10 °С весной до даты созревания подсолнечника.

В районах с достаточными термическими ресурсами ведущая роль в формировании урожая подсолнечника принадлежит влаге.

Сахарная свёкла. Агроклиматическое районирование возделывания этой культуры было выполнено Л.С. Кельчевской для территории Западной Сибири и Северного Казахстана с рекомендациями по повышению урожайности сахарной свёклы (рис. 4.10).

Овцеводство. Зооклиматическое районирование применительно к отдельной отрасли сельскохозяйственного производства – овцеводству Казахстана – было разработано А.И. Чекересом (1973).

На территории России и сопредельных государств СНГ исторически сложились различные формы специализации животноводческой отрасли в соответствии с особенностями природных и экономических условий. Например, в северо-западных регионах страны преобладает мясомолочное животноводство, а в Казахстане и Среднеазиатских республиках

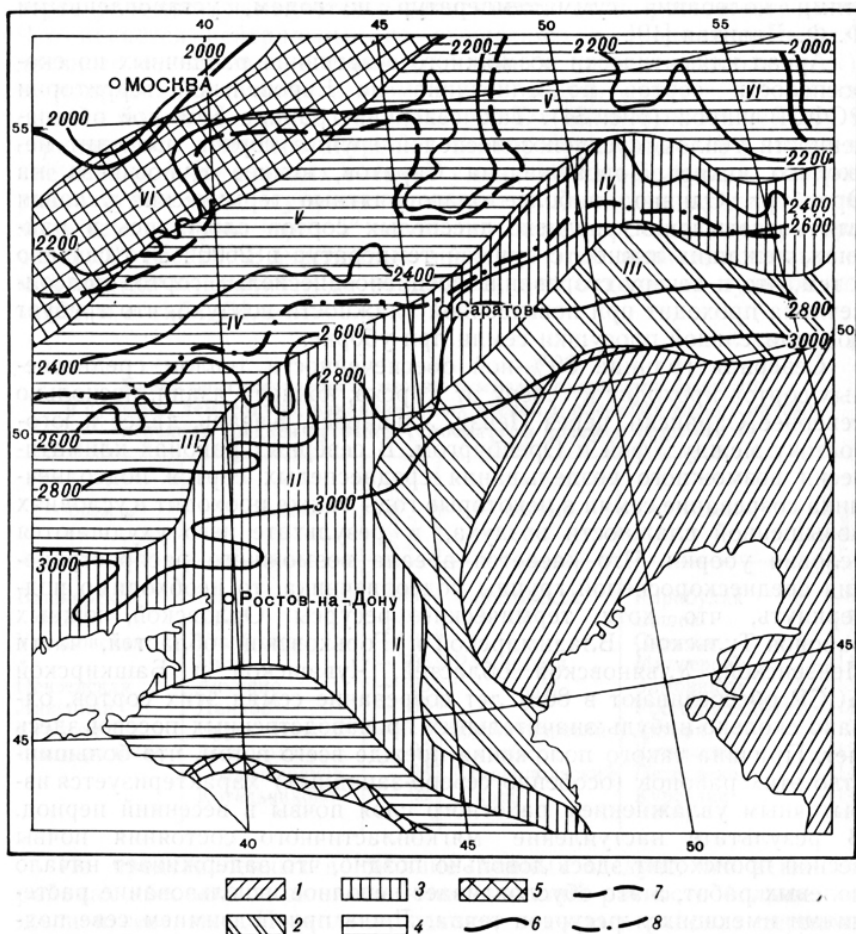


Рис. 4.9. Агроклиматическая карта обеспеченности теплом и влагой подсолнечника, возделываемого на территории европейской части России.

Зоны обеспеченности теплом: I – жаркая, сумма температур выше $10^{\circ}\text{C} > 3000^{\circ}\text{C}$; II – умеренно-жаркая ($3000 \dots 2800^{\circ}\text{C}$);

III – тёплая ($2800 \dots 2600^{\circ}\text{C}$); IV – умеренно-тёплая ($2600 \dots 2400^{\circ}\text{C}$);

V – умеренно прохладная ($2400 \dots 2200^{\circ}\text{C}$); VI – прохладная ($2200 \dots 2000^{\circ}\text{C}$);

Секторы обеспеченностью влагой: 1 – сухой ($K < 0,6$);

2 – засушливый ($K = 0,6 \dots 0,9$); 3 – недостаточно увлажнённый ($K = 1,0 \dots 1,3$);

4 – умеренно-влажный ($K = 1,4 \dots 1,7$); 5 – влажный ($K = 1,8 \dots 2,1$);

Северная граница 80 %-ной обеспеченности теплом подсолнечника на зерно: 6 – среднескороспелые сорта; 7 – среднеспелые;

8 – среднепозднеспелые

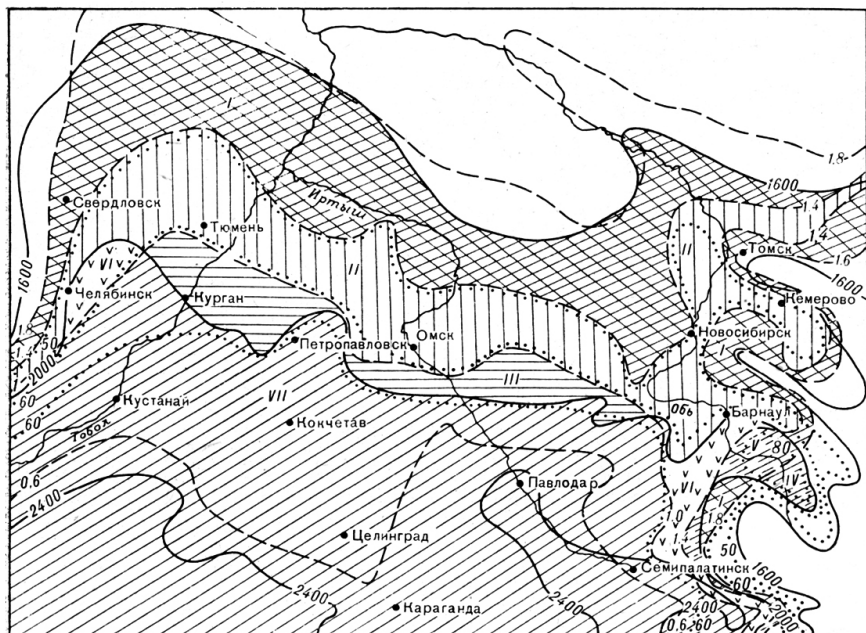


Рис. 4.10. Агроклиматическое районирование Западной Сибири и Северного Казахстана по тепло- и влагообеспеченности применительно к сахарной свёкле:

- I – прохладный, умеренно-влажный ($\sum t = 1600 \dots 1800 \text{ } ^\circ\text{C}$, $k = 1,8 \dots 1,4$);
 II – умеренно прохладный, умеренно засушливый ($\sum t = 1800 \dots 2000 \text{ } ^\circ\text{C}$, $k = 1,4 \dots 1,0$); III – умеренно прохладный, засушливый ($\sum t = 1800 \dots 2000 \text{ } ^\circ\text{C}$, $k = < 1,0$); IV – умеренно-тёплый, влажный ($\sum t = 2000 \dots 2200 \text{ } ^\circ\text{C}$);
 V – умеренно-тёплый, умеренно-влажный ($\sum t = 2000 \dots 2200 \text{ } ^\circ\text{C}$, $k = > 1,8 \dots 1,4$); VI – умеренно-тёплый, умеренно засушливый ($\sum t = 2000 \dots 2200 \text{ } ^\circ\text{C}$, $k = 1,2 \dots 1,0$); VII – тёплый, засушливый ($\sum t = < 2200 \text{ } ^\circ\text{C}$, $k < 1$).

1 – сумма температур; 2 – изолинии оценки агроклиматических условий (в баллах); 3 – коэффициент увлажнения

основу отрасли составляет овцеводство. В северных регионах с холодной, снежной и продолжительной зимой преобладает стойловое содержание животных, в тёплый период – пастбищное. В южных регионах овцы содержатся на пастбищах круглогодично с использованием в периоды ненастья временных укрытий от непогоды.

При круглогодичном содержании животных на пустынных и полупустынных пастбищах особенно необходим учёт влияния на животных неблагоприятных условий летнего и зимнего периодов. Летом в условиях

продолжительной безоблачной погоды высокая интенсивность солнечной радиации, экстремально высокие температуры воздуха и почвы, горячий ветер, низкая относительная влажность воздуха и дефицит питьевой воды угнетают поголовье овец. Зимой неблагоприятными факторами для животных являются низкие температуры воздуха, нередко в сочетании с сильными ветрами, в отдельные годы – глубокий снежный покров, затрудняющий доступ к подножному корму. В летние месяцы средняя температура воздуха 24...27 °С угнетает животных, находящихся на выпасе.

Для характеристики зооклиматических условий летнего выпаса овец А. И. Чекерес предложил климатический индекс K_L :

$$K_L = N_L / L_L, \quad (4.8)$$

где N_L – число жарких летних суток со средней температурой 24...27 °С; L_L – продолжительность периода между первым и последним жарким днём. Изменчивость индекса K_L зависимости от географической широты местности на территории Казахстана представлена в табл. 4.7.

Таблица 4.7

Изменчивость климатического индекса K_L от географической широты местности

Условное название метеостанции	Географическая широта, ° с. ш.	Продолжительность периода между первыми и последними жаркими сутками, L_L	Число жарких суток $t > 24...27$ °С, N_L	Индекс K_L
А	54	97	27	0,22
Б	49	112	43	0,38
В	47	119	50	0,42
Г	43	165	107	0,65
Д	41	164	121	0,74

Как видно из этих данных, в более высоких широтах местности влияние неблагоприятной жаркой погоды на животных снижается ($K_L = 0,22$), а в более низких – возрастает ($K_L = 0,74$).

Зооклиматическая характеристика условий зимнего содержания овец выражается индексом K_3 :

$$K_3 = N_3 / L_3. \quad (4.9)$$

Распределение индекса K_3 по территории Казахстана характеризуется ростом его значения к северу и убыванием – к югу. Например, на 54° с.ш. (Благовещенск) среднее многолетнее значение индекса составляет 0,65, а на 42° с.ш. (Чардара) – 0,10. Следовательно, наибольшим средним многолетним значениям K_L соответствуют меньшие значения K_3 , и наоборот.

В основу оценки зооклиматических условий Казахстана применительно к овцеводству автор положил отношение средних многолетних

значений показателя K_3 к идентичным значениям K_L . Таким образом, зооклиматический индекс $R = K_3 / K_L$ или

$$R = N_3 \cdot L_L / N_L \cdot L_3 . \quad (4.10)$$

Приведённое соотношение является «критерием суровости» (R) зооклиматических условий применительно к овцеводству. Среднее многолетнее значение этого критерия на территории равнинной части республики заметно варьирует, последовательно уменьшаясь в направлении с севера на юг, а в направлении с запада на восток наблюдается его увеличение (табл. 4.8).

Таблица 4.8

Географическая изменчивость «критерия суровости» (R) применительно к овцеводству

Широта, градусы	54	50	48	46	44	42
R	3,30	2,90	2,70	1,0	0,40	0,20
Долгота, градусы	47	52	69	80	–	–
R	0,80	1,00	1,30	3,20	–	–

Этот индекс достаточно отражает особенности наиболее ответственных периодов (летнего и зимнего) содержания овец на пастбищах. Сравнительная оценка зооклиматических условий для овцеводства в Казахстане приведена в табл. 4.9.

Таблица 4.9

Сравнительная оценка зооклиматических условий Казахстана применительно к овцеводству

Зона	Среднее значение R	Число невыпасных суток за зиму			Вероятность зим с продолжительностью невыпасных периодов, %			Вероятность периода с устойчивой жаркой погодой, %
		среднее	абсолютный максимум	Вероятность 75 % лет	≥ 30 дней	≥ 60 дней	≥ 90 дней	
А	2,80	96	167	85	100	95	65	≤ 45
Б	1,40	63	148	55	85	55	30	70
В	0,70	35	115	24	50	20	15	95
Г	0,20	14	64	10	20	10	–	100

Пространственное распределение значений индекса R на территории Казахстана позволило выделить четыре зоны, различающиеся степенью благоприятности круглогодичного содержания овец (рис. 4.11).

Эти зоны, представленные на рис. 4.11, ограничены с юга соответствующим значением:

- зона 1 – преобладающее непрерывное стойловое содержание овец зимой и благоприятные условия в период летнего выпаса ($R = 2,00$);

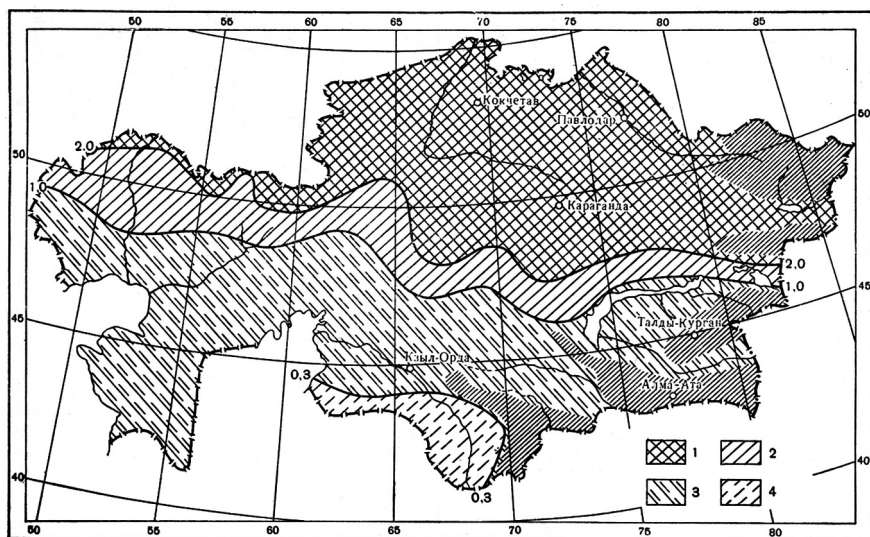


Рис. 4.11. Зооклиматические зоны применительно к пастбищному животноводству Казахстана:

1 – зона А; 2 – зона Б; 3 – зона В; 4 – зона Г (пояснения в тексте)

- зона 2 – стойлово-пастбищное содержание овец зимой и затруднительные условия летнего выпаса тонкорунных овец ($R = 1,00$);
- зона 3 – пастбищно-полустойловое содержание овец зимой, затруднённые условия летнего выпаса для грубошерстных и неблагоприятные условия для тонкорунных овец ($R = 0,30$);
- зона 4 – преобладающее пастбищное содержание зимой и крайне жёсткие условия летнего выпаса для всех пород овец ($R < 0,30$).

Исторически сложившаяся на территории республики система содержания овец хорошо согласуется с зооклиматическим районированием по индексу R .

Подробнее проблемы влияния зооклиматических условий на содержание и продуктивность выпасаемого поголовья в жарких регионах (овцеводство) и холодных областях территории бывшего СССР (северное оленеводство) рассмотрены в монографии И.Г. Грингофа и О.Л. Бабушкина (2010).

Агроклиматическая характеристика распространения вредителей и болезней возделываемых культур, а также неблагоприятных и опасных гидрометеорологических условий для сельскохозяйственного производства тёплого и холодного периодов представлена в работе «Основы сельскохозяйственной метеорологии», 2011, том I, часть III, раздел 17.10 (вредители и болезни) и в части IV, поэтому в настоящем томе эти вопросы не рассматриваются.

Глава 5

АГРОКЛИМАТИЧЕСКИЕ АНАЛОГИ

Основной задачей агроклиматического районирования является выявление территорий со сходными условиями климата, обеспечивающими возможность заимствования и акклиматизации сельскохозяйственных культур и приёмов земледелия в интересах интенсификации сельскохозяйственного производства. При интродукции культурных растений, т. е. при переносе их из одних регионов в другие, а также при обмене национальным опытом земледельческой культуры между различными странами необходимо учитывать сходство и различие климатов, почв и других природных условий, в которых выращиваются растения.

Территории, сходные по климатическим условиям произрастания определённых экологических групп растений, сельскохозяйственных животных и приёмов земледелия, называются *агроклиматическими аналогами*. Ещё в 1932 г. академик Н. И. Вавилов указывал, что вопрос климатических аналогов нельзя рассматривать упрощённо. Полных климатических и почвенных аналогов не существует, поэтому проведение аналогий по общим климатическим характеристикам для сельскохозяйственного производства не достигает цели. Хорошо известны примеры неудачной акклиматизации некоторых сельскохозяйственных культур в новых почвенно-климатических условиях нашей страны без учёта перечисленных выше факторов. Неоднократные попытки внедрения новых культур без учёта их потребностей к климатическим и почвенным факторам приводили к серьёзным неудачам. К ним относятся опыты по разведению чайных плантаций на полях Дальневосточного и Среднеазиатского регионов; хлопчатника – в Украине, кукурузы – в Вологодской, Пермской и других более северных областях.

Теория агроклиматических аналогов, разработанная агроклиматологами СССР, основывается не на сходстве общих характеристик климатов, а на выявлении общности ведущих элементов климата, определяющих оптимальную продуктивность культур и применяемых агротехнических приёмов их возделывания (Шульгин А. М., 1978). Для установления агроклиматических аналогов необходимо:

- выделение ведущих элементов климата, ограничивающих произрастание и акклиматизацию культуры на новом месте;
- определение по фенологическим данным периода, для которого надо проводить сравнение агроклиматических условий территорий, особенно для однолетних культур.

Было предложено находить агроклиматические аналоги для отдельных групп сельскохозяйственных культур по учёту ведущих

агроклиматических показателей, определяющих возможность произрастания культуры.

Как было показано в работе «Основы сельскохозяйственной метеорологии», 2011, том I, глава 4, раздел 4.2, не все факторы окружающей среды имеют одинаковое экологическое значение в жизни растений: они подразделяются на основные и второстепенные. При использовании сравнительного метода исследования агроклиматических ресурсов анализируются в первую очередь основные факторы климата для конкретных культур в различные периоды их роста, развития и формирования продуктивности. К ним, как известно, относятся интенсивность и спектральный состав солнечной радиации, включая её физиологически активную часть – ФАР, ресурсы тепла и влаги, их распределение в период вегетации, механический состав и плодородие почвы.

В отношении зимующих культур или вегетирующих в субтропическом поясе в холодные месяцы проводится анализ условий их перезимовки. Более того, при выявлении агроклиматических аналогов необходим учёт лимитирующих неблагоприятных и опасных для возделываемых культур гидрометеорологических условий, их интенсивность и повторяемость. К ним относятся весенние и осенние заморозки, периоды переувлажнения почвы, атмосферные и почвенные засухи, суховеи, сильные ветры и т.п. Чем ближе эти условия, тем больше возможность успешной интродукции, тем легче проходит акклиматизация растений в новом районе.

Практическое значение имеет установление аналогов и по отдельным факторам развития растений, и по их комплексу. Аналоги по теплообеспеченности указывают на возможность произрастания одинаковых экологических типов сельскохозяйственных культур, по влагообеспеченности – на возможную их продуктивность. Аналоги по комплексу факторов позволяют судить о характере технических и агротехнических мероприятий, о потенциальной продуктивности климата (Шашко Д. И., 1967).

Мировые агроклиматические аналоги бывшего СССР по условиям произрастания культуры винограда впервые были выявлены Ф. Ф. Давитая. Аналогами агроклиматических условий возделывания яровой пшеницы, кукурузы и картофеля в СССР являются отдельные районы в Западной Европе и Северной Америке (Сапожникова С. А., 1957).

Исследования теории агроклиматических аналогов (П. И. Колосков, И. А. Гольцберг, Ф. Ф. Давитая, С. А. Сапожникова, Д. И. Шашко) позволили создать серию подобных карт. Например, на карте субтропической зоны бывшего СССР выделены территории сухих и влажных субтропиков первой, второй и третьей ступеней по сходству климатических условий и степени благоприятности интродукции культур этой зоны. Дифференциация зоны проведена по температуре самого холодного месяца года, суммам температур и уровню температуры за летний вегетационный период, а

для сухих субтропиков также по продолжительности засушливого и сухого периодов.

В *холодном поясе*, занимающем в Северном полушарии огромные территории, выращивание культур возможно в условиях закрытого грунта, а также ранних малотребовательных к теплу овощных культур в короткий период лета. Агроклиматические аналоги территории СССР в этом поясе встречаются в северной части Финляндии, Швеции и Норвегии, а также в Канаде, Исландии, Гренландии и в Китае (в горных районах Тибета).

Умеренный пояс в Северном полушарии занимает территорию Евразии и Америки примерно между 40-й и 60-й параллелями. Сочетание материковых и океанических влияний обуславливает в этом поясе большое разнообразие агроклиматических образований. По увлажнению пояс расчленяется на области достаточного, недостаточного и незначительного увлажнения, а по суровости зимы выделяются типы с жёсткой, суровой, холодной, мягкой и тёплой зимой.

Холодно-умеренный подпояс этого пояса на территории бывшего СССР совмещается примерно со средней и южной тайгой и частично с лесостепными районами Сибири. В этом подпоясе также расположены южная часть Финляндии, Швеции и Норвегии, северная часть Англии и южная часть Канады. На всём протяжении этот подпояс относится преимущественно к области достаточного увлажнения, за исключением некоторых районов Западной и Восточной Сибири и горных районов в западной части США.

К *умеренному подпоясу* относятся южные районы Дальнего Востока, Казахстан, юго-восточные и центральные области Российской Федерации, Украина, южные районы Белоруссии, а также страны Западной Европы, примерно половина территории США, северная и северо-восточная часть Китая, Монголии, Турции (горные районы).

Этот пояс на территории бывшего СССР относится преимущественно к областям недостаточного и незначительного увлажнения, кроме районов Дальнего Востока с муссонным климатом и Западной Украины, которые относятся к области достаточного увлажнения. Страны Западной Европы, восточная половина пояса в США и его тихоокеанское побережье, северо-восточные части Китая относятся к области достаточного увлажнения. Западная часть США, Монголия, внутренние районы Китая, северная Испания, центральная часть Турции относятся к области недостаточного и частично незначительного увлажнения.

Тёплый пояс характеризуется продолжительным вегетационным периодом у однолетних культур и субтропических многолетников. В Северном полушарии пояс простирается примерно между 30-й и 40-й параллелями. Изотерма 0 °С наиболее холодного месяца делит этот пояс на два подпояса: *умеренно-тёплый* с температурой января ниже 0 °С и *тёплый*

с температурой в пределах 5...15 °С. Особенности общей циркуляции атмосферы обуславливают преимущественно недостаточное и незначительное увлажнение тёплого пояса, кроме территории влажных субтропиков (причерноморская полоса Закавказья) и Ленкоранской низменности.

Субтропическая зона бывшего СССР подразделена на подзоны влажных и сухих субтропиков. Возможность произрастания чувствительных к морозам субтропических культур в основном определяют условия зимнего периода. Основными агроклиматическими показателями являются: средние из абсолютных минимумов температуры воздуха от -10 до 0 °С, и при наличии суммы температур выше 10 °С более 3000 °С тёплого периода. Дифференциация влажной подзоны выполнена по температуре самого холодного месяца и суммам температур за летний период. Для подзоны сухих субтропиков используется также показатель продолжительности засушливого и сухого подпериодов.

Наибольшее сходство по агроклиматическим условиям влажные субтропики бывшего СССР имеют с влажными провинциями Средиземноморской области: восточное побережье Адриатического моря, нижняя зона и южные склоны Итальянских Альп и северо-западная часть Пиренейского полуострова, а также юго-восточная часть Китая, северные районы Бирмы, южная и юго-восточная части США, южная часть Бразилии, восточные и частично южные районы Австралии (Г. Т. Селянинов, 1961).

К подзоне сухих субтропиков бывшего СССР очень близки по агроклиматическим условиям возвышенные плато Пиренейского полуострова, гор Атлас (Северная Африка), малая и Передняя Азия. Некоторые культуры, завезённые из юго-восточных областей Китая и Японии (характеризуемых муссонным типом годовых осадков), были успешно акклиматизированы на Черноморском побережье Кавказа: мандарины, чай, хурма, бамбук и др.

Таким образом, агроклиматические аналоги бывшего СССР встречаются в умеренном поясе в Северном Китае, Монголии, Корее, Японии, Турции, в странах Западной Европы, Канаде и США (Шашко Д. И., 1967).

По данным Д. И. Шашко (1985), более 30 % территории СССР относится к малопродуктивному в сельскохозяйственном отношении холодному поясу, в то время как в США такие условия наблюдаются лишь на Аляске, занимая примерно 3 % территории страны. Более 30 % территории США находится в тёплом поясе, где произрастают высокопродуктивные теплолюбивые культуры с продолжительным вегетационным периодом. В СССР такие условия наблюдаются только на 5 % территории. Причём это районы с крайне неблагоприятными условиями увлажнения. Биологическая продуктивность среднего гектара за весь период вегетации превосходит продуктивность среднего гектара в СССР в 2,2 раза. Однако отдельные районы СССР и Северной Америки весьма близки по условиям тепло- и влагообеспеченности, а также и по типам почв.

В работе В.А. Жукова и С.А. Даниелова (1989) в основу выделения агроклиматических аналогов на территории СССР и Северной Америки было положено предварительное гидрометеорологическое описание каждой области, края, республики СССР и штатов, провинций территорий Северной Америки. Каждая территориальная единица описывалась основными климатическими параметрами. В решении задачи была использована обобщённая евклидова метрика в качестве меры близости в объективной типизации метеорологических условий периода вегетации озимых культур.

В результате классификации с использованием метрики на территории СССР было выделено 22 района, достаточно хорошо различающихся между собой по почвенно-климатическим условиям. В дальнейшем выявление агроклиматических аналогов сводилось к расчёту меры близости агроклиматических условий административных единиц Североамериканского континента и выделенных 22 почвенно-климатических районов СССР. Авторы установили, что агроклиматические аналоги российским земледельческим районам на Североамериканском континенте соответствуют лишь в южной части Канады и северной части США, в так называемых пшеничном и кукурузном поясах. Наилучшие агроклиматические условия для возделывания пшеницы в зерновом поясе находятся в штатах Индиана, Иллинойс, Айова, Небраска, Канзас, Миссури и Оклахома. Эти условия наиболее близки условиям юга Украины и Молдавии, Донецко-Приднепровскому и Северо-Кавказскому регионам. Южнее 34° с.ш. на территории Североамериканского континента агроклиматические и почвенные условия не имеют аналогов в России. На территории Закавказья и Республик Средней Азии климатические условия похожи на таковые в штатах Арканзас и Джорджия, но эти районы резко различаются по почвенным условиям.

Глава 6

МЕЗОКЛИМАТ, МИКРОКЛИМАТ И ФИТОКЛИМАТ. ЗНАЧЕНИЕ ИХ ИЗУЧЕНИЯ ДЛЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

6.1. Основные понятия

Климатические ресурсы относятся к абиотическим факторам¹, обладающим свойством непрерывного или почти непрерывного восстановления (свет, тепло, влага, ветер и др.). Разнообразие физико-географических условий, различия в условиях атмосферной циркуляции, неоднородность подстилающей поверхности, расчленённость ландшафтов и их разнообразие обуславливают мезо- и микроклиматическую изменчивость территорий, регионов, районов и даже отдельных хозяйств.

Выделение мезоклимата и микроклимата в объекты самостоятельных исследований, обусловленных разными масштабами, отличными от макроклимата, связано с тем, что, во-первых, именно в их зоне протекает значительная часть жизни и деятельности человека, и, во-вторых, они наиболее доступны для изменения в нужном направлении.

Особенности климата, складывающиеся на относительно небольших территориях, под влиянием неоднородностей подстилающей поверхности – формы рельефа, экспозиция и крутизна склонов, типы почвы, состав и плотность растительного покрова, орошаемое поле и т. п. – проявляются в значениях, несколько отличающихся от средних климатических величин основных факторов, характерных для более крупных территориальных единиц. Поэтому стандартные наблюдения относительно редкой сети метеорологических станций не отражают специфику среды обитания растений (и животных) незначительных территорий. Эти изменения климата в приземных слоях воздуха широко известны под терминами «местный климат» и «микроклимат».

Мезоклимат (или *местный климат* – по С.А. Сапожниковой, С.П. Хромову и др.) определяется климатообразующими факторами более мелкого масштаба, мезорельефом и представляет собой климат относительно крупных географических ландшафтов, достаточно однородных по комплексу природных условий; характеризуется обычно данными одной метеорологической станции, расположенной в конкретном урочище. Мезоклимат в значительной степени определяется особенностями

¹ См. в работе «Основы сельскохозяйственной метеорологии», 2011. Том I, глава 3.

земной поверхности в исследуемом районе, например, конкретный лесной массив, участок речной долины, часть морского побережья, часть высотного пояса в горах, городской район и т.п.

Особенности местного климата проявляются в слое воздуха, измеряемом сотнями метров и более. В зависимости от местных особенностей климата минимальная температура может изменяться на градусы на расстоянии нескольких десятков метров, вертикальные же градиенты температуры в этом слое имеют резко выраженный суточный ход. Дневные градиенты температуры сменяются ночной инверсией. Мезоклимат, как климатическая единица, занимает по масштабу положение между *макроклиматом*¹ и микроклиматом.

Агроклиматические характеристики больших территорий изменяются не только в пространстве, но и существенно изменяются под влиянием условий рельефа местности, водоёмов, естественного растительного покрова, различных сельскохозяйственных угодий. Мезоклимат является фоновым показателем для микроклиматов отдельных почвенных фаций (разностей), агроландшафтов и *биогеоценозов*².

В качестве примера приведём карту мезоклиматического районирования Новгородской области по условиям теплообеспеченности почв (рис. 6.1).

Микроклимат – это климат приземного слоя воздуха, обычно до высоты 2 м над поверхностью почвы небольших территорий – района, поля, сада, склонов возвышенностей, равнин, котловин, обусловленный неоднородностью подстилающей поверхности, на которой неодинаково протекают процессы нагревания, охлаждения, увлажнения, высыхания, формирования снежного покрова, его таяния и т.д. (Толковый словарь по сельскохозяйственной метеорологии, 2002).

Фитоклимат – это микроклимат растительного покрова и корнеоби-таемых горизонтов почвы. Подробнее особенности фитоклимата рассмотрены в разделе 6.5 настоящей главы.

Микроклимат формируется под влиянием особенностей рельефа местности, типа и состояния растительного и почвенного покровов, наличия и размеров (площадь и глубина) водоёмов и т.п. Днём при малооблачной погоде и слабом ветре различия в термическом режиме разных местоположений определяются особенностями радиационного режима и достигают максимальных величин на уровне деятельной поверхности, а

¹ *Макроклимат* – это климат крупномасштабного географического района, природной (географической) зоны, обширных территорий материков, океанов и т.п., определяемый общециркуляционными процессами и географической широтой местности. В отдельных случаях термин применяется в планетарном масштабе.

² *Биогеоценоз* – пояснения см. в работе «Основы сельскохозяйственной метеорологии», 2011, том I, глава 3.

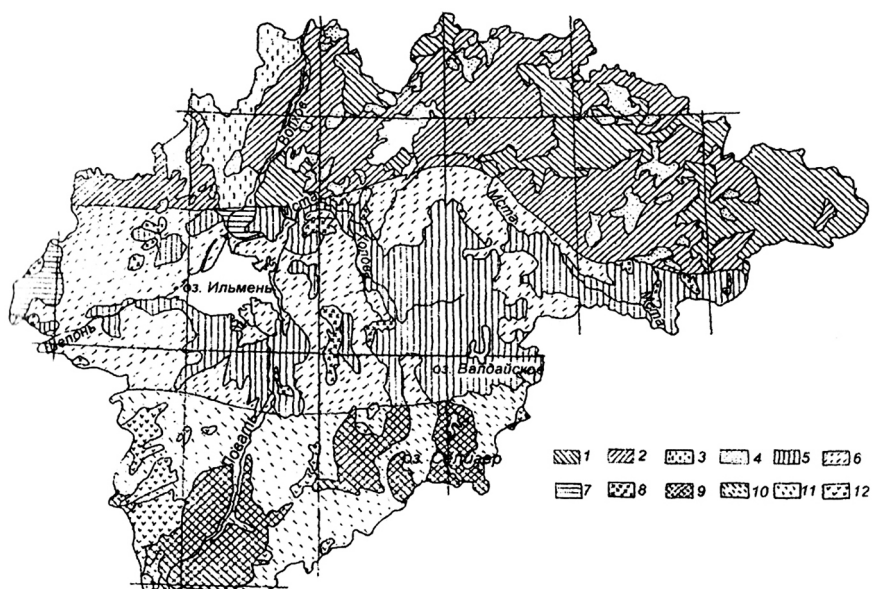


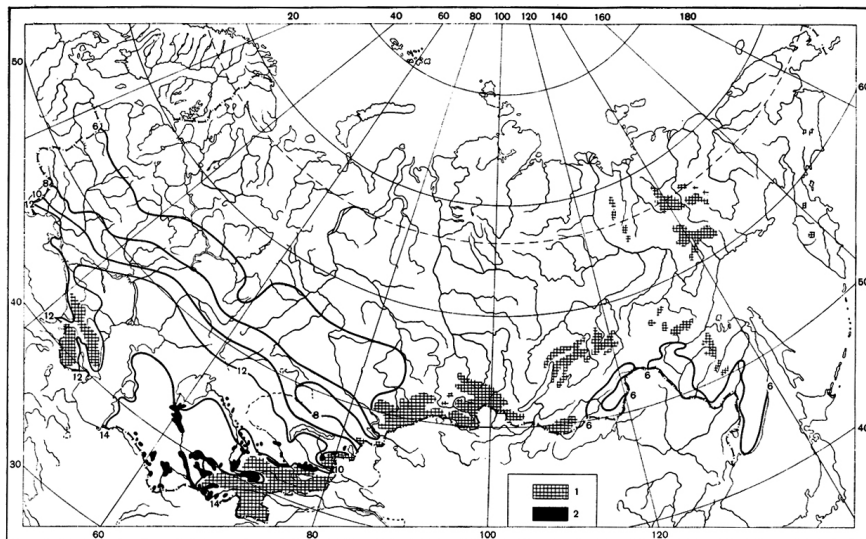
Рис. 6.1. Мезоклиматическое районирование Новгородской области по условиям теплообеспеченности почв

Расшифровка легенды рис. 6.1

Мезорайоны	$\Sigma t_{>10}^{\circ\text{C}}$	Длительность периода, сутки
1	1900...2000	125...130
2	1685...1785	109...114
3	1475...1575	95...100
4 Осушенные	1700...1800	103...108
Неосушенные	1275...1375	88...93
5	2000...2100	130...135
6	1785...1875	114...119
7	1575...1675	100...105
8 Осушенные	1800...1900	108...114
Неосушенные	1375...1475	93...99
9	2100...2300	136...142
10	1885...2085	120...126
11	1675...1875	106...112
12 Осушенные	1900...2100	115...120
Неосушенные	1475...1675	100...105

на высоте 1,5...2,0 м от поверхности почвы эти различия сглаживаются за счёт турбулентного перемешивания.

Микроклиматические характеристики приземного слоя воздуха до высоты 50...150 см отличаются от показаний термометра в психрометрической будке. Осреднённые за июль разности между дневными температурами деятельной поверхности и воздуха на высоте 2 м приведены на рис. 6.2 (Мищенко З.А., 1984).



*Рис. 6.2. Средняя разность между дневными температурами
деятельной поверхности и воздуха в июле (°C):
1 – горные районы выше 1500 м; 2 – оазисы*

Если за вегетационный период просуммировать эти различия, то сумма температур у поверхности почвы оказывается на 250...400 °C больше, чем на высоте 2 м (в будке).

На двух близко расположенных участках с различной деятельной поверхностью – орошаемом поле, занятом рисом, и на сухом поле на высоте 20 см – разность температур воздуха днём превышает 5 °C, а ночью уменьшается на 2 °C, причём знак разности ночью меняется на обратный. Наибольшие различия наблюдаются в тихую солнечную погоду, а также ночью при сильном радиационном выхолаживании, особенно в разных формах рельефа. Разность температур на поверхности почвы северных и южных склонов (крутизной 5...8°) весной может достигать 10...15 °C. На полях с посевами высокостебельных культур, таких как кукуруза, подсолнечник, кенаф и др., освещённость поверхности почвы

оказывается в 10...20 раз меньше, чем у верхней границы посева. В лесу под сомкнутым пологом листьев температура воздуха в полдень жаркого дня на 4–5 °С, а у поверхности почвы на 15–20 °С ниже, чем на открытом участке. *Спелость почвы*¹ на южных склонах наступает на 5...7 суток раньше, чем на склонах северных экспозиций.

Масштабы микроклиматических явлений отличаются от метеорологических явлений, характеризуемых сетью метеорологических станций, расположенных на расстоянии десятков километров (и более) друг от друга. Микроклимат изучают методом микроклиматических съёмок на обследуемой территории с целью учёта микроклиматических особенностей географических ландшафтов, полей с возделываемыми посевами при агрометеорологическом обеспечении сельскохозяйственной деятельности фермеров и крупных хозяйственных объединений. Сущность таких съёмок заключается в одновременном производстве комплекса микроклиматических (градиентных) наблюдений на конкретных полях, ландшафтах, в условиях пересечённой местности – на разных элементах рельефа, в садах и т. п.

Регрессионный анализ массовых материалов микроклиматических измерений и данных опорных метеорологических станций в те же календарные сроки и часы позволяет установить количественные связи между сравниваемыми значениями метеорологических и агрометеорологических величин. С помощью полученных уравнений регрессии по данным наблюдений опорных метеорологических станций рассчитывают метеорологические и другие искомые величины для пунктов, где проводились микроклиматические наблюдения (измерения). При этом следует иметь в виду, что коэффициенты корреляции уравнений связи варьируют в зависимости от сезона года.

Особенно чётко микроклиматические различия метеорологических элементов проявляются в условиях горного, сильно пересечённого рельефа. В горных районах, расположенных вдоль основных влагонесущих потоков воздуха, преобладает сухой летний период, в котором распределение характеристик теплового баланса по поперечному профилю долины определяется ориентацией и крутизной склонов. Общий характер структуры теплового баланса различных элементов рельефа однотипен, где основная доля энергии радиационного баланса расходуется на турбулентный обмен.

В горных районах, расположенных поперёк основных влагонесущих потоков, складываются иные условия увлажнения осадками весенне-летнего периода. Влажные воздушные массы при встрече с мощными

¹ Спелость почвы – состояние почвы, показывающее готовность её к обработке (физическая спелость) или к посеву растений – биологическая спелость (Толковый словарь по сельскохозяйственной метеорологии, 2002).

орографическими поднятиями формируются в интенсивные восходящие потоки, в которых благодаря конденсации образуется кучево-дождевая облачность, дающая обильные ливневые осадки. На развитие конвективной внутримассовой облачности и режим осадков существенное влияние оказывает и горно-долинная циркуляция, вовлекающая в горную зону обогащенный водяными парами воздух. С этим связана характерная для многих горных районов суточная изменчивость режима облачности с максимумом в дневные часы (при долинном ветре) и прояснением ночью при стоке холодного воздуха из высокогорий. Подробно особенности теплового баланса и формирования контрастных различий микроклимата в горных условиях Среднеазиатского региона рассмотрены в монографии Б.А. Айзенштата (1967).

В качестве примера в табл. 6.1 приведены некоторые уравнения регрессии, характеризующие связь между значениями температуры воздуха, полученными на сети опорных метеорологических станций и в пунктах микроклиматических наблюдений. Материалы микроклиматических наблюдений за температурой воздуха были собраны в периоды полевых работ агрометеорологических экспедиций САРНИГМИ, проведенных в пустыне Кызылкум и в горах Центрального Тянь-Шаня (Киргизский хребет).

Таблица 6.1

Некоторые статистические характеристики связи средней температуры воздуха опорных метеорологических станций (X) и пунктов микроклиматических измерений (Y), выполненных экспедициями САРНИГМИ¹ (П.А. Ан, И.Г. Грингоф, Н.С. Коновалова)

Опорная МС	Пункт микроклиматических измерений	Уравнение регрессии	Коэффициент корреляции	Ошибка уравнения, °С
Юго-Западный Кызылкум				
Джангельды	Стационар АН Узбекистана «Аяк-Гужумды»	$Y = 1,00X - 0,23$	$0,97 \pm 0,01$	0,77
Аякагитма	То же	$Y = 1,01X - 0,50$	$0,96 \pm 0,01$	0,81
Киргизский хребет, профиль I (1850 м над уровнем моря)				
Ала-Арча (2945 м над уровнем моря)	Дно долины	$Y = 1,05X + 6,90$	$0,86 \pm 0,03$	1,20
	Восточный склон	$Y = 0,99X + 8,00$	$0,89 \pm 0,02$	1,10
	Западный склон	$Y = 1,00X + 7,70$	$0,91 \pm 0,02$	1,16
Киргизский хребет, профиль II (2100 м над уровнем моря)				
Ала-Арча	Дно долины	$Y = 0,95X + 5,70$	$0,89 \pm 0,02$	1,06
	Западный склон	$Y = 1,15X + 4,99$	$0,95 \pm 0,01$	0,89

¹ САРНИГМИ – Среднеазиатский региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт, переименованный после распада СССР в НИГМИ (г. Ташкент).

Эти количественные связи были использованы в дальнейшем при расчётах урожайности естественной пастбищной растительности в пустыне (весной) и в горах (летом), формирующейся в различных почвенно-растительных формациях – на дне долины горной реки и на склонах различной экспозиции.

Одним из результатов микроклиматических съёмок является составление микроклиматических карт, характеризующих особенности микроклимата изучаемой территории.

Использование морфометрических характеристик рельефа даёт возможность освещать микроклимат на площадях, превосходящих территории отдельных хозяйств. Масштаб картирования определяется характером рельефа территории. При незначительной глубине и плотности расчленения рельефа для построения морфометрической основы используют гипсометрические карты масштаба 1:500 000, при более сильном расчленении рельефа используют карты в масштабе 1:100 000, а в горной местности даже 1:50 000. Приведём два примера, изображённых на рис. 6.3 и 6.4 (Романова Е. Н. и др., 1983).

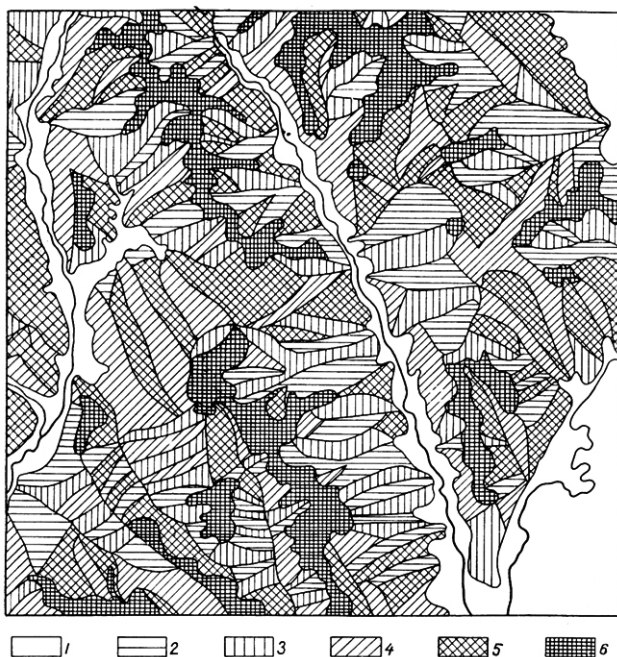


Рис. 6.3. Распределение склонов по экспозициям на участке расчленённой местности:

1 – дно долин; 2 – северные склоны; 3 – южные склоны; 4 – западные склоны; 5 – восточные склоны; 6 – плоские водоразделы



Рис. 6.4. Условия увлажнения различных склонов пересечённого рельефа:
 1 – засушливые и слабо засушливые; 2 – достаточные и оптимальные;
 3 – влажные; 4 – избыточно влажные; 5 – склоны крутизной более 15°, для которых условия увлажнения не оценивались

Знание микроклимата сельскохозяйственных угодий позволяет практически использовать один из резервов повышения продуктивности сельскохозяйственного производства без дополнительных материальных затрат. Этот резерв заключается в более рациональном размещении видов и сортов возделываемых культур с учётом их потребности в тепле и влаге, заморозкоопасности различных участков территории, повторяемости неблагоприятных явлений, а также дифференцирования сроков сева и уборки урожая.

По наблюдениям А. М. Шульгина и его сотрудников (1978), в условиях Западной и Восточной Сибири изменчивость сумм активных температур является основной причиной различий в скорости прохождения отдельных фаз развития растений. Например, в верхних и средних частях склонов (превышение высот более 50 м, уклон более 10°) сумма температур воздуха за безморозковый период, по сравнению с равниной, на 50...150 °С больше, а по сравнению с верхними частями пологих склонов (превышение высот менее 50 м, уклон 3...10°) – на 150...200 °С. Нижние части склонов, прилегающие части дна широких долин, замкнутые

плоские долины и сырые низины, по сравнению с ровным рельефом, получают меньше тепла на 200... 350 °С. На рис. 6.5 представлена общая схема распределения температуры воздуха ночью в условиях пересечённого рельефа (С.А. Сапожникова).

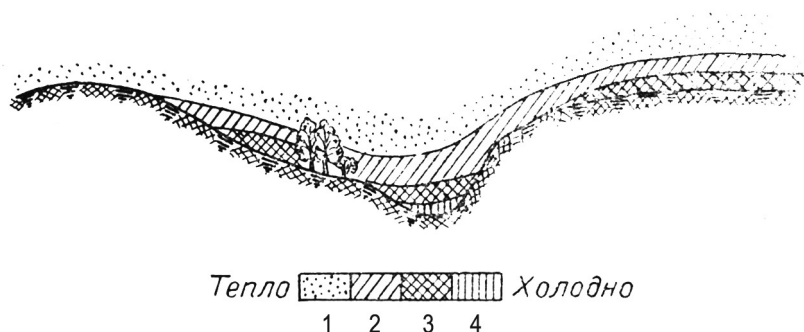


Рис. 6.5. Схема распределения температуры воздуха ночью в условиях пересеченного рельефа:

1 – очень тёплая, не заморозкоопасная зона; 2 – относительно тёплая; 3 – заморозкоопасная; 4 – холодная, очень заморозкоопасная

В результате таких различий в термическом режиме продолжительность вегетационного периода растений в различных частях рельефа разная. Например, в Иркутской области яровая пшеница созревает в условиях верхних и средних частей склонов на 7...10 суток раньше, чем в долине, расположенной приблизительно на 100 м ниже. В Среднем Предуралье яровая пшеница в низине созревает на 5...13 суток позднее, чем на вершине холма, овёс – на 15 суток раньше в средней части юго-западного склона, по сравнению с низиной. В северной зоне европейской части России в прохладные и увлажнённые годы урожаи большинства зерновых культур в средних частях склонов выше, чем у подножий и в низинах. В засушливые и жаркие годы урожаи зерновых выше в низинах, где складываются лучшие условия увлажнения, чем на положительных частях рельефа. Преимущество склонов южной экспозиции в тепловых ресурсах при достаточном увлажнении проявляется во все годы.

6.2. Физические основы формирования микроклимата

В широком смысле понятие «*микроклиматология*»¹ представляет собой изучение климата приземного слоя воздуха и факторов, влияющих

¹ Микроклиматология – одно из научных направлений климатологии, включающее изучение микроклимата (Толковый словарь по сельскохозяйственной метеорологии, 2002).

на него; исследование взаимосвязей между растительным покровом, почвой и окружающей их средой. По существу, микроклиматология охватывает различные области метеорологии, физики почв, физиологии растений, экологии и др.

Специалисты, изучающие микроклимат различных ландшафтов, сельскохозяйственных полей, городов и т. п., рассматривают в первую очередь распределение температуры и влажности приземного слоя воздуха и почвы, особенности распределения солнечной радиации по элементам рельефа, ветровой режим и другие факторы, влияющие на формирование микроклимата. В то же время из этих факторов наибольшее значение имеют суточная и сезонная динамика теплового и водного баланса, природа и свойства растительности (посева), а также трение между деятельной поверхностью и атмосферой.

Поверхность почвы и растительности, а также любого другого тела, которая поглощает и отдаёт тепло путём радиации и тем самым регулирует термический режим прилегающих слоёв воздуха и почвы, называется *деятельной поверхностью*¹ или деятельным слоем. Разность между собственным излучением почвы и растительности, с одной стороны, и встречным излучением атмосферы – с другой, называется эффективным излучением, почти всегда имеющим отрицательный знак. Это означает, что в результате эффективного излучения деятельная поверхность теряет тепло. В дневные часы солнечная радиация обычно превышает эффективное излучение. Получающийся при этом избыток тепла на поверхности почвы и растительности расходуется на нагревание растений, почвы, прилегающих слоёв воздуха и на биологические процессы (фотосинтез), испарение растений (транспирация) и с поверхности почвы.

В зимний период, когда интенсивность солнечной радиации (прямой и рассеянной) незначительна, особенно над снежным покровом, отражающим большую часть солнечного тепла, радиационный расход тепла превышает его приход, в результате деятельная поверхность теряет тепло, частично компенсируемое отдачей тепла из воздуха и почвы.

Деятельная поверхность играет большую роль не только в теплообороте, но и во влагообороте. Эта поверхность получает влагу в виде атмосферных осадков, путём её осаджения из влажного воздуха (роса, иней), с этой же поверхности происходит испарение влаги. Влияние почвенной и растительной влаги на микроклимат осуществляется в основном путём испарения, которое изменяет тепловой баланс и определяет количество и распределение водяного пара в нижних слоях атмосферы. В течение дня на испарение в виде скрытого тепла расходуется некоторая часть поступающей от солнца лучистой энергии. Над открытой водной поверхностью

¹ В научной литературе часто встречается термин «*подстилающая поверхность*», являющийся синонимом (Хромов С. П., Мамонтова Л. И., 1974).

в среднем от 40 до 90 % суммарной солнечной радиации расходуется на испарение в зависимости от размеров водного пространства. Для влажной оголённой почвы характерны несколько меньшие величины суммарной радиации, расходуемой на испарение, поскольку поверхность почвы высыхает и скорость испарения снижается, приближаясь в конце концов к нулю, когда вся почвенная толща высыхает почти полностью. При этом, соответственно, возрастает доля притока тепла в почву и непосредственное поступление тепла в атмосферу (Слейтер Р., Макилрой И., 1964).

Для влажной почвы влияние характера (типа) растительного покрова играет второстепенную роль в интенсивности испарения. При сплошном, плотном растительном покрове на хорошо увлажнённой почве испарение несущественно зависит от типа растительного покрова. Над влажной почвой при низком растительном покрове, получающем достаточное количество почвенной влаги, типичные градиенты упругости водяного пара близки к градиентам температуры, наблюдаемым в самое жаркое время дня. Упругость водяного пара непрерывно уменьшается с увеличением высоты над поверхностью почвы. Ночью испарение, как правило, невелико или даже имеет обратный знак и градиенты упругости водяного пара либо очень малы, либо также направлены в противоположную сторону.

В засушливых регионах бывшего СССР, характеризующихся сезонным типом выпадения осадков, в течение большей части времени года низкое содержание влаги в почве определяет очень слабое испарение или формирование одинаковых профилей упругости водяного пара днём и ночью.

В формировании микроклимата большая роль принадлежит ветру, влияющему на режим температуры и влажности воздуха. От ветра зависит эффективность переноса тепла и водяного пара, причём по вертикали этот перенос осуществляется главным образом путём турбулентной диффузии, а по горизонтали – путём адвекции¹. Вблизи земной поверхности интенсивность адвекции зависит в основном от скорости ветра и шероховатости подстилающей поверхности, а также от термической устойчивости воздуха, т.е. вертикального температурного градиента. Если скорость или направление ветра характеризуются резкими изменениями, то заметно усиливаются изменения во времени и до некоторой степени в пространстве микроклиматических условий.

Тепло- и влагооборот деятельной поверхности является основным фактором, определяющим микроклиматические особенности приземного слоя воздуха и верхних слоёв почвы. Вертикальные градиенты температуры и влажности в этих слоях прямо пропорциональны притоку тепла и парообразной влаги от деятельной поверхности в воздух или обратно – из воздуха к деятельной поверхности. В редких случаях тепло- и влагооборот

¹ Адвекция – горизонтальное движение воздушной массы в направлении градиента давления (Хромов С.П., Мамонтова Л.И., 1974).

деятельной поверхности равен нулю, т.е. когда нет ни прихода, ни расхода тепла и влаги, температура и влажность однородны во всём слое 0...200 см и несколько выше.

Радиационный баланс (R) или приход-расход радиационного тепла, поступающего от деятельной поверхности непосредственно в воздух или, наоборот, идущего из воздуха (Q), теплообмен в почве (T) и тепло, расходуемое на испарение (транспирацию) или выделяемое при конденсации (E) в совокупности составляют тепловой баланс деятельной поверхности. Таким образом, под тепловым балансом деятельной поверхности в обобщённом виде понимают баланс потоков тепла, проходящих через эту поверхность:

$$R + T + Q + E = 0. \quad (6.1)$$

М.И. Будыко (1971) отмечал, что к числу компонентов теплового баланса следует отнести приход-расход тепла, связанный с биологическими процессами – фотосинтезом и дыханием растений. Однако количество тепла, поглощаемое или выделяемое в результате биологических процессов, как правило, очень невелико и редко достигает нескольких процентов от радиационного баланса, что позволяет при «грубых» расчётах пренебрегать этими величинами. В (6.1) расходы тепла на испарение включены в общие расходы тепла на испарение.

Распределение радиационного тепла между остальными компонентами определяется соотношением величин теплопроводности, с одной стороны, деятельного слоя (почвы, воды, растительности), а с другой – воздуха и условиями, определяющими испарение влаги, её состояния – парообразного, жидкого или твёрдого.

Передача тепла, водяного пара и других примесей в воздухе осуществляется путём турбулентного перемешивания, которое выполняет основную роль в формировании микроклимата и местного климата, отличается большой изменчивостью во времени и в пространстве, особенно по вертикали. Резкое увеличение градиентов температуры и влажности воздуха по мере приближения к деятельной поверхности определяется убыванием в том же направлении турбулентного обмена, который у самой деятельной поверхности ничтожно мал.

Согласно «Толковому словарю по сельскохозяйственной метеорологии» (2002), тепловой баланс земной (подстилающей) поверхности является применением закона сохранения энергии к исследованию процессов тепло- и влагообмена в пределах рассматриваемых участков земной поверхности. Формой выражения теплового баланса является уравнение теплового баланса земной поверхности в виде:

$$R = LE + P + B, \quad (6.2)$$

где R – радиационный баланс, кал/см²·мин; E – испарение за вычетом конденсации, кал/см²·мин; L – скрытая теплота испарения, кал/см²·мин;

P – теплообмен с атмосферой, кал/см²·мин; B – теплообмен с почвой, кал/см²·мин¹.

Частным случаем теплового баланса подстилающей поверхности является тепловой баланс почв, который представляет собой совокупность всех видов поступления и расхода тепла в почве в их количественном выражении за определённый промежуток времени для конкретного слоя почвы. Тепловой баланс деятельной поверхности объединяет в единый комплекс не только процессы нагревания и охлаждения воздуха и почвы, но и две важные статьи влагооборота: испарение и конденсацию. Физическое обоснование тех или иных особенностей микроклимата и местного климата обычно сводится к выявлению особенностей теплового и водного балансов деятельной поверхности и определению роли его отдельных компонентов.

Подытоживая приведённые в этом разделе материалы, сформулируем основные выводы:

- микроклимат представляет собой распределение в приземном слое воздуха различных факторов, главными из которых являются: солнечная радиация, температура, влажность воздуха и скорость его перемещения (ветер), температура и влажность почвы;

- основная причина изменений микроклимата состоит в особенностях перераспределения тепла, получаемого от солнца разнообразными видами подстилающей поверхности при различных атмосферных условиях;

- при отсутствии движения воздуха и безоблачном небе влияние суточного движения солнца проявляется наиболее чётко, в этом случае микроклиматические условия изменяются от типично дневных к типично ночным при значительном контрасте между ними;

- влияние облаков проявляется главным образом в ослаблении суточного хода и контрастов между различными типами подстилающей поверхности, а также в величинах вертикальных градиентов;

- наличие влаги на подстилающей поверхности приводит к поглощению тепла при испарении с последующим уменьшением амплитуды колебания влажности;

- растительность, как правило, уменьшает «крайности» микроклимата, по сравнению с оголённой почвой, причем степень этого уменьшения зависит от типа и плотности растительного покрова;

- влияние ветра сказывается главным образом на уменьшении амплитуды колебаний температуры и влажности как во времени, так и в пространстве. Это происходит отчасти в результате более эффективного турбулентного перемешивания, способствующего обмену между

¹ 1 кал = 4,19 Дж; 1 Дж = 0,239 кал.

приземным слоем воздуха и более высокими слоями. Благодаря этому происходит ограничение изменчивости вдоль подстилающей поверхности и одновременно уменьшение вертикальных градиентов. Кроме того, ветер вызывает адвекцию тепла и водяного пара из районов с их избытком или недостатком:

- над шероховатой влажной поверхностью при пасмурном небе и сильном постоянном ветре условия в приземном слое становятся изотермическими при весьма небольших пространственных и временных изменениях;

- ни один из перечисленных факторов нельзя рассматривать как полностью независимый от других;

- при изучении микроклимата необходимо учитывать непосредственно предшествующие процессы, происходящие в приземном слое атмосферы. При устойчивых условиях достаточно знать время года и суток, в других случаях большое значение имеют направленность и интенсивность изменений основных факторов, формирующих микроклимат.

6.3. Особенности микроклимата дневного и ночного режимов температуры воздуха в тёплое полугодие

Цикличность геофизических процессов, происходящих в природе (периодическая смена дня и ночи, сезонов года), обусловленная наклоном земной оси ($23^{\circ} 27'$), определяет неодинаковую продолжительность светлой части суток в течение астрономического года в различных широтах нашей планеты. Подробнее об этом рассказано в работе «Основы сельскохозяйственной метеорологии», 2011, том I, главы 2 и 15.

Способность живых организмов к ориентации во времени, возникшая в процессе их эволюционной адаптации к такой цикличности, объясняет установившуюся периодизацию физиологических процессов в качестве ответной реакции на изменения факторов внешней среды: света, тепла, влаги и др. Эта способность получила название *биологическое время* живых организмов (или «биологические часы» – по терминологии, принятой в книге «Биологические часы» под ред. С. Э. Шноля, 1964).

Одним из способов выражения биологического времени в агрометеорологии и агроклиматологии является метод набора сумм эффективных (активных) температур:

$$\sum t(\tau) = \sum_{j=1}^{\tau} (t_j - B), \quad (6.3)$$

где t_j – средняя суточная температура воздуха j -х суток, $^{\circ}\text{C}$; τ – физическое время, отсчитываемое от даты всходов (сева) растений; B – пороговая температура ($^{\circ}\text{C}$), принятая при конкретных расчётах (5, 10, 15 $^{\circ}\text{C}$).

Суммирование по j происходит по суткам в пределах межфазного периода развития растений или от даты сева культуры до её полной спелости.

Температура среды оказывает существенное воздействие на характер и интенсивность основных физиологических процессов, происходящих в живых организмах. В работах многих исследователей были показаны различия в режиме температуры воздуха в дневные и ночные часы. Наибольший вклад в исследование влияния дневных и ночных температур воздуха был сделан З.А. Мищенко (1962, 1984, 1986).

Автором для расчёта средней дневной и средней ночной температуры воздуха были использованы многолетние материалы по суточному ходу температуры воздуха из справочников по климату СССР. Дневная температура определялась как средняя сумма температуры воздуха ($\sum T_d$) от времени восхода до захода солнца, ночная – как средняя сумма температуры воздуха ($\sum T_n$) от захода до восхода солнца:

$$T_d = \sum T_d / N_d, \quad (6.4)$$

$$T_n = \sum T_n / N_n, \quad (6.5)$$

где N_d и N_n – число часов за день и за ночь соответственно.

На северной границе земледелия продолжительность дня летом составляет в среднем 20...23 часа в сутки, а на юге территории бывшего СССР – 14...15 часов. Таким образом, с изменением широты места дневная и ночная температуры изменяются и количественно (продолжительность), и качественно, поскольку представляют собой среднее значение из температур за различное число часов, характеризующих светлую и тёмную часть суток. Для восполнения недостающих данных по дневным и ночным температурам З.А. Мищенко применила метод расчёта, суть которого заключается в определении дневной температуры по температуре воздуха в 13 ч и ночной температуры – по среднему значению минимума температуры воздуха.

Выявление этой зависимости между названными характеристиками позволило по климатологическим данным рассчитать дневные и ночные температуры воздуха по графику с ошибкой, в среднем не превышающей $\pm 1^\circ\text{C}$ (Мищенко З.А., 1984).

Географическое распределение дневных и ночных температур носит сложный характер, отражая влияние основных факторов, определяющих особенности термического режима дня и ночи в летний период, – притока тепла от Солнца, атмосферной циркуляции, степени континентальности климата, характера формы подстилающей поверхности (глава 3, рис. 3.4 и 3.5).

Наименьшие значения дневных температур $\sum T_d$ характерны для северных и северо-восточных регионов страны (400...800 $^\circ\text{C}$), наибольшие наблюдаются в регионах Средней Азии (6000...6400 $^\circ\text{C}$). На карте сумм ночных температур воздуха $\sum T_n$ в северных и северо-восточных регионах выделяются большие земельные территории, где $\sum T$ выше

10 °С не наблюдаются. Значения $\sum T_H$ возрастают в направлении с севера и северо-востока на юг и юго-запад. Таким образом, диапазон географических различий в распределении $\sum T_H$ варьирует по территории страны от 400 до 4400 °С. Анализ сравнительной оценки географического распределения $\sum T_D$ и $\sum T_H$ с аналогичным распределением $\sum T_{ср\text{ед.}}$ позволил установить, что в северных регионах прибавка тепла за счёт дневного нагрева составляет более 100...200 °С, в то время как ночью суммы тепла уменьшаются на 300...500 °С. В средней полосе России дополнительное тепло, которое могут использовать растения днём, возрастает до 300...700 °С, при снижении ночью до 600...900 °С. В южных и юго-восточных районах Среднеазиатского региона прибавка тепла днём достигает 900...1100 °С при снижении тепловых ресурсов ночью до 1100...1500 °С. Суммарный эффект при оценке тепловых ресурсов за день выражается прибавкой тепла в северных регионах страны на 40 %, а в южных районах Средней Азии на 80 %, по сравнению с $\sum T_{ср\text{ед.}}$. Относительное расхождение между суммами ночных и суточных температур воздуха изменяется в обратном направлении. В северо-западных регионах $\sum T_H$ примерно на 50...60 % меньше $\sum T_{ср\text{ед.}}$, а в южных регионах Средней Азии – только на 15...25 %.

Самые малые величины T_D и T_H наблюдаются на островах и побережьях арктических морей, составляя, соответственно, 2...4 и 1...2 °С. Наибольшие значения этих величин отмечены в юго-восточных районах пустыни Каракумы (Республика Туркменистан) и в горных долинах Республики Таджикистан, достигающие 32...34 и 24...26 °С соответственно. В районах с резко континентальным климатом – Якутии и Забайкалья, расположенных примерно на той же широте, что и западные районы европейской части страны, дневные температуры в среднем на 1–2 °С выше, а ночные температуры на 1–2 °С ниже, чем на ЕЧС.

Преимущества раздельной характеристики термического режима дня и ночи иллюстрируются изменением этих температур в сравнении с уровнем средней суточной температуры воздуха $T_{ср\text{ед.}}$ (рис. 6.6).

Как видно на этом рисунке, в северных районах с продолжительностью дня 20...23 ч в сутки дневная температура примерно на 0,5 °С выше $T_{ср\text{ед.}}$, а ночная температура на 1–1,5 °С ниже. В южных районах бывшего СССР, где продолжительность дня существенно меньше, чем в крайних северных регионах, T_D примерно на 2,5–3,0 °С больше $T_{ср\text{ед.}}$, а T_H на 3,5–4,5 °С меньше.

На рис. 6.7 представлена расчётная номограмма изменения продолжительности дня (N_D) и ночи (N_H) в зависимости от географической широты места и времени года.

Суммарным показателем термических различий дня и ночи является разность ($T_D - T_H$), изменяющаяся в разных физико-географических районах бывшего СССР не только по широте, но и в зависимости от степени

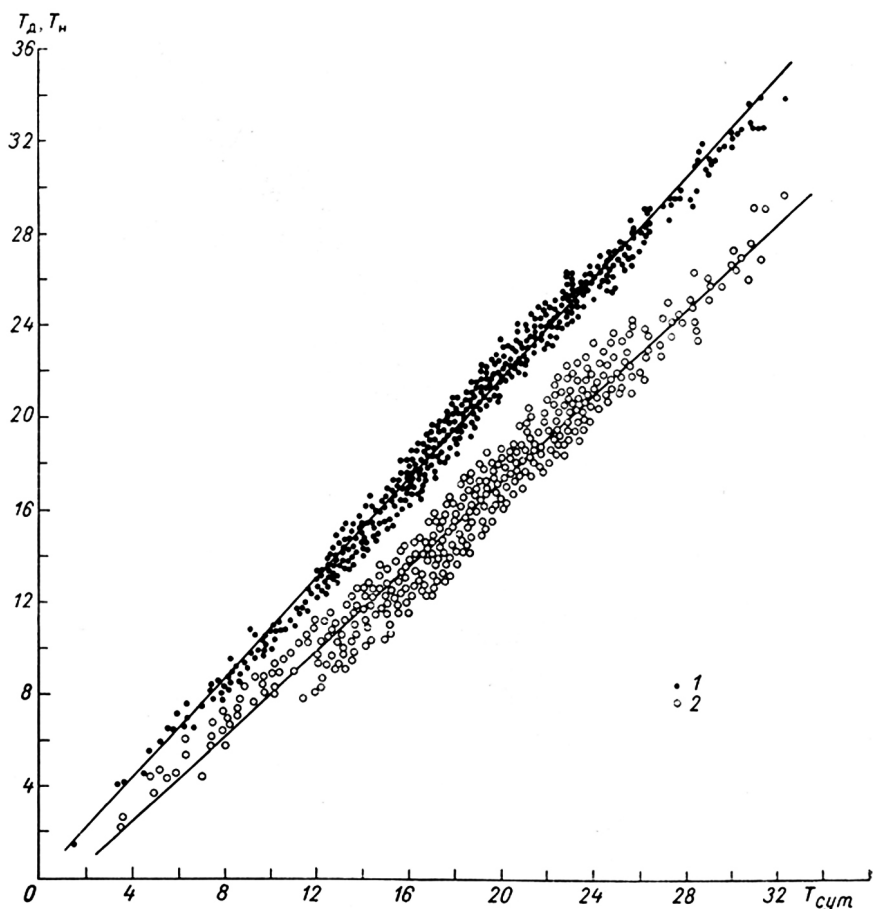


Рис. 6.6. Зависимость между дневной, ночной и средней температурой воздуха ($T_{\text{сред. сум}}$) в июле:

1 – дневная температура; 2 – ночная температура

континентальности климата и характера подстилающей поверхности. Эта разность изменяется в направлении с северо-запада на восток и юго-восток примерно в 3–4 раза, составляя в северных регионах 1–2 °С, а в юго-восточных регионах Средней Азии – 8 °С. В континентальных районах Среднесибирского плоскогорья и в Забайкалье разность ($T_{\text{д}} - T_{\text{н}}$) значительно увеличивается, по сравнению с ЕТС и Западной Сибирью. В континентальных районах $\sum T_{\text{д}}$ на 200...500 °С больше, а $\sum T_{\text{н}}$ на 300...1000 °С меньше, чем в западных, и особенно в приморских регионах.

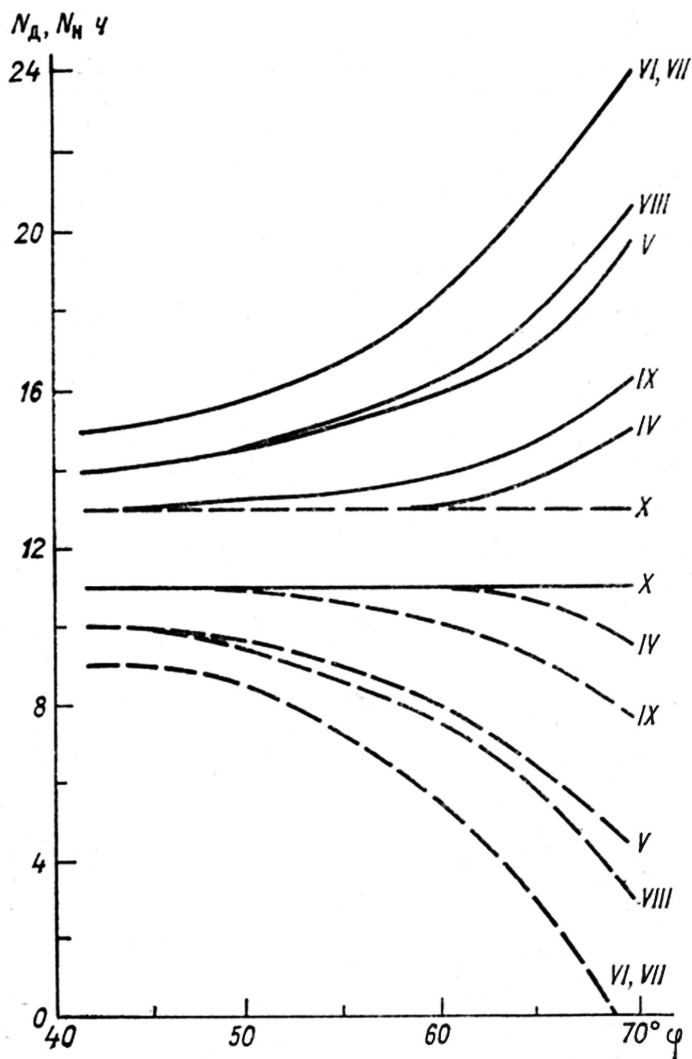


Рис. 6.7. Изменение продолжительности дня N_d и ночи N_n (часы) в зависимости от географической широты местности (φ) и времени года (месяца). Сплошные кривые – продолжительность дня (N_d), пунктирные кривые – продолжительность ночи (N_n)

Для практического использования тепловых ресурсов отдельно дня и ночи необходимо использовать знания о микроклиматической их изменчивости в зависимости от рельефа местности (табл. 6.2).

Таблица 6.2

**Микроклиматическая изменчивость ($^{\circ}\text{C}$) $\sum T_d$ и $\sum T_n$ выше 10°C
в холмистом рельефе Нечернозёмной зоны европейской части России
(Мищенко З.А., 1984)**

Мезорайон по величине базиса эрозии ΔH , м	Параметр	Тип микрорельефа			
		вершина, верхняя часть склона	середина склона	широкая долина	замкнутая долина, котловина
Слабовсхолмлен- ный рельеф ($\Delta H \leq 50$ м, уклоны $3 \dots 8^{\circ}$)	$\sum T_d$ $\sum T_n$	-50...-100 100...150	≤ -50 ≤ 50	≥ 50 -100	50...100 -100...-150
То же в континентальных юго-восточных районах	$\sum T_d$ $\sum T_n$	-100...-150 150...200	-50...-100 50...100	50...100 -100...-150	100...150 -150...-200
Холмистый рельеф ($\Delta H = 50 \dots 150$ м, уклоны $5 \dots 12^{\circ}$)	$\sum T_d$ $\sum T_n$	-150...-200 200	≥ -100 ≥ 100	100...150 -150...-200	150...200 -200...-300
То же в континентальных юго-восточных районах	$\sum T_d$ $\sum T_n$	-200 200...300	-100...-150 100...150	150...200 -200...-300	200...300 -300...-350

Примечание. Знак «-» – уменьшение $\sum T_d$, $\sum T_n$, по сравнению с открытым местом. Остальные цифры означают увеличение.

Суммы дневных и ночных температур воздуха биологически более точно описывают влияние температурного фактора на жизнедеятельность растений – фотопериодизм и термопериодизм, определяющие темпы развития, продуктивность и качество сельскохозяйственных культур. Таким образом, знания особенностей микроклимата дня и ночи могут быть использованы при:

- рациональном размещении и микрорайонировании сельскохозяйственных культур, их новых сортов и гибридов с использованием экологических ниш конкретной местности и её микроклимата;
- совершенствовании специализации сельскохозяйственного производства в зональном и азональном пространствах с учётом местных особенностей климата и микроклимата;
- агро- и микроклиматическом обосновании дифференцированных технологий возделывания культур, локальных мелиораций на ограниченных территориях в целях экономии энергоресурсов и охраны окружающей среды.

6.4. Микроклимат ландшафтов, фитоклимат сельскохозяйственных полей

Как было отмечено выше, осреднённые данные многолетних наблюдений сети метеорологических станций характеризуют общие климатические особенности той или иной территории, зоны, района, пункта. Такие

материалы не отражают микроклиматические особенности сельскохозяйственных полей, ландшафта или иных местообитаний.

Впервые детальное микроклиматическое изучение территории и составление крупномасштабных карт было выполнено Г.Т. Селяниновым в середине 30-х гг. прошлого столетия. В дальнейшем в учреждениях Росгидромета – в Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова (г. Санкт-Петербург), в ФГБУ «ВНИИСХМ» (г. Обнинск), а также в ряде национальных гидрометеорологических служб стран СНГ (например в Узбекистане, Украине, Армении и др.) – были выполнены крупные исследования в области микроклиматологии.

Получение устойчивых и высоких урожаев сельскохозяйственных культур предусматривает, наряду с современными агротехническими мероприятиями, интенсивное использование всех земельных угодий на фоне повышения культуры земледелия. Имеется в виду квалифицированный учёт не только агроклиматических, почвенных, но и микроклиматических особенностей каждого отдельного поля или конкретного участка местности.

Микроклиматические особенности разных ландшафтов, местообитаний и полей, занятых различными сельскохозяйственными культурами, столь разнообразны и многочисленны, что изучить микроклимат каждого участка земной поверхности практически невозможно. Поэтому при микроклиматическом изучении основное внимание уделяют особенностям физических процессов приземного слоя атмосферы и верхних горизонтов почвы в наиболее типичных участках сельскохозяйственных полей, ландшафтов или участков местности. *Типичный участок – это условное понятие, используемое при выборе наблюдательных участков по комплексу внешних признаков среды: рельефу, почвам, растительному покрову или осреднённому состоянию сельскохозяйственной культуры: густоте стояния растений на единице площади, их высоте, фазе развития и т.п.* Поскольку наблюдательные участки выбираются визуально, то понятие «типичность» всегда отражает субъективную оценку лица, выбирающего участок.

Методы микроклиматических наблюдений (измерений) разработаны известными учёными М.И. Будыко, И.А. Гольцберг, С.А. Сапожниковой, А.Ф. Чудновским, Д.Л. Лайхтманом, Б.А. Айзенштатом и др. Подробно организация проведения микроклиматических наблюдений (измерений) и методики расчётов микроклиматических характеристик изложены в «Руководстве по изучению микроклимата для целей сельскохозяйственного производства» (1979).

В качестве примера рассмотрим особенности изучения микроклиматической изменчивости влажности почвы. Детальный учёт запасов влаги в почве является одним из необходимых условий для определения влагообеспеченности посевов. В условиях выровненного рельефа влагозапасы

почвы на сельскохозяйственных полях при сходной агротехнике определяются климатическими условиями, характером почвенных разностей и типом возделываемой культуры. В пересечённой местности влагозапасы почвы в большой степени зависят не только от перечисленных факторов, но и от места расположения исследуемых участков. Так, влажность почвы на вершине холма и в верхней части склонов в увлажнённой зоне обычно оказывается меньше, чем у подножия холма в сухой зоне.

Причиной неравномерного увлажнения различных участков в холмистом рельефе является поверхностный и внутрисочвенный сток, неодинаковый расход влаги на испарение со склонов различной крутизны и ориентации, а также перераспределение осадков в зависимости от направления влагонесущих потоков. В условиях холмистого рельефа проводятся массовые определения запасов продуктивной влаги на различно экспонированных склонах, в разных высотных участках склона (верхняя, средняя и нижняя части), в максимально сближенные сроки взятия всех почвенных образцов. Этому должны предшествовать определения агрогидрологических (водно-физических) свойств почвы в различных условиях рельефа.

Весной для роста растений наиболее важны запасы продуктивной влаги в слое почвы 0...20 см, хотя в этом слое величина запасов влаги подвержена наибольшим вариациям. Летом в корнеобитаемых горизонтах почвы (до 50...100 см) запасы продуктивной влаги различаются в зависимости от местоположения больше, чем весной. Они изменяются от 25...50 мм в верхних частях южных склонов до 150 мм и более – у подножия склонов.

Данные о запасах влаги в почве в различных местоположениях в пределах конкретного хозяйства обычно характеризуются большой пестротой. Для получения сравнимых данных их необходимо «привязать» к многолетним средним значениям ближайшей метеорологической (агрометеорологической) станции, опубликованных в специализированных справочниках «Средние многолетние и вероятностные характеристики..., 1979» или в справочниках «Агроклиматические ресурсы области, края, республики» (1971–1978).

Расчёт коэффициента увлажнённости производится по формуле (Руководство..., 1979):

$$K_W = W_C / W_P, \quad (6.6)$$

где K_W – коэффициент увлажнённости (безразмерная величина); W_C – запасы продуктивной влаги в корнеобитаемом слое почвы на склоне (мм); W_P – запасы влаги в том же слое на ровном участке (мм).

Затем с помощью полученных в результате наблюдений значений K_W рассчитывают многолетние запасы продуктивной влаги для всех местоположений, в которых проводились полевые определения запасов почвенной влаги (табл. 6.3).

Таблица 6.3

**Расчёт коэффициента увлажнённости и многолетние запасы
продуктивной влаги**

Местоположение	K_W	W_N	K_W	W_N
Вершина холма	0,45	25...50	—	—
Склоны	Южный		Северный	
Верхняя часть	0,40	25...50	0,95	75...100
Средняя часть	0,55	25...50	1,0	75...100
Нижняя часть	0,95	75...100	1,30	100...125
Подножие	1,0	75...100	1,70	125...150
Ровное место	1,0	75...100	—	—

Пример. В результате выполненных полевых определений получены значения K_W (табл. 6.3). Многолетние запасы влаги в слое 0...50 см по данным ближайшей МС, расположенной на равнине, составляют 75...100 мм. Путём умножения этих данных на соответствующий K_W получаем средние многолетние запасы продуктивной влаги W_N (мм) для слоя 0...50 в различных местоположениях на территории изучаемого хозяйства.

Далее проводится микроклиматическое крупномасштабное картирование запасов продуктивной влаги (рис. 6.8). На карте проводится

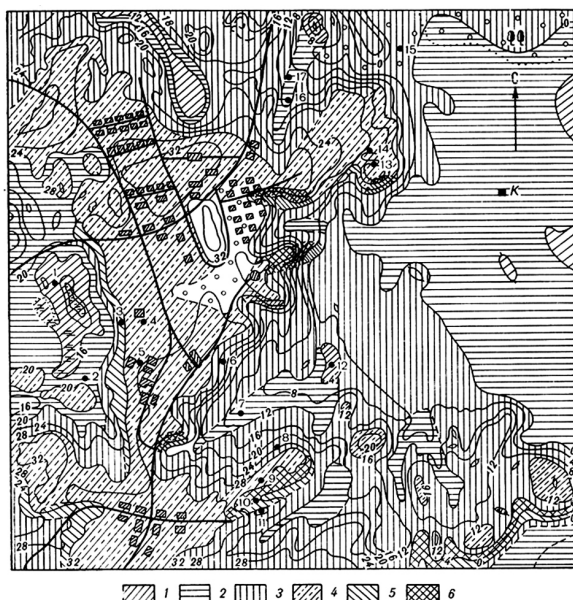


Рис. 6.8. Запасы продуктивной влаги (мм) в слое 0...50 см летом:
 1 – 150 и более; 2 – 125...150; 3 – 100...125; 4 – 75...100;
 5 – 50...75; 6 – 25...50

выделение ровных участков, отмечаются четыре склона, ориентированные по странам света; при крупномасштабном картировании на склонах выделяют три части по высоте (верхняя, средняя, нижняя).

Выделенные участки оконтуриваются и раскрашиваются или заштриховываются соответственно грациям влажности по таблице. В летние месяцы диапазон изменения запасов почвенной влаги больше по сравнению с весной: в верхних частях южных и западных склонов 25...50 мм, в понижениях 150 и более мм.

Фитоклимат сельскохозяйственных полей

Исследование режима метеорологических элементов и составляющих радиационного и теплового балансов в среде растений представляет научно-практическую задачу физики приземного слоя атмосферы, поскольку в этом слое формируется своеобразный режим радиационных условий, тепло- и влагообмена, устанавливаются характерные вертикальные профили метеорологических элементов. Великий русский физиолог растений К.А. Тимирязев (1962) считал, что «предел плодородия данной площади земли определяется не количеством удобрений, которое мы могли бы ей доставить, не количеством влаги, которую мы её оросим, а количеством световой энергии, которую посылает на данную площадь Солнце».

Знание закономерностей формирования метеорологического режима в процессе развития растений позволяет правильно вести разработку мероприятий, направленных на управление (смягчение) микроклимата сельскохозяйственного поля в интересах повышения его продуктивности.

Структура каждого растительного сообщества и даже его отдельных компонентов оказывает существенное влияние на формирование микроклимата окружающей среды. В свою очередь изменение микроклимата обуславливает не только различия в развитии, росте и формировании продуктивности растений, но и неоднородность характера и состояния растительного и почвенного покровов.

Согласно ГОСТ 17713–89, *фитоклимат* – это микроклимат растительного покрова и корнеобитаемых горизонтов почвы. «Под фитоклиматом понимают особенности распределения климатических элементов во всём слое растительного покрова как в надземной, так и в подземной частях его, например среди зерновых культур, в саду, в лесу» (Микроклимат СССР, 1967). Фитоклимат зависит от микроклиматических особенностей окружающей среды, но главным образом от структуры посева (насаждения), т.е. от формирующихся внутри растительного покрова условий. Он изменяется в процессе роста и развития растений, а также в зависимости от складывающихся условий погоды и применяемой агротехники. Например, в начальный период вегетации посевов (или

естественной растительности) микроклиматические различия определяются только влиянием рельефа (микрорельефа) местности или ориентацией и крутизной склона. По мере развития высоты и плотности растений на единице площади изменяется радиационный, тепловой, влажностный режимы в среде растений. Плотные посевы препятствуют проникновению солнечной радиации к почве, затрудняют турбулентный обмен и испарение с поверхности почвы под пологом растений. Почва меньше нагревается и меньше теряет тепла.

Как известно, плотность растений характеризуется не только их количеством на единице площади, но и габитусом растения – его высотой, структурой, разветвленностью, степенью облиственности, т.е. расположением листьев и их количеством в единице объёма. К информативным биометрическим характеристикам видов (сортов) сельскохозяйственных культур относятся количество растений на единице площади и общая поверхность растения или *индекс листовой поверхности*¹, поглощающей ФАР, и осуществляющий ассимиляцию углекислоты.

Н.А. Ефимовой выделены три основных типа структуры посева возделываемых культур по распределению общей площади поверхности по вертикальному профилю их высоты: тип I – с максимумом общей площади поверхности растений, расположенной в верхней или средней части стеблестоя; тип II – с максимумом общей площади поверхности растений в нижней части стеблестоя; тип III – с более или менее равномерным распределением общей площади элементов растений по высоте стеблестоя (рис. 6.9).

В исследованиях Х.Г. Тооминга, Ю.К. Росса и др. была определена количественная зависимость изменения потоков интегральной ФАР от площади листовой поверхности растений. В работах Н.А. Ефимовой выявлены различия в закономерностях поглощения ФАР не только в зависимости от абсолютной величины индекса общей поверхности растений, но и от угла наклона листовых пластинок. Например, в посеве пшеницы, у которой широкие листовые пластинки были расположены почти горизонтально, фотосинтетически активная радиация поглощается на 10...15 % больше, чем в стеблестое озимой ржи, где преобладали вертикально расположенные стебли и узкие листья, мало отклоняющиеся от вертикали (рис. 6.10). Эти же самые особенности травостоя, влияющие на проникновение радиации под полог растительного покрова, в значительной степени определяют термический режим поверхности почвы, и, таким образом, величина поверхности травостоя оказывается в прямой связи с температурным режимом почвы как на поверхности, так и на

¹ Индекс листовой поверхности – отношение площади всех листьев (одной их стороны) посева (фитоценоза) к площади занимаемой им территории (Толковый словарь по сельскохозяйственной метеорологии, 2002).

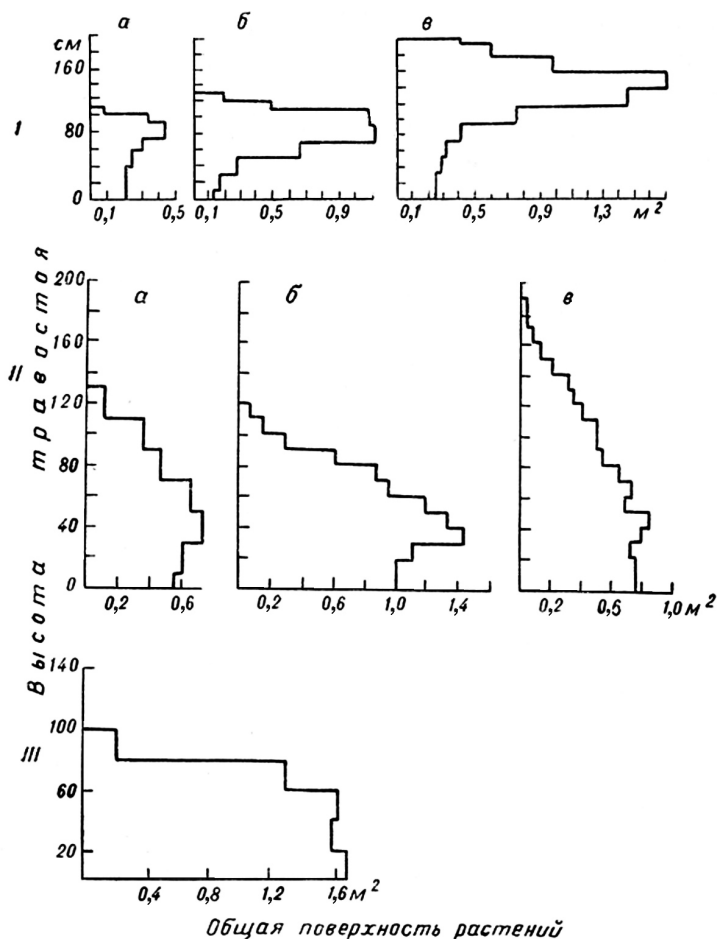


Рис. 6.9. Вертикальное распределение общей площади фотосинтезирующей поверхности растений.

Тип I: а – кукуруза, б – конские бобы, в – донник белый;
тип II: а – озимая пшеница, б – озимая пшеница сорта Сиверская,
в – озимая рожь сорта Белогорка; тип III – пшеница яровая

глубинах. Формирование температурного режима внутри растительного покрова в дневные и ночные часы различно. В дневные часы величина и знак градиента температуры оказывается в тесной связи с соотношением между составляющими теплового баланса деятельного слоя: между затратами тепла на испарение и турбулентным теплообменом.

Последние элементы определяются условиями влажности почвы и воздуха и зависят от фаз развития растений.

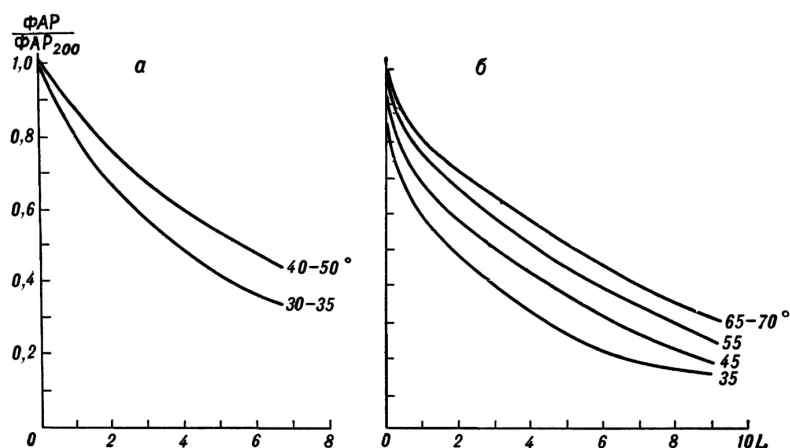


Рис. 6.10. Зависимость коэффициента пропускания фотосинтетически активной радиации ($\text{ФАР} / \text{ФАР}_{200}$) от общей площади поверхности растений (L) при разных высотах солнца и различной степени горизонтальности расположения листьев: а – озимая рожь сорта Белогорка; б – пшеница яровая (Таджикистан)

Таким образом, основными факторами, формирующими микроклимат сельскохозяйственных культур (полей), являются теплобалансовые характеристики подстилающей поверхности и биометрические характеристики посевов. В зависимости от типа погодных условий, запасов влаги и фазы развития растений меняется соотношение между составляющими теплового баланса и формируется соответствующая *стратификация*¹ приземного слоя воздуха. Особенности вертикального профиля всех метеорологических элементов внутри травостоя определяются абсолютной величиной общей площади элементов растений и уровнем расположения слоя с максимальной площадью элементов растений. Выявленные закономерности формирования фитолимата сельскохозяйственных культур позволяют оценить основные особенности метеорологического режима внутри травостоя, не выполняя для этого всего сложного комплекса теплобалансовых наблюдений, а лишь учитывая простые характеристики погодных условий (облачность, скорость ветра, температуру и влажность воздуха и почвы), фазу развития и тип травостоя. В пределах одной и той же почвенно-климатической зоны, в разных фитоценозах существенно различаются освещённость растений, температура и влажность воздуха и почвы, скорость ветра. Подробнее о проникновении солнечной радиа-

¹ Стратификация – распределение температуры в слое воздуха (Хромов С.П., Мамонтова Л.И., 1974).

ции в различные типы растительного покрова, в том числе в посевы, рассказано в работе «Основы сельскохозяйственной метеорологии», 2011, том I, глава 7, раздел 7.2.1.

При различной структуре посева фитоклимат одной и той же сельскохозяйственной культуры может изменяться в широких пределах, а при одинаковой структуре посева разных культур он может быть сравнительно одинаковым. Регулируется фитоклимат путём изменения плотности посева (густоты стояния растений на единице площади с учётом общего габитуса возделываемых растений), изменения расположения грядок по отношению к падающим солнечным лучам, способов обработки междурядий, поливов и т. п. Различия в температуре воздуха, измеренной в психрометрической будке, и в среде растений могут достигать 2...4 °С в зависимости от особенности культуры, плотности посева и его расположения на различных формах рельефа.

В табл. 6.4 приведены данные натурных фитоклиматических градиентных измерений за суточным ходом температуры воздуха на разных высотах на полях, занятых различными сельскохозяйственными культурами, возделываемыми на полях агрометеорологической станции «Бозсу» (Узбекистан).

Таблица 6.4

Суточный ход температуры воздуха по высотам на полях, занятых картофелем, кукурузой и люцерной, в сравнении с пашней без растений (Ф.А. Муминов)

Время измерений, ч	Высота измерений, см	Температура воздуха, °С			
		пашня без растений	картофель	кукуруза	люцерна
00	20	16,2	17,2	17,1	14,8
	50	16,4	18,0	17,7	15,5
	150	16,5	19,8	17,8	16,5
04	20	16,0	16,9	16,5	14,3
	50	16,1	17,2	17,1	15,3
	150	16,2	18,7	17,5	16,2
08	20	26,8	25,7	24,5	22,7
	50	26,4	25,8	25,0	24,1
	150	26,6	25,7	24,5	22,8
12	20	35,3	33,3	32,8	28,1
	50	34,0	33,0	32,5	28,9
	150	33,8	33,3	32,3	31,2
16	20	36,6	33,7	32,8	27,4
	50	36,7	33,8	32,8	28,7
	150	35,2	34,6	33,2	32,3
20	20	22,4	20,1	20,6	17,4
	50	22,8	20,4	20,3	17,4
	150	23,3	24,2	22,5	22,6

Высота ботвы картофеля – 50...55 см – измерялась в фазу роста клубней; высота кукурузы – около 200 см (фаза созревания); высота люцерны в начале фазы цветения составляла 60...65 см, а к концу этой фазы достигла 100 см.

Анализ этой таблицы приводит к следующим заключениям. В течение суток температура воздуха на люцерновом поле ниже, чем на других сравниваемых посевах. В дневные, особенно в послеполуденные часы, различия в температуре воздуха весьма значительны: на высоте 20 см они достигают 10 °С для участков пашни – люцерновое поле. Наибольшие разности наблюдаются в вечерний период на всех высотах. Так, в слое 20...50 см разности достигают 8...11 °С между пашней и люцерновым полем, 4...7 °С – между пашней и кукурузным полем, а на высоте 150 см разности составляют, соответственно, 3,6, 2,7 и 0,5 °С.

Смещение максимальных разностей на вечерние часы объясняется так: ночью и утром разности температур воздуха невелики; после восхода солнца с увеличением испарения на полях картофеля, кукурузы и люцерны разности непрерывно возрастают, что связано с более быстрым ростом температуры на пашне при незначительных затратах тепла на испарение. После полудня температура на пашне и на других участках начинает убывать вследствие уменьшения притока лучистой энергии. Однако благодаря тому, что испарение на картофельном, кукурузном и люцерновом полях ещё достаточно велико, температура убывает быстрее, чем на пашне, и разности продолжают возрастать. После 19 ч в связи с резким уменьшением испарения на исследуемых посевах разности температур начинают быстро убывать.

Весьма показательно сравнение амплитуды температуры воздуха между пашней и исследуемыми посевами различных культур (табл. 6.5).

Таблица 6.5

Средние суточные амплитуды температуры воздуха на пашне и в среде сельскохозяйственных культур и их разности (Ф.А. Муминов)

Высота измерений, см	Пашня	Картофель	Кукуруза	Люцерна	Пашня – картофель	Пашня – кукуруза	Пашня – люцерна
20	22,1	17,6	17,2	14,1	4,5	4,9	8,0
50	21,3	17,1	16,5	14,0	4,2	4,8	7,3
150	19,6	16,9	15,9	15,9	3,5	3,7	3,7

Средние суточные амплитуды оказались наибольшими на открытой пашне, на высоте 20 см; с высотой величина амплитуды убывает. Разность температур по срокам измерений между пашней и в среде изучаемых культур изменялась в течение суток от 3 до 8 °С.

Более низкие температуры воздуха в среде посева люцерны объясняются тем, что этой культуре свойственна интенсивная транспирация.

Кроме того, на люцерновом поле наблюдается необычное распределение амплитуд с высотой: если на пашне, картофельном и кукурузном полях амплитуды с высотой непрерывно убывают, то на люцерновом поле амплитуда с высотой увеличивается. Таким образом, на люцерновом поле наблюдаются два максимума суточных амплитуд: один вблизи поверхности почвы (за счёт некоторого дневного нагрева поверхности почвы), а второй непосредственно над люцерной, что указывает на образование второй деятельной поверхности на этом уровне за счёт интенсивной транспирации. Аналогичное явление было отмечено над посевами орошаемых культур – хлопчатника и др.

Характер распределения температуры воздуха ($^{\circ}\text{C}$) по высоте (z) на сравниваемых полях различен. В дневные часы на пашне температура убывает с высотой при наличии больших адиабатических градиентов¹ в слое до 50 см, ночью наблюдается приземная инверсия температур, более выраженная в слое 20...50 см (рис. 6.11).

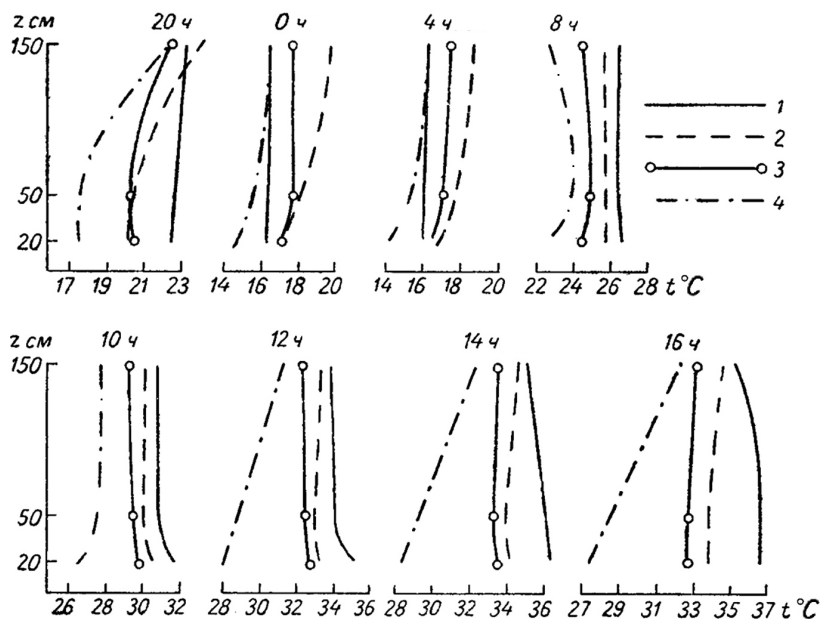


Рис. 6.11. Распределение температуры воздуха по высоте в среде посевов различных культур над пашней:

1 – пашня; 2 – картофельное поле; 3 – кукурузное поле;
4 – люцерновое поле (Муминов Ф. А., 1963)

¹ Адиабатический градиент температуры – величина изменения температуры в массе воздуха при её адиабатическом перемещении на единицу высоты (на 100 м) (Хромов С. П., Мамонтова Л. И., 1974).

На кукурузном поле в дневные и ночные часы температура воздуха изменяется с высотой незначительно. На люцерновом поле вертикальные профили в дневные и ночные часы характеризуются достаточно быстрым ростом температуры с высотой. Таким образом, над люцерновым полем формируется инверсия температуры, которая устойчиво сохраняется в течение суток.

Наибольшего развития инверсия достигает в дневной период (12...16 ч), а также вечером в слое 50...150 см. Причиной круглосуточной инверсии на люцерновом поле являются большие затраты тепла на испарение и транспирацию.

Известно, что для наступления каждой очередной фазы развития растений необходимо накопление определённых для каждого вида (сорта) возделываемой культуры сумм температур (Бабушкин Л. Н., 2004). Например, для прохождения межфазного периода от цветения до раскрытия первых коробочек хлопчатника среднеспелого сорта необходим набор сумм эффективных температур (выше 13 °С) 700...710 °С. Анализ многолетних наблюдений за развитием этой культуры показал, что эта сумма эффективных температур, рассчитанная по данным, полученным на стандартной высоте 2 м (в метеорологической будке), изменяется от 620 до 850 °С (Ф. А. Муминов). Если же для расчёта использовать данные по температуре воздуха в среде растений (на высоте 50 см), то для этого межфазного периода хлопчатнику необходимо накопление суммы эффективных температур 590 °С.

Аналогичные расчёты, выполненные в различных районах хлопководства в Среднеазиатских республиках, показали, что сумма эффективных температур 590 °С для этого межфазного периода является практически постоянной при измерениях в среде хлопчатника на высоте 50 см. Некоторые изменения этой суммы объясняются различиями в условиях влагообеспеченности растений.

Многочисленные исследования микроклиматического режима в посевах различных сельскохозяйственных культур в разных почвенно-климатических зонах доказали, что данные о температуре и влажности воздуха на уровне 2 м не могут с достаточной точностью характеризовать условия, формирующиеся в среде растений. Поэтому исследования фитолимата сельскохозяйственных полей имеет большое практическое значение в системе оперативного агрометеорологического обеспечения растениеводческой отрасли аграрного сектора экономики.

6.5. Пути и методы улучшения фитолимата сельскохозяйственных угодий

В практике сельскохозяйственного производства широко применяются различные методы улучшения мезо- и микролимата с целью

улучшения условий для роста, развития и повышения продуктивности возделываемых культур, природных пастбищных фитоценозов, снижения возможных потерь от неблагоприятных условий. Важное место в улучшении условий быта и трудовой деятельности людей отведено также мероприятиям по улучшению планировки населённых пунктов, их озеленению и обводнению.

Комплекс технических (и агротехнических) мероприятий, направленных на улучшение мезоклимата и микроклимата, в том числе радиационного и теплового режимов сельскохозяйственных угодий, водного и теплового режимов почвы, называется *мелиорацией*. Мелиорация осуществляется путём проведения работ по созданию оросительных систем, осушению заболоченных территорий, посадке полезащитных лесных полос, а также развитию растениеводства в условиях защищённого грунта и т. п.

Водная мелиорация. Одним из наиболее древних приёмов улучшения мезо- и микроклимата является *орошение*, коренным образом изменяющее водный и термический режимы сельскохозяйственных угодий.

Различные виды водной мелиорации особенно широко применяются в странах и регионах с засушливым климатом. В южных регионах России и в сопредельных странах СНГ многие сельскохозяйственные культуры возделываются на орошаемых полях: хлопчатник, люцерна, бахчевые, многие фрукты, теплолюбивые зерновые культуры и т. п. Крупномасштабное орошение возможно только при развитии мощного гидротехнического и ирригационного строительства, при правильной эксплуатации и режимов водохранилищ, современных, технически оснащённых оросительных каналов, водораспределительных гидроузлов и др. Однако при орошении неизбежны непроизводительные потери влаги путём испарения с открытой поверхности водоёмов (особенно в условиях жаркого климата), поверхностного стока (при ливневых осадках) и фильтрации воды в глубокие горизонты почвогрунтов при поливах по бороздам или напуском (например чеки на рисовых полях). Для повышения результативности орошения агрометеорологи среднеазиатских государств разработали рекомендации по срокам и нормам полива основных сельскохозяйственных культур с учётом их биологических особенностей и складывающихся агрометеорологических условий конкретных лет. В современных условиях принципиальное значение приобрела проблема водodelения на трансграничных реках, питающих своей влагой несколько соседних суверенных государств.

Наиболее прогрессивной и экономичной формой орошения признано *капельное орошение* – нормированная подача воды к растениям по специально проложенным по земле трубкам. Нормы расхода воды рассчитывают с учётом агрогидрологических свойств почвы, потребностей выращиваемых культур во влаге. Этот способ позволяет снизить расходы

дорогостоящей пресной воды на 30 %, по сравнению с расходом при традиционных методах орошения по бороздам и напуском.

В условиях России эффективным методом повышения весенних влагозапасов в почве является *снегозадержание*. Приёмы снегозадержания различны: сохранение на зиму стерни зерновых культур и высокостебельных культур (кукуруза, подсолнечник и др.), снегопахота, установка снегозадерживающих щитов, полесозащитные лесные полосы и др. Подробнее о снежных мелиорациях будет рассказано в главе 7 настоящего тома.

Все методы обработки почвы способствуют улучшению микроклиматических условий в её верхних горизонтах. Например, при рыхлении почвы улучшаются условия аэрации и теплообмена в пахотном горизонте, а при вспашке повышается температура верхних горизонтов почвы на 3...5 °С. Эти традиционные способы обработки почвы способствуют лучшему сохранению влаги благодаря разрушению почвенных капилляров – основных проводников водяного пара.

Полесозащитное лесоразведение среди посевов, в том числе посадки и посев древесно-кустарниковых форм в засушливых регионах, лесомелиоративные мероприятия на сильно эродированных почвах, а также на засушливых горных склонах существенно смягчают мезоклимат и микроклимат, способствуют повышению продуктивности фитоценозов и сельскохозяйственных культур, выращиваемых в зоне фитомелиорации¹.

Тепловая мелиорация является составной частью общей проблемы мелиорации сельскохозяйственных полей, направленной на улучшение физических условий среды обитания растений (радиационного, теплового, водного, солевого, газового и других режимов). Под *тепловой мелиорацией* понимают изменение теплового режима в среде обитания растений – корнеобитаемом горизонте почвы и в приземном слое воздуха. Успех тепломелиоративных мероприятий зависит от климатических особенностей и погодных условий, которые могут приводить к улучшению или к ухудшению теплового режима (Куртнер Д. А., Чудновский А. Ф., 1979).

Эффективным средством регулирования теплового режима почвы является *мульчирование*, т.е. нанесение на поверхность почвы специальных материалов: соломы, листьев, песка, мелкого гравия, опилок, различных красок, плёнок и т.п. Наиболее перспективными из них считаются светопрозрачные полимерные плёнки, обладающие высокими интегральными коэффициентами пропускания. В результате мульчирования

¹ Фитомелиорация – система агротехнических, инженерных и хозяйственных мероприятий по улучшению природной среды путём регламентированного использования растительных сообществ, создания лесополос с целью сохранения и обогащения биоценозов, повышение количества и качества полезной человеку продукции (Толковый словарь по сельскохозяйственной метеорологии, 2002).

на границе почва–воздух изменяются условия тепло- и массообмена, определяющие рост и развития растений.

Применение других средств тепловой мелиорации почв основано на изменении микрорельефа поверхности. К ним относятся такие агротехнические приёмы, как выращивание картофеля на гребнях грядок, возделывание садовых культур на земляных валах, виноградников – в траншеях. Для регулирования теплового режима почвы известны приёмы применения полимерных пенообразователей, образующих устойчивый теплозащитный слой.

В качестве эффективного тепломелиоративного средства при борьбе с заморозками применяют распыление воды (при высокой дисперсности капель), а также активное перемешивание приземного слоя воздуха с помощью турбореактивных двигателей. Подробнее об этом рассказано в работе «Основы сельскохозяйственной метеорологии», 2011, том I, часть IV, глава 18.

При биологическом способе тепловой мелиорации источником тепла является биотопливо (навоз, растительные остатки и т.п.), которое равномерно распределяется под пахотным горизонтом почвы. В настоящее время в арсенале тепловой мелиорации почв находится большое разнообразие агротехнических и инженерных методов, относящихся к пяти основным типам:

- I тип – нанесение на поверхность почвы материалов с иными теплофизическими свойствами, обеспечивающими хороший тепловой контакт между почвой и такими материалами, как мульчирование почвы красителями, применение теплозащитных укрытий из пенистых, сыпучих и волокнистых материалов;

- II тип – изменение параметров окружающей среды (применение воздушонагревательных и воздушодувных установок, инфракрасных излучателей);

- III тип – использование укрытий из тонких полупрозрачных оболочек, не состоящих в тепловом контакте с поверхностью почвы (мульчирование почвы плёночными материалами);

- IV тип – целенаправленное изменение теплофизических характеристик почвы (поверхностное пескование торфяников, рыхление, уплотнение верхних слоев почвы, орошение, изменение уровня грунтовых вод и т. п.);

- V тип – применение источников тепла внутри почвы.

Тепловой режим почвы определяется условиями теплообмена на поверхности почвы, начальным распределением температуры в почве, теплофизическими характеристиками почвы и действием внутренних источников тепла (мероприятия V типа). Мероприятия IV типа оказывают влияние на тепловой режим почвы через изменения теплофизических

характеристик почвы. Условия теплообмена на поверхности почвы зависят от метеорологического режима приземного слоя атмосферы, характеристик поверхности почвы и её микрорельефа, агротехники, структуры посевов и от влияния мероприятий I, II, и III типов, т.е. определяются совокупностью большого числа факторов. В специальной агрофизической литературе, посвящённой тепловой мелиорации почв, приведены современные динамико-статистические модели, позволяющие решать широкий спектр инженерных задач при строительстве культивационных сооружений, для создания необходимых агрометеорологических условий возделываемым культурам защищённого грунта. В настоящем пособии физико-математические основы моделирования «климата под стеклом» не приводятся. В последние годы в России и в ряде стран умеренного климата растениеводство защищённого грунта в промышленных масштабах получает всё большее развитие: культивационные сооружения применяются в цветоводстве, овощеводстве ранних культур, в селекционной работе и в семеноводстве.

6.6. Использование камер искусственного климата в растениеводстве

Парники, теплицы, оранжереи, малогабаритные плёночные укрытия в обобщённой терминологии называют культивационными сооружениями.

В современном сельскохозяйственном производстве зоны умеренного климата широкое распространение получили теплицы с ограждением из светопрозрачных полимерных плёнок, стекла, малогабаритных плёночных укрытий и парники. Ограждающие конструкции способны пропускать солнечную радиацию, а в некоторых случаях и лучистые потоки инфракрасной области спектра (тепловое излучение).

Развитие химии высокомолекулярных соединений позволило использовать многие материалы для покрытия культивационных сооружений защищённого грунта. Полимерные материалы – это лёгкие, гибкие, негорючие светопрозрачные плёнки – имеют ряд преимуществ перед стеклом, характеризующимся большим удельным весом (массой), хрупкостью и высокой стоимостью. В сельскохозяйственном производстве защищённого грунта применяются разнообразные светопрозрачные полимерные плёнки для покрытия – от полиэтилена до стеклопластиков, обладающих теплозащитными свойствами. На рис. 6.12 представлен суточный ход температуры воздуха под укрытием и на открытом участке. Нагрев воздуха происходит в основном в дневные часы, минимумы температуры между различными укрытиями и открытым участком различаются незначительно.

Для увеличения теплового сопротивления ограждения (плёнки) применяют двухслойные плёнки с воздушным зазором между слоями 2...5 см.

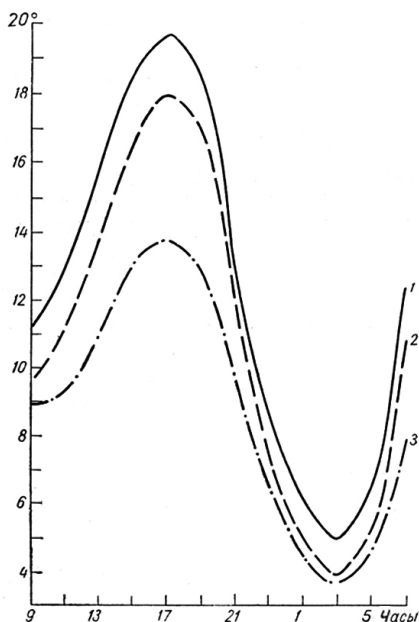


Рис. 6.12. Суточный ход температуры воздуха под укрытиями и на открытом участке: 1 – укрытие из полиамидной плёнки; 2 – укрытие из полиэтиленовой плёнки; 3 – открытый грунт

Несмотря на снижение поступления солнечной радиации до 45...50 % её величины, поглощаемой деятельным слоем на открытом грунте, температура воздуха днём под таким укрытием оказывается на 5...12 °C выше, по сравнению с однослойным укрытием той же плёнкой. Даже в дни со сплошной облачностью разница температуры в пользу двухслойного укрытия достигает 2–3 °C. В ночные часы температура воздуха под двойным укрытием выше на 4...6 °C, по сравнению с однослойным укрытием (рис. 6.13).

На процесс формирования температурных условий в почве и воздухе таких сооружений оказывают влияние следующие факторы:

- метеорологические – солнечная радиация, температура наружного воздуха, абсолютная влажность, скорость ветра, облачность;
- термические характеристики почвы – теплопроводность, теплоёмкость, плотность, альbedo её поверхности;
- конструктивные и теплотехнические характеристики культивационного сооружения;
- характеристики системы воздушного отопления – теплопроизводительность (мощность), теплоёмкость, масса и поверхность нагревательных приборов и т.п.;

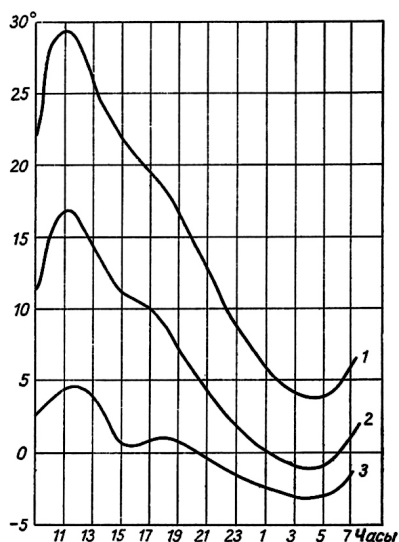


Рис. 6.13. Суточный ход температуры воздуха под однослойным и двухслойным укрытием: 1 – двухслойное укрытие из полиэтиленовой пленки; 2 – однослойное укрытие из такой же пленки; 3 – открытый грунт

– термические характеристики и конструктивные параметры почвенного отопления – теплопроизводительность, глубина залегания источников тепла и др.;

– характеристики и параметры тепломелиоративных мероприятий – альbedo и прозрачность плёночных материалов, толщина и термические свойства дисперсных материалов и др.

В 60–80 гг. прошедшего столетия широкое развитие получила экспериментальная агрометеорология. С помощью проведения лабораторно-полевых опытов были получены многие количественные характеристики условий роста, развития и формирования продуктивности зерновых и овощных культур. На рис. 6.14 показан эксперимент, проводимый во ВНИИСХМ, по выращиванию зерновых культур и картофеля с различными дозами удобрений, размещённых в вегетационных сосудах, в светопроницаемом парнике (1983).

Камерой искусственного климата (фитотрон) называется специальное технически оборудованное стационарное помещение для выращивания растений в искусственно регулируемых условиях. Камеры позволяют имитировать различные климатические условия в течение всего года, что способствует ускорению селекционных работ по выведению новых сортов сельскохозяйственных культур, исследовать возможности районирования новых культур, сортов и гибридов.



Рис. 6.14. Лабораторный эксперимент по внесению различных доз удобрений под зерновые культуры и картофель в «вегетационном домике» – модифицированном варианте теплицы

Существуют различные типы фитотронов. Например, так называемый вегетационный шкаф в виде небольшой камеры (около 1 м^3), в которой наблюдения и уход за растениями осуществляется через специальный люк в боковой стенке. Другой тип фитотрона – вегетационная камера объёмом около 5 м^3 , оборудованная стеллажами с посевами растений. В такую камеру исследователь может входить для ухода за растениями. Наиболее совершенный фитотрон, так называемая станция искусственного климата, представляет собой комплекс стационарных камер, размещённых в отдельном здании и позволяющих одновременно имитировать различные климаты. В современных фитотронах автоматически регулируются и поддерживаются заданные величины интенсивности радиации, температурный, влажностный и углекислотный режимы воздуха, почвы и др. В качестве источников излучения применяются различной мощности лампы накаливания, ксеноновые, ртутные и люминесцентные лампы.

Впервые фитотрон был создан в 1949 г. в штате Калифорния, несколько позднее в городах Белтсвилл, Вашингтон (США) и в г. Вагенинген, Голландия. В СССР первый фитотрон был построен в Институте физиологии растений им. К.А. Тимирязева АН СССР в Москве (1949–1957 гг.), затем аналогичный фитотрон был сооружен при Биологическом факультете МГУ им. М.В. Ломоносова. С 1969 г. функционирует фитотрон при

Институте биохимии и физиологии растений СО РАН в г. Иркутске, являющийся центральным сооружением экспериментальной базы института. Этот комплекс работает круглогодично с изучаемыми растениями путём создания запрограммированных и контролируемых условий освещения, температуры и влажности среды обитания растений (Халамейзер М. Б., Фридман И. Р. и др., 1969). Известны крупный фитотрон, работающий во Франции, а также Лаборатория искусственного климата в Российском государственном аграрном университете – сельскохозяйственной академии им. К. А. Тимирязева (г. Москва). В специальной научно-технической литературе приводятся подробные описания конструкций для опытов с растениями в условиях защищённого грунта.

Большой вклад в экспериментальную агрометеорологию внесли исследования, выполненные с помощью камер искусственного климата, при установлении потребностей сельскохозяйственных культур в радиационном, температурном и влажностном режимах, при изучении влияния этих условий на прохождение различных фаз развития растений, этапов органогенеза, и формирование продуктивности (количества и качества) изучаемых культур. Результаты таких экспериментов позволили получить количественные оценки реакции растений на неблагоприятные и опасные метеорологические явления, такие как похолодания, заморозки, оттепели, переувлажнение почвы, засухи, высокие температуры, а также на продолжительность вегетационных периодов при различных заданных условиях и т. п.

Исходным материалом для проведения подобных экспериментов является коллекция мирового генетического банка, созданная академиком Н. И. Вавиловым во Всероссийском институте растениеводства в г. Санкт-Петербурге. Эти материалы широко используются при установлении количественных агроклиматических показателей.

Модификацией камеры искусственного климата являются *низкотемпературные* и *морозильные камеры*, предназначенные для исследования влияния низких температур на растения. Например, в агрометеорологии такие камеры использовались при изучении морозоустойчивости различных сортов зерновых культур. Результаты исследований применялись для оперативного определения хода перезимовки озимых культур в основных регионах их возделывания. Так, в Институте экспериментальной метеорологии (ИЭМ) в 70–80-е гг. прошлого столетия были сконструированы стационарные и передвижные низкотемпературные камеры, которые использовались для изучения влияния весенних и осенних заморозков и разработки методов оценки зимних условий на состояние озимых культур (Коровин А. И., Шмаков А. С., Зиборов Н. Ф., 1975).

По полученным экспериментальным данным и материалам агрометеорологических станций центральных районов Нечернозёмной зоны

России была определена зависимость изреженности посева клевера от минимальной температуры почвы в зоне корневой шейки и корней на разных глубинах. Кроме того, была установлена зависимость критической температуры вымерзания этой культуры от метеорологических условий осеннего и зимнего периодов (рис. 6.15). Количественно эта зависимость выражена уравнением (И.И. Яшкина, В.П. Горшкова, Л.П. Немчинова)

$$Y = 100 / (1 + 10^{3,05 + 0,28x}), S_Y = \pm 9 \%, \eta = 0,87, \quad (6.7)$$

где Y – гибель клевера (%) до 20 февраля в районах Нечернозёмной зоны; x – минимальная температура ($^{\circ}\text{C}$) на глубине залегания корневой шейки.

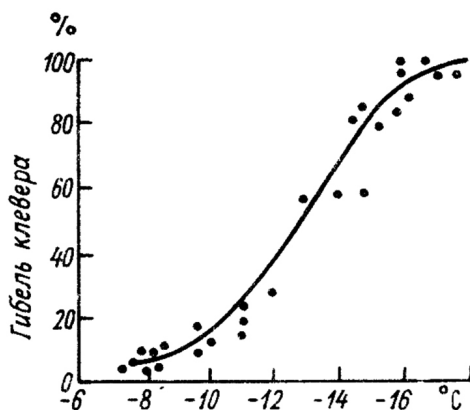


Рис. 6.15. Зависимость гибели одноукосного клевера первого года жизни от минимальной температуры почвы на глубине залегания корневой шейки

Полученная зависимость была использована в прогнозах условий перезимовки клевера в исследуемых районах Нечернозёмной зоны России, где значительная часть посевов многолетних трав занимает эта культура.

Аналогичные исследования в низкотемпературных камерах проводились по озимой пшенице с целью выявления критической температуры вымерзания в зависимости от температурного режима и продолжительности предзимнего и зимнего периодов, от минимальной температуры на глубине залегания узла кущения пшеницы. Было установлено также, что значения критической температуры вымерзания озимых изменяется в течение периода перезимовки в зависимости от общего запаса сахаров в узлах кущения пшеницы. Эксперименты в морозильных камерах подтвердили, что степень изреженности посевов озимых после перезимовки находится в тесной зависимости от минимальных значений содержания сахаров в узлах кущения озимых культур.

Газометрическая камера – другая модификация камеры искусственного климата. Она представляет собой передвижную или стационарную техническую лабораторию, предназначенную для исследования газового режима посева сельскохозяйственных культур. Камера, оснащённая датчиками контроля температуры воздуха и почвы, суммарной радиации, концентрации CO_2 , системами кондиционирования и блоком дистанционного управления, устанавливается на изолированном участке поля с посевом изучаемой культуры или в лабораторных условиях. Непрерывная регистрация заданных параметров позволяет получать характеристики процессов фотосинтеза, дыхания, транспирации, роста растений и влажностного режима посева. В такой камере предусмотрена возможность регулирования и поддержания заданных параметров с целью количественного определения их влияния на рост, развитие и формирование продуктивности сельскохозяйственных культур. Подобные камеры применяются в экспериментах агрофизических лабораторий и чрезвычайно полезны для практической агрометеорологии.

В камерах искусственного климата (фитотронах) можно создавать как оптимальные условия для развития растений, так и неблагоприятные: засуху, суховеи, заморозки и т. п. Возможно моделирование любых заданных микроклиматических условий, позволяющих изучать степень приспособляемости различных сортов к заданным климатическим условиям для определения оптимальных сроков сева, сроков прохождения различных фаз развития растений и условий формирования продуктивности растений. В фитотронах можно получать несколько урожаев исследуемых культур в год. Такие эксперименты ускоряют установление агрометеорологических показателей (сумм температур, необходимых растениям для прохождения фаз развития, коэффициентов влагопотребления и т. п.) с целью разработки рационального, климатически обоснованного размещения растений по территории.

Фитотроны позволяют также исследовать жизнедеятельность, активность и уровень плодovitости вредителей и болезней сельскохозяйственных культур, для разработки эффективных методов борьбы с вредителями и болезнями возделываемых культур.

Преимущество подобных экспериментов заключается в том, что растения в своём развитии оказываются вне зависимости от сезонных ритмов развития природы, поскольку программы экспериментов позволяют имитировать условия вегетационного периода и в холодное полугодие.

6.7. Учёт микроклимата в сельскохозяйственном производстве

Смысл проведения микроклиматических исследований заключается в определении участков (территорий), на которых возможно наиболее эффективное сельскохозяйственное использование земель путём

рационального размещения культур, применения системы севооборотов с целью повышения их продуктивности и качества. Даже в пределах почти однородной по климатическим условиям Ленинградской области теплообеспеченность одной и той же культуры весьма различна: в самом холодном восточном мезорайоне области суммы температур выше 10 °С составляют 1200...1600 °С, в то время как в южной части области она достигает 1990 °С и более. Продолжительность безморозного периода в сравниваемых мезорайонах изменяется от 80...100 суток на востоке области до 150 суток – в более тёплом мезорайоне.

В пределах каждого мезоклиматического района микроклиматическая изменчивость ещё более увеличивает неоднородность ресурсов климата и создаёт в пределах небольших территорий различные условия для возделывания сельскохозяйственных культур. На территории европейской части Нечернозёмной зоны по условиям тепло- и влагообеспеченности выделено четыре крупных агроклиматических района, в пределах которых рассчитаны значения микроклиматических ресурсов для различных местоположений (рис. 6.16).

1. Район холодного пояса с суммой активных температур воздуха за период с устойчивым превышением средней суточной температуры 10 °С менее 1000 °С, с продолжительностью безморозного периода менее 90...75 суток и с постоянным переувлажнением почвы.

2. Северный район умеренного пояса с суммой активных температур воздуха (выше 10 °С) от 1000 до 1500 °С, с продолжительностью безморозного периода 90...105 суток, с большим избытком влаги в весенний и осенний периоды.

3. Район Центрального нечерноземья с суммой активных температур воздуха (выше 10 °С) от 1500 до 2000 °С, с продолжительностью безморозного периода 105...130 суток; условия увлажнения в целом за вегетационный период характеризуются как достаточно влажные.

4. Район, занимающий южную часть территории Нечерноземья, с суммой активных температур воздуха (выше 10 °С) от 2000 до 2500 °С; условия увлажнения характеризуются незначительной засухливостью почвы на всей территории, за исключением Калининградской области.

Расчёт агроклиматических ресурсов с учётом микроклиматических особенностей в различных зонах нечернозёмной части России показал их существенное отклонение от фоновых значений, а, следовательно, учёт микроклиматической изменчивости ресурсов климата необходим при планировании размещения возделываемых культур.

Влияют ли особенности микроклимата на урожайность выращиваемых культур? В качестве иллюстрации приведём табл. 6.6.

Весьма показательна чувствительность теплолюбивых культур (огурцов и томатов) при выращивании их в различных районах и местоположениях Ленинградской области (рис. 6.17).

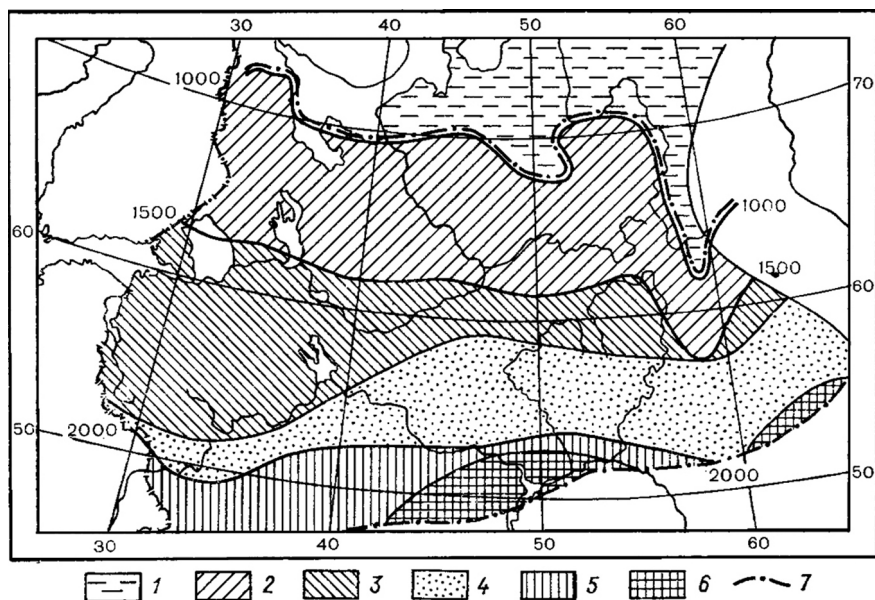


Рис. 6.16. Агро- и микроклиматические ресурсы Нечернозёмной зоны
(Рекомендации по оценке микроклиматических ресурсов
Нечернозёмной зоны РСФСР, 1981):

- 1 – сумма температур воздуха $>10\text{ }^{\circ}\text{C} \leq 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, избыточно влажная зона холодного пояса; 2 – сумма температур воздуха $>10\text{ }^{\circ}\text{C} = 1000 \dots 1500\text{ }^{\circ}\text{C}$, избыточно влажная зона умеренного пояса; 3 – сумма температур воздуха $>10\text{ }^{\circ}\text{C} = 1500 \dots < 2000\text{ }^{\circ}\text{C}$, избыточно влажная зона; 4 – сумма температур воздуха $>10\text{ }^{\circ}\text{C} = 2000\text{ }^{\circ}\text{C}$, достаточно влажная зона; 5 – сумма температур воздуха $>10\text{ }^{\circ}\text{C} > 2000\text{ }^{\circ}\text{C}$, достаточно влажная зона; 6 – сумма температур воздуха $>10\text{ }^{\circ}\text{C} > 2000\text{ }^{\circ}\text{C}$, слабозасушливая зона; 7 – изолиния северной границы суммы температур воздуха $>10\text{ }^{\circ}\text{C}$

Таблица 6.6

Снижение урожайности (% от наилучшего урожая) культуры огурцов
и томатов при уменьшении $\sum t_{>10\text{ }^{\circ}\text{C}}$

Культура	$\sum t_{>10\text{ }^{\circ}\text{C}}$							
	1900	1800	1700	1600	1500	1400	1300	1200
Огурцы	20	42	54	65	73	81	90	100
Томаты	0	0	35	52	66	74	80	92

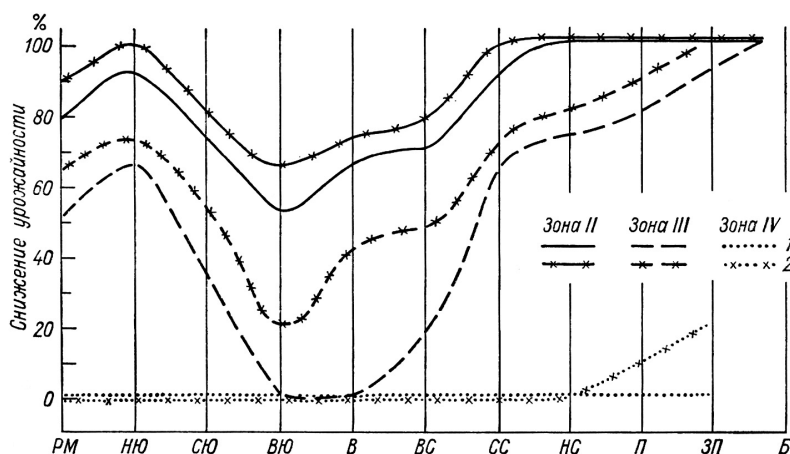


Рис. 6.17. Снижение урожайности томатов (1) и огурцов (2) в зависимости от теплообеспеченности различных местоположений в агроклиматических зонах Нечерноземья.
 Местоположения: РМ – ровные участки; НЮ, СЮ, ВЮ – нижняя, средняя, верхняя части склонов южной экспозиции; П, ЗП, Б – подножия склонов, замкнутые понижения рельефа, болота

Этот рисунок демонстрирует, что внутризональные изменения урожайности теплолюбивых культур значительно превышают межзональные: например, при переходе от второго района к третьему зональные изменения составляют 25...30 %, а микроклиматические вариации достигают 35...40 %; при переходе от третьего района к четвёртому зональные изменения составляют 50...65 %, тогда как микроклиматические – 80...100 %.

В табл. 6.7 приведены данные о влиянии местоположения на урожайность озимой ржи и сахарной свёклы в зависимости от условий теплообеспеченности по агроклиматическим районам.

Таблица 6.7

Влияние на урожайность озимой пшеницы и сахарной свёклы условий теплообеспеченности по агроклиматическим районам Нечернозёмной зоны (Романова Е. Н., Мосолова Г. И., Береснева И. А., 1983)

Агроклиматический район (рис. 6.16)	Сельскохозяйственная культура	Урожайность, т/га		
		фоновая	максимальная	минимальная
2-й	Озимая пшеница	1,3	1,6	0,8
	Сахарная свёкла	19,5	24,0	12,0
3-й	Озимая пшеница	1,6	1,9	0,8
	Сахарная свёкла	20,0	22,5	16,0
4-й	Озимая пшеница	2,0	2,2	1,8
	Сахарная свёкла	24,0	25,0	18,0

Микроклиматическая изменчивость условий увлажнения различных местоположений также оказывает большое влияние на урожайность выращиваемых культур. На рис. 6.18 приведены данные о снижении урожайности картофеля в зависимости от дефицита увлажнения с обеспеченностью 50, 80 и 90 % в различных местоположениях (для 2-го – 4-го агроклиматических районов Нечерноземья).

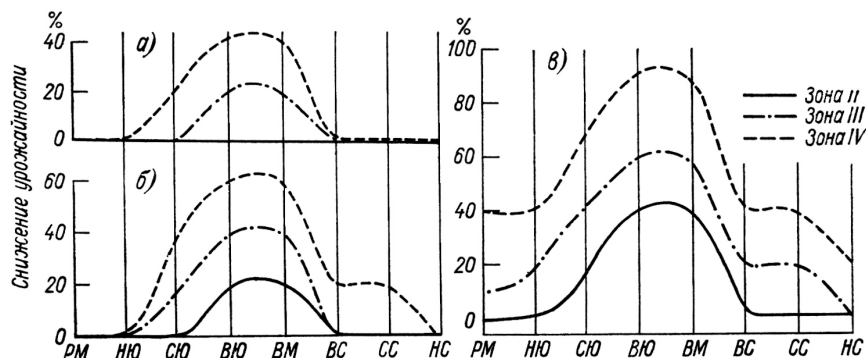


Рис. 6.18. Снижение урожайности картофеля в зависимости от величины дефицита увлажнения и местоположения в разных агроклиматических зонах Нечерноземья: а, б, в – обеспеченность 50, 80, 90 % соответственно. Местоположения – см. рис. 6.17

На этом рисунке видно, что влагообеспеченность, близкая к средним многолетним условиям (50 %), во 2-м агроклиматическом районе Нечерноземья снижения урожайности картофеля вследствие дефицита увлажнения не наблюдается во всех местоположениях; в 3-м и 4-м районах в более сухих местоположениях (верхние и средние части южных склонов, вершины) снижение урожайности этой культуры составляет 20 и 30 % соответственно.

В засушливые годы (обеспеченность 80 %) снижение урожайности картофеля за счёт дефицита увлажнения отмечено во всех агроклиматических районах Нечерноземья: во 2-м районе оно не превышает 20 %, в 3-м районе варьирует от 20 до 40 %, в 4-м районе достигает 5 % в наиболее сухих местоположениях посевов. На средних и влажных по условиям влагообеспеченности участках не наблюдается снижения урожайности ни во 2-м, ни в 3-м районах; в 4-м районе она не превышает 20 %. В условиях ещё большей засушливости (обеспеченность 90 %) во 2-м районе в средних и влажных местоположениях снижения урожайности не наблюдается, а в наиболее сухих оно составляет 30 %.

В 3-м районе только для наиболее влажных участков характерно отсутствие потерь урожая картофеля, для средних потери составляют 10...20 %, достигая 60 % в наиболее засушливых местоположениях.

В 4-м районе снижение урожайности картофеля характерно для всех местоположений, однако в наиболее увлажнённых участках оно составляет только 20 %, а в наиболее сухих достигает 90 %.

Помимо влияния условий тепло- и влагообеспеченности на рост, развитие и формирование урожайности картофеля оказывают влияние и другие факторы, например режим ветра и его изменения в различных формах рельефа. Многочисленные исследования, выполненные в разные годы различными авторами, убеждают в эффективности размещения сельскохозяйственных культур с учётом микроклиматической изменчивости условий теплообеспеченности различных местообитаний на территории Нечерноземья.

Таким образом, повышение урожайности сельскохозяйственных культур без дополнительных затрат может быть достигнуто путём:

- применения дифференцированных сроков посева и уборки урожая в пределах отдельных хозяйств в зависимости от особенностей микроклимата;

- размещения в полях севооборота возделываемых культур с учётом их потребности в условиях тепло- и влагообеспеченности, варьирующих на участках, находящихся на близких расстояниях, а также сортовых особенностей культур;

- учёта микроклиматических условий заморозкоопасности различных местоположений полей, в особенности при размещении садов и плантаций плодовых культур;

- дифференцирования различных мелиоративных мероприятий в зависимости от месторасположения участков, отведённых под мелиорацию.

Глава 7

КЛИМАТ ПОЧВЫ И ЕГО РЕГУЛИРОВАНИЕ

...Почвы, являясь результатом чрезвычайно сложного взаимодействия местного климата, растительности и животных организмов, состава и строения материнских горных пород, рельеф местности, наконец, возраста страны, понятно, требуют от их исследователя беспрестанных экскурсий в область самых разнообразных специальностей...

В. В. Докучаев,
«Русский чернозём», 1883

Почвенный климат – одна из составных частей физико-географической среды, – формируясь под воздействием этой среды и деятельности человека, оказывает в свою очередь непосредственное воздействие на многие природные явления и сельскохозяйственное производство.

А. М. Шульгин,
«Климат почвы и его регулирование», 1972

7.1. Понятие о климате почвы

При оценке агроклиматических ресурсов территории особое значение имеет учёт климата и микроклимата почвы. В широком понимании понятие «почва» представляет собой естественно-историческое образование, состоящее из генетически связанных почвенных горизонтов, формирующихся в результате преобразования поверхностных слоев горных пород и рельефа под воздействием воды, ветра (воздуха) и живых организмов. В отличие от субстрата, почва обладает *плодородием*, благодаря которому происходит воспроизведение биомассы, в том числе и урожая возделываемых культур. Основная трудность исследований почвенно-климатических соотношений связана с исключительным разнообразием почвенных и климатических условий на земной поверхности, а также со сложной зависимостью почв от всего комплекса физико-географических условий. Правильное понимание почвенно-климатических соотношений может быть достигнуто только путём исследования взаимозависимостей, возникающих между почвой–растением–климатом в их целостном развитии.

Изучению этой проблемы посвящено большое количество научной литературы. В конце XIX столетия идея исследования климата почв была выдвинута крупным учёным-агрохимиком П. А. Костычевым (1886). Он рассматривал климат почвы как преломление атмосферного климата через специфические особенности и свойства почвы. А. А. Измаильский (1894)

отмечал, что одни и те же почвы в зависимости от их культурного состояния неодинаково используют выпадающие осадки, создавая различный водный режим почвы. В первой половине XX столетия на необходимость широкого изучения климата почв указывали многие учёные. Так, С. С. Неуструев (1930) считал, что атмосферный воздух создает почвенный климат, т. е. температурный и водный режимы почвы, которые непосредственно влияют на процессы почвообразования. Он подчёркивал, что климат и микроклимат почвы представляют собой явления иного порядка, чем атмосферный климат и микроклимат, поскольку последние, преломляясь в самой почвенной толще, создают особые гидротермические режимы. Именно поэтому различные типы и виды почв отличаются по характеру распределения температуры и влажности. М. И. Сумгин (1931) полагал, что климат почвы является своего рода передаточным механизмом между общими климатическими условиями и почвенными процессами. Академик В. Р. Вильямс (1939) отмечал, что глубокая взаимосвязь и взаимозависимость стадий и периодов развития почвообразовательного процесса с развитием элементов климата (в пределах одного климатического широтного пояса) уже давно и ярко отразилась в понятии почвенно-климатических зон. В агроклиматологии постановка и развитие многих вопросов климата почв принадлежит П. И. Колоскову (1925, 1946, 1947). В статье «Почвенная климатология» (1946) автор впервые сформулировал сущность, предмет, основные задачи и разделы почвенной климатологии. Под климатом почвы он понимал «совокупность внутрипочвенных физических явлений годовой и суточной цикличности, влияющих на жизнь и продуктивность почвы и стоящих в зависимости от внешнего климата, почвенного субстрата и воздействия человека на почву и её покров». К элементам климата почвы П. И. Колосков относил температуру, влажность и аэрацию почвы. В качестве основных задач почвенной климатологии автором были определены:

- количественный учёт связи почвенного климата с внешним климатом, почвообразовательным процессом и биологической продуктивностью почвы;
- изучение механизма внешних воздействий на почвенный климат как фактор почвообразовательного процесса и биологической продуктивности почвы;
- установление типа почвенных климатов и их классификацию с генетической, морфологической и хозяйственной точек зрения;
- районирование территории страны в отношении почвенного климата.

Во второй половине XX века крупные исследования особенностей климата почв были проведены В. Р. Волобуевым (1953), который показал, что значение климата в почвообразовании может быть правильно

понятым лишь в представлении о совокупной роли факторов почвообразования, и прежде всего развивающегося во времени единства «почва – климат – растение».

В отличие от атмосферы, характеризующейся более или менее однородными свойствами на больших пространствах, почва не однородна по своему составу и свойствам на сравнительно небольших территориях. Вследствие этого физические явления, протекающие в почвенных горизонтах менее однородны, чем в атмосфере. Почвенный климат формируется и проявляется в почве по иным законам развития, поскольку почва является биоорганоминеральной системой. Растительный и снежный покров на почве, корневые системы, растительные остатки, микроорганизмы и животные, обитающие в почве, оказывают большое влияние на жизнь почвы и её климат. Хозяйственная деятельность человека, систематически воздействующего на почвенный покров, приводит к изменению протекающих в ней процессов. Развивая основные положения, выдвинутые П. И. Колосковым, А. М. Шульгин (1957) уточнил понятие о климате почв, рассматривая его, как «совокупность внутрипочвенных физических явлений с суточным и годовым ходом, развивающихся во взаимосвязи и взаимообусловленности с атмосферным климатом, почвой, растительностью и производственной деятельностью человека». И далее: «почвенная климатология есть новый раздел агроклиматологии о закономерностях формирования и развития почвенного климата, его географического распространения и изменения, о влиянии его на жизнь растений, почвы и сельскохозяйственное производство, о путях управления почвенным климатом».

Как известно, в системе Гидрометеорологической службы России и СССР систематически проводятся наблюдения (измерения) за температурой и влажностью почвы на сети метеорологических и агрометеорологических станций. Подобные наблюдения проводятся также в ряде институтов Росгидромета, в некоторых институтах системы Российской академии сельскохозяйственных наук. Методы и сроки наблюдений, формы записи результатов измерений и первичная их обработка регламентируются руководящими документами (Наставлениями, Руководствами и т. п.), переиздаваемыми в соответствии с действующими нормативами. Массовые материалы таких наблюдений позволили выполнить капитальные исследования по выявлению физических пространственно-временных закономерностей, количественных связей между агрофизическими и атмосферными процессами, развивающимися в приземном слое воздуха. Результаты этих исследований были обобщены во многих монографиях: С. А. Вериге и Л. А. Разумовой (1963), А. М. Шульгина (1957, 1967, 1972), И. И. Судницына (1964), А. А. Роде (1965, 1969), В. Н. Димо и А. А. Роде (1968), В. Н. Димо (1972), А. В. Павловой (1975), А. Ф. Чудновского (1976), Н. Ф. Кулика (1979), Л. С. Кельчевской (1983), а также

в ряде переводных монографиях зарубежных авторов (Л. Тюрк (1958), Р. Дж. Хэнкс, Дж. Л. Ашкрофт (1985) и др.).

Таким образом, современные определения *климата почвы* следующие:

– *тепловой, водный и воздушный режимы почвы, имеющие многолетнюю и вековую цикличность, складывающуюся под влиянием климата, почвообразующих пород, рельефа, растительности и производственной деятельности человека. Особенности климата почвы определяют динамику веществ в почвенном профиле, процессы почвообразования и степень плодородия почвы* (Толковый словарь по сельскохозяйственной метеорологии, 2002);

– *совокупность внутрипочвенных физических явлений с суточным и годовым ходом, развивающихся во взаимосвязи с атмосферным климатом, почвой, растительностью и производственной деятельностью человека. Основные элементы климата почвы – температура и влажность почвы* (Хромов С. П., Мамонтова Л. И., 1974).

Глубокие исследования почвенно-климатических закономерностей, климата почв важны как в теоретическом, так и в практическом плане. Для земледелия знания особенностей местного климата почв используются во всем цикле выращивания культур. Начиная от сроков весеннего сева сельскохозяйственных культур и кончая условиями перезимовки озимых культур, садов и виноградников, земледелец обязан пользоваться данными о температуре, влажности и степени аэрации корнеобитаемых горизонтов почвы. Роль почвенного климата наиболее ярко проявляется на состоянии, росте и формировании урожайности в засушливые и чрезмерно увлажнённые годы. В определённой мере смягчению аномальных гидрометеорологических условий способствует проведение агротехнических мероприятий. Эффективность обработки пахотного слоя почвы и всего комплекса агротехнических воздействий на почву, производительность сельскохозяйственных машин и орудий, качество их работы, сроки проведения полевых работ непосредственно зависят от почвенного климата и сложившихся агрометеорологических условий на конкретных территориях сельскохозяйственного назначения.

7.2. Общие закономерности теплового и водного режимов почвы

Тесное взаимодействие между климатом приземного слоя воздуха и почвой обуславливает в ней динамику таких её физических элементов, как температура, влажность и аэрация. Все эти характеристики почвы в своей динамике подчинены не только физическим изменениям в приземном слое воздуха, но и в определённой мере связаны с биологическими процессами, протекающими в почве.

Суммарная радиация и встречное излучение атмосферы, поступающие на земную поверхность, поглощаются поверхностью почвы,

превращаются в тепловую и постепенно проникают в более глубокие её горизонты. При ночном излучении почвой расход тепла превышает приход, в результате поверхность почв охлаждается, благодаря этому охлаждение передается в верхние и нижележащие слои. Этими процессами регулируется тепловой режим почвы. Приход и расход лучистой энергии на поверхности земли выражается уравнением радиационного баланса:

$$R = Q(1 - \alpha) - I, \quad (7.1)$$

где R – радиационный баланс, ккал/см²·год (Дж/см²·год); Q – суммарная солнечная радиация, ккал/см²·год (Дж/см²·год); α – альбедо, %; I – эффективное излучение земли¹, Вт/м².

Оставшаяся часть радиации расходуется на нагревание поверхности почвы и воздуха, часть расходуется на испарение с поверхности почвы и транспирацию растений, на биологические процессы – фотосинтез, дыхание и обмен веществ (метаболизм) в растениях. Изменения температуры в приземных слоях атмосферы определяются прежде всего изменениями температуры земной поверхности, следующими за этими изменениями. Тепловой баланс поверхности почвы, согласно М. И. Будыко (1956), в первом приближении выражают уравнением:

$$R = LE + P + A, \quad (7.2)$$

где R – радиационный поток тепла, Вт/м²; LE – затраты тепла на испарение (или выделение тепла при конденсации), где L – скрытая теплота испарения², E – скорость испарения (или конденсации) – количество воды, испаряющейся за единицу времени с единицы поверхности; P – турбулентный поток тепла между подстилающей поверхностью и атмосферой приземного слоя; A – поток тепла между подстилающей поверхностью и нижележащими слоями почвы.

В исследованиях А. Ф. Чудновского, Е. А. Иконниковой, Л. Э. Инта и др. показано, что существует весьма сложная зависимость основных теплофизических характеристик почвы от различных факторов, важнейшими из которых являются влажность почвы и её плотность. Авторы разработали методы оценки изменчивости основных теплофизических характеристик почвы – коэффициента *температуропроводности*³ α , коэффициента

¹ Эффективное излучение – разность между собственным излучением земной поверхности и встречным излучением атмосферы, Вт/м².

² Теплота испарения – количество тепла L , которое нужно сообщить жидкому или твёрдому телу, чтобы перевести его в пар при неизменной температуре, кал/г (Хромов С. П., Мамонтова Л. И., 1974).

³ Температуропроводность (или коэффициент температуропроводности) – параметр, характеризующий скорость изменения температуры вещества в нестационарных тепловых процессах; мера инерционных свойств вещества, численно равная отношению коэффициента теплопроводности вещества к произведению его удельной теплоёмкости (при постоянном давлении) на плотность, выражается в м²/с.

теплопроводности¹ λ и объёмной теплоёмкости почвы² c_p . Эти характеристики связаны соотношением:

$$\alpha = \lambda / c_p. \quad (7.3)$$

Их зависимость от влажности почвы достаточно сложная, нелинейная, тогда как с увеличением плотности основные теплофизические характеристики почвы линейно возрастают (рис. 7.1).

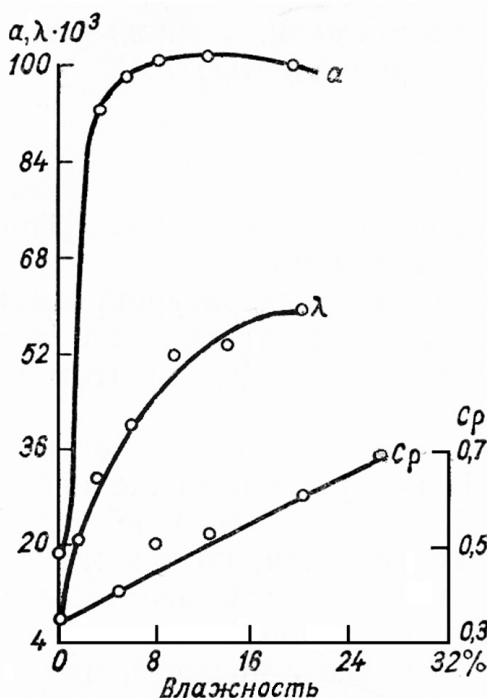


Рис. 7.1. Зависимость тепловых характеристик почвы от влажности (Чудновский А. Ф., 1976)

Чем меньше влаги содержится в почве, тем больше содержание воздуха в порах между частицами почвы, тем хуже контакт между отдельными агрегатами почвы. С увеличением содержания воды в почве увеличивается возможность передачи тепла кондуктивным теплообменом

¹ Коэффициент теплопроводности — мера теплопроводности — способность вещества проводить тепло, численно равная количеству тепла (кал), которое протекает в 1 с через 1 см² поверхности при градиенте температуры 1 °С/см (С.П. Хромов, Л.И. Мамонтова, 1974).

² Объёмной теплоёмкостью почвы называется количество тепла (например в калориях), которое необходимо для того, чтобы нагреть 1 см³ почвы на 1 °С.

через тонкую водную пленку, окружающую частицы почвы. Величина теплопроводности – наибольшая для твёрдого вещества, слагающего почву, далее по нисходящей следуют вода и воздух. С увеличением влажности почвы линейно растут теплопроводность и объёмная теплоёмкость. Соотношение между скоростями роста объёмной теплоёмкости и теплопроводности почвы определяет характер поведения температуропроводности. Так, при увеличении увлажнения почвы от 2...5 до 25...28 % рост теплопроводности будет сильнее роста объёмной теплоёмкости, что и приводит к наблюдаемому эффекту – росту температуропроводности с увеличением влажности.

Для надёжной оценки основных теплофизических характеристик почвы необходимы данные о её влажности и плотности, об их изменчивости и в пространстве, и во времени. В зависимости от механического состава почвы при одинаковом количестве осадков влажность почвы может существенно различаться. Например, при одном и том же количестве осадков влажность песчаной почвы в среднем в 1,5 раза меньше влажности суглинистой и в 2...2,5 раза меньше влажности глинистых почв. Влажность песчаных почв в 1,5 раза меньше влажности суглинистых почв.

Нагревание и охлаждение почвы зависит от многих условий: от разности температур отдельных слоёв почвы, её теплопроводности, теплоёмкости, а, следовательно, и температуропроводности. Чем больше разность температур поверхности почвы и её более глубоких слоёв, тем большее количество тепла поступает в почву или уходит из неё.

Теплопроводность почвы зависит от её физических свойств – механического состава, воздуха, воды, пористости. При этом теплопроводность твёрдых частиц почвы в 100 раз больше теплопроводности почвенного воздуха; теплопроводность воды в 24 раза больше теплопроводности воздуха, поэтому влажные почвы обладают большей теплопроводностью, чем сухие. По мере увлажнения почвы, при котором происходит вытеснение воздуха водой, теплопроводность почвы увеличивается, но не пропорционально влажности. При небольшой влажности теплопроводность резко повышается, при дальнейшем её увеличении рост теплопроводности снижается. Это объясняется тем, что при малых значениях влажности различия между теплопроводностью воды и почвенных частиц большие; при значительном увлажнении почвы теплопроводность её постепенно приближается к теплопроводности воды (рис. 7.1).

Большое влияние на теплопроводность оказывает пористость почвы (или её скважность), которая характеризуется отношением объёма почвенных пор к общему объёму почвы и выражается в процентах. С увеличением пористости теплопроводность почвы уменьшается (рис. 7.2). Суточные колебания температуры во влажной почве меньше, чем в сухой;

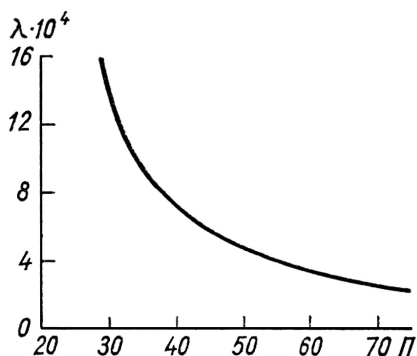


Рис. 7.2. Зависимость коэффициента теплопроводности почвы от её пористости (P), %

в такой почве меньше и изменения температуры между отдельными слоями. Влажные почвы медленнее нагреваются и медленнее охлаждаются, сухие же, наоборот, быстрее нагреваются, но медленнее охлаждаются.

Поэтому глинистые почвы, обладающие большой теплоёмкостью при малом содержании воды, нагреваются днём меньше, чем песчаные почвы, ночью же они меньше охлаждаются. Весной глинистые почвы обычно холоднее песчаных. Осенью же при большом увлажнении глинистые почвы становятся теплее песчаных. Условия обработки почвы также оказывают влияние на основные теплофизические характеристики её, в частности, пахота (вспашка) приводит к уменьшению тепло- и теплопроводности, а также объёмной теплоёмкости почвы, что способствует увеличению дневного нагревания и ночного охлаждения почвы. Эффекты этих влияний различны у разных типов почв в зависимости от их механического состава. Агротехнический прием прикатывания почвы, напротив, способствует росту основных теплофизических характеристик. Все это качественно определяет механизм формирования термического режима разных типов почв, на который накладывается влияние пространственно-временных различий, составляющих теплового баланса и их соотношений в различных климатических зонах.

Влияние механического состава почвы на основные теплофизические характеристики почвы проявляется в термических различиях почвенных неоднородностей даже в тех случаях, когда потоки тепла, направленные в почву или из неё, постоянны или мало меняются в пространстве и времени. На эти различия накладывается также влияние рельефа, естественного неравномерного выпадения осадков по площади, ветра, испарения и характера растительного покрова. Все перечисленные факторы приводят к увеличению контрастов термического режима разных типов почв или

к их ослаблению (при наложении влияний разного знака). Такие контрасты проявляются в амплитудах температуры почвы в её суточном, месячном и сезонном режимах (рис. 7.3). Наибольшая амплитуда годовых колебаний температуры наблюдается на оголённой почве. Поверхность почвы, покрытая растительным (летом) или снежным (зимой) покрывом, имеет сглаженный ход амплитуды колебаний. Летом оголённая почва теплее почвы под естественным растительным покрывом, а зимой (в умеренных широтах) оголённая почва значительно холоднее почвы под снежным покрывом.

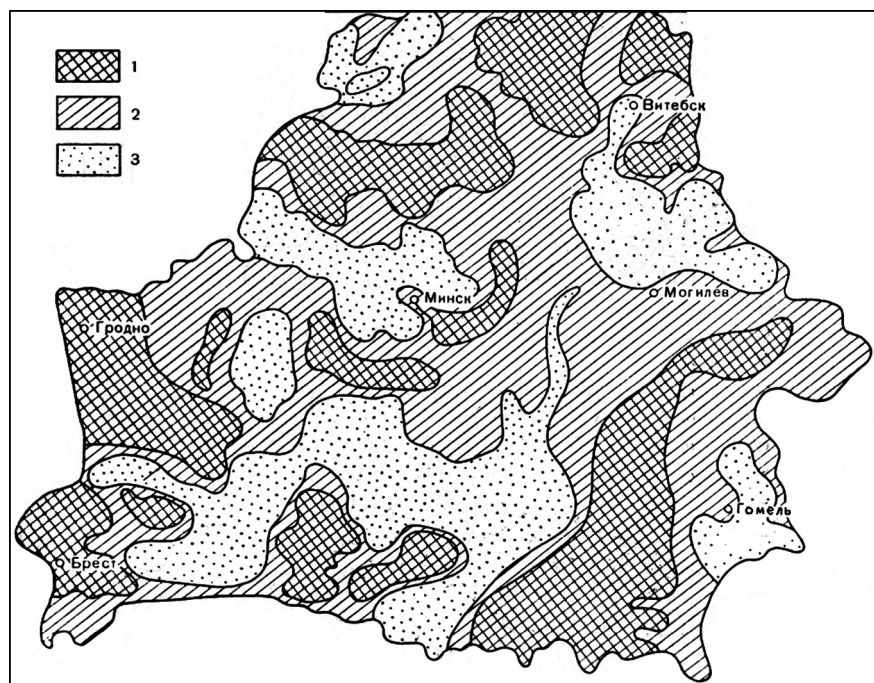


Рис. 7.3. Средняя температура почвы на глубине 10 см в Беларуси в мае:
1 – лёгкие почвы, 14–15 °С; 2 – супеси и увлажнённые почвы, 13–14 °С;
3 – переувлажнённые почвы и тяжёлые почвы, 12–13 °С

С глубиной амплитуды годового хода температуры почвы уменьшаются, что иллюстрируют данные С.И. Небольсина, полученные им в Подмоскowie в летние месяцы:

На поверхности оголённой почвы	31 °С
На глубинах (см): 10	21
25	18
50	16
100	14
200	10

Время наступления максимума и минимума температуры с увеличением глубины слоя почвы запаздывает: например, если в Подмоскovie максимум температуры на поверхности почвы наступает в конце июня, то на глубине 200 см он наступает только в середине августа.

Микроклиматическая изменчивость показателей термического режима почвы под влиянием механического состава проявляется наиболее отчетливо в пределах пахотного горизонта. По сравнению с почвами тяжёлого механического состава песчаные, супесчаные и легкосуглинистые почвы опережают переход средней суточной температуры через 5 и 10 °C в сторону повышения на 2–3 недели и больше. Для лёгких почв сумма температур выше 10 °C оказывается на 300...600 °C больше, а период с температурой выше 10 °C на 2...4 недели продолжительнее, чем для тяжёлых почв. Разность в продолжительности периодов с температурой выше 15 °C между лёгкими и тяжёлыми почвами достигает в отдельные годы более четырёх недель. Весной тяжёлые почвы, обладающие повышенным влагосодержанием, просыхают медленно, поэтому их прогревание до температуры ≥ 5 °C происходит в среднем на 10...15 суток позднее, по сравнению с воздухом. Лёгкие почвы просыхают раньше, и сроки прогрева до этой температуры оказываются близкими к срокам прогрева воздуха, либо наступают раньше на 7...10 суток.

Теплообмен в почве

Во все сезоны года в почве происходит обмен тепла от поверхности в глубь почвы и в обратном направлении. Днём ход теплообмена следует за ходом солнечной радиации. Время перехода теплообмена через ноль соответствует времени восхода и захода солнца (рис. 7.4). Этот ход изменяется в зависимости от наличия, характера и состояния растительного покрова, от скорости ветра и других причин.

В течение года наибольший положительный теплообмен отмечается весной и в начале лета, наибольший отрицательный – в конце осени и начале зимы. Большое влияние на теплообмен оказывает снежный покров. С установлением устойчивого снежного покрова приостанавливается охлаждение почвы. Передача тепла вглубь происходит путём молекулярной теплопроводности, а также в результате радиационного и конвективного теплообмена. Распространение тепла путём теплопроводности осуществляется при наличии разности температур верхних и нижних слоёв почвы. Величиной, характеризующей изменение температуры с глубиной, служит вертикальный градиент, показывающий изменение температуры на единицу глубины слоя.

К распространению тепла в почве применима общая теория молекулярной теплопроводности, предложенная Ж. Фурье, получившая название *законов Фурье*. Приведём их краткое описание по С.П. Хромову и М.А. Петросянцу (1994).

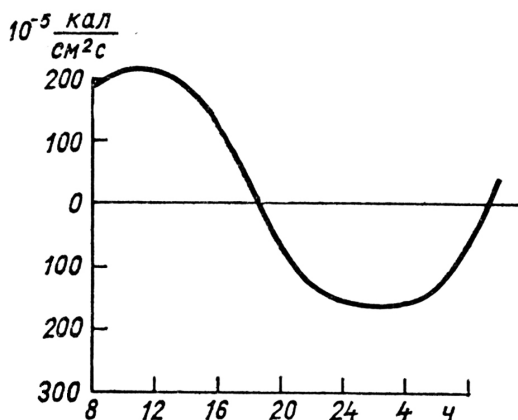


Рис. 7.4. Суточный ход теплообмена в почве ($1 \text{ ккал/см}^2 \cdot \text{с} = 4,19 \text{ Дж/см}^2 \cdot \text{с}$)

1. Чем больше плотность и влажность почвы, тем быстрее распространяются в глубину и тем глубже проникают колебания температуры. Независимо от типа почвы период колебаний температуры не изменяется с глубиной. Это означает, что не только на поверхности, но и на глубинах сохраняется суточный ход с периодом 24 ч между каждыми двумя последовательными максимумами или минимумами и годовой ход с периодом в 12 месяцев. С глубиной амплитуды колебаний уменьшаются.

2. Возрастание глубины в арифметической прогрессии приводит к уменьшению амплитуды в прогрессии геометрической. Например, если на поверхности почвы суточная амплитуда равна 30°C , на глубине 20 см – 5°C , то на глубине 40 см она будет уже менее 1°C . На некоторой глубине (70...100 см) суточная амплитуда постепенно затухает и начинается слой почвы с постоянной суточной температурой. Амплитуда годовых колебаний температуры уменьшается с глубиной по этому закону. Но годовые колебания распространяются до большей глубины, что объясняется более длительным временем их распространения. Амплитуды годовых колебаний убывают практически до нуля на глубине около 30 м в полярных широтах, около 15...20 м – в средних и около 10 м – в тропических широтах. На этих глубинах начинается слой постоянной годовой температуры.

3. Сроки наступления максимальных и минимальных температур как в суточном, так и в годовом ходе запаздывают с глубиной пропорционально увеличению глубины. Это понятно, так как требуется время для распространения тепла в глубину. Суточные экстремумы на каждые 10 см глубины запаздывают на 2,5...3,5 ч. Годовые максимумы и

минимумы запаздывают на 20...30 суток на каждый метр глубины. Например, в г. Москве на глубине 3 м минимум температуры наблюдается не в январе, а в апреле, максимум – не в июле, а в сентябре (рис. 7.5).

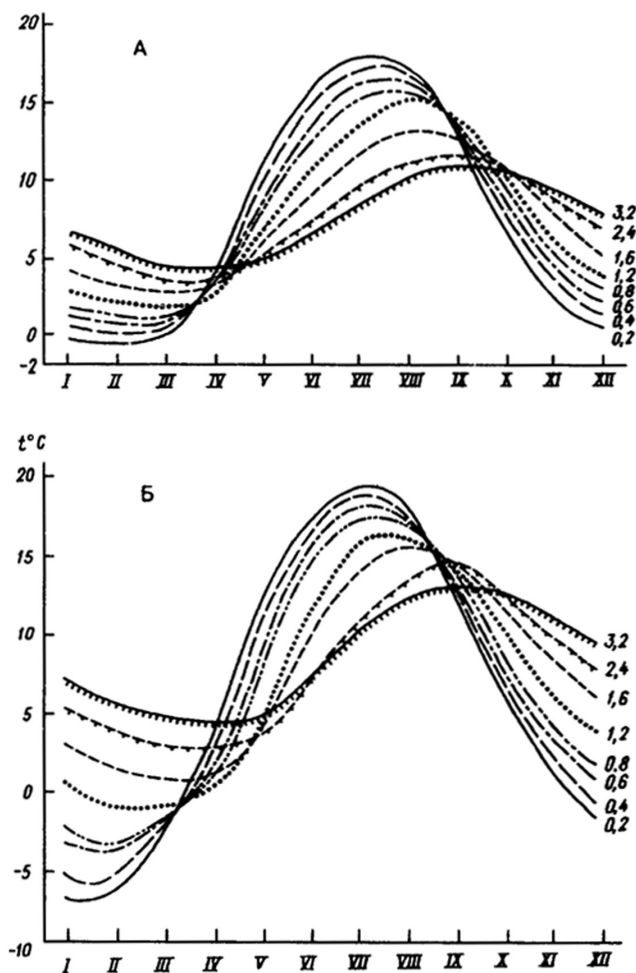


Рис. 7.5. Годовой ход температуры (термоизоуплеты)¹ почвы на разных глубинах в Москве под травяным покровом (А) и на оголённой поверхности (Б) (Хромов С. П., Петросянц М. А., 2004)

¹ Термоизоуплеты – линии, графически представляющие функции двух переменных (температуры и времени), проводятся на графике через те точки, в которых данная функция имеет одно и то же числовое значение: на оси абсцисс – время, по оси ординат – температура почвы. Цифры у кривых в поле графика – глубина слоя почвы в м.

4. *Глубины слоёв постоянной суточной и годовой температуры относятся между собой как корни квадратные из периодов колебаний.* Глубина, на которой затухают годовые колебания, в 19 раз больше глубины, на которой затухают суточные колебания.

Однако неоднородность состава и структуры почвы, а также осадки, просачивающиеся в слои почвы, несколько нарушают эти соотношения. С различиями в годовом ходе температуры на разных глубинах связано распределение температуры в почве по вертикали и в разные сезоны: *летом температура от поверхности почвы в глубину падает, зимой – растёт; весной она сначала убывает, а потом растёт; осенью – сначала растёт, а затем убывает.*

Влагообмен в почве

Почвенной влагой называется вода, содержащаяся в почве в жидком, твёрдом и газообразном (парообразном) состояниях. Влага, находящаяся в корнеобитаемых горизонтах почвы, является основным источником водоснабжения растений. Поглощённая корнями вода с растворёнными в ней питательными веществами поступает в ткани растений, участвует в физиологических процессах фотосинтеза, транспирации, в построении органических соединений, в поддержании тургора листьев, стеблей, обеспечивает терморегуляцию растительного организма. Почвенная влага является одним из незаменимых факторов жизни. Подробнее о роли влаги в жизни растений рассказано нами в работе «Основы сельскохозяйственной метеорологии», 2011, том I, глава 9 и глава 15, раздел 15.3.

Фундаментальным исследованиям почвы и её водно-физическим (агрогидрологическим) свойствам посвящена обширная научная литература, опубликованная Н. А. Качинским (1927, 1965, 1970); А. А. Роде (1952, 1960, 1968); Л. Тюрком (1958); С. А. Вериги и Л. А. Разумовой (1963); И. Б. Ревутом (1964); И. И. Судницыным (1979); Л. С. Кельчевской (1983) и многими другими учёными.

Состояние влаги в почве, её водный баланс определяется климатическими и почвенными факторами. Согласно Толковому словарю по сельскохозяйственной метеорологии (2002) *«Алгебраическая сумма прихода и расхода влаги в почве за выбранный промежуток времени для определённого слоя почвы (обычно 0–100 см) называется водным балансом почвы. Он выражается уравнением водного баланса (в мм водного слоя или в м³/га)».*

Приходную часть водного баланса почвы составляют атмосферные осадки, конденсация влаги в почве, приток поверхностных и подземных вод; расходную часть – испарение с поверхности почвы, снежного покрова и воды; транспирация влаги растительностью, поверхностный сток, отток

подземных вод за пределы балансового участка. Полный водный баланс почвы имеет следующий вид (Качинский Н. А., 1970):

$$W_0 + Q + g_{ГР} + g_K = E_{П} + E_T + g_{И} + W_T + \Delta W, \quad (7.4)$$

где W_0 – запас влаги в почвенном слое в начале периода (мм); Q – сумма осадков за период (мм); $g_{ГР}$ – количество воды, поступившей в почву из грунтовых вод (мм); g_K – величина конденсации (мм); $E_{П}$ – величина испарения с поверхности почвы (мм); E_T – величина транспирации за период (мм); $g_{И}$ – величина инфильтрации (мм); W_T – запас влаги в почве в конце периода (мм); ΔW – изменение запаса влаги (мм).

Для практических целей целесообразно рассчитывать водный баланс почвы по упрощённой формуле (Роде А. А., 1968):

$$W_T = W_0 + Q + g_{ГР} - (E_{П} + E_T + g_{И}). \quad (7.5)$$

Буквенные обозначения те же, что и в формуле (7.4).

Помимо водного баланса почвы (водный режим почвы), автор выделяет ещё и режим влажности почвы, охватывающий все явления динамики содержания влаги в почве. Согласно А. А. Роде, выделено шесть типов режима влажности почв: 1 – *мерзлотный*, характерный для регионов с вечной мерзлотой; 2 – *промывной*, распространённый в районах превышения осадков над испаряемостью; 3 – *периодически промывной* – в районах, где испаряемость равна величине выпадающих осадков; 4 – *непромывной*, распространённый в районах с количеством осадков меньше испаряемости; 5 – *десуктивно¹-выпотной*, характеризующийся ещё большим различием между осадками и испаряемостью; 6 – *выпотной*, по своим характеристикам близок к пятому типу, но отличающийся от него глубоким залеганием грунтовых вод.

Режим влажности почв был исследован С. А. Вериги и Л. А. Разумовой (1973) на материалах многолетних наблюдений (измерений) влажности почвы на сети метеорологических станций СССР. Авторы выделили четыре основных типа годового хода запасов продуктивной влаги² в почве: 1 – *тип обводнения*; 2 – *тип капиллярного увлажнения*; 3 – *тип весеннего промачивания*; 4 – *тип слабого весеннего промачивания*. Эти типы режима влажности характеризуются специфическими особенностями годового хода запасов почвенной влаги на территории бывшего СССР (рис. 7.6).

¹ Десукция – процесс отсоса влаги корнями растений из почвы: или количество воды, отсасываемое растениями из почвы за определённый промежуток времени (по Реймерсу Н. Ф., 1990).

² Продуктивная влага (мм) – часть почвенной влаги, используемой растением в процессе жизнедеятельности, синтеза органических веществ и формирования урожая. Нижним пределом продуктивной влаги является влажность устойчивого завядания.

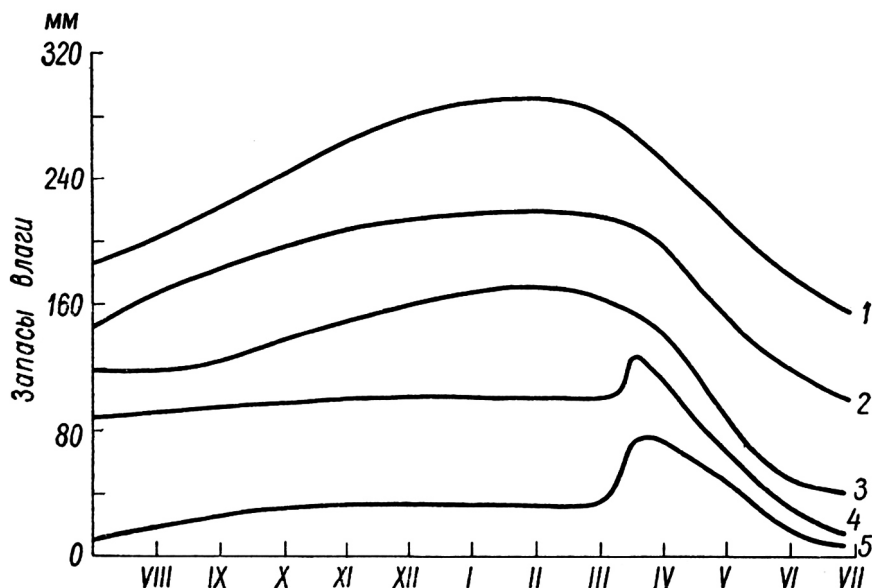


Рис. 7.6. Типы годового хода запасов продуктивной влаги в метровом слое почвы под озимыми культурами, посеянными по чистому пару:
 1 – тип обводнения; 2 – тип капиллярного увлажнения; 3 – тип полного весеннего промачивания; 4 – тип слабого весеннего промачивания (засушливые районы); 5 – тип слабого весеннего промачивания (очень засушливые районы)

На основании этих исследований авторы установили основные закономерности формирования влажности почвы и годовой динамики запасов продуктивной влаги в различных почвенно-климатических зонах бывшего Советского Союза.

Таким образом, основные закономерности климата почвы сводятся к следующему. Установлены количественные зависимости основных тепловых характеристик почв от влажности почвы, её плотности и механического состава. Выявлена связь теплопроводности почв с формами почвенной влаги; водных и тепловых условий, формирующихся в почве. Даны характеристики теплового и температурного режимов почв, суточного и годового хода температуры почвы под естественной и оголённой поверхностью в разных природных зонах страны. Показан характер теплообмена почвы и соотношения температур воздуха и почвы в тёплый и холодный периоды года. Установлены схемы режима влажности почвы, категорий влаги и показана их роль в жизнедеятельности возделываемых культур. Выявлены типы годового хода запасов продуктивной влаги и выделены агрогидрологические зоны на территории бывшего СССР.

7.3. Климат почвы в тёплое полугодие

В годовом ходе температуры почвы отчётливо выделяются два сезона года с различно направленными потоками тепла и соотношениями температур почвы между отдельными слоями. В течение тёплого периода года, продолжительность которого в различных частях России неодинакова, температура почвы с глубиной понижается; наоборот, зимой верхние слои почвы холоднее лежащих ниже.

Климат почвы формируется под влиянием ряда факторов, таких как рельеф местности, тип и механический состав почвы, особенности растительного покрова и применяемой агротехники при возделывании культур.

Влияние *рельефа* на температуру почвы особенно ярко проявляется на различно ориентированных склонах. Больше всего тепла получают склоны южных экспозиций. Западные склоны получают от солнца примерно такое же количество тепла, как и восточные, но оказываются при этом более тёплыми. Это объясняется тем, что в первой половине дня, когда освещены восточные склоны, значительное количество тепла затрачивается на испарение, тогда как во второй половине дня, когда освещены западные склоны, испарение сильно уменьшается вследствие иссушения верхних горизонтов почвы.

Температурный режим различных склонов неодинаков, что связано не только с величиной поступающей солнечной радиации, но и с влажностью почвы, характером растительного покрова, наличием дернины, ветром и др. Известны многочисленные исследования, выполненные в разные годы в различных районах, подтверждающие большие различия между температурой почвы на разноэкспонированных склонах. Однако количественные различия в температуре почвы, установленные в одном районе, не могут использоваться в другом районе из-за локальных условий, характерных для каждого конкретного района.

Распределение температуры в холмистой местности на отдельных элементах рельефа зависит от радиационного режима, влажности почвы, теплообмена, механического состава почвы. При достаточной влажности и одинаковом типе почвы (суглинистой) с разностями высот в пределах до 100 м средние суточные температуры почвы на глубине 5...10 см весной на южных склонах выше, по сравнению с выровненным участком на 1 °С, а по сравнению с северными склонами – на 2 °С. В связи с этим сроки сева ранних яровых культур могут начинаться на южных склонах на 2...5 суток раньше, чем на ровных участках, и на 4...7 суток раньше, чем на северных склонах. В тёплые сухие весны эти различия могут достигать даже 10 суток (Шульгин А. М., 1972).

В зависимости от крутизны склонов различия в температуре при прочих равных условиях могут достигать 5...7 °С; на более выровненных участках, где мелкие неровности поверхности повышают нагрев почвы,

разница составляет 0,5...1,5 °С. В горных и особенно в высокогорных условиях различия в температуре воздуха (на высоте 2 м) и почвы с увеличением абсолютной высоты над уровнем моря возрастают. Это объясняется более высокой интенсивностью солнечной радиации в горах.

Известно, что увлажнение в поймах рек, как правило, более высокое, по сравнению с таковым на берегах рек. В этой связи формируются различные температурные условия на сравниваемых участках. Например, наибольшие разности максимальных температур на поверхности суглинистых почв в зоне достаточного увлажнения на европейской части страны достигали 16 °С, на глубине 5 см – 8,5 °С и на глубине 20 см – около 5 °С. В засушливой зоне ЕТС максимальная разность температуры почвы на поверхности между берегом и поймой составляла более 26 °С, на глубине 20 см – 10...11 °С. При холодной погоде менее увлажнённая почва на берегу охлаждается быстрее, поэтому в пойме температура поверхности почвы на 7...8 °С и на глубине 20 см на 1 °С выше, чем на берегу.

Тип и механический состав почвы оказывают заметное влияние на температурный режим почвы. Например, разность температур песчаной и глинистой почв на северо-западе лесной зоны страны достигает 1...1,5 °С. Эти различия связаны с большей теплоёмкостью, влагоёмкостью, а также большим содержанием воды в глинистых почвах. Кроме этого, испарение глинистых почв весной и летом увеличивает расход тепла, поэтому они нагреваются меньше, чем песчаные почвы.

В южной части Чернозёмной зоны страны наибольшие различия в температуре суглинистого и супесчаного чернозёма наблюдаются с мая по август и на глубине 20 см достигают 2 °С. Анализ материалов годового хода температуры почвы на глубине от 5 до 100 см в северных и центральных областях европейской части страны выявил следующие типы:

- суглинистые влажные почвы полей, в которых температура большинства слоёв в тёплый период ниже температуры воздуха; чем влажнее почва, тем разность больше;
- песчаные полевые, более сухие, в которых температура верхних слоёв в тёплый период выше температуры воздуха и тем больше, чем суше и теплее почва;
- лесные почвы, в которых в тёплый период температура почвы значительно ниже температуры воздуха.

Подъём температуры до 5 °С в слое 5...10 см в песчаных и супесчаных почвах происходит раньше, чем на суглинистых почвах, в среднем на 3...5 суток, а до температуры 10 °С – в среднем на 4...7 суток. По сравнению с воздухом и верхними слоями почвы, температура 5...10 °С на глубине 20 см запаздывает на 2...3 суток.

Сухие и хорошо дренируемые почвы весной и летом являются тёплыми, а тяжёлые и переувлажнённые – холодными. Осенью в период

охлаждения и увлажнения песчаная почва благодаря хорошей теплопроводности быстрее охлаждается и потому становится холоднее глинистой. Влияние увлажнения почвы на её температуру особенно заметно проявляется в самом верхнем слое (табл. 7.1).

Таблица 7.1

Температура воздуха и почвы на глубине 5 см на почвах разного типа при различной их влажности весной в Московской области

Температура воздуха, °С	Температура почвы, °С			
	слабоувлажнённый суглинок	влажный суглинок	слабоувлажнённая супесь	влажная супесь
5	6,6	6,4	7,4	7,7
10	11,4	9,3	11,8	10,3
15	16,2	12,1	16,4	13,0
20	21,0	14,9	20,7	15,5

Как видно из этих данных, по мере увеличения температуры воздуха прогревание верхнего слоя почвы происходит по-разному, в зависимости от типа почвы и её увлажнения. Ещё большие различия в температуре верхних слоёв наблюдаются при сравнении минеральной и торфяной почв. Торфяная почва весной холоднее минеральной, что определяется не только плохой теплопроводностью¹, но и большой затратой тепла на испарение: разность температур этих почв составляет 2,5...4,2 °С, т. е. больше разности температур песчаной и глинистой почв.

Почвы лёгкого механического состава – песчаные, супесчаные и даже легкосуглинистые, по сравнению с почвами тяжёлого механического состава, раньше прогреваются, у них раньше наступает время устойчивого перехода средней суточной температуры через 5, 10 и 15 °С. Соответственно, на таких почвах накапливаются большие значения сумм температур выше названных пределов и оказываются более длительными периоды с температурами, превышающими эти пределы. Величина разности температур на глубине 5 см песчаной и суглинистой почв в летние месяцы на чёрном пару увеличивается к югу и с запада на восток в летние месяцы. В зависимости от механического состава в отдельные периоды эта разность достигает 6...10 °С и более в пределах отдельных полей, районов и может превышать градиент температуры по широте, что эквивалентно смещению по широте с севера на юг до 200...500 км (рис. 7.7).

¹ Теплопроводность почвы – способность почвы проводить тепло путём теплового взаимодействия соприкасающихся между собой твёрдых, жидких и газообразных частиц, а также путём испарения, перегонки и конденсации влаги внутри почвы. Количественно характеризуется коэффициентом теплопроводности (Толковый словарь по почвоведению, 1975).

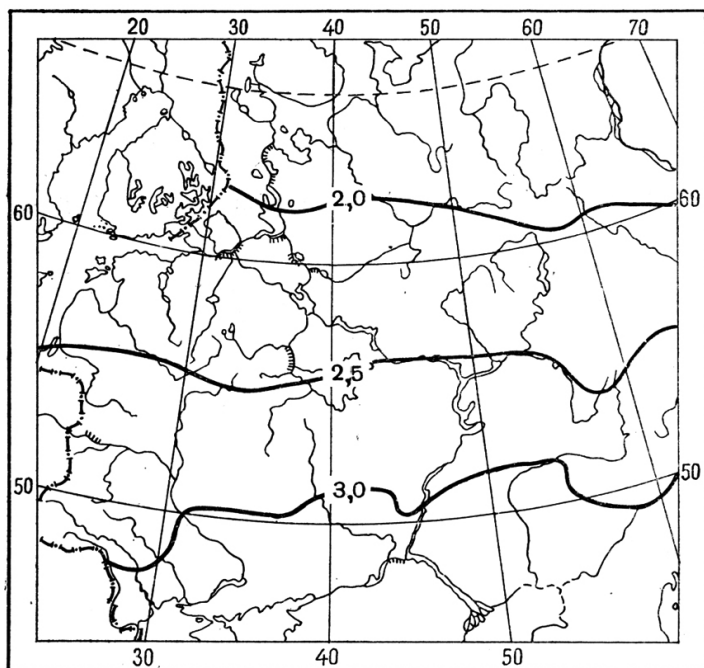


Рис. 7.7. Разность между температурами пахотных слоёв песчаной и суглинистой почв на чёрном паре в мае (Шульгин А. М., 1972)

Растительный покров оказывает влияние на температуру почвы следующим образом:

- затеняя поверхность почвы, уменьшает приток тепла;
- ночью предохраняет от лучеиспускания;
- высушивая почву путём усиленного испарения, уменьшает её теплоёмкость;
- расходуя тепло на созидание растительных тканей, отнимает тепло от почвы;
- затрудняет турбулентное перемешивание воздуха.

Исследованию влияния различных типов растительности и сельскохозяйственных культур на температуру различных типов почвы и различные её горизонты посвящена обширная научная литература. Отметим только основные закономерности. Под озимыми культурами осенью температура поверхностного слоя почвы мало отличается от оголённой почвы. После формирования густого покрова озимых температурный режим почвы изменяется: почва под растениями становится теплее, чем на пару. Весной и летом слой почвы 0...20 см под озимью прогревается меньше, чем на пару. Максимальная и минимальная температура почвы

на глубине 10 см, а также суточная амплитуда зависят от мощности травостоя и типа растений. Наименьшая амплитуда (до 2 °С) отмечена среди посевов с большой зелёной массой (горох, клевер, просо); амплитуда 2...4 °С отмечена на посевах с меньшей зелёной массой (свёкла, лён, подсолнечник, отава луга); наибольшая амплитуда (4...5 °С) была среди посевов пшеницы, картофеля, отавы клеверного поля. Амплитуда на пару на 5 °С больше, чем под сельскохозяйственными культурами. Следовательно, под растительным покровом температура верхних слоёв почвы ниже, чем на пару.

Температурный режим почвы под сельскохозяйственными растениями в большой степени зависит от «архитектуры» самого растения, фазы его развития, высоты и облиственности, а также от комплекса применяемой агротехники. Различия в температуре почвы под разными культурами приведены в табл. 7.2.

Таблица 7.2

Температура почвы (°С) на глубине 3 см под паром и сельскохозяйственными культурами в 13 ч, Северный Кавказ

Дата, июль	Пар	Озимая пшеница	Кукуруза	Просо
2	36,0	26,0	28,5	32,5
3	32,0	25,0	25,0	31,0
5	38,0	25,0	26,5	33,5
7	26,5	21,0	21,0	22,5
9	28,0	23,0	22,0	24,0

Натурные наблюдения показали, что даже под одной и той же культурой, но при различной агротехнике возделывания температурный режим почвы поверхностных слоёв заметно различался.

Большое влияние на формирование температурного режима почвы оказывает лесная растительность. При сравнении температуры почвы на разных глубинах на лесной поляне и под пологом леса оказалось, что с апреля по октябрь почва в лесу холоднее, чем на поляне. А с ноября по февраль-март почва в лесу теплее, чем на поляне. Годовая амплитуда температуры поверхности почвы в лесу меньше, чем в поле на 7,4 °С. На температуры почвы в лесу оказывает влияние и лесная подстилка, состоящая из отмерших органических остатков, между которыми находится воздух. По некоторым данным в дубовых лесах разность температур воздуха и почвы в ясные дни доходила до 16 °С.

Выше уже отмечалось, что в условиях холмистого рельефа наблюдается неравномерное увлажнение различных участков: вершин, склонов на разных высотах, низин (подножий склонов) и т. п. Различия формируются под влиянием солнечной радиации, ветра, типа почвы, степенью проективного покрытия почвы растениями и т. п. Почвы отрицательных

форм рельефа в сравнимых условиях всегда влажнее почв положительных форм рельефа. Влажность почв вогнутых склонов возрастает от вершины к подошве, на выпуклых склонах, наоборот, понижается к основанию склонов. По мере удаления от вершины и с увеличением уклона влажность почвы выпукло-вогнутых склонов уменьшается, а в нижней части склонов значительно увеличивается. Террасы оказываются влажнее склонов. В сравнимых условиях наиболее влажными оказываются северные склоны, затем следуют восточные, западные и южные склоны. Наветренные склоны суше подветренных, кроме склонов, противоположных влагонесущим потокам воздуха.

А.П. Федосеев предложил коэффициент перераспределения влаги (A), представляющий собой отношение общих запасов влаги различных участков рельефа к запасам водораздельного участка. В условиях Казахстана эти коэффициенты оказались следующими: для понижений рельефа весной $A = 1,56$, для северных склонов $A = 1,0$, для южных склонов $A = 0,81$; летом $A = 1,34$, осенью $A = 1,15$.

Подсчёты Е.Н. Романовой и др. (1983) показали, что перераспределение влаги от осадков летнего периода невелико. В районах избыточного и достаточного увлажнения оно обычно составляет 10...15 % на южных склонах и 15...25 % – на северных, а в засушливых зонах не превышает 10 %. В этих зонах подножия склонов получают влаги на 30...40 % больше, чем ровные участки, а в засушливых зонах – на 15...25 %. В слабозасушливой зоне перераспределение влаги весной равно 15...25 % на южных склонах и 25...30 % – на северных.

Перераспределение влаги зависит также от типа почв. Супесчаные почвы поглощают больше влаги, чем суглинистые, поэтому на супесчаных почвах увлажнение склонов более равномерное, чем на суглинистых. В то же время подножия суглинистых склонов получают больше влаги, чем супесчаных. В условиях пашенного земледелия (большие по площади понижения рельефа) юго-востока Европейской территории страны Н.Н. Желтая проводила многолетние наблюдения за влажностью почвы на различных элементах микрорельефа (табл. 7.3).

Таблица 7.3

Запасы влаги (мм) в почве на различных элементах микрорельефа

Характеристика увлажнения	Западины	Склоны микроповышения	Микроповышения	Большие падины
Весенние запасы влаги в слое почвы 0–100 см к началу весны	128	65	32	–
Запасы продуктивной влаги весной в слое 0–100 см	110	85	35	115
Глубина весеннего промачивания почвы, см	90...150	20...100	10...40	50...150

На разных элементах рельефа по-разному складывается расходование почвенной влаги, различны продолжительность вегетации естественной растительности и урожайность полевых культур. Например, во влажные годы урожайность яровой пшеницы в больших понижениях рельефа при обычной агротехнике достигает 18...20 ц/га, в сухие годы – менее 4 ц/га, а в средние по увлажнению годы – 8...10 ц/га. Активная вегетация естественной растительности во влажные годы продолжается 80...100 суток, на склонах микроповышений – 40...60 суток.

Средняя месячная температура почвы на глубине 20 см самого тёплого месяца года (июль) изменяется от 0 до 36 °С, имея повсюду положительное значение. Амплитуды температур почвы характеризуют степень континентальности почвенного климата. Они изменяются от 16 до 48 °С. Районы повышенной континентальности почвы (28 °С и выше) расположены как на юго-западе, так и на северо-востоке азиатской части бывшего СССР, а пониженной (менее 20 °С) – на северо-западе и севере страны. Суммы температур почвы (выше 10 °С) на глубине 20 см изменяются от менее 400 до 6800 °С и более, нарастая в направлении с севера на юг.

В исследовании В. Н. Димо и А. А. Роде (1968) приведена оценка температурного режима выделенных четырёх типов почв территории бывшего СССР: 1 – мерзлотных; 2 – длительно сезонно промерзающих; 3 – сезонно промерзающих; 4 – непромерзающих. Для выделения подтипов почв авторы использовали количественные оценки годового и сезонного циклов среднегодовой температуры почвы, средней температуры самого тёплого месяца, суммы температур почвы выше 10 °С, глубины проникновения температуры почвы выше 10 °С в тёплый сезон, температуры почвы самого холодного месяца, суммы отрицательных температур в почве и глубины проникновения температуры почвы ниже 0 °С. По каждому подтипу авторы привели интервалы количественных характеристик и классификацию степени континентальности климата (табл. 7.4).

Таблица 7.4

**Континентальность климата почв территории России,
сопредельных стран СНГ и стран Балтии**

Подтипы	Интервал годовой амплитуды температуры почвы (°С) на глубине 20 см
Мягкий	16
Умеренно континентальный	16...24
Континентальный	24...32
Резко континентальный	32...40
Экстраконтинентальный	> 40

Влияние температуры почвы на растения. Известно, что корневые системы основной массы возделываемых однолетних культур охватывают слой почвы до 100...150 см. Особенно заметно влияние температуры

корнеобитаемых горизонтов почвы на развитие растений в начальные этапы их жизни – в период всходов–кущения. Многочисленные эксперименты, проведённые в различные годы, выявили количественные показатели влияния температуры почвы на разные культуры. Опыты показали, что повышение температуры почвы в условиях достаточного увлажнения ускоряет рост однолетних растений и сокращает период их вегетации.

Чем выше температура почвы в период посев–всходы, тем быстрее идёт прорастание семян. При низкой температуре почвы семена подолгу не дают всходов, а при высокой влажности верхних горизонтов повышается вероятность их загнивания. Эти вопросы достаточно полно освещены в специальной агрометеорологической и агрономической литературе. Согласно А. М. Шульгину (1972), влияние температуры почвы проявляется на росте, развитии и продолжительности межфазных периодов и вегетации культур до формирования их урожайности (табл. 7.5, 7.6, 7.7).

Таблица 7.5

Влияние температуры почвы на продолжительность межфазных периодов (сутки) у пшеницы

Температура почвы, °С	Посев–всходы	Всходы–3-й лист	3-й лист–трубка	Трубка–колошение	Колошение–молочная спелость	Молочная спелость–«воскование»	Посев–созревание
6...7	11	23	14	20	32	24	124
8...10	9	20	14	20	22	21	106
12...14	6	15	10	19	17	14	81
15...20	5	13	10	20	17	13	78

Таблица 7.6

Влияние температуры почвы на продолжительность вегетационного периода зерновых культур

Температура почвы	Продолжительность вегетационного периода, сутки		
	пшеница	ячмень	овёс
6...7	124	120	139
8...10	106	98	106
12...14	81	77	83
15...20	78	73	79

Таблица 7.7

Влияние температуры почвы на структуру урожая пшеницы

Температура почвы	Среднее число колосков	Среднее число цветков в колосе	Озерённость	Зерно, %	Солома, %	Корни, %
6...7	11,7	21,9	12,1	25	45	30
8...10	13,8	31,9	12,1	32	47	21
12...14	14,0	48,6	21,2	37	44	19
15...20	14,3	47,8	22,6	42	47	11

В условиях северного земледелия, в Западной и Восточной Сибири прогрев почвы, сильно промёрзшей за зиму, с наступлением весны происходит медленно, и это сказывается на растянутых во времени фазах развития растений.

Таким образом, отрицательное влияние пониженных температур почвы (в сравнении с потребностью культур) проявляется в замедленном развитии, росте, увеличении продолжительности вегетационного периода, в силу чего растения не успевают созреть до наступления осенних заморозков. В результате – снижение величины урожайности культур – главной цели земледельца.

В ряде исследований показано, что биохимические процессы, происходящие в растениях, напрямую связаны с температурой почвы. Например, при понижении температуры затрудняется усвоение растениями фосфора (P) и азота (N), но, с другой стороны, калий (K) лучше других минеральных элементов усваивается при пониженных температурах почвы. Именно с этим связана эффективность внесения минеральных удобрений в почву.

Фитопатологи¹ установили, что у теплолюбивых культур (кукуруза и др.) при пониженных температурах почвы на проростках зерна активно развиваются грибковые заболевания, приводящие к гибели посевов ещё до появления всходов. Хорошо известно значение фактора влажности почвы для сельскохозяйственных культур. Почвенная засуха – одно из опаснейших природных явлений – наносит в отдельные годы значительный урон урожаю возделываемых культур. Подробная информация о природе этого феномена, о его распространении на территории России и повторяемости, о влиянии его на состояние и урожайность культур, о методах агрометеорологических оценок и мерах борьбы с засухами приведена в обширной агрометеорологической и агроклиматической литературе. Основные сведения о засухах помещены в работе «Основы сельскохозяйственной метеорологии», 2011, том I, часть IV «Неблагоприятные и опасные погодные явления для сельскохозяйственного производства», раздел 18.2. Поэтому на страницах настоящего тома эти вопросы не рассматриваются.

7.4. Климат почвы в холодное полугодие

Состояние почвы в холодные месяцы года имеет особое значение для озимых посевов, плодовых культур, виноградников, многолетних цветов и многих видов декоративных деревьев и кустарников, возделываемых человеком. Динамика температуры почвы, её влажности, глубины промерзания, их географическое распространение в зоне сельскохозяйственного производства определяет состояние и продуктивность этих

¹ Фитопатология – наука о болезнях растений, мерах их профилактики и ликвидации.

культур в будущем году. Продолжительность периода зимнего покоя у озимых зерновых культур варьирует по территории страны от 120 до 190 суток. За эти месяцы условия зимнего покоя определяются отрицательными температурами воздуха и почвы, наличием и высотой снежного покрова, оттепелями и их резкой сменой при вторжениях холода.

В программы зимних наблюдений наземной гидрометеорологической сети России (Наставление гидрометеорологическим станциям и постам, 2000, вып. 11, часть I, книга 1) включены систематические наблюдения за температурой почвы на глубине залегания узла кущения озимых злаков (3 см) и корневой шейки зимующих посевов ряда бобовых культур (клевер, люцерна и др.), за высотой и плотностью снежного покрова. Эти наблюдения дают необходимую информацию для периодического контроля и оценки состояния зимующих культур на больших площадях.

Общая характеристика неблагоприятных и опасных гидрометеорологических условий холодного периода года и их влияние на зимующие сельскохозяйственные культуры, а также меры защиты описаны нами в работе «Основы сельскохозяйственной метеорологии», 2011, том I, глава 19.

Два основных фактора – минимальная температура воздуха и снежный покров – формируют температуру почвы в зимние месяцы. Охлаждение поверхности почвы, не защищённой снежным покровом, постепенно передаётся в более глубокие слои почвы (20...160 см), в которых расположена основная масса корневых систем растений (табл. 7.8).

Таблица 7.8

Средняя температура почвы на поверхности (без снега) и на глубинах в Ленинградской области (Шульгин А.М., 1972)

Месяц	Глубина, см				
	0	20	40	80	160
Ноябрь	-1,6	0,6	2,0	3,8	6,0
Декабрь	-6,5	-3,9	-1,9	0,9	3,8
Январь	-8,0	-6,1	-4,2	-1,2	2,8
Февраль	-8,8	-6,9	-5,2	-2,3	1,8
Март	-4,7	-3,7	-2,9	-1,6	0,8
Апрель	-3,8	3,2	1,0	0,2	0,9

Снежный покров оказывает решающее значение в формировании температуры верхних горизонтов почвы. Первые исследования о роли снежного покрова в формировании климата почвенных горизонтов были выполнены А. И. Воейковым. В своих исследованиях – «Влияние снеговой поверхности на климат» (1872) и «Снежный покров, его влияние на почву, климат, погоду и способы исследования» (1889) – автор показал, что такие физические свойства снега, как способность почти полностью отражать солнечные лучи и малая теплопроводность, делают его прекрасным изолятором,

сохраняющим тепло почвы: «Если бы не лежал снег, охлаждение суши земного шара, несомненно, продвинулось бы гораздо дальше, чем в настоящее время». Прекрасно сохраняя тепло почвы, снежный покров сильно выхолаживает нижний слой атмосферы и образует стойкие области низкого давления. Он обеспечивает высокую относительную влажность приземного слоя воздуха и способствует ослаблению ветров:

- снег – плохой проводник тепла, он защищает почву от охлаждения, пока температура воздуха и поверхности снега ниже 0 °С;
- влияние снега тем сильнее, чем он рыхлее; при снеге, пропитанном водой или обледенелом, это влияние незначительно;
- при температуре выше 0 °С влияние снега на температуру почвы обратное, оно продолжается и после таяния, так как тогда верхний слой почвы оказывается пропитанным водой;
- снег уменьшает амплитуду температуры почвы, которая наблюдается при отсутствии снежного покрова;
- согревающее влияние снега превосходит его охлаждающее влияние, и оно тем больше, чем продолжительнее сохраняется снежный покров при морозной погоде.

Теплоизолирующее влияние снежного покрова связано с его плотностью, мощностью слоя и отражательной способностью. Плотность снега – это отношение объема воды, полученной при растапливании некоторого количества снега, к объему снега в тех же единицах. Плотность снега колеблется в больших пределах – от 0,04 (свежевыпавший) до 0,6–0,7 (слежавшийся снег). Плотность свежевыпавшего снега зависит от температуры воздуха во время снегопада: чем выше температура воздуха, тем плотнее снег (табл. 7.9).

Таблица 7.9

Плотность свежевыпавшего снега в зависимости от температуры воздуха

Температура воздуха, °С, при снегопаде	Плотность снега		
	средняя	максимальная	минимальная
Ниже -10	0,07	0,23	0,01
-10...-5	0,09	0,30	0,01
-5...0	0,11	0,45	0,04
0...-2	0,18	0,53	0,07
Выше 2	0,20	0,59	0,16

Теплоизолирующее свойство снежного покрова объясняется его плохой теплопроводностью, которая в 10 раз больше теплопроводности воздуха и в 10 раз меньше теплопроводности минеральной части почвы. В течение зимних месяцев теплопроводность снега изменяется в зависимости от плотности снежного покрова: чем больше его плотность, тем выше теплопроводность. Коэффициент теплопроводности сухого снега λ пропорционален квадрату его плотности d :

$$\lambda = d^2 \text{ кал/см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{град} \quad \text{или} \quad \lambda = 2,81 \text{ Вт/(м} \cdot \text{град)} \quad (7.6)$$

при $d = 0,14 \dots 0,33 \text{ з/см}^3$.

Отражательная способность свежеснегавшего снега равна 70...90 %, поэтому нагревание снега солнечными лучами в 2–3 раза меньше, чем почвы (в зависимости от типа почвы – 15...40 %). Благодаря этому охлаждение поверхности свежеснегавшего снега значительно и её температура ниже температуры приземного слоя воздуха, а также поверхности почвы, не покрытой снегом.

А. М. Шульгиным (1972) был предложен агроклиматический показатель суровости зимы (K):

$$K = T_{AM} / H_{CP}, \quad (7.7)$$

где T_{AM} – средняя из абсолютных минимумов температуры воздуха за месяц (или в среднем за все зимние месяцы), °С; H_{CP} – средняя высота снежного покрова за эти же промежутки времени, см.

Для районов Западной Сибири малосуровые зимы характеризуются показателем до 1; суровые зимы – от 1 до 3 и весьма суровые – выше 3. Весьма суровыми условиями зимнего периода считаются, когда при температуре ниже -30 °С высота снежного покрова оказывается менее 10 см; суровые условия характеризуются такой же температурой воздуха и высотой снежного покрова от 10 до 30 см; малосуровые условия – при минимальной температуре воздуха выше -30° С и снежном покрове выше 30 см. Роль снежного покрова в динамике температур почвы на разных глубинах иллюстрирует рис. 7.8

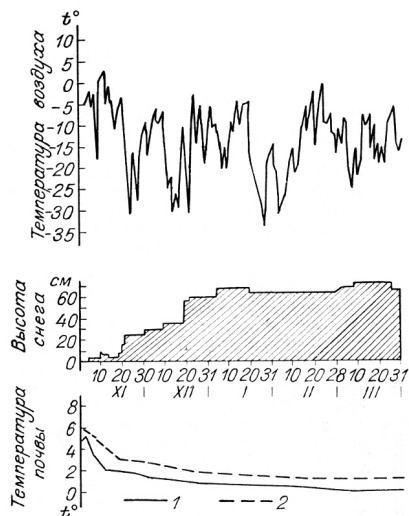


Рис. 7.8. Динамика температуры воздуха и почвы в суровую зиму:
1 – на глубине 0,4 м; 2 – на глубине 0,8 м (Шульгин А. М., 1972)

Эмпирическая зависимость минимальной температуры почвы на глубине залегания узла кущения озимых злаков (3 см) от минимальной температуры воздуха на высоте 2 м и различной высоты снежного покрова представлена на рис. 7.9.

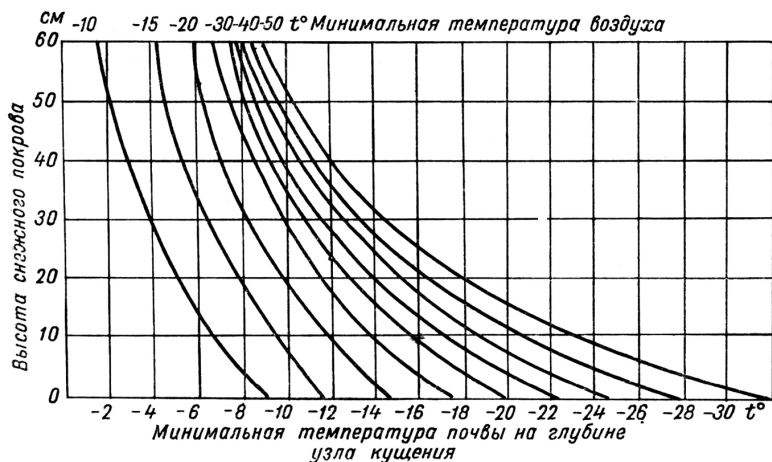


Рис. 7.9. Связь минимальной температуры почвы на глубине 3 см с минимальной температурой воздуха при разной высоте снежного покрова

В.А. Моисейчик (1975) для юго-восточных районов бывшего СССР установила зависимость между минимальной температурой воздуха и глубиной промерзания почвы при высоте снежного покрова 5 и 10 см (рис. 7.10).

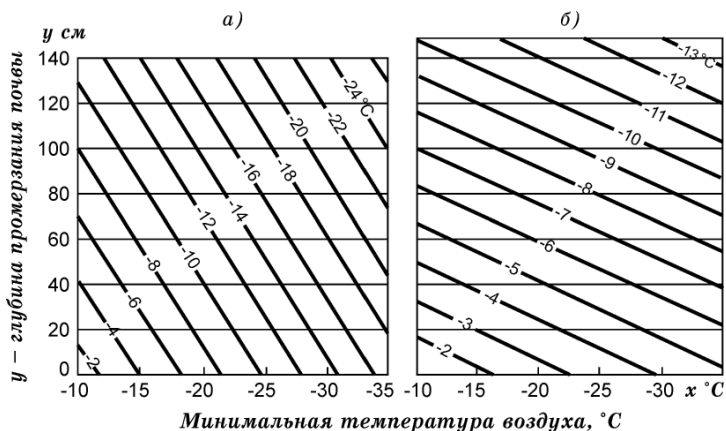


Рис. 7.10. Зависимость минимальной температуры на глубине 3 см от минимальной температуры воздуха (2 м) и глубины промерзания почвы (y) при высоте снежного покрова 5 см (а) и 10 см (б)

На многолетних материалах наблюдений сети метеорологических станций В. М. Мухин составил карту средней глубины промерзания почвы перед началом весеннего снеготаяния на европейской части страны, представленную на рис. 7.11.

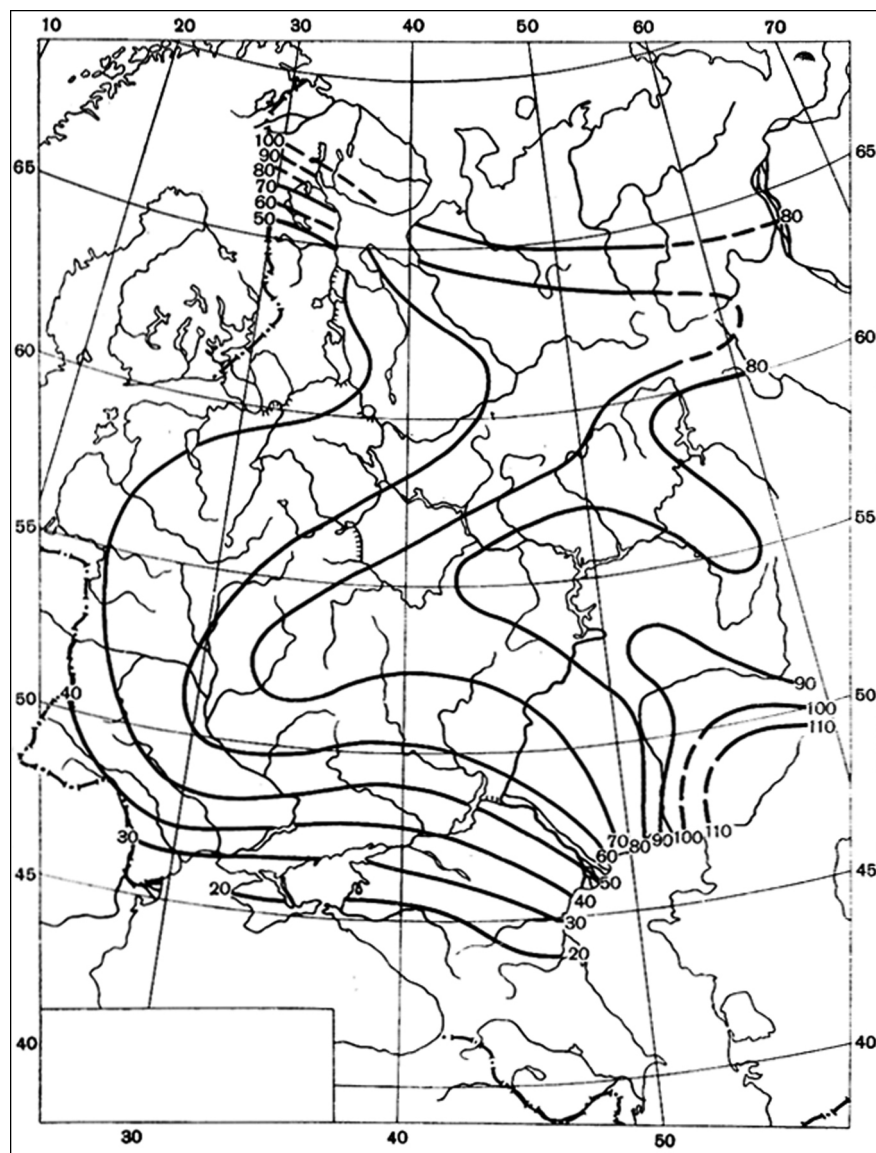


Рис. 7.11. Средняя глубина промерзания почвы (см) перед началом снеготаяния весной на ЕТС

7.5. Основы регулирования климата почвы (мелиорации)

Приёмы улучшения микроклимата сельскохозяйственных полей в тёплый период года были рассмотрены нами в главе 6. Регулирование температуры и влажности почвы в холодное полугодие имеет большое значение в растениеводстве. Сохранность зимующих растений, их продуктивность следующего года в значительной степени зависят от климата почвы зимнего периода и условий перезимовки, складывающихся в каждом конкретном году.

Широкое распространение в практике сельскохозяйственного производства получили *снежные мелиорации*. Это комплекс агротехнических мероприятий, направленных на улучшение температурного и водного режимов почвы в период перезимовки озимых и многолетних плодовых культур. Уменьшая или увеличивая мощность снежного покрова, его плотность, продолжительность залегания снега на полях, земледельцы регулируют температурный и влажностный режимы для зимующих растений.

Основные принципы регулирования климата почвы зимой следующие:

- высота снежного покрова должна быть такой, которая создает оптимальный режим температуры для зимующих растений. При малом снежном покрове температура на глубине 3 см нередко опускается ниже критической для растений, что чревато их вымерзанием. При большом снежном покрове температура на этой глубине может оказаться близкой к 0 °С, а влажность почвы избыточной, что также ведёт к выпреванию и гибели посевов;

- высота снежного покрова должна быть дифференцированной в зависимости от степени холодостойкости культур, их сортов и агротехники посева, от условий осеннего развития растений и их закалки к началу зимы;

- снежный покров должен залегать равномерно по всей площади поля для обеспечения одинакового температурного и влажностного режимов в почве, необходимых для механизированной обработки почвы ранней весной.

Соблюдение этих принципов обеспечивается проведением соответствующих приёмов снегозадержания и снегонакопления. Снегозадержание направлено на удержание и сохранение выпавшего снега от сдувания сильным ветром. Снегонакопление осуществляется путем вторичного отложения снега, снесённого ветром с окружающих пространств. Перенос снега происходит всю зиму при скорости от 2 до 9 м/с. За счёт участков сноса накапливают снег значительной высоты в местах его отложения. При снегозадержании частично используется и переносимый с других площадей снег, а при снегонакоплении удерживается снег, выпадающий на иной территории.

Снегозадержание широко применяется в Западной и в некоторых районах Восточной Сибири, на юге и юго-востоке Европейской территории

страны, в Северном Казахстане. В этих районах с континентальным климатом снежный покров обычно не превышает высоты 30 см, а сильные морозы начинаются задолго до установления устойчивого снежного покрова. В юго-западных районах ЕТС снежный покров образуется обычно до наступления сильных морозов, поэтому снегозадержание должно проводиться после промерзания почвы на глубине 3 см до -5°C .

Снегонакопление применяется в основном в степных и лесостепных районах страны, в которых запасы почвенной влаги к началу зимы обычно бывают незначительными. Накопленный снег, поступивший при переносе из других территорий, может пополнить ресурсы влаги в таких районах. В северной половине территории России в лесной зоне снежный покров в среднем превышает 50...60 см и устойчиво сохраняется в течение зимы. Более того, благодаря лесным массивам весеннее таяние снега происходит постепенно, что очень важно для более глубокого промачивания почвы и исключения бурных весенних потоков, в результате которых происходит развитие процессов водной эрозии почвы и образование овражного рельефа.

Основные способы снежных мелиораций (снегозадержание, снегонакопление и снегууплотнение) осуществляется агротехническими и техническими приёмами: с помощью самого снега (рис. 7.12) или с помощью различных кулис (рис. 7.13).

Весьма показательна эффективность снегозадержания, приведённая А. М. Шульгиным (1972) в районе г. Барнаул (табл. 7.10).



Рис. 7.12. Снежные валы, образованные снегопахом на поле с озимыми культурами

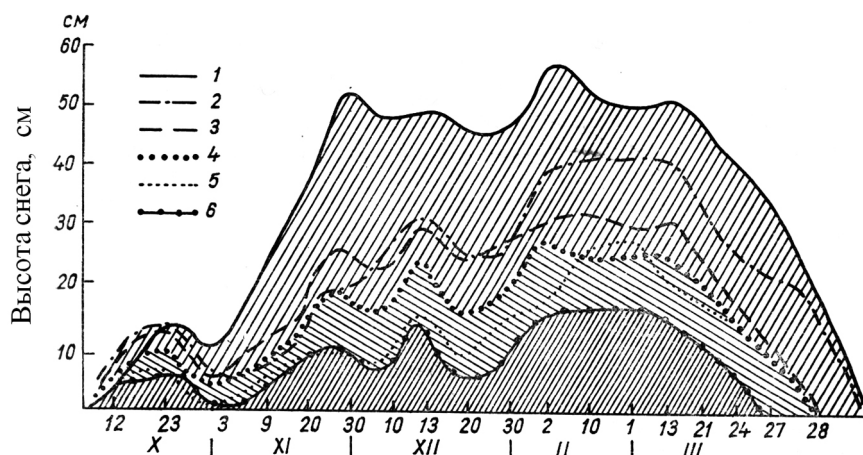


Рис. 7.13. Динамика снегонакопления различными кулисами:

1 – кулисы из побегов горчицы высотой 70 см; 2 – кулисы из побегов подсолнечника высотой 80 см; 3 – высокая стерня, 42 см; 4 – средняя стерня, 23 см; 5 – низкая стерня, 13 см; 6 – контроль (пар без искусственного снегозадержания); на оси ординат – высота снега (см)

Таблица 7.10

**Эффективность регулирования высоты снежного покрова
и температуры почвы снегозадержанием**

Характеристика участка	Средняя высота снежного покрова	Минимальная температура почвы в слое 3 см		Запас продуктивной влаги (мм) в слое 0...100 см			Средняя из наибольших глубин промерзания почвы, см
		средняя за зиму	абсолютная	осень	весна	прибавка	
Без снегозадержания	12	-14,4	-31,6	99	115	16	150
Со снегозадержанием	41	-6,5	-15,1	98	165	67	50

Широкие исследования, выполненные многими учёными в различные годы на территории России и сопредельных государств СНГ и Балтии, позволили установить:

– возможность регулирования температурного режима почвы путём создания снегозадерживающих препятствий различной высоты, кулисными (высокостебельными) растениями, межкулисными полосами различной ширины, сроками начала снегонакопления и т.п.

– эффективность снежных мелиораций и сроков их проведения в зависимости от конкретных климатических и погодных условий.

Таким образом, регулирование климата почвы в зимний период позволяет с помощью снежных мелиораций создавать более однородный (в

пределах конкретного поля) умеренно-холодный зимой и более влажный весной климат почвы, благоприятный для получения устойчивых и высоких урожаев озимых и плодовых культур.

7.6. Принципы и методы районирования климата почвы

Почвенный климат является составной частью природной среды, формируясь под её воздействием, отображает комплекс физико-географической среды в целом. По определению В. В. Докучаева, «почва есть зеркало климата», но климат почвы имеет специфические особенности, обусловленные средой его формирования, влиянием растительного и снежного покровов, рельефа и производственной деятельности человека.

Районирование климата почвы является составной частью агроклиматического районирования и комплексного физико-географического районирования территории. Известно, что между всеми компонентами физико-географического комплекса существует тесная взаимозависимость, но темпы и продолжительность исторического развития каждого из них неодинаковы. Согласно Ф. Ф. Давитая (1970), связь между растительностью, фауной, почвой, рельефом и климатом может быть адекватной лишь при учёте временного масштаба их взаимодействия. Для формирования и изменения в той или иной природной зоне климата достаточны десятилетия, флоры и фауны – столетия, почвы – тысячелетия, рельефа – десятки и сотни тысяч лет. Поэтому не может быть тесной связи между климатом, определяемым по материалам наблюдений метеорологической сети в последние 30...50 лет, и почвой – продуктом *многовекового* взаимодействия материнской породы, климата, флоры и фауны. В то же время некоторые физические свойства почвы, особенно её механический состав, оказывает большое влияние на тепловой, водный и газовый режимы почвы, на особенности годового хода её увлажнения. Отметим при этом, что изменения механического состава почвы в определённой мере связаны с вековой производственной деятельностью человека на земле.

Смысл районирования климата почвы заключается в выделении территории разного масштаба (страны, регионов, административных единиц, отдельных хозяйств) по основным элементам почвенного климата и их совокупности для сельскохозяйственной оценки почвенных ресурсов в интересах их рационального использования в земледелии. При выборе показателей при районировании почвенного климата исходят из особенностей объекта исследования. Например, используются показатели обеспеченности запасов почвенной влаги, тепловых ресурсов почвы, изменяющихся количественно по поясам, зонам и подзонам, обусловленных во многом радиационными и гидрометеорологическими факторами атмосферного климата, геолого-геоморфологическими условиями, зональностью в распределении почв, растительности и в целом особенностями природной среды. При

учёте производственных факторов большое значение имеют сроки и техника проведения полевых работ в зависимости от биологических особенностей возделываемых культур и состояния почвы (сроки и степень промерзания почвы осенью, оттаивание и прогревание почвы весной, запасы влаги в почве в период вегетации и др.).

Таким образом, при оценке ресурсов климата почвы и его районировании решающее значение имеет производственно-экологический подход, предусматривающий зависимость продуктивности посевов, уровень плодородия почвы и её водно-физических (агрогидрологических) свойств.

Например, в северо-западной части ЕТС решающим фактором выращивания сельскохозяйственных культур является температурный режим почвы при достаточном и даже избыточном увлажнении вегетационного периода. При районировании в качестве показателя теплового режима почвы были приняты средние даты наступления температуры 5 и 10 °С на глубине 20 см весной, сумма температур выше 10 °С и соответствующая продолжительность периода с температурой выше 10 °С (рис. 7.14).

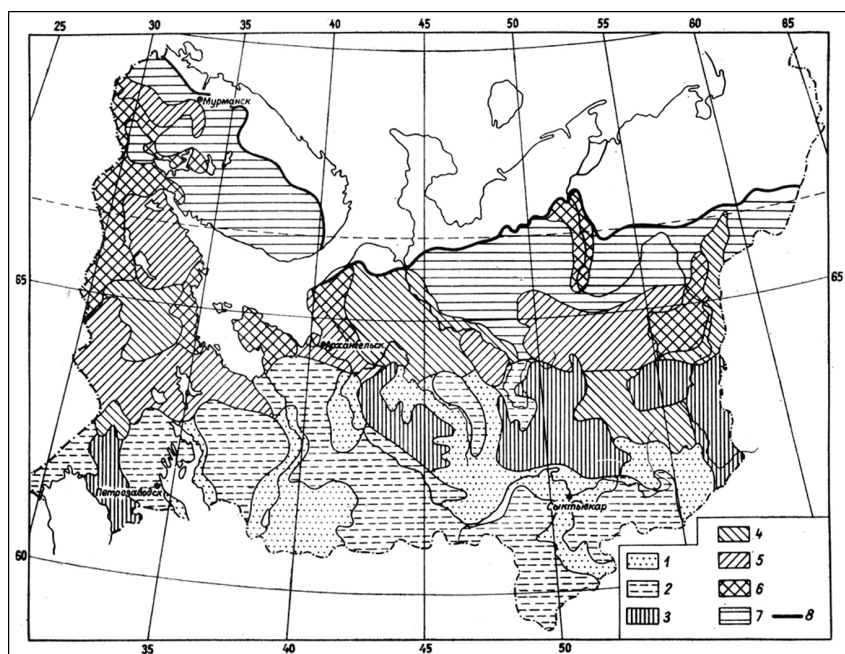


Рис. 7.14. Карта районирования Севера ЕТС по условиям теплообеспеченности почв:

1 – самый тёплый; 2 – тёплый; 3 – умеренно-тёплый; 4 – умеренный; 5 – умеренно-холодный; 6 – холодный; 7 – наиболее холодный; 8 – граница зон тундровых почв (Горышина Н.Г., 1969)

А.М. Шульгин предложил следующие количественные характеристики основных типов климата почвы на территории России, сопредельных стран СНГ и Балтии (табл. 7.11).

Таблица 7.11

Основные количественные характеристики типов климата почвы территории бывшего СССР

Тип по температуре	t _{ср.} °С на глубине 20 см в тёплый период	Тип по влажности	Средние запасы продуктивной влаги (мм) на глубинах:	
			0...100 см	0...20 см
Холодный	0...5	Избыточно влажный	200	50
Умеренно-тёплый	5...10	Влажный	150...200	30...50
Тёплый	10...15	Умеренно-влажный	100...150	20...30
Весьма тёплый	15...20	Недостаточно влажный	50...100	10...20
Жаркий	20	Сухой	50	10

На равнинных территориях различия связаны в основном с резко выраженной пестротой почвенного покрова, особенно характерной для Нечернозёмной зоны страны. Например, на территории Ленинградской области разности значений температуры песчаной и тяжелосуглинистой почв на глубине 10...20 см составляли 3,0... 4,0 °С при расстоянии между участками всего 20 м. Весной тяжёлые почвы с высоким содержанием влаги просыхают медленно, поэтому на глубине 20 см температура 5 °С наступает на 10...15 суток позже, чем в воздухе. Лёгкие почвы прогреваются до 5 °С на 7–10 суток раньше, чем воздух. Температура осушенной торфяной почвы на 3...5 °С выше, чем температура неосушенного торфяника.

Районирование климата почв основной растениеводческой зоны бывшего СССР было выполнено А. М. Шульгиным (1972) по следующим количественным характеристикам:

- средней температуре почвы на глубине 20 см за периоды: *холодный* (0...5°С), *умеренно-тёплый* (5...10°С), *тёплый* (10...15°С), *весьма тёплый* (15...20°С), *жаркий* (>20°С);

- запасам продуктивной влаги, соответственно, в метровом (0...100 см) и пахотном (0...20 см) слоях почвы в начале весны: *избыточно влажный* (>200 мм; >50 мм); *влажный* (150...200; 30...50 мм); *умеренно-влажный* (100...150; 20...30 мм); *недостаточно влажный* (50...100; 10...20 мм); *сухой* (менее 50 , менее 10 мм);

- теплообороту или амплитуде температуры почвы на глубине 20 см за год: *малый* (менее 10 °С); *умеренный* (10...20 °С), *большой* (более 20 °С);

– влагообороту (или амплитуде запасов почвенной влаги в метровом слое почвы за тёплый период): *равномерный* – менее 50 мм, *неравномерный* – 50...100 мм, *весьма неравномерный* – более 100 мм.

На основании этой типизации им была предложена схема геотермических поясов (рис. 7.15).

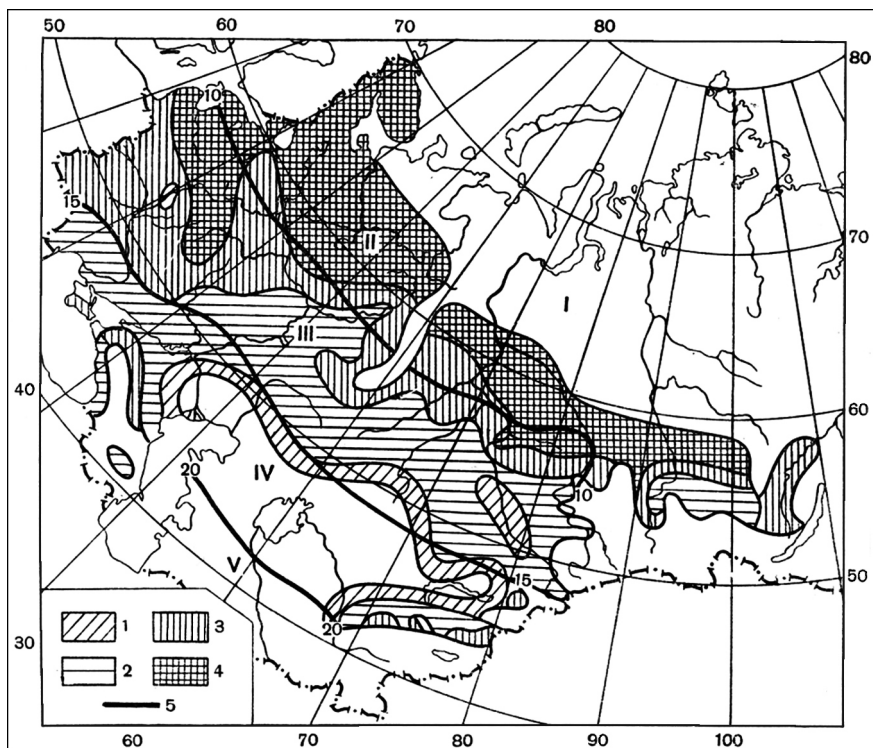


Рис. 7.15. Схематическая карта геотермических поясов и зон увлажнения почвы.

Зоны: 1 – недостаточно влажная; 2 – умеренно-влажная; 3 – влажная; 4 – избыточно влажная; 5 – геотермические пояса (средняя температура почвы на глубине 20 см за тёплый период: I – холодный; II – умеренно-тёплый; III – тёплый; IV – весьма тёплый; V – жаркий

Детальное изучение почвенного климата в нескольких областях Нечернозёмной зоны страны выявило большую пестроту в сроках весеннего прогревания почвы. Например, в Псковской области суммы температур почвы выше 10 °С на глубине 20 см в разных районах на конкретную дату различались более чем на 800 °С.

Пестрота значений влагозапасов, обусловленная водно-физическими свойствами почв, также весьма существенна. Так, при сравнительно

одинаковом количестве выпавших осадков на различных типах почв и пестром распределении величины влагозапасов на таких почвах диапазон цифровых значений этих запасов по территории достигает 200 %.

В процессе изучения климата почвы на территории Российской Федерации и сопредельных стран СНГ и Балтии были выявлены закономерности распределения температуры, влажности, составлены карты распределения температуры почвы на разных глубинах, запасов продуктивной влаги в почве под различными сельскохозяйственными культурами по декадам и основным периодам вегетации (Справочник... под ред. Л. С. Кельчевской, 1979). Пространственная и временная изменчивость влажности почв получила убедительное подтверждение в двух капитальных изданиях «Атласа запасов продуктивной влаги в почве...» (1983, 1987), разработанных в ФГБУ «ВНИИСХМ» Росгидромета коллективом сотрудников под руководством Л. С. Кельчевской.

Для холодного периода года А. М. Шульгин (1972) провёл почвенно-климатическое районирование. За основу автор принял интегральный показатель зимы – средний из абсолютных годовых минимумов температуры почвы на глубине залегания узла кущения злаков (3 см). По этому показателю им была построена карта по земледельческой части страны, отражающая районирование зимнего климата почвы и снежных мелиораций (рис. 7.16).

На этой карте выделено семь районов:

1 – *очень мягкий*, не нуждающийся в снежных мелиорациях, с отличными условиями перезимовки озимых культур. Средний из абсолютных минимумов температуры почвы на глубине 3 см от -4 до -8 °С. Район разделён на два подрайона, различающиеся между собой средней высотой неустойчивого снежного покрова (от 5 до 20 см);

2 – *мягкий*, требующий снежных мелиораций в отдельные зимы. Средний из абсолютных минимумов температуры почвы на глубине 3 см от -8 до -12 °С. Вероятность зим с температурой почвы ниже критической¹ для зерновых составляет не более 10...20 %. Этот район подразделён на три подрайона, различающиеся между собой различной повторяемостью холодных зим на общем фоне благоприятных условий для перезимовки посевов. Условия для зимостойкой озимой ржи благоприятнее, чем для озимой пшеницы;

3 – *умеренно-холодный*, требующий проведения снежных мелиораций во многие зимы, условия для перезимовки посевов удовлетворительные. Средний из абсолютных минимумов температуры почвы на глубине 3 см от -12 до -16 °С. Вероятность зим с температурой почвы ниже критической варьирует от 5 до 20 % для озимой ржи и от 20 до 50 % – для озимой

¹ Критическая температура на глубине залегания узла кущения (3 см) для озимой пшеницы – -16 °С, для озимой ржи – -20 °С.

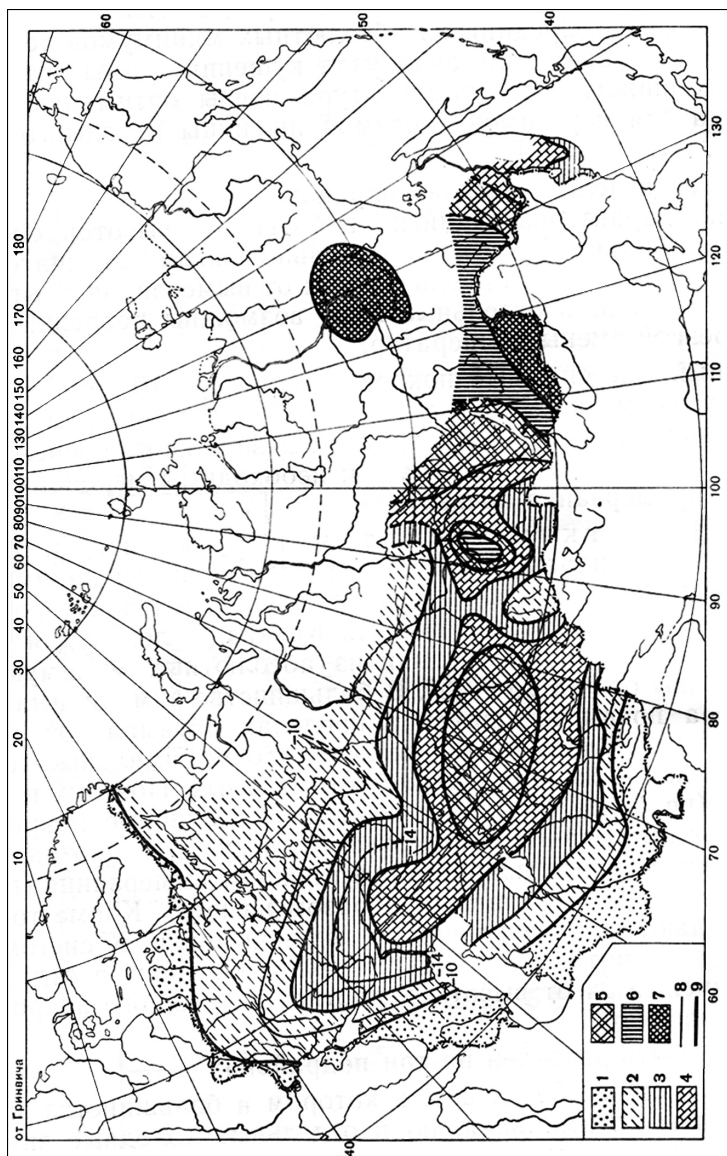


Рис. 7.16. Районы зимнего климата почвы и снежных мелiorаций:

1 – очень мягкий, не нуждающийся в проведении снежных мелiorаций; 2 – мягкий, требующий проведения снежных мелiorаций в отдельные зимы; 3 – умеренно-холодный, требующий проведения снежных мелiorаций во многие зимы; 4 – холодный, требующий проведения снежных мелiorаций в большинстве зим; 5 – очень холодный, требующий ежегодного проведения снежных мелiorаций; 6 – суровый, требующий ежегодного проведения снежных мелiorаций; 7 – очень суровый, требующий ежегодного проведения снежных мелiorаций; 8 – границы подрайонов; 9 – границы районов

пшеницы. В этом районе исключительное значение имеет снегозадержание в большинстве зим, главным образом на посевах озимой пшеницы. Район разделён на три подрайона, различающихся по уровню абсолютных минимумов температуры на глубине 3 см в указанных пределах;

4 – *холодный*, требующий проведения снежных мелиораций в большинстве зим. Средний из абсолютных минимумов температуры почвы на глубине 3 см от -16 до -20 °С. Условия для перезимовки ниже удовлетворительных. Возможна частая гибель посевов от вымерзания;

5 – *очень холодный*, требующий проведения ежегодных снежных мероприятий. Условия для перезимовки посевов плохие и возможны только при достаточном снежном укрытии. Средний из абсолютных минимумов температуры почвы на глубине 3 см от -20 до -24 °С. Район подразделён на три подрайона;

6 – *суровый*, необходимо ежегодное проведение снежных мелиораций. Средний из абсолютных минимумов температуры почвы на глубине 3 см от -24 до -28 °С. Абсолютный минимум достигает -30 °С. Минимальная температура ниже критической (-20 °С) вероятна в 50...70 % лет, а ниже -25 °С – в 50 % лет. Район разделён на два подрайона;

7 – *очень суровый*, снежная мелиорация необходима ежегодно. Средний из абсолютных минимумов температуры почвы на глубине 3 см от -28 до -32 °С. Перезимовка озимой ржи возможна лишь в отдельные, наиболее благоприятные годы.

Обобщённая характеристика температурных режимов почвы в зимний период применительно к озимым культурам приведена в табл. 7.12.

Таблица 7.12

Характеристика зим по температурному режиму почвы (Шульгин А. М., 1972)

Районы почвенного климата	Характеристика зимы для перезимовки озимых культур	Средний из абсолютных минимумов температуры на глубине 3 см	Вероятность температуры почвы ниже °С в отдельные зимы (%)	
			- 16	- 20
I, II	Благоприятные условия; повреждения возможны только в отдельные зимы	- 12	20	5
III	Средние условия; повреждения возможны в ряде зим	- 12...- 16	20...50	5...20
IV...VII	Неблагоприятные условия; повреждения возможны во многие зимы	- 16	50	20

Районирование почвенного климата по отдельным регионам, административным областям, районам, хозяйствам и сельскохозяйственным культурам открывает возможности более детально характеризовать их ресурсы применительно к конкретным задачам сельскохозяйственного производства.

Таким образом, материалы, приведённые в этой главе, описывают основные достижения в познании климата почв, имеющего большое научно-практическое значение. В основу выполненных исследований были положены теоретические разработки отечественной климатологии и почвоведения, идеи А.И. Воейкова и В.В. Докучаева о почвенно-климатической зональности, о роли снежного покрова в земледелии, о влиянии хозяйственной деятельности человека на почвы и др.

Наибольшее развитие это направление в сельскохозяйственной метеорологии получило в 30–70-е гг. прошлого столетия, когда проводились экспериментально-полевые, экспедиционные и лабораторные исследования в различных почвенно-климатических зонах бывшего СССР. Были изучены и выявлены типы годового хода запасов продуктивной влаги и температуры различных почв, выделены агрогидрологические зоны, геотермические пояса и зоны увлажнения почвы, выполнено районирование территории по климату почвы.

В течение многих десятилетий наблюдательная сеть метеорологических станций Росгидромета обеспечивала сбор материалов по динамике температуры почвы на глубине залегания узла кущения злаков и корневой шейки многолетних бобовых культур в зимние месяцы. Ряды таких массовых наблюдений используются во многих агрометеорологических исследованиях, а текущие данные широко применяются в оперативной работе агрометеорологов. Однако до сих пор определение зимнего состояния посевов проводится трудоёмким способом вырубки монолитов замёрзшей почвы с зимующими зерновыми культурами. Попытка разработки механизированных или иных способов оценки состояния зимующих культур, предпринятая во ВНИИСХМ и другими организациями, не дала положительных решений. По-видимому, это предстоит выполнить в будущем. Были экспериментально установлены критические температуры и оптимальные значения величины запасов продуктивной влаги, температуры почвы для нормальной жизнедеятельности и перезимовки основных зимующих и плодовых культур; установлены количественные зависимости их состояния и продуктивности от элементов климата почв. Выполнено агроклиматическое описание особенностей климата почв в холодный и тёплый периоды, определяющих жизнедеятельность и продуктивность посевов, садов и виноградников.

Получены характеристики неблагоприятных и опасных гидрометеорологических условий холодного периода года и влияние их на зимующие культуры, разработаны меры защиты культур от неблагоприятных условий. Дано научное обоснование эффективности многих агротехнических приёмов, направленных на улучшение климата почв в разных регионах страны. Эти вопросы рассмотрены нами в работе «Основы сельскохозяйственной метеорологии», 2011, том 1, часть I, главы 18 и 19.

ЧАСТЬ 2

ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА НА ЭКОСИСТЕМЫ, АГРОСФЕРУ И СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЕ ПРОИЗВОДСТВО

Глава 8

СОВРЕМЕННОЕ ГЛОБАЛЬНОЕ ПОТЕПЛЕНИЕ И АГРОСФЕРА

8.1. Глобальный парниковый эффект и генезис современных изменений климата

Под климатом обычно понимают осреднённые характеристики погоды и их флуктуаций. Статистические характеристики состояния климатической системы получают путём осреднения характеристик погоды за интервал времени, намного превышающий предел предсказуемости, который составляет около двух недель. Климатическая система включает в себя, помимо атмосферы, океан, ледниковые щиты, деятельную поверхность суши и биосферу. Все эти объекты находятся в сложном нелинейном взаимодействии. Существует междугодовая изменчивость климата; кроме того, климат может испытывать флуктуации масштаба нескольких лет и изменяться за более продолжительные промежутки времени. В качестве стандартного периода для оценивания климатических переменных, характеризующий текущий или современный климат, по рекомендации ВМО используется период, равный трём десятилетиям. В настоящее время это период с 1961 по 1990 год. Но поскольку климат всегда изменяется, строго определённого интервала не существует, и результаты зависят от выбранного интервала и начала отсчёта. Например, в Четвёртом оценочном докладе Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК или IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change) используются 20-летние периоды (последний период – 1981–2000 гг.).

Причины климатических изменений

Изменения глобального климата происходят в результате разнообразных процессов, приводящих к изменению потоков радиационной энергии внутри системы. Например, может измениться поглощение

солнечной радиации, а также поглощение длинноволновой радиации атмосферными газами.

К основным возможным причинам изменений климата относятся (Б. Болин и др., 1989):

- изменение светимости Солнца или параметров орбиты Земли;
- изменение доли коротковолнового излучения Солнца, приходящего к верхней границе атмосферы и поглощаемого атмосферой или поверхностью Земли;
- изменение потока уходящего длинноволнового излучения на верхней границе тропосферы;
- изменение количества тепла, накапливаемого в глубинах океана.

Вторая и третья причины в свою очередь могут возникнуть вследствие:

а) изменений радиационных потоков, связанных с изменениями состава атмосферы;

б) изменений прозрачности атмосферы, вызванных либо вулканической деятельностью, либо антропогенными поступлениями аэрозоля, либо вариациями облачности;

в) изменений количества отражённой поверхностью энергии (изменений альбедо);

г) изменений потока длинноволнового излучения, идущего от поверхности или поглощаемого водяным паром в атмосфере.

Солнечное излучение

Известно, что светимость Солнца изменяется в течение очень больших промежутков времени. Непосредственных свидетельств наличия климатически значимых вариаций солнечного излучения в масштабах от одного года до тысяч лет не имеется. Влияние солнечных пятен на климат не установлено, так как нет достаточного количества данных, чтобы подтвердить статистически значимые связи. В любом случае эффекты, вероятно, очень малы. Были обнаружены изменения интенсивности излучения в течение 11-летнего цикла солнечной активности, но они составляют около 0,05 % (спутниковые данные). Такие вариации излучения должны оказывать ничтожно малое влияние на среднюю глобальную температуру – во всяком случае обнаружить её невозможно.

Состав атмосферы

Земная атмосфера состоит из смеси хорошо перемешанных газов, основные из которых азот (N) с объёмной концентрацией 78 %, кислород (O₂) – 20,8 %, аргон (Ar) – 0,9 %, диоксид углерода (CO₂) – 0,038 %. Остальные атмосферные газы имеют объёмные концентрации не более $2 \cdot 10^{-3}$ %. Их называют малыми газовыми примесями. Наиболее важными из них являются вода (H₂O), озон (O₃), закись азота (N₂O), метан (CH₄), фреоны

(хлорфторпроизводные метана). Присутствие водяного пара в атмосфере вызвано естественными причинами, а наличие фреонов в ней – только внешними (антропогенными) воздействиями. Концентрация других малых газовых составляющих изменяется под влиянием антропогенных воздействий, возможны также их естественные вариации. Эти газовые примеси поглощают и излучают радиацию и поэтому способны влиять на климат Земли. Все эти газы в совокупности называют парниковыми.

Многие газовые составляющие атмосферы поглощают и переизлучают энергию в разных интервалах солнечного спектра. Изменение концентрации любого из этих газов влияет на распределение потоков излучения в атмосфере по высоте: увеличение количества парникового газа может привести к заметному нагреву тропосферы и охлаждению стратосферы. Это происходит по следующей причине. Практически все атмосферные газы обладают колебательными полосами поглощения в инфракрасной области спектра. Если полосы поглощения атмосферных газов имеют достаточную интенсивность и расположены в тепловой области спектра электромагнитного излучения, где сосредоточена основная часть излучения земной поверхности, то, поглощая излучение от земной поверхности, они создают тем самым парниковый эффект.

Механизм воздействия CO_2 на климат также заключается в парниковом эффекте. В то время как для коротковолновой солнечной радиации CO_2 прозрачен, уходящую длинноволновую радиацию этот газ поглощает и переизлучает поглощённую энергию по всем направлениям. Вследствие этого эффекта с увеличением содержания CO_2 и других газов в атмосфере количество поглощённой ими тепловой радиации, следовательно, переизлучаемой ими к земной поверхности, увеличивается, что приводит к нагреву поверхности земли и нижней атмосферы. Кроме того, выяснено, что большое число других парниковых газов атмосферы сходным образом воздействует на радиационный баланс Земли. Их концентрации также меняются из-за воздействия естественного и антропогенного характера. Поскольку увеличение концентраций CO_2 и других парниковых газов приводит к нагреванию поверхности Земли и нижней атмосферы, ожидаемое воздействие на климат, а также на другие характеристики и компоненты глобальной системы (например уровень моря, вечная мерзлота, сельское хозяйство) должно рассматриваться как следствие совокупного вклада в потепление всех парниковых газов.

Концентрации некоторых парниковых газов возрастают со временем. Этот тренд экстраполируют для предсказания значения концентраций этих газов в будущем. Такой прогноз составляют также путём моделирования их геохимических циклов.

Наиболее важным фактором изменения климата является увеличение концентрации CO_2 . Представление, что климат мог меняться в

результате выброса в атмосферу двуокиси углерода появилось не сейчас. Ещё Аррениус в 1896 г. указывал на то, что сжигание ископаемого топлива могло привести к увеличению концентрации атмосферного CO_2 и тем самым изменить радиационный баланс Земли. В 30-х гг. XX века G. S. Callender (1938) впервые убедительно показал, что концентрация атмосферного CO_2 увеличивается. Учитывая количество топлива, израсходованного за 50 предшествующих лет, G. S. Callender оценил, что три четверти CO_2 , образованного при сжигании топлива, задерживается в атмосфере. Эта оценка значительно отличалась от распространённых тогда представлений: весь углекислый газ, создаваемый человеком, растворяется в океане.

G. S. Callender впервые рассчитал зависимость температуры воздуха от изменений массы углекислого газа, при учёте влияния водяного пара на радиационный режим атмосферы. В этом расчёте он получил эффект насыщения, т.е. уменьшения скорости роста температуры воздуха при увеличении количества CO_2 . Хотя найденная им путём довольно элементарного расчёта величина повышения средней температуры воздуха при удвоении концентрации углекислого газа была занижена, она согласуется с результатами аналогичных вычислений по сложным моделям теории климата, выполненным через много лет после его исследований.

Изменение содержания парниковых газов и аэрозоля в атмосфере

Цикл CO_2 изучен лучше циклов других газовых примесей, поскольку имеется достаточно длинный ряд наблюдений за его концентрацией. В настоящее время действуют программы наблюдений на Мауна-Лоа (Гавайские острова) и Южном полюсе (начало наблюдений – 1957–1958 гг.). Значения концентрации CO_2 обычно приводятся в миллионных долях («частей на миллион» – млн^{-1} , или ppm, англ.).

До начала индустриальной эры его средняя глобальная концентрация составляла $280 \pm 10 \text{ млн}^{-1}$ (или $280 \pm 10 \text{ ppm}$). В течение последних 10 000 лет она изменялась не более чем на 20 млн^{-1} , причём эти изменения были вызваны естественными причинами. В Четвёртом оценочном докладе МГЭИК за 2007 г. (IPCC, 2007) отмечено, что наблюдается значительный рост концентрации CO_2 в атмосфере за последние 250 лет. С середины XVIII столетия до 2005 г. концентрация CO_2 увеличилась на 35 % и составила 379 млн^{-1} .

Киотский протокол. В 1992 г. была принята Рамочная конвенция ООН по изменению климата (РКИК), в которой декларировалась озабоченность мирового сообщества потеплением климата. Конкретные меры, направленные на уменьшение антропогенного воздействия, были сформулированы в Киотском протоколе, принятом в 1997 году. Страны, присоединившиеся

к протоколу, взяли обязательства сократить выброс парниковых газов к первому контрольному сроку (2008–2012 гг.) до 8 % относительно уровня 1990 г., принятого за базовый; не превышать выбросы уровня 1990 г. и ограничить увеличение выбросов на уровне 1–8 % выше базового.

Национальные объёмы эмиссии (выбросы) парниковых газов в атмосфере оцениваются по различным секторам экономики на основе данных государственной статистической отчётности и иных данных о процессах и видах деятельности, приводящих к антропогенным выбросам из источников и абсорбции¹ поглотителями парниковых газов. В соответствии с обязательствами Российской Федерации по Рамочной конвенции ООН об изменении климата (РКИК) и Киотскому протоколу подготовка Национальных докладов о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Киотским протоколом, осуществляется на ежегодной основе с последующим представлением в секретариат РКИК и размещением на Интернет-сайте РКИК и Роскомгидромета (<http://unfccc.int>; <http://meteorf.ru>). Изменение выбросов парниковых газов в России в энергетике, промышленности, сельском хозяйстве и при обращении с отходами (без учёта выбросов в секторе землепользования, изменениями землепользования и лесного хозяйства) в период с 1990 по 2004 г. представлены в табл. 8.1. Выбросы парниковых газов в этих секторах России в 2004–2006 гг. незначительно отличались от 2004 г. и составляли около 70 % уровня 1990 г. (Оценочный доклад... Техническое резюме, 2008).

Таблица 8.1

Антропогенная эмиссия парниковых газов на территории России, выбросы которых ограничены Киотским протоколом (НС-4, 2006)

Парниковый газ	Единица измерения	1990 г.	2000 г.	2004 г.
CO ₂	млн т CO ₂ % от 1990 г.	2362 100	1520 64	1630 69
CH ₄	млн т CO ₂ -экв. % от 1990 г.	550 100	286 52	336 69
N ₂ O	млн т CO ₂ -экв. % от 1990 г.	98 100	35 36	96 98
Техногенные газы (гидрофтор- и перфторуглеродные соединения, гексафторид серы)	млн т CO ₂ -экв. % от 1990 г.	40 100	42 105	46 115
Сумма выбросов парниковых газов (ПГ)	млн т CO ₂ -экв. % от 1990 г.	3050 100	1883 62	2108 69

Примечание. CO₂-эквивалент – количество некоторого парникового газа, которое обеспечивает тот же парниковый эффект, что и CO₂.

¹ Абсорбция – физико-химический процесс поглощения веществ из раствора или смеси газов твёрдыми телами или жидкостями с образованием растворов (Хромов С. П., Мамонтова Л. И. Метеорологический словарь, 1963).

МГЭИК разработала сценарии эмиссии парниковых газов и аэрозоля в атмосферу в XXI веке с учётом демографических, экономических, технологических и других факторов SRES (Special Report on Emission Scenarios). Согласно «жёсткому» сценарию A2, к 2050 г. концентрации основных парниковых газов диоксида углерода (CO_2) и метана (CH_4) увеличатся в 1,51 раза и закиси азота (N_2O) в 1,21 раза, по сравнению с их концентрациями в 1990 году. Однако расчёты показывают, что, по крайней мере, до середины века потепление глобального климата и климата России в целом слабо зависит от выбранного сценария эмиссий (Оценочный доклад Том I, 2008).

8.2. Как прогнозируются изменения климата

Центральной задачей исследований климатической системы Земли является прогноз её поведения в будущем. Эта задача чрезвычайно сложна и настолько значима для человеческого сообщества, что её исследованием занимаются научные коллективы во многих странах мира и международные организации. Межправительственная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК) была создана в 1988 году совместно с Всемирной метеорологической организацией (ВМО) и Программой ООН по окружающей среде (ЮНЕП). МГЭИК – организация, объединяющая несколько сотен учёных из 130 стран мира, основная роль которой заключается в оценке имеющейся научно-технической и социально-экономической информации о климатических изменениях.

МГЭИК подготовлено ряд Оценочных докладов, технических документов, методологий, широко используемых политиками, учёными и широким кругом экспертов. В Оценочных докладах содержатся результаты комплексного исследования климатических изменений, их причин и возможных последствий, а также оценка потенциала по принятию адаптационных мер и снижению антропогенного воздействия на климатическую систему как на глобальном, так и на региональном уровнях.

Первый Оценочный доклад, представленный МГЭИК в 1990 году, заложил основу для создания РКИК ООН. В 2007 г. МГЭИК презентовал Четвёртый оценочный доклад, в котором содержатся самые последние научные выводы. В подготовке Четвёртого оценочного доклада МГЭИК (2007) принимало участие 15 российских авторов.

В 2007 году Межправительственная группа экспертов по изменению климата совместно с бывшим вице-президентом США Альбертом Гором была удостоена Нобелевской премии мира «за изучение последствий глобальных климатических изменений, вызванных деятельностью человека, и выработке мер по их возможному предотвращению». Среди награждённых – наши ведущие отечественные учёные Ю.А. Израэль, О.Д. Сиротенко и Г.В. Менжулин.

Национальным координатором Российской Федерации в МГЭИК в течение 1997–2008 гг. был директор Института глобального климата и экологии (ИГКЭ) Росгидромета и Российской академии наук академик-секретарь Отделения океанологии, физики атмосферы и географии Российской академии наук Ю. А. Израэль. На 29-й сессии МГЭИК (2008 г.) на пост вице-председателя Бюро МГЭИК по Второй рабочей группе избран директор ИГКЭ Росгидромета и РАН С. М. Семенов. В течение 20 лет ведущим экспертом МГЭИК по влиянию изменений климата на аграрный сектор экономики был О. Д. Сиротенко.

Эмпирические модели

В начале 70-х гг. прошлого века М. И. Будыко высказал предположение о возможности применения эмпирического подхода к прогнозированию климата будущего (Антропогенные изменения ..., 1987). В основе этого подхода к прогнозированию антропогенных изменений климата лежит концепция аналогов климатических условий геологических эпох – оптимума голоцена, зема и плиоцена с соответствующими стадиями ожидаемого повышения средней глобальной приземной температуры воздуха. Если выполняются определённые предположения при сравнении величины повышения средней температуры воздуха за определённую тёплую эпоху с результатами расчётов изменения средней глобальной температуры в будущем, эмпирический подход позволяет получить региональные изменения температуры воздуха и других метеорологических элементов, используя эмпирические данные, описывающие климатические условия тёплых эпох геологического прошлого.

Имеющиеся доказательства того, что изменения климата в прошлом были связаны с изменением химического состава атмосферы, особенно концентрации CO_2 , может быть использовано для прогноза климатических условий будущего.

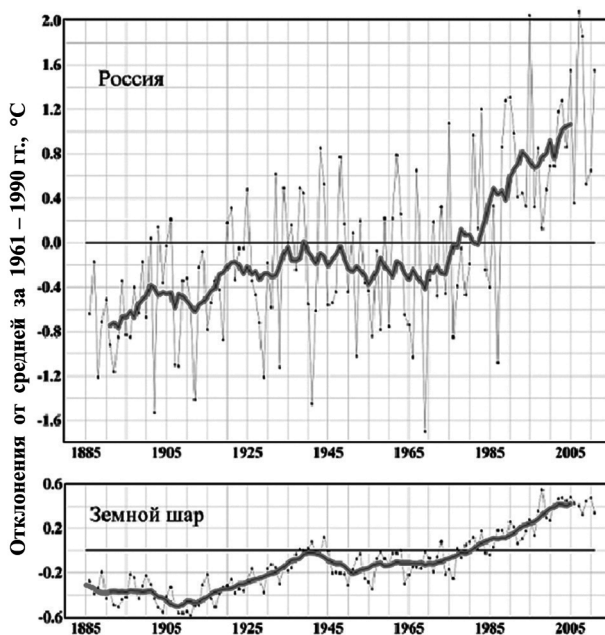
М. И. Будыко (1972), используя данные об увеличении концентрации CO_2 и эмпирические оценки чувствительности климата к ожидаемому повышению этой концентрации, установил, что средняя глобальная температура воздуха повысится при стационарном состоянии системы на $2,5^\circ\text{C}$ с середины XX до второй половины XXI века. Это ожидаемое потепление обусловлено удвоением концентрации CO_2 в атмосфере.

Оценка предстоящих изменений климата статистическими методами

Анализ данных о приземной температуре воздуха за период с середины XIX века до настоящего времени показывает, что с конца XIX века до начала 1940-х гг. происходило общее потепление в обоих полушариях. Затем наблюдалось похолодание, завершившееся в середине 1960-х гг.

С тех пор средняя глобальная температура постепенно повышается, причём потепление в Северном полушарии несколько запаздывает по отношению к среднему. Эмпирический ряд аномалий средних глобальных температур и средних глобальных температур, осреднённых по территории России, приведён на рис. 8.1 и 8.2 (Доклад об особенностях климата ..., 2011).

Рассмотрим, как менялась температура воздуха (среднегодовая) на территории России. В Докладе Росгидромета об особенностях климата на территории РФ за 2011 год приведены данные наблюдений и модельных расчётов, которые показывают, что климат России более чувствителен к глобальному потеплению, чем для других регионов земного шара. Из рис. 8.1 видно, что потепление на территории России превышает уровень глобального. Размах аномалий для России в целом составляет 3–4 °С, для земного шара – несколько больше 1,0 °С. За сто лет (1907–2006) потепление в России составило 1,29 °С, а для земного шара, согласно докладу МГЭИК (IPCC), – 0,74 °С. За период с 1976–2010 гг. скорость роста приземной температуры воздуха для территории России оценивается средней величиной 0,44 °С за 10 лет (рис. 8.2).



Временные ряды пространственно осреднённых аномалий средней годовой температуры у поверхности Земли для территории России и земного шара** за 1886 – 2011 гг. Красным показан ход 11-летних средних*

В среднем по территории России самым тёплым был 2007 год, за ним следуют 1995 и 2008 гг.

Для земного шара в целом самыми тёплыми были годы: 1998, 2005 и 2010

* Данные ФГБУ «Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН»

** Данные Метеослужбы Великобритании <http://www.cru.uba.ac.uk>

Рис. 8.1. Временные ряды пространственно осреднённых аномалий средней годовой температуры у поверхности Земли для территории России и земного шара

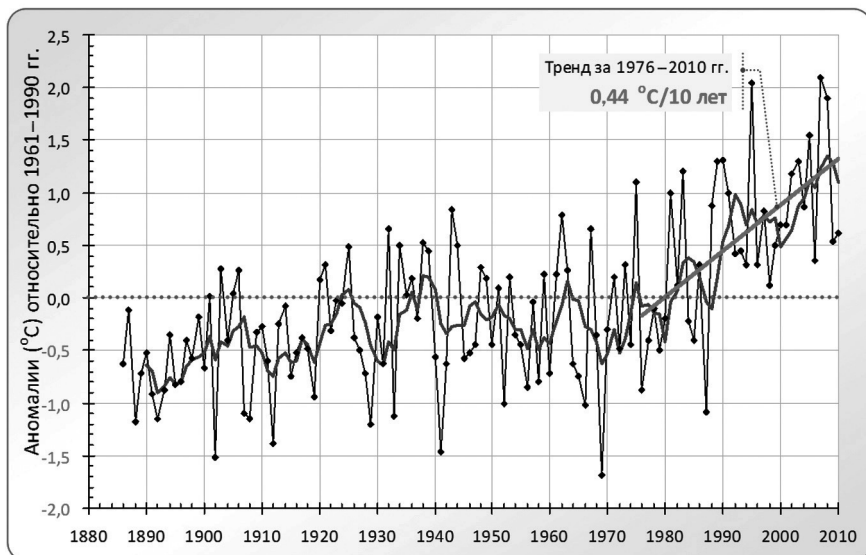


Рис. 8.2. Среднегодовые аномалии приземного воздуха (°C), осреднённые по Российской Федерации, 1961–1990 гг.

Аномалии рассчитаны как отклонения от среднего за 1961–1990 гг.

Сглаженная кривая получена 11-летним скользящим осреднением

Выявление связанного с CO_2 потепления в рядах наблюдений является важным направлением исследований. Проблема обнаружения потепления может быть рассмотрена с точки зрения отношения сигнал/шум, т.е. изменения климата могут считаться обнаруженными, как только сигнал (например аномалия температуры) заметно превысит уровень шума (т.е. естественную изменчивость температуры). Данные, относящиеся к прошлому, свидетельствуют о том, что естественная изменчивость климата имеет характерные масштабы времени от нескольких лет до столетий, тысячелетий и более. Исследователи сходятся на том, что наблюдаемое повышение средней глобальной температуры воздуха в течение последних ста лет не может быть статистически строго объяснено только повышением концентрации CO_2 , хотя найденная величина находится внутри прогнозируемого диапазона изменений приземной температуры, обусловленных ростом CO_2 . Основным неясным вопросом в обнаружении климатического эффекта от увеличения концентрации CO_2 остаётся объяснение природы крупномасштабных временных флуктуаций (10-летних и более) температуры в рядах наблюдений. Работы по обнаружению эффекта потепления от CO_2 остаются уязвимыми для критики.

Тем не менее в материалах МГЭИК (IPCC, 2001, 2007) наблюдаемое глобальное потепление климата в XX веке объясняется главным образом ростом концентрации парниковых газов в атмосфере.

В монографии Г. В. Грузы и Э. Я. Раньковой (2012) региональный климатический отклик оценивался как реакция температуры воздуха на увеличение концентрации двуокиси углерода в атмосфере. Такая постановка задачи равнозначна задаче об оценке чувствительности климата, под которой понимается изменение температуры приземного слоя воздуха при изменении объёмной концентрации CO_2 на единицу. Авторы полагают, что при наблюдаемой концентрации парниковых газов и её изменениях до 50 млн^{-1} можно принять линейную зависимость между локальными изменениями температуры воздуха и изменением концентрации CO_2 (вместо логарифмической, принятой в общем случае для глобальной температуры приземного воздуха). Утверждается, что пространственная форма и величина отклика в моделях глобальной циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО) существенно отличается от таковых по наблюдениям. Общий уровень наблюдаемого отклика выше, а пространственная структура сложнее, чем в моделях глобальной циркуляции. Как в модельных оценках, так и в оценках по реальным данным, присутствуют области с отрицательными значениями локальной чувствительности (похолодания, несмотря на рост CO_2).

Данные о пространственном распределении оценок чувствительности климата на территории России могут быть использованы для выбора наиболее вероятных причин наблюдаемых изменений климата и для построения проекций региональных изменений климата на будущее.

Для получения прогноза предстоящих изменений климата достаточно умножить чувствительность в каждой точке на ожидаемое изменение концентрации парниковых газов, соответствующее выбранному сценарию эмиссии парниковых газов.

Модели общей циркуляции

Существует множество факторов, действие которых приводит к изменению климата, однако наше представление о причинно-следственных связях в столь сложной системе ограничено. Причинами возмущения глобального климата могут служить изменения количества приходящей солнечной радиации, параметров земной орбиты, интенсивности вулканических выбросов, состава атмосферы, количества облаков, альбедо Земли и взаимодействий в системе «Земля–атмосфера». Все эти факторы могут действовать совместно и раздельно. Несмотря на полученные в последнее время теоретические оценки и исчерпывающее понимание многих отдельных процессов, учёные пока не имеют адекватного представления о природе зафиксированных в прошлом климатических

флуктуаций. Лишь для масштабов времени порядка периода ледниковая эпоха—межледниковье наиболее вероятной причиной изменения климата можно считать вариации приходящей солнечной радиации, обусловленные постепенным изменением параметров земной орбиты.

Оценки влияния на климат изменений состава атмосферы были проведены на основе моделирования климатической системы. Поскольку климатическая система является очень сложным объектом, при разработке такого рода моделей применяются различные упрощения и параметризации. Существует целая серия климатических моделей с различными упрощающими предположениями: от простых одноточечных моделей, воспроизводящих изменение средней глобальной температуры, до трёхмерных моделей общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО), наиболее полно описывающих взаимодействие в системе «атмосфера—суша—океан». По мнению многих авторов, только модели общей циркуляции атмосферы и океана способны обеспечить получение надёжной информации относительно эволюции климата и его характерных особенностей в будущем. На основе таких моделей можно прогнозировать не только средние характеристики для Земли в целом, но и получить детальную картину региональных климатических изменений, а также гидрологических изменений на поверхности суши.

В течение последних десятилетий достигнут значительный прогресс в их развитии, обусловленный как достижениями в исследованиях собственно климатической системы, так и увеличением вычислительных ресурсов, обеспечивающим всё большую детализацию и полноту описания в моделях климатических процессов. Однако, несмотря на непрерывное увеличение пространственного разрешения МОЦАО, для многих важных климатических процессов оно недостаточно. Поэтому такие процессы представлены в моделях с помощью параметризаций, основанных на физических соотношениях между климатическими характеристиками. Современный уровень компьютерной техники позволяет выполнять расчёты по МОЦАО на многие сотни лет вперёд.

Модели общей циркуляции возникли как побочный продукт развития моделей прогнозов погоды с помощью численных методов. В них атмосфера рассматривается во всех трёх пространственных координатах и во времени. В этих моделях совместно решаются уравнения движения и сохранения тепловой энергии и водяного пара. Уравнение для переноса тепла содержит детальное описание вертикального переноса солнечного и длинноволнового излучения, параметризацию сухой и влажной конвекции и турбулентного переноса тепла и водяного пара. Уравнения переноса водяного пара содержат члены, описывающие процесс выпадения дождя или снега. Модель атмосферы связана с моделями поверхностных слоёв. Например, чтобы получить температуру поверхности океана,

нужно иметь модель океана, так как свойства атмосферы и океана тесно связаны, а значения температуры поверхности океана является одной из важнейших климатических факторов. Кроме того, нужны модели для описания эволюции морского льда, а также различных процессов, происходящих на поверхности суши, таких как изменение снежного покрова, влагосодержание почвы, транспирации и испарения. На рис. 8.3 представлена схема, иллюстрирующая различные связи, в иерархии современных климатических моделей. Только модели общей циркуляции могут адекватно описать такие свойства подстилающей поверхности, как влажность, наличие снежного покрова и температура. В порядке возрастания сложности можно выделить (Оценочный доклад ..., 2008, глава 5):

- простые климатические модели (двумерные, одномерные или нульмерные);
- модели промежуточной сложности (МПС)¹;

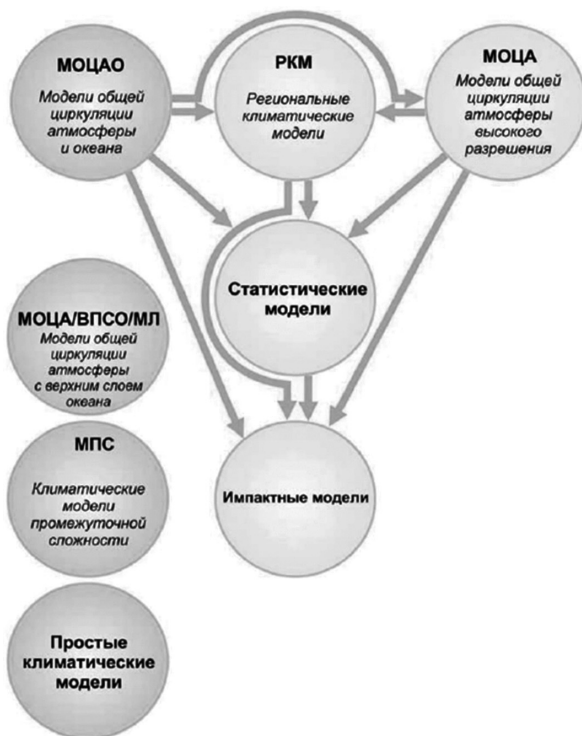


Рис. 8.3. Иерархия современных климатических моделей
(Катцов, Мелешко, 2004)

¹ В английской литературе эти модели известны как EMIC – Earth System Models of Intermediate Complexity.

- модели общей циркуляции атмосферы (МОЦА) с упрощёнными описаниями верхнего слоя океана и морского льда (ВПСО/МЛ);
- сложные трёхмерные модели совместной циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО), занимающие высшую ступень в иерархии климатических моделей (левая часть рис. 8.3).

Оценка качества моделей климата

Как проверить, что та или иная модель «правильно» воспроизводит климат и реалистично реагирует на внешние воздействия? Например, в прогнозе погоды используются модели общей циркуляции атмосферы, которые имеют более высокое пространственное разрешение (поскольку в численном прогнозе погоды сроки интегрирования МОЦАО измеряются сутками). Сравнение прогноза с данными наблюдений является стандартной процедурой во всех прогностических центрах. Обычно сравнение проводится по ряду критериев для ограниченного числа ключевых прогнозируемых характеристик.

Иначе обстоит дело с расчётами будущих изменений климата с помощью МОЦАО. Такие расчёты проводятся на десятки и сотни лет вперёд, поэтому сравнение рассчитанных результатов с данными наблюдений станут возможными лишь в далёком будущем. Кроме того, эти расчёты нельзя считать в полном смысле прогнозами, т.к. внешние воздействия на климатическую систему (например антропогенные выбросы CO_2 и аэрозолей в атмосферу) задаются в соответствии с разными сценариями развития человеческого сообщества, вероятность которых не определена. Поэтому вполне естественным является предположение, что достоверность расчётов будущего климата определяется способностью модели воспроизводить современное состояние климатической системы, а также разные её состояния в прошлом. Ещё одним отличием моделирования климата от численного прогноза погоды является отсутствие общепринятых показателей качества для климатических моделей. Климат определяется как осреднённая погода, поэтому сравнение расчётов с помощью МОЦАО и данных наблюдений можно проводить за достаточно большие промежутки времени. Как было отмечено выше, «классический» базовый период ВМО охватывает 1961–1990 гг. и представлял климат в четырёх Оценочных докладах МГЭИК (1990, 1995, 2001, 2007). В докладе (ACIA – Arctic Climate Impact Assessment, 2005) используется в качестве базового 1981–2000 гг. Выбор базового периода определяется характером изменчивости климата в регионе, наличием и качеством данных наблюдений и др. (Катцов В. М. и др. , 2003).

Модели должны воспроизводить не только среднее состояние климатической системы, но и эволюцию климатической системы, например за период инструментальных наблюдений. Существуют два требования,

которым должны отвечать МОЦАО в расчётах эволюции климата: первое – способность воспроизводить изменения климата, связанные с внешними воздействиями (прежде всего временных рядов метеорологических величин от начала XX века до настоящего времени, или за последние несколько десятилетий); второе – генерировать собственную изменчивость, близкую по амплитуде к наблюдаемой (например, арктическое потепление в первой половине XX века) (Катцов В. М., Мелешко В. Г. Оценочный доклад ..., 2008).

Всесторонняя оценка МОЦАО требует больших усилий от коллектива разработчиков моделей. Облегчает дело международная кооперация в виде проектов сравнения моделей. К наиболее известным международным проектам относятся проект сравнения объединённых моделей (атмосферы и океана) CMIP (Coupled Model Intercomparison Project), проект сравнения палеоклиматических моделей PMIP и проект «Климат XX века».

Трёхмерные региональные климатические модели (РКМ) имеют разрешение порядка 10 км и размеры моделируемой области вплоть до субконтинентальной. В зависимости от решаемой задачи на границах региона задаётся внешнее воздействие в виде полей атмосферных величин, рассчитанных по моделям глобальной циркуляции атмосферы и океана. Обычно региональные климатические модели проходят процедуру калибровки параметров модели и проверку её адекватности, прежде чем она будет применяться для оценок будущих изменений климата конкретного региона.

Несмотря на то, что в моделировании климатической системы достигнут значительный успех, модели ещё не могут реалистически воспроизводить многие процессы, относящиеся к региональному климату. Тем не менее при сравнении некоторых результатов расчётов с данными наблюдений за общей циркуляцией атмосферы, в частности при оценке способности модели воспроизводить сезонные изменения погоды и климата, получается удовлетворительное согласование.

Сравнительный анализ большого числа модельных результатов позволяет сделать вывод о том, что наиболее вероятное ожидаемое при удвоении концентрации CO_2 изменение глобальной равновесной температуры лежит в диапазоне от 1,5 до 5,5 °C. Здесь имеется в виду эквивалентное удвоение содержания атмосферного CO_2 , обусловленное увеличением как концентрации углекислого газа, так и концентраций других парниковых газов.

Наиболее значительным источником неопределённостей при моделировании изменений глобальной осреднённой температуры, по-видимому, является описание обратных связей температуры с облачностью, альбедо, покрытой льдом поверхностью, вертикальным температурным

градиентом и изменениями содержания водяного пара. Необходимо учитывать также то обстоятельство, что океаны запасают большое количество тепла, а это замедляет ожидаемое потепление от увеличения количества двуокси углерода и может существенно повлиять на географическое распределение климатических изменений. Очевидно, что океаны играют важную роль в процессах газо- и теплообмена, однако эта роль до конца количественно не определена. Результаты моделирования указывают на то, что глобальное потепление, обусловленное увеличением концентраций парниковых газов, к настоящему времени можно оценить величиной 0,3–1,1 °С. Климатические изменения в масштабах континента и региона пока оцениваются с меньшей надёжностью, но можно сделать некоторые выводы (Катцов В.М., Мелешко В.Г. Оценочный доклад ..., 2008).

При расчётах по трёхмерным моделям получается, что максимальное повышение температуры должно произойти в высоких широтах в осенне-зимний сезон; кроме того, все модели прогнозируют похолодание в стратосфере. Существуют также некоторые предпосылки оценки летнего иссушения почв во внутриконтинентальных областях и средних широтах.

Ансамблевый подход

Параллельные расчёты с одной или несколькими моделями при одинаковом внешнем воздействии принято называть ансамблевыми. Ансамбли, составленные из расчётов с одной и той же моделью, но при разных начальных условиях, характеризуют неопределённость, обусловленную собственной климатической изменчивостью данной модели. Мультимодельные ансамбли¹, составленные из расчётов с независимыми моделями, характеризуют неопределённость, обусловленную межмодельными различиями. Наиболее высокую успешность при сравнении с данными наблюдений, как правило, показывает результат осреднения по мультимодельному ансамблю (Катцов В.М., Мелешко В.П., 2004). Это связано с тем, что систематические ошибки, присущие каждой модели в отдельности, часто являются случайными по отношению к ансамблю моделей и при осреднении взаимно компенсируются. С другой стороны, поскольку климатической системе присуща собственная изменчивость, соответствующая часть неопределённости оценок будущих изменений этой системы не может быть устранена только усовершенствованием моделей. Из-за нелинейности климатической системы модельные расчёты её эволюции чувствительны к малым возмущениям в начальных условиях. Решая проблему предсказуемости климата, необходимо

¹ Мультимодельные ансамбли – осреднённые из расчётов по нескольким независимым МОЦАО.

исследовать неизбежную неопределённость, связанную с собственной изменчивостью, которую можно описать в терминах вероятностного распределения. С этой целью необходимо проводить ансамблевые расчёты как с варьированием начальных состояний, так и неопределённых модельных параметров в реалистичном диапазоне (Kattsov and Kallen, 2005; Randal et al., 2007). Такой подход, успешно используемый в прогнозах погоды, позволяет оценить изменения функций распределения вероятностей для разных климатических параметров.

8.3. Причинно-следственные связи в системе «климат–почва–сельское хозяйство»

Основной объект исследований и моделирования в агрометеорологии – связи между гидрометеорологическими условиями и сельскохозяйственными растениями. Важнейшая агрометеорологическая проблематика является, по существу, экологической. Целесообразно использовать аппарат понятий, выработанных экологией. Наиболее важным обобщением экологии является понятие экологической системы (экосистемы), включающей совокупность взаимосвязанных живых организмов и тех элементов внешней среды, которые оказывают на них наиболее сильное влияние и сами в той или иной степени зависят от деятельности организмов (Одум Ю., 1975; Будыко М.И., 1977). Число доступных измерению параметров экосистем огромно, как и потенциальное число параметров окружающей среды. Поэтому из всего множества связей выделяются только те, которые представляются существенными в соответствии с задачами исследования.

Самая распространённая сельскохозяйственная экосистема (агро-экосистема) – поле, засеянное монокультурой, – значительно проще многих естественных экосистем, таких как луг, лес. Но и такая экосистема чрезвычайно сложна, и её полное исследование выходит за рамки задач агрометеорологии. Для целей агрометеорологии обычно достаточно функционально учитывать лишь один компонент агроэкосистемы – агроценоз, а из многообразия факторов внешней среды ограничиться лишь теми, которые определяют процессы обмена теплом, влагой, углекислым газом и элементами минерального питания между растениями и окружающей средой.

Растения одновременно находятся в двух средах – приземном слое воздуха и почве – и активно взаимодействуют с ними. Из неорганических соединений, поступающих из внешней среды, растение синтезирует углеводы и другие богатые энергией органические вещества. Поступление энергии и веществ осуществляется процессами, протекающими на границах растения с окружающей средой. Так ассимиляция солнечной энергии и углекислого газа происходит в листе, т.е. на границе растения и

атмосферы, а поступление воды и минеральных веществ осуществляется через границы корневой системы и почвы. Процессы обмена между средой и растениями, происходящими в листьях и корневой системе, функционально неразделимы и проходят одновременно. Связь между ними обеспечивает сложная совокупность процессов переносов внутри растения. Осуществляя обменные процессы, агроценоз видоизменяет воздушную и почвенную среду своего обитания, смягчая в какой-то мере колебания внешних условий.

Объектом математического моделирования в агрометеорологии является трёхзвенная система «почва–растение–атмосфера». Для этой системы характерны следующие свойства (Сиротенко О.Д., 1981):

- сложность;
- нестационарность;
- инерционность;
- нелинейность;
- адаптивность.

Сложность. Центральное звено этой системы – совокупность растений – агроценоз. Различают несколько уровней организации живого – биосфера, биогеоценоз, организм, орган, клетка, субклеточные структуры. При переходе к более высоким иерархическим уровням некоторые характеристики становятся более сложными, однако часто упускают из виду, что другие свойства при переходе от малых систем к большим становятся менее сложными и менее изменчивыми (Одум Ю., 1975). Например, интенсивность фотосинтеза поля кукурузы варьирует в меньшей степени, чем интенсивность фотосинтеза отдельных листьев. Каждому уровню организации биомассы присущи свои характерные способы взаимодействия между специфическими для данного уровня единицами. Нельзя понять свойства явлений на более высоком уровне, не обращаясь к характеристикам более низких структурных уровней. В то же время не все свойства данного уровня могут быть объяснены лишь из закономерностей, присущих нижележащим уровням. Например, нельзя предсказать все свойства агроценоза, изучая лишь отдельные растения, но вместе с тем нельзя построить содержательную модель агроценоза, не прибегая к знаниям, полученным на организменном (перемещение и утилизация ассимилятов) и клеточном (поглощение воды и минеральных веществ) уровнях.

Абиотические компоненты агроэкосистемы – почва и атмосфера – также имеют сложную внутреннюю структуру. Однако при изучении агроэкосистем они могут рассматриваться в большинстве случаев как сплошные среды, в которых осуществляются процессы переноса вещества и энергии. Сложность внешней среды, в которую «погружена» система «почва–растение–атмосфера» обуславливается прежде всего её многомерностью. Состояние почвы и атмосферы нельзя охарактеризовать

каким-либо одним параметром. Так, для расчёта водного и теплового режима агроценоза необходимо задать в качестве граничных условий следующие параметры внешней среды: температуру и влажность воздуха, интенсивность солнечной радиации, противоизлучение атмосферы, скорость ветра, температуру и влажность (для почвы).

Анализ влияния условий внешней среды осложняется также заметными статистическими связями между отдельными параметрами, характеризующими её состояние. Временные колебания основных метеорологических элементов обуславливаются общими причинами – синоптическими процессами (возникновением, развитием и перемещением крупномасштабных атмосферных возмущений). В связи с этим наблюдается существенная корреляция между отдельными метеорологическими элементами (солнечной радиацией и температурой воздуха, температурой и осадками и т.д.). Это обстоятельство серьёзно затрудняет оценку параметров математических моделей по экспериментальным данным.

Многим параметрам внешней среды свойственна динамичность, носящая сложный характер. Существенная особенность временных спектров большинства метеорологических элементов – наличие в них синоптического максимума, соответствующего колебаниям с периодом около четырёх дней. Метеорологические элементы подвержены также периодическим колебаниям – суточным, сезонным и годовым. Колебания важнейших агрофизических параметров почвы значительно менее интенсивны, чем колебания метеозадающих элементов, при этом, чем глубже слой почвы, тем уже спектр наблюдаемых в нём колебаний. Учёт суточных и синоптических колебаний метеозадающих элементов требует использования суточных метеорологических элементов, что ведёт к резкому увеличению объёма обрабатываемой информации. Тем не менее в силу нелинейности многих реакций растений на условия внешней среды учёт суточных колебаний метеорологических элементов в ряде случаев представляется необходимым.

Нестационарность – изменение во времени реакции системы на воздействие условий внешней среды. Для целей моделирования рассматривается качественная и количественная причина нестационарности. Качественная причина – развитие растений, количественная – их рост.

Хорошо известно, что в процессе онтогенеза потребности растений в условиях внешней среды закономерно изменяются. Это находит своё отражение, в частности в наличии критических периодов по отношению к теплу, влаге, элементам минерального питания и т.д. Известно также, что кардинальные точки основных физиологических процессов не остаются постоянными в течение вегетационного периода. Попытки учесть качественные изменения растений в процессе предпринимались неоднократно, однако недостаточная изученность этих процессов резко ограничивает возможности их учёта при моделировании.

Процессы роста растений обуславливают нестационарность рассматриваемой системы следующим образом. Возрастает объём внутренней среды агроэкосистемы. Элементы фитомассы являются источниками (или стоками) тепла, влаги и других субстанций. Мощность этих источников растёт до определённых пределов пропорционально удельной поверхности фитомассы. Растительный покров значительно изменяет поля температуры и влажности воздуха, формирует особый ветровой режим, перехватывает значительную часть солнечной радиации. С ростом растений система становится более инерционной. Проникновение корней в более глубокие слои почвы делает агроценоз менее чувствительным к кратковременным колебаниям условий увлажнения.

Инерционность рассматриваемой системы обуславливается инерционностью двух её звеньев – почвы и растений. Так, суточные приросты фитомассы агроценоза, помимо текущих метеорологических условий, определяются такими инерционными характеристиками, как площадь листьев, мощность корневой системы, влажность почвы и др. Площадь листьев и мощность корневой системы характеризует предысторию посева – степень благоприятности условий среды от прорастания семян до рассматриваемого момента времени.

Предысторию гидротермических условий характеризует влажность почвы. Степень влияния инерционных элементов на будущий ход процессов различна и зависит как от состояния системы «почва–растение–атмосфера», так и от внешних метеорологических условий. Например, влияние кратковременных атмосферных осадков может в одном случае сказываться вплоть до конца вегетации, а в другом – «память» о них стирается через несколько дней очередным ливнем. Свойства почвы как инерционной системы рассмотрены в работе (Шульгин А.И., 1973).

Наличие инерционных элементов в системе «почва–растение–атмосфера», с одной стороны, затрудняет её моделирование, а с другой – именно с наличием этих элементов связано развитие методов прогнозирования урожая.

Нелинейность. Все биологические процессы, определяющие продуктивность растений, нелинейно связаны с факторами внешней среды. На практике использование разумно осреднённых данных для агрометеорологических расчётов определяется их изменчивостью и степенью соответствующей функции отклика агроэкосистемы в наблюдаемом диапазоне изменения данных. Использование разумно осреднённых данных упрощает расчёты и вполне оправдано, но нельзя забывать о возможных ошибках, связанных с нелинейностью. На практике встречаются случаи, когда необходимость привлечения к анализу срочных данных из-за сильной нелинейности реакции растений совершенно очевидна (отклик растений на заморозки, аномально высокие температуры, переувлажнение и т.д.).

Адаптивность. Важнейшее свойство агроэкосистем – адаптивный характер поведения. Адаптивность (приспосабливаемость) к изменяющимся условиям – свойство всего живого.

Саморегуляция процесса накопления биомассы охватывает все уровни организации растения. На клеточном уровне – это смещение кардинальных точек метаболических процессов, на уровне растений (организмов) – увеличение той части организма, метаболиты которой находятся в минимуме. Основной атрибут регуляции темпа накопления биомассы – способность к распределению пластического материала таким образом, чтобы улучшить снабжение органа, работающего в наиболее трудных условиях. Например, при недостатке элементов минерального питания морфологические изменения корней направлены на удлинение и увеличение площади рабочей поверхности; недостаток влаги также способствует формированию наиболее приспособленной к использованию влаги корневой системы.

Ключевой вопрос при создании моделей саморегуляции и адаптации – использование принципа оптимальности или вариационного принципа. В экологии общая формулировка критерия биологической оптимальности состоит в следующем: организмы, обладающие биологической структурой, оптимальной в смысле естественного отбора, оптимальны также и в том смысле, что они минимизируют некоторую оценочную функцию, определяемую основными характеристиками окружающей среды (Розен Р., 1969). Часто используется приближённая количественная формулировка критерия оптимальности в виде требования максимума относительной скорости роста численности популяции (Ханин М. А., 1978). Эта формулировка для монокарпических¹ растений эквивалентна требованию максимальной продуктивности, записанному в виде:

$$K = n(j+1)/n(j), \quad (8.1)$$

где K – критерий оптимальности; n – число биологически полноценных семян данного вида на единицу площади агроценоза на начало j -го и $(j+1)$ -го вегетационного периода соответственно. Использование этого критерия позволило О. Д. Сиротенко (1981) сформулировать задачу определения «ростовых» функции, управляющих процессами распределения ассимилятов в течение вегетационного периода, как многошаговую задачу управления. В соответствии с этим критерием жизненная стратегия однолетних растений будет состоять в том, чтобы вначале использовать большую часть ассимилятов на формирование листьев, которые сразу же «включаются» в процесс фотосинтеза и увеличивают прирост массы. Начиная с фазы цветения, распределение ассимилятов будет меняться в пользу репродуктивных органов, чтобы использовать

¹ Монокарпические – растения, плодоносящие один раз в своей жизни.

ассимиляционный аппарат для формирования максимально возможного числа полноценных семян.

Критерий оптимальности (K_F), доступный для практического использования, предложил Х. Г. Тооминг (1977):

$$K_F = F_C(L) \rightarrow \max, \quad (8.2)$$

где $F_C(L)$ – интенсивность газообмена CO_2 фотосинтеза за сутки; L – относительная площадь листьев. Обоснованием критерия служат следующие соображения. Для выживания организма самое важное значение имеет их энергетическая мощность, которая определяется количеством усваиваемой солнечной энергии или интенсивностью поглощения углекислого газа.

В монографии (Полуэктов Р. А. и др., 2006) излагается оригинальный подход использования принципа оптимальности для моделирования процессов органогенеза¹. В достаточно сложной модели рассматриваются «вегетативные органы» и «генеративные органы», дифференцированные на составляющие их реальные части растения – корни, листья, колос и т. п. Функционал цели сформулирован в терминах максимальной мощности генеративных органов на конечный момент вегетации. Сказанное, конечно, относится только к однолетним растениям. Ясно, что не отмирающий зимой организм обладает большей степенью «эгоизма», и понятие выживаемости имеет для него не меньший смысл, чем производство потомства в данном конкретном году.

Система «почва–растение–атмосфера» является объектом математического моделирования в агрометеорологии. За последние несколько десятилетий объём и характер знаний о системе «почва–растение–атмосфера» как объекта исследования целого ряда научных дисциплин биологического, геофизического и агрономического профиля существенно расширился. Разработаны математические модели важнейших физиологических процессов растений: фотосинтеза, дыхания, роста, развития, минерального питания. Развиваются теоретические и экспериментальные исследования процессов переноса радиации, тепла, влаги, углекислого газа в среде обитания растений. Основные положения агрономического, физиологического, экологического и других аспектов количественной теории продуктивности агроэкосистем сформулированы в работах А. А. Ничипоровича, М. И. Будыко, Ю. К. Росса, И. С. Шатилова, А. И. Будаговского, Р. А. Полуэктова и других исследователей. Эти исследования, применительно к задачам агрометеорологии обобщены О. Д. Сиротенко в учебном пособии «Основы сельскохозяйственной метеорологии», том II, книга 1 (2012).

¹ Органогенез – процесс возникновения, формирования и развития органов (корня, стебля, листьев, цветков) в течение индивидуальной жизни растения (онтогенез) из участков недифференцированной ткани независимо от его возраста.

Глава 9

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА НА ПРОДУКТИВНОСТЬ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

9.1. Методы анализа временных рядов агрометеорологических наблюдений в условиях изменяющегося климата

Изменения климата и климатические аномалии привели к необходимости организации системы наблюдения за климатом или мониторинга климата. Система должна включать сбор и обобщение климатических данных, оценку текущих климатических аномалий и изменений климата.

Концепция мониторинга природной среды была разработана Ю.А. Израэлем в 1974 г. (Израэль Ю.А., 1974). В этой работе впервые в отечественной литературе встречается термин «мониторинг природной среды», означающий наблюдение (измерение) с целью контроля принятия решений. В монографии «Экология и контроль состояния природной среды» (Израэль Ю.А., 1979) указывается, что «для понимания изменений и колебаний климата необходимы данные о состоянии климатической системы “атмосфера–океан–поверхность суши–криосфера¹–биота” за длительный период времени, т.е. осуществление климатического мониторинга». Основные задачи климатического мониторинга заключаются в следующем: наблюдение за состоянием природной среды, оценка и прогноз её состояния; определение степени антропогенного воздействия на окружающую природную среду, выявление источников такого воздействия, а также степени их воздействия.

В настоящее время ряд научных и оперативно-производственных учреждений Росгидромета и Российской академии наук и др. проводят регулярный мониторинг климата, что позволяет получать оценку наблюдаемых климатических аномалий. Мониторинг климата осуществляется по данным оперативных метеорологических наблюдений (передаваемых по каналам связи) и дальнейшей подготовкой месячных, сезонных и годовых наблюдений.

Для оценки климатических изменений в регионах «рассматриваются пространственно-осреднённые значения аномалий метеорологических переменных (отклонений от базового периода 1961–1990 гг.). Для их осреднения используется алгоритм осреднения точечных данных (на станциях наблюдений) по региону с предварительным осреднением по

¹ Криосфера – компонент климатической системы, состоящий из всего снега, льда и вечной мерзлоты на поверхности суши и океана (Российский гидрометеорологический энциклопедический словарь, 2009, том II).

широотно-долготным квадрантам («боксам»). Область анализа (земной шар, полушарие, регион) покрывается сетью «боксов» заданного размера и производится арифметическое осреднение значений анализируемой переменной на станциях внутри каждого «бокса». Затем полученные значения усредняются с «весами» (вкладом), пропорциональными площади пересечения «бокса» с территорией региона.

Сезонные средние значения метеорологических величин рассчитываются осреднением месячных значений аномалий на станциях для зимы (декабрь–февраль), весны (март–май), лета (июнь–август) и осени (сентябрь–ноябрь) при наличии данных не менее чем за два месяца в сезоне. Средние годовые значения рассчитываются для календарного года (январь–декабрь) при наличии не менее 11 среднемесячных значений (Груза Г.В., Ранькова Э.Я., 2012).

С 2005 г. выпускается Ежегодный доклад Росгидромета об особенностях климата на территории России в истекшем году (<http://climate.change.igce.ru>).

Данные для мониторинга климата

В Институте глобального климата и экологии (ИГКЭ) в начале 1990-х гг. был создан базовый массив данных станционных наблюдений о приземной температуре воздуха на основе наблюдений практически всех действующих на тот момент станций (передающих телеграммы КЛИМАТ). В результате анализа полноты и однородности рядов была сформирована сеть станций для мониторинга климата. В неё были включены станции наблюдений с началом не позже 1951 г. и отвечающие двум требованиям. Во-первых, станции должны быть действующими (передавать телеграммы в реальном времени) и иметь в рядах наблюдений не более 10 % пропусков. Во-вторых, пропуски практически должны отсутствовать за базовый период наблюдений 1961–1990 гг. Таким требованиям к климатической информации, как оказалось, отвечают 1383 станции. В базовом массиве мониторинга климата 1383 территория стран СНГ представлена 455 станциями, в том числе 310 – на территории России (Груза Г.В., Ранькова Э.Я., 2012).

В систему мониторинга климата, наряду с базовыми массивами данных на станциях, включены массивы с расчётными характеристиками – все виды аномалий и характеристики климатических экстремумов для временных масштабов месяц–сезон–год.

Ниже приведены определения климатических индексов и статистик для базового периода (или за период расчёта норм), а также индикаторы меняющегося климата, предложенные в названной работе.

Норма климатической переменной определяется как многолетняя средняя величина за определённый интервал времени (базовый период),

за который, согласно действующим рекомендациям ВМО, принимается период 1961–1990 гг. Обозначение: $E^y X_y$ (X_y – значение климатической переменной в году y , E^y – оператор осреднения по множеству лет).

Аномалия климатической переменной (средней месячной/сезонной/годовой температуры на станции или для любого региона) определяется как отклонение от климатической нормы и рассчитывается по формуле:

$$VX_y = X_y - E^y X_y. \quad (9.1)$$

Нормированная или стандартизованная аномалия определяется как в долях статистики масштаба:

$$(WX)_y = (X_y - E^y X) / S^y X. \quad (9.2)$$

Здесь $S^y X$ – стандартное отклонение переменной X , рассчитанное за базовый период. Нормированная аномалия применяется для величин с приблизительно симметричным распределением (температура). Для осадков, имеющих выраженное асимметричное распределение (например, гамма-распределение) больше применим индекс «относительная аномалия» (% от нормы).

Метод EV-диаграмм

Изменения климата на различных интервалах времени и в разных регионах ведут к трансформации функций плотности распределения $f(x)$ гидрометеорологических элементов. Трансформация функций плотности распределения выражается прежде всего в сдвиге положения центра распределения гидрометеорологических показателей, а также в изменении (в увеличении или уменьшении) дисперсии, характеризующей междугодичную изменчивость.

Для анализа текущих изменений метеорологических или иных параметров $f(x)$ – математического ожидания (E) и дисперсии (V) – полезно использовать метод EV-диаграмм. По вертикальной оси графика наносятся значения скользящих средних, а по горизонтальной – соответствующие оценки средних квадратических отклонений. Точки заносятся в хронологическом порядке от первой V_1 до последней V_k ($i = 1, 2, \dots, k$) и для наглядности соединяются либо прямыми линиями, либо сплайнами. Каждый год рассчитываются координаты новой точки ($k + 1$) и эта точка также наносится на график. Таким образом EV-диаграмма позволяет осуществлять постоянный мониторинг текущих изменений и/или колебаний климата. Среднее значение и среднее квадратическое отклонение определяют функцию плотности нормального распределения. Поэтому величина расстояния между соседними точками V_i и V_{i+1} характеризует степень изменения (трансформации) кривой распределения плотности вероятности за счёт добавления нового наблюдения и изъятия самого «старого» наблюдения анализируемого временного ряда. Чем сильнее эти два

наблюдения отличаются друг от друга, тем на большее расстояние каждый год смещается точка, характеризующая текущее состояние климата. Если новое и старое наблюдения совпадают, то точка V_i сохраняет своё положение на диаграмме. На рис. 9.1 представлена EV-диаграмма гидротермического коэффициента, рассчитанного для 30-летнего скользящего периода по данным наблюдений метеорологической станции «Константиновск» Ростовской области. Здесь в качестве начальной точки (V_H) выбран 1975 г. (начало периода интенсивного глобального потепления в XX веке). Кривая, соединяющая точки V_H и V_k на рис. 9.1, представляет собой траекторию движения соответствующего климатического параметра за рассматриваемый период. Изменения климата с 1975 по 2003 г., по данным МС «Константиновск», не были монотонными и однонаправленными. Тем не менее основная тенденция этих изменений – потепление – проявилось достаточно чётко. Если провести прямую линию из начальной точки в конечную, то становится очевидным факт увеличения скользящего среднего ГТК – от 0,6 в 1975 г. до 0,76 в 2003 году.

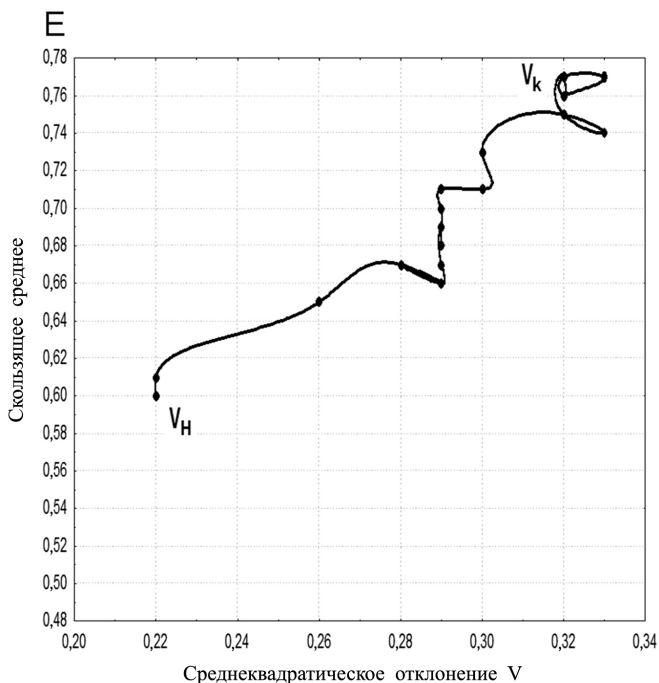


Рис. 9.1. EV-диаграмма изменений центров распределений и разброса гидротермического коэффициента для скользящих 30-летних периодов с 1975 по 2003 г. (МС «Константиновск»), (точки V_H и V_k соответствуют состоянию климата 30-летних периодов, закончившихся в 1975 и 2003 гг. соответственно)

Статистический анализ многолетних рядов агроклиматических показателей для выявления и анализа локальных проявлений глобальных процессов изменения климата может быть сведён к следующим действиям (Сиротенко О.Д., 2007).

1. Выявление и оценка средних скоростей изменения агроклиматических показателей, которые определяются величинами трендов. Для расчёта оценок линейных трендов определяются уравнения регрессии вида:

$$\hat{y} = a_T z + a_0, \quad (9.3)$$

где \hat{y} – агроклиматический показатель, $z = 1, 2, \dots, k$; k – переменная, характеризующая время, a_T – показатель тренда, $a_0 = \hat{y}$ при $z = 0$.

Величина a_T связана с коэффициентом корреляции между величинами y и z следующим соотношением:

$$r_{yz} = a_T \frac{\sigma_z}{\sigma_y}. \quad (9.4)$$

Коэффициент корреляции r_{yz} характеризует степень выраженности линейных изменений климата за рассматриваемый период k лет, а знак r_{yz} – направленность этих изменений (потепление или похолодание); σ_z и σ_y – средние квадратические значения z и y .

2. Расчёт и построение графиков скользящих оценок средних величин и средних квадратических отклонений агроклиматических показателей для нескольких n_i периодов осреднения.

3. Построение EV-диаграмм для рядов рассчитанных скользящих оценок.

4. Расчёт скользящих оценок интеграла вероятности нормального распределения на основании

$$F(y_p, \bar{y}, \sigma_y) = \int_{-D}^{y_p} \frac{1}{\sigma_y \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{y_k - \bar{y}}{2\sigma_y} \right] dy, \quad (9.5)$$

где $F(y_p, \bar{y}, \sigma_y)$ – обеспеченность заданного уровня y величины y_p .

Практическая реализация предложенной схемы агроклиматического мониторинга будет представлена ниже, в разделе 9.4.

9.2. Оценки изменений агроклиматических ресурсов и прогнозирование рисков в земледелии

Термические ресурсы

Сведения о термических (тепловых) ресурсах вегетационного периода растений необходимы для решения самых 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 изменениями её годовой и суточной амплитуды, что может иметь 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 нельзя ограничиться каким-либо одним показателем. Необходимо использовать широкий набор показателей – климатических индексов – для оценки термических ресурсов, применяемых в агроклиматологии. Приведём основные показатели:

- суммы среднесуточных значений температуры воздуха за период календарного года со среднесуточной температурой, превышающей 0, 5 и 10 °С;
- даты устойчивого перехода среднесуточной температуры воздуха через 0, 5 и 10 °С весной и осенью;
- продолжительность периодов календарного года со среднесуточной температурой, превышающей 0, 5 и 10 °С, а также периодов со среднесуточной температурой от 5 до 15 °С (климатическая весна) и от 15 до 5 °С (климатическая осень);
- средняя температура самого холодного и самого тёплого месяцев календарного года.

Рассмотрим, как изменяются агроклиматические индексы на протяжении современной волны глобального потепления, за начало которого принимают 70-е гг. XX века. Например, продолжительность периода с температурой выше 5 °С на территории Ростовской области выросла на 7–11 суток, а средняя температура января повысилась на 1,3–2,1 °С (табл. 9.1). При этом сумма среднесуточных температур, превышающих 10 °С, с 1970 г. практически не изменилась. Не изменилась и средняя температура июля за этот период.

Обратимся к наблюдаемым агрометеорологическим изменениям условий холодного периода года и вегетационного периода на примере Ростовской области (табл. 9.2), используя данные метеорологической станции «Чертково». Рассматриваются две случайные величины – продолжительность периода календарного года со среднесуточной температурой, превышающей 5 °С, и средняя температура января.

Таблица 9.1

Динамика показателей термического режима территории Ростовской области за 1950–2003 гг. (приведены средние значения за два десятилетия, предшествующие указанному году)

Гидрометеорологическая станция	Год						
	1950	1960	1970	1980	1990	2000	2003
	Продолжительность периода со среднесуточной температурой, превышающей 5 °С						
Чертково	199	197	203	205	205	210	213
Ремонтное	214	210	215	220	220	223	226
Таганрог	220	215	221	225	225	226	228
	Сумма среднесуточных значений температуры за период со среднесуточной температурой, превышающей 10 °С						
Чертково	2941	2907	2970	2937	2937	2995	2985
Ремонтное	3201	3253	3409	3396	3392	3442	3435
Таганрог	3410	3376	3466	3462	3447	3488	3493
	Средняя температура января, °С						
Чертково	-9,1	-8,0	-7,6	-8,7	-7,3	-5,6	-5,5
Ремонтное	-7,3	-6,2	-5,3	-6,9	-5,7	-3,5	-3,5
Таганрог	-5,8	-4,8	-4,1	-5,4	-4,2	-2,8	-2,8
	Средняя температура июля, °С						
Чертково	22,0	21,5	21,8	21,3	21,0	21,5	21,9
Ремонтное	23,6	23,7	24,2	23,8	23,6	24,0	24,2
Таганрог	23,8	23,3	23,7	23,3	23,0	23,5	23,8

Таблица 9.2

Изменение агроклиматических показателей скользящих двадцатилетних периодов (МС «Чертково», Ростовская область); M – оценка математического ожидания случайной величины x ; σ – оценка среднеквадратического отклонения; p – вероятность события

Последний год периода	Продолжительность периода со среднесуточной температурой, превышающей 5 °С, (х), сут.			Средняя температура января (х), °С		
	M	σ	$p(x > 213), \%$	M	σ	$p(x > -5 \text{ °С}), \%$
1950	199	10,54	9,5	-9,1	4,42	17,7
1960	197	7,78	2,3	-8,0	4,52	21,6
1970	203	11,65	20,0	-7,6	3,39	22,3
1975	204	11,55	24,0	-7,8	3,67	22,6
1980	205	12,68	28,2	-8,7	3,54	14,8
1990	205	13,16	28,6	-7,3	4,15	29,0
2000	210	11,93	43,0	-5,6	3,24	42,9
2003	213	12,47	50,0	-5,5	3,34	50,0

Приведённые в табл. 9.2 значения средних (M) и среднеквадратических отклонений (σ) полностью определяют положение и форму соответствующих «скользящих» кривых распределения в рамках предположения о нормальности закона распределения. Изменение M сдвигает кривую распределения: вправо – при росте M , влево – при уменьшении M . Изменение среднеквадратического отклонения деформирует кривую распределения – делает её более плоской при росте σ и более островершинной при уменьшении σ . При этом могут возникать интересные эффекты. Например, при росте средней температуры января вероятность вымерзания озимых культур может повыситься, если одновременно повысится изменчивость (дисперсия) средней температуры этого месяца.

Оценим по данным табл. 9.2 изменения повторяемости мягких зим, благоприятных для перезимовки сельскохозяйственных культур. Мягкой называется зима, для которой средняя температура самого холодного месяца не ниже $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Шашко Д. И., 1985). Из данных табл. 9.2 следует, что 20-летние средние температуры января устойчиво росли с $-9,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ в 1950 г. до $-5,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ в 2003 году. Это подтверждает хорошо известный факт – глобальное потепление в умеренных широтах проявляется прежде всего в повышении температуры холодного периода года. Отметим тенденцию к снижению межгодовой изменчивости январских температур, среднеквадратическое отклонение которых за рассматриваемый период снизилось с $4,42$ до $3,24\text{ }^{\circ}\text{C}$, т.е. более чем на $1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$. В результате изменения параметров M и σ распределения январских температур повторяемость (т.е. вероятность, умноженная на 100 %) мягких зим повысилась с $17,7\text{ }\%$ в 1950 г. до $42,9\text{ }\%$ – в 2000 году. Рост повторяемости мягких зим в 2,5 раза с середины прошлого века по настоящее время в отдельных регионах, безусловно, оказал существенное позитивное влияние на сельскохозяйственное производство.

Оценим теперь изменение продолжительности периода календарного года со среднесуточной температурой выше $5\text{ }^{\circ}\text{C}$; эта величина является расчётной оценкой продолжительности вегетационного периода. За вторую половину XX столетия средняя продолжительность названного периода увеличилась на две недели (с 199 до 213 дней). Этот рост не связан с повышением июльских температур. Увеличение продолжительности тёплого периода года обусловлено уменьшением степени континентальности климата, в результате чего кривая годового хода температуры воздуха стала более плоской и удлинился период между датами устойчивого перехода температуры через $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ весной и осенью. Наблюдаемая тенденция изменения обеспеченности также подтверждает вывод об устойчивом росте продолжительности периода вегетации сельскохозяйственных культур. Действительно, если современная (равная в среднем 213 дням) продолжительность вегетационного периода в 1950–1960-е гг. наблюдалась менее одного раза за 10 лет, то с 1975 по 2003 г. этот показатель повысился в два раза – с 24 до 50 %.

Ресурсы влаги

Увлажнённость территории определяется соотношением приходной и расходной составляющих водного баланса почв, т.е. соотношением суммы осадков и испарения. Ниже будет рассматриваться именно этот случай. Испарение достаточно сложно зависит от температуры и влажности воздуха, облачности, скорости ветра и других факторов.

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

$$ГТК = \frac{r_{VI-VIII}}{0,1\sum T_{VI-VIII}}, \quad КУ = \frac{0,5r_{X-III} + r_{IV-VIII}}{0,18\sum T_{IV-VIII}}, \quad ИС = \frac{0,18\sum T_{>10^{\circ}C}}{r_{I-XII}}. \quad (9.6)$$

Здесь T – среднесуточная температура ($^{\circ}C$); r – сумма осадков (мм). При вычислении *ГТК* и *КУ*, при суммировании среднесуточных значений температуры T в нижнем индексе указан период года, за который производится суммирование.

Показатели увлажнённости *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 $0,1\sum T_{VI-VIII}$ и $0,18\sum T_{IV-VIII}$ соответственно. Коэффициенты 0,1 и 0,18 в формулах (9.6) для вычисления *ГТК* и *КУ* размерные (мм/ $^{\circ}C$).

Индекс сухости (*ИС*) Будыко – также безразмерная величина – 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 $10^{\circ}C$ как $0,18\sum T_{>10^{\circ}C}$, что представляется возможным благодаря тесной связи сумм температур с энергетической характеристикой испаряемости – радиационным балансом. Коэффициент 0,18 в формуле для расчёта *ИС* размерный (мм/ $^{\circ}C$).

Индекс сухости – интегральный годовой показатель увлажнённости, а коэффициенты увлажнения *ГТК* и *КУ* – более специальные показатели, характеризующие влагообеспеченность агроэкосистем при естественном увлажнении за определённый промежуток года. При этом *ГТК* – увлажнённость тёплого периода года, а *КУ* характеризует увлажнённость почвы с учётом осадков холодного периода года.

В табл. 9.3 представлены средние скорости (тренды) изменения агроклиматических характеристик влажностного режима в расчёте на десятилетний период за 1975–2010 г. для ряда областей Центрального

федерального округа. Увлажнённость территории определяется соотношением приходной и расходной составляющих деятельного слоя почвы – осадками и испарением соответственно. Для характеристики изменений увлажнённости в табл. 9.3 представлены тренды сезонных сумм осадков за 1975–2010 гг., коэффициентов увлажнённости (КУ) и запасов влаги в пахотном слое почвы с апреля по июль. Рассмотрим в качестве примера показатели увлажнения в Калужской области. За исключением зимнего периода, на территории Калужской области наблюдается положительная тенденция (рост) сезонных сумм осадков, особенно осенних (16,7 мм за 10 лет и, соответственно, $16,7 \cdot 3 = 50,1$ мм за 30 лет). Незначительно понижалась величина ГТК Г. Т. Селянинова – со скоростью $-0,058/10$ лет. Следует отметить, что скорость роста осенних осадков положительна на всей рассматриваемой территории.

Таблица 9.3

Средние скорости (тренды) изменения агроклиматических характеристик влажностного режима в расчёте на десятилетний период за 1975–2010 гг.

Область	Изменение осадков, мм/10 лет				ГТК	КУ	Изменение влагозапасов, мм/10 лет			
	зима	весна	лето	осень			W _{в.в.}	W _{май}	W _{июнь}	W _{июль}
Смоленская	-0,1	-6,2	13,0	15,2	-0,009	-0,010	0,359	1,323	2,032	-2,351
Калужская	-4,8	3,2	3,4	16,7	-0,058	-0,027	-0,013	-0,557	-1,118	-3,421
Московская	3,5	-2,4	-12,0	9,0	-0,125	-0,045	-0,499	-2,592	-3,692	-5,133
Рязанская	-3,5	-1,3	-3,9	14,0	-0,033	-0,118	-0,097	-1,241	-0,990	-3,337
Тульская	2,3	-0,2	3,2	15,8	-0,074	-0,028	-0,538	-0,663	-0,905	-2,151

Как показывают расчёты, выполненные в системе «климат–почва–урожай», в связи с потеплением климата наблюдается уменьшение запасов влаги в почве и повышается вероятность пересыхания пахотного слоя почвы как на дату возобновления вегетации ($W_{в.в.}$), так и в течение вегетационного периода ($W_{май}$, $W_{июнь}$, $W_{июль}$). Это может являться одной из основных причиной снижения урожайности яровых зерновых в регионе.

9.3. Оценка биоклиматического потенциала и продуктивности сельскохозяйственного производства

9.3.1. Биоклиматический потенциал

Биоклиматический потенциал (БКП) – расчётный показатель, характеризующий сельскохозяйственную продуктивность в условиях данного климата. Напомним, что продуктивность агроценоза – это суммарная биомасса, синтезированная за вегетационный период. Её размерность – ед. массы / (ед. площади · ед. времени).

Этот показатель рассчитывают по следующей формуле:

$$БКП = K_p \frac{\sum T_{>10^\circ\text{C}}}{\sum T_{>10^\circ\text{C}} \text{ база}}. \quad (9.7)$$

Здесь T – среднесуточная температура (причём суммирование её значений за календарный год производится лишь по тем суткам, когда она превышает 10°C); K_p – определяется влагообеспеченностью. Обычно за базовые условия принимаются такие, где $\sum T_{>10^\circ\text{C}} \text{ база} = 1000^\circ\text{C}$, что соответствует северной границе земледелия.

В качестве показателей влагообеспеченности используются отношение годовой суммы осадков к испаряемости за год (Шашко Д. И., 1985), коэффициент увлажнения $KУ$ (Сапожникова С. А., 1979) и некоторые другие.

Для сельскохозяйственной проблематики – адекватной и информативной – представляется методология оценки $БКП$ с помощью динамических моделей «погода–урожай» (Сиротенко О. Д., Абашина Е. В., Павлова В. Н., 1995).

Согласно этой методике значения первичной биологической продуктивности агроэкосистем рассчитываются для четырёх уровней интенсивности земледелия:

- $БКП_0$ – для современного низкозатратного земледелия;
- $БКП_W$ – для условий оптимального увлажнения;
- $БКП_N$ – для условий оптимального минерального питания;
- $БКП_{WN}$ – для оптимальных увлажнения и минерального питания.

При использовании динамических моделей продуктивности агроценозов расчёт значений биоклиматического потенциала начинается с даты перехода температуры воздуха через 5°C весной и продолжается до достижения посевам заданного стандартного состояния (листового индекса, равного 5). Затем посев в модели «скашивается», после чего рост растений продолжается вплоть до достижения очередного стандартного состояния посева или падения температуры воздуха ниже 5°C осенью. Суммарный урожай за год (выраженный сухой биомассой), рассчитанный имитационной моделью агроценоза, представляет собой искомую оценку биоклиматического потенциала.

Рассмотрим результаты расчета $БКП$ для Брянской и Самарской областей, расположенных примерно на одних и тех же широтах, но совершенно различных по условиям увлажнения и уровню плодородия почвы, а также для Краснодарского края, почвенно-климатические условия которого обычно принимались за эталонные для территории бывшего СССР. Оценки биоклиматического потенциала для четырёх уровней интенсивности земледелия, а также их приращения $\Delta W = БКП_W - БКП_0$, $\Delta N = БКП_N - БКП_0$ и $\Delta W_N = БКП_{WN} - БКП_0$ представлены в табл. 9.4.

Величина ΔW характеризует рост $БКП$ за счёт возможной оптимизации водного режима посевов, ΔN – рост за счёт оптимизации режима

минерального питания, а $\Delta W/N$ позволяет оценить эффективность оптимизации этих двух факторов в комплексе.

Таблица 9.4

Оценки биоклиматического потенциала для разных уровней интенсивности земледелия и его приращений за счёт оптимизации водного режима и минерального питания (т сухой биомассы)/(га · год)

Регион	БКП				Приращение БКП		
	$БКП_0$	$БКП_W$	$БКП_N$	$БКП_{WN}$	ΔW	ΔN	ΔWN
Брянская область	5,9	6,0	14,2	14,4	0,1	8,3	8,5
Самарская область	5,4	8,7	9,9	14,5	3,3	4,5	9,1
Краснодарский край	10,8	15,9	12,4	18,1	5,1	1,6	7,3

Согласно данным табл. 9.4, территория Краснодарского края характеризуется более высокими значениями всех четырёх типов БКП, что представляется вполне закономерным. Брянская и Самарская области при близких значениях $БКП_0$ и $БКП_{WN}$ существенно отличаются по значению биоклиматического потенциала при оптимальном увлажнении и оптимальном минеральном питании. Различная структура составляющих БКП этих областей свидетельствует о том, что продуктивность сельскохозяйственных культур на территории Брянской области лимитируется уровнем плодородия почв, а Самарской области – условиями увлажнения.

Анализ распределения биоклиматического потенциала на территории России, стран ближнего зарубежья и Европейского Союза представлен в коллективной монографии (А.В. Гордеев и др.). Расчёт БКП, основанный на динамических моделях теории продуктивности агроэкосистем, позволил составить стратегический прогноз урожайности зерновых культур для России (Стратегический прогноз ..., 2005).

9.3.2. Урожайность

Методы анализа влияния наблюдаемых и ожидаемых изменений климата на урожайность, т.е. хозяйственно-ценную биомассу, получаемую за год с единицы посевной площади, (ед. массы/ед. площади) и качество сельскохозяйственной продукции существенно различаются. Первая задача представляется менее сложной.

Необходимо дать оценку влияния наблюдаемых с середины 1970-х гг. изменений климата на продуктивность растениеводства. Учитывая, что с начала современного, «взрывного», потепления прошло более 30 лет и получены необходимые для анализа ряды наблюдений, эта задача может быть решена средствами корреляционного и регрессионного анализов. Осложняющим обстоятельством для территории России является неоднородность временных рядов урожайности, обусловленная экономической перестройкой, совпавшей с периодом существенных изменений климата.

Приведём в качестве примера оценки влияния изменений глобального климата на урожайность шести важнейших сельскохозяйственных культур за период 1981–2002 гг. (табл. 9.5).

Таблица 9.5

Оценки влияния изменений глобального климата на продуктивность и урожайность шести важнейших мировых сельскохозяйственных культур (Lobell D. et al., 2007)

Показатель	Сельскохозяйственная культура					
	Пшеница	Рис	Кукуруза	Соя	Ячмень	Сорго
Посевная площадь в 2002 г., млн га	214	148	139	79	55	42
Продуктивность в 2002 г., млн т/год	574	578	602	181	137	54
Изменение урожайности за 1981–2002 гг., кг/га	846	1109	1178	632	473	-80
Климатически обусловленные изменения урожайности 1981–2002 г., кг/га	-88,2	-10,5	-90,3	23,1	-144,9	-19,5
Климатически обусловленные изменения продуктивности 1981–2002 г., млн т/год	-18,9	-1,6	-12,5	1,8	-8,0	-0,8

Для выделения климатообусловленных трендов во временных рядах урожайности могут быть использованы следующие подходы: (I) – первые разности, (II) – исключение линейного временного тренда, (III) – исключение кубического сплайн-тренда, а также метод (IV) – введение временного тренда в регрессию между урожаями (с неисключённым трендом) и климатическими переменными. Результаты расчётов с применением всех указанных подходов представлены в табл. 9.6.

Таблица 9.6

Оценки влияния изменений глобального климата в 1981–2002 гг. на тренды продуктивности мирового сельского хозяйства (млн т), полученные с использованием разных методов выделения и исключения временных трендов (Lobell D. et al., 2007)

Метод	Температурные переменные*, °C	Пшеница	Рис	Кукуруза	Соя	Ячмень	Сорго	Всего
I	T_{\min}, T_{\max}	-18,9	-1,6	-12,5	1,8	-8,0	-0,8	-40,0
I	T_{avg}	-14,8	-1,5	-20,7	-1,6	-8,3	-1,0	-48,0
II	T_{\min}, T_{\max}	-13,5	1,1	-5,6	2,8	-5,1	-1,2	-21,5
II	T_{avg}	-10,8	-1,0	-18,4	-0,7	-6,2	-1,2	-38,3
III	T_{\min}, T_{\max}	-13,5	-3,4	-9,3	2,6	-5,2	-0,6	-29,4
III	T_{avg}	-10,8	-0,6	-19,1	-1,2	-6,1	-0,6	-38,4
IV	T_{\min}, T_{\max}	-13,2	-1,2	-5,2	4,4	-6,6	-1,5	-23,3
IV	T_{avg}	-11,0	-1,0	-15,2	-1,0	-6,6	-1,8	-36,5

Примечание. * – для температуры T используются средние значения за вегетационный период минимальных (min), максимальных (max) и средних (avg) значений за сутки.

В табл. 9.6 приведены оценки влияния на тренды урожая температуры воздуха в приземном слое атмосферы, которая учитывалась с помощью средних за вегетационный период: максимального (max), минимального (min) и среднего (avg) значения за сутки. Все использованные подходы дают достаточно согласованные между собой результаты.

Данные табл. 9.6 позволяют заключить, что наблюдаемое в 1981–2002 гг. изменение климата обусловило падение глобальной урожайности всех важнейших мировых продовольственных культур, за исключением сои. Однако эти климатообусловленные потери мирового сельского хозяйства за указанный период с избытком компенсированы агротехнологическим прогрессом и прямым положительным влиянием роста содержания CO_2 в атмосфере на урожайность. Тенденция конца XX–начала XXI вв. к снижению глобальной климатообусловленной урожайности зерновых культур вследствие изменения климата не исключает возможности роста урожайности в отдельных регионах мира в тот же период времени. На территории России за сопоставимый период при той же методологии расчётов выявлен климатообусловленный рост урожайности зерновых и зернобобовых культур (Сиротенко О.Д., 2007; Сиротенко О.Д., 1991; Сиротенко О.Д., Павлова В.Н., 2010; Сиротенко О.Д. и др., 2007). Ниже, в разделе 9.5, будет рассмотрен эмпирико-статистический метод «первых разностей» для расчёта климатически обусловленного изменения урожайности в России в 1975–2008 гг.

9.3.3. Качество сельскохозяйственной продукции

Изменения климата влияют не только на урожайность сельскохозяйственных культур, но и на качество товарной продукции растениеводства. В результате агрометеорологических исследований выявлено большое число физико-статистических зависимостей между характеристиками погодных условий и показателями, определяющими качество сельскохозяйственной продукции. Этот научный потенциал до сих пор практически не используется для оценок влияния наблюдаемых и ожидаемых изменений климата на сельское хозяйство.

Для территории СССР З.А. Мищенко (1962) установлена тесная корреляционная связь между процентным содержанием белка (B) в зёрнах яровой пшеницы и средним значением суточной амплитуды температуры воздуха за вегетационный период (A):

$$B = 1,29A + 2,1. \quad (9.8)$$

Коэффициент корреляции переменных B и A равен 0,86. Суточная амплитуда температуры воздуха является хорошим показателем влияния на растения климатических условий, определяющих континентальность климата. Выше уже отмечалось, что за последние 30 лет наблюдается существенное снижение континентальности климата в основных

сельскохозяйственных районах России. Можно предположить, что эта тенденция существенно повлияет на качество зерна пшеницы.

Наряду с термическими условиями, на содержание белка в зерне пшеницы влияет и влажность почвы. Приведём уравнение регрессии, полученное Г.В. Дегтяревой (1981) для юго-востока Европейской территории России (ЕТР):

$$B = -0,058x - 0,039x^2 + 1,62y^2. \quad (9.9)$$

Здесь B – содержание белка в зерне (%); x – запасы продуктивной влаги метрового слоя почвы в фазу молочной спелости (мм); y – средняя температура воздуха в период колошение–молочная спелость ($^{\circ}\text{C}$).

В агрометеорологической литературе имеются аналогичные разработки и по другим сельскохозяйственным культурам.

9.4. Методы мониторинга изменений климата для сельского хозяйства

Климат есть многомерный случайный процесс (случайное поле), компоненты которого – поток солнечной радиации, температура, влажность воздуха, сумма осадков, температура и влажность почвы, ряд других параметров – совместно определяют состояние и продуктивность агроэкосистем, и через них прямо или непосредственно влияют на сельскохозяйственные технологические процессы и эффективность сельскохозяйственной деятельности в целом. Связи между климатом, агроэкосистемами и результатами хозяйственной деятельности, как правило, многозначны, нелинейны и неаддитивны¹, им свойственны инерционность и адаптивность². Всё это делает проблему экономической и агроэкологической интерпретации наблюдаемых изменений климата достаточно сложной и в определённой мере неоднозначной.

В табл. 9.7 представлен перечень биоклиматических и агроклиматических показателей, используемых для комплексной оценки влияния изменений климата на сельское хозяйство и землепользование. Эти показатели представлены четырьмя группами: характеристики теплообеспеченности, увлажнённости, биоклиматического потенциала и климатообусловленной урожайности.

Для расчёта показателей увлажнённости ИС, ГТК и КУ (определяются по формулам (9.6)) необходим минимальный объём гидрометеорологической информации – среднесуточные значения температуры и суточные суммы осадков. Достаточная точность достигается и при использовании данных месячного разрешения. Напомним, что эти показатели – безразмерные.

¹ Аддитивный – получаемый путём сложения.

² Адаптация – эволюционно возникшее приспособление организмов к условиям среды, выражающееся в изменении их внешних и внутренних особенностей (биол.).

Таблица 9.7

**Перечень основных биоклиматических и агроклиматических показателей
для мониторинга влияния изменений климата на сельское хозяйство**

Показатель, размерность	Обозначение	Способ расчёта
Характеристики термического режима		
Сумма среднесуточных значений температуры воздуха за период календарного года со среднесуточной температурой воздуха, превышающей 5 или 10 °С, °С	$\sum T_{>5}^{\circ\text{C}}$ $\sum T_{>10}^{\circ\text{C}}$	
Продолжительность вегетационного периода (т.е. периода календарного года, когда среднесуточная температура воздуха превышает 5 или 10 °С), сутки	N_5, N_{10}	
Даты перехода (номер дня от начала календарного года) среднесуточной температуры воздуха через границы 5 или 10 °С весной и осенью	d_5, d_{10}	
Средняя температура воздуха в январе и июле, °С	T_1, T_7	
Амплитуда годового хода среднесуточной температуры, °С	A_T	
Продолжительность вегетационной весны и осени (т.е. периодов времени весной и осенью, когда среднесуточная температура воздуха находится в указанных пределах), сутки	N_{5-15}, N_{15-5}	
Характеристики увлажнения		
Сумма осадков за период календарного года со среднесуточной температурой, превышающей 5 и 10 °С, мм	R_5, R_{10}	
Суммарное испарение за вегетационный период, мм	E	*
Испаряемость за вегетационный период, мм	E_0	
Влагозапасы в слое почвы 0–20 и 0–100 см в среднем за тёплый период календарного года (т.е. когда среднесуточная температура воздуха выше 5 °С), мм	W_{20}, W_{100}	*
Гидротермический коэффициент Селянинова, безразмерный	$ГТК$	
Индекс сухости Будыко, безразмерный	$ИС$	
Коэффициент увлажнения Сапожниковой, безразмерный	$КУ$	
Дефицит испарения Будаговского, мм	ΔE	*
Биоклиматический потенциал (БКП), т·га⁻¹		
БКП Сапожниковой	$БКП_C$	
БКП при низкозатратном 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, т·га⁻¹		
При низкозатратном земледелии	Y_0	*
При оптимальном увлажнении	Y_W	*
При оптимальном минеральном питании	Y_N	*
При оптимальном увлажнении и минеральном питании	Y_{WN}	*

* – Показатель вычисляется с помощью системы «климат – почва – урожай».

Согласно А. И. Будаговскому (1964), наилучшим критерием для оценки и, следовательно, для мониторинга засух является дефицит испарения $\Delta E = E_0 - E$, где E_0 и E – испаряемость и испарение.

В настоящее время система мониторинга климата Росгидромета не располагает в достаточной мере репрезентативными и достаточно однородными длиннорядными наблюдениями за влажностью почвы. Поэтому в системе мониторинга изменений климата для сельского хозяйства предлагается использовать ряды влагозапасов почвы, рассчитанные по результатам стандартных гидрометеорологических наблюдений с помощью системы «климат–почва–урожай».

Для оценки изменений климата по агробиологическим критериям можно использовать первичную биологическую продуктивность агроэкосистем – биоклиматический потенциал ($БКП$, т сухой биомассы/(га · год)), который рассматривается для четырёх уровней интенсивности земледелия – $БКП_0$, $БКП_W$, $БКП_N$ и $БКП_{WN}$.

Урожайность сельскохозяйственных культур можно рассчитывать по формуле С. А. Сапожниковой (1979) – $БПК_C$ – в форме бонитировочного балла климата B_K . Он равен урожаю яровых зерновых культур при данном сочетании тепла и влаги. Для его расчёта используется формула

$$B_K = 0,01 \varepsilon \sum T_{>10^\circ C}. \quad (9.10)$$

Здесь ε – балл увлажнения, количественно равный осреднённой урожайности этих культур (ц/га), приходящийся на единицу тепла ($\sum T_{>10^\circ C} = 100^\circ C$) при данном увлажнении, а $\sum T_{>10^\circ C}$ – фактическая сумма среднесуточных значений температуры ($^\circ C$) за период календарного года со среднесуточной температурой выше $10^\circ C$.

Значение ε определяется на основании коэффициента увлажнения $KУ$:

$$\varepsilon = -1,7 KУ^2 + 3,7 KУ - 0,28. \quad (9.11)$$

Зависимость ε от $KУ$ имеет чётко выраженный максимум в пределах значений $KУ$ от 1 до 1,2; он соответствует лесостепной зоне.

Практически мониторинг изменений климата для сельского хозяйства реализуется путём расчёта ежегодно обновляемых таблиц следующих характеристик агроклиматических показателей:

- текущих годовых значений;
- скользящих средних значений;
- скользящих среднеквадратических отклонений;
- скользящих оценок повторяемости, обеспеченности или рисков.

Приведём в качестве примера результаты мониторинга с пятилетним шагом, полученные по данным МС «Чертково» (Ростовская область) для тёплого периода года (см. табл. 9.8–9.11).

Таблица 9.8

**Текущие значения агроклиматических показателей
(МС «Чертково», Ростовская область)**

Год	Биоклиматический потенциал, ц/га		Климатически обусловленная урожайность, ц/га		ΔE , мм	ГТК	Влагозапасы почвы W_{100} , мм	
	BKP_0	BKP_N	Y_0	Y_N			июнь	июль
1976	73,4	126,1	18,0	35,5	430	1,48	48,0	36,0
1980	61,1	108,3	12,4	20,4	444	1,42	71,0	30,0
1985	52,5	97,1	15,9	29,3	494	1,26	59,0	33,0
1990	54,1	112,7	16,5	36,9	571	0,94	50,0	28,0
1995	45,1	87,4	8,7	16,2	585	0,87	35,0	27,0
2000	55,9	108,1	12,4	26,7	591	1,01	45,0	39,0
2004	61,1	114,9	16,4	34,5	511	1,14	62,0	48,0

Таблица 9.9

**Скользящие 30-летние средние значения агроклиматических показателей
(МС «Чертково», Ростовская область)**

Последний год периода	Биоклиматический потенциал, ц/га		Климатически обусловленная урожайность, ц/га		ΔE , мм	ГТК	Влагозапасы почвы W_{100} , мм	
	BKP_0	BKP_N	Y_0	Y_N			июнь	июль
1976	46,1	81,9	10,5	18,1	582	0,78	52,6	36,1
1980	48,2	85,7	11,2	19,6	566	0,84	56,9	37,4
1985	48,8	86,8	11,3	20,1	572	0,83	57,7	38,8
1990	48,0	85,9	11,5	20,6	580	0,80	56,6	36,9
1995	49,1	88,2	11,5	20,8	576	0,83	55,4	37,3
2000	49,4	88,9	11,2	20,2	570	0,86	54,8	38,0
2004	50,3	90,8	11,7	21,4	561	0,90	56,4	39,3

Таблица 9.10

Скользящие 30-летние среднеквадратические отклонения значений агроклиматических показателей (МС «Чертково», Ростовская область)

Последний год периода	Биоклиматический потенциал, ц/га		Климатически обусловленная урожайность, ц/га		ΔE , мм	ГТК	Влагозапасы почвы W_{100} , мм	
	BKP_0	BKP_N	Y_0	Y_N			июнь	июль
1976	9,7	19,7	3,9	9,0	59	0,30	12,1	7,6
1980	11,3	22,1	4,2	9,8	73	0,36	16,2	8,3
1985	11,2	21,0	4,4	10,2	81	0,37	16,1	8,6
1990	10,9	20,8	4,2	10,1	79	0,35	15,9	8,4
1995	11,0	20,8	4,3	10,3	79	0,34	15,9	8,2
2000	11,3	21,4	4,4	10,2	77	0,34	16,2	7,7
2004	10,8	20,3	4,4	10,6	80	0,35	15,4	8,1

Таблица 9.11

Скользящие 30-летние оценки обеспеченности $F = \int_{-\infty}^{y_k} p(x)dx$ заданных значений (y_k) агроклиматических показателей, %

Последний год периода	Биоклиматический потенциал		Климатически обусловленная урожайность		ΔE ,	ГТК	Влагозапасы почвы W_{100} , мм	
	$БКП_0$	$БКП_N$	Y_0	Y_N			июнь	июль
1976	66,7	67,4	61,8	64,4	35,8	66,1	62,3	66,1
1980	57,2	59,2	55,0	57,4	47,0	56,3	48,8	58,9
1985	55,1	57,6	53,1	55,3	44,3	57,3	46,8	52,3
1990	58,0	59,2	52,2	53,1	40,3	61,7	49,7	60,9
1995	54,3	54,9	51,4	52,5	42,1	58,4	52,7	59,5
2000	52,9	53,5	54,1	55,0	45,2	54,4	54,1	56,3
2004	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0
y_k	50,3	90,8	11,7	21,4	561	0,90	56,4	39,3

Эти данные позволяют решать следующие практические задачи гидрометеорологического обеспечения сельского хозяйства:

- оценивать агрометеорологические условия текущего года, по сравнению с прошлым годом и предысторией прошедшего 30-летнего периода;
- определять годы, аналогичные текущему году по агрометеорологическим условиям вегетационного периода;
- находить наблюдаемые границы изменчивости оцениваемых агроклиматических показателей по данным за последние 30 лет.

Скользящие средние значения агроклиматических параметров (табл. 9.9) представляются весьма информативными показателями. Так, например, из данных этой таблицы следует вполне однозначный вывод – наблюдаемые за последние 30 лет изменения климата способствовали росту продуктивности сельского хозяйства северных районов Ростовской области, которые характеризуются наблюдениями МС «Чертково». Данные табл. 9.9 позволяют также заключить, что степень аридности климата с 1970-х гг. (с начала «взрывного» глобального потепления) существенно уменьшилась. Так, 30-летние средние значения дефицита испарения уменьшились с 582 мм в 1976 г. до 561 мм в 2004 году. Значения ГТК увеличились с 0,78 до 0,90. Средние значения влагозапасов в пахотном и метровом слоях почвы в июне и июле также повысились, хотя это повышение нельзя оценить как значительное. Отметим согласованный характер изменений важнейших показателей степени засушливости климата – дефицита испарения, ГТК и влагозапасов почвы.

Последствия засух оцениваются величинами урожайности и биоклиматического потенциала для двух уровней интенсивности земледелия – современного низкозатратного (Y_0 , $БКП_0$) и интенсивного (Y_N и $БКП_N$).

Тренды всех названных показателей свидетельствуют о положительном влиянии наблюдаемых изменений климата на продуктивность сельского хозяйства и биоклиматический потенциал территории. Средние значения биоклиматического потенциала для уровней современного и интенсивного земледелия повысились на 9,1 (с 46,1 до 50,3 ц/га) и на 10,1 % (с 81,9 до 90,8 ц/га) соответственно. Аналогичным образом повысились значения климатически обусловленной урожайности зерновых культур.

Тем не менее анализ скользящих средних недостаточен для однозначной интерпретации результатов расчётов. Изменения средних величин свидетельствуют лишь о смещении положения центра распределения, но в связи с потеплением изменяется и форма функции распределения.

Данные табл. 9.10 подтверждают это предположение – с 1976 по 2004 г. повысилась изменчивость всех представленных в таблице показателей. Особенно значителен рост среднеквадратического отклонения дефицита испарения с 59 мм в 1976 г. до 80 мм в 2004 г., что составляет 36 %. Повышение межгодовой изменчивости урожаев следует отнести к негативным последствиям наблюдаемых изменений климата.

В табл. 9.11 приведены 30-летние скользящие оценки повторяемости современного (на 2004 г.) состояния системы агроклиматических показателей. Значения y_k – верхнего предела интегрирования – заданы равными средним за 1976–2004 гг., и, таким образом, оценка повторяемости значений, представленных в предпоследней строке табл. 9.11, равна 50 %. Результаты расчётов, представленные в табл. 9.11, интерпретируются следующим образом: повторяемость урожаев зерновых при высоком уровне агротехники (Y_N) ниже 21,4 ц/га, которая составляла 64,4 % в 1976 г., к 2000 г. снизилась до 55 %. Аналогичным образом повторяемость урожаев зерновых при современной агротехнике (Y_0) – ниже 11,7 ц/га, равная 61,8 % в 1976 г., снизилась до 54,1 % к 2004 году. Повторяемость влагозапасов метрового слоя почвы в июле ниже уровня 39 мм составляла в 1976 г. 66 % и снизилась к 2000 г. на 9,8 %, до уровня 56,3 %.

Снижение аридности климата ведёт к заметному росту урожайности зерновых культур и биоклиматического потенциала сельскохозяйственных угодий. Вместе с тем наблюдаемое увеличение климатической изменчивости урожайности в определённой мере дестабилизирует сельскохозяйственное производство, снижает его устойчивость и экономическую эффективность.

9.5. Оценка влияния наблюдаемых изменений климата по уравнениям множественной регрессии

Региональные и национальные системы мониторинга и прогнозирования урожайности на основе систем дифференциальных уравнений, реализованные в виде динамических моделей «климат–почва–урожай»,

являются достаточно сложным технологическим продуктом, что в какой-то мере ограничивает их практическое использование. Для получения оценок влияния наблюдаемых изменений климата на приращение урожайности могут быть использованы уравнения множественной регрессии в разностной форме, а именно в форме первых разностей (Lobell, Field, 2007). Агрегированные зависимости приращения урожайности (ΔY^j) от приращения метеорологических факторов – температуры (ΔT^j) и сумм осадков (ΔP^j) – можно представить в виде

$$Y^j - Y^{j-1} = c_0 + a_i \cdot (T_i^j - T_i^{j-1}) + b_i \cdot (P_i^j - P_i^{j-1}), \quad (9.12)$$

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 не исключает полностью технологические тренды в рядах урожайности за длительные промежутки времени (2–3 десятилетия), но 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. С помощью этого метода возможно идентифицировать искомые зависимости со значимыми (при 5 %-ном 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 климатически обусловленных трендов урожайности основных сельскохозяйственных культур для территории России. В табл. 9.12 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. Предикторы уравнений множественной регрессии – среднемесячные данные по температуре воздуха и месячным суммам осадков, а также сезонные суммы осадков и средние температуры за зимний, весенний, летний и осенний периоды (Павлова В. Н., Сиротенко О. Д., 2010). Расчёты выполнялись за период с 1975 по 2006 г. по крупным регионам в границах федеральных округов (ФО). Как следует из данных (табл. 9.12), с помощью предложенного подхода можно получить достаточно надёжные оценки влияния наблюдаемых изменений климата для основных сельскохозяйственных культур Российской Федерации. Доля объяснённой климатическими факторами дисперсии урожайности достигает 43,8 % для озимой пшеницы. Соответствующие оценки для зерновых и зернобобовых и ярового ячменя также достаточно высоки и составляют 40,4 и 37,9 %. По сравнению с выполненными ранее оценками (Сиротенко О. Д., Павлова В. Н., 2010), более высокая точность прогностической зависимости

достигнута за счёт учёта условий тепло- и влагообеспеченности осеннего и зимнего периодов вегетации, особенно для озимых культур.

Таблица 9.12

Оценки коэффициентов множественной корреляции (R) в уравнениях регрессии для расчёта средней по области урожайности зерновых и зернобобовых культур, ярового ячменя и озимой пшеницы

Регион	N	Зерновые и зернобобовые		Яровой ячмень		Озимая пшеница	
		R	$R^2 \cdot 100 \%$	R	$R^2 \cdot 100 \%$	R	$R^2 \cdot 100 \%$
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 данные отсутствуют.

В табл. 9.13 представлены выбранные предикторы уравнений множественной регрессии и соответствующие им коэффициенты для расчёта урожайности озимой пшеницы. Эти уравнения позволяют количественно оценить степень влияния изменений температурного и влажностного режимов на формирование урожайности в разных регионах. Так, повышение средней температуры мая на 1 °С повсеместно приводит к снижению урожайности озимой пшеницы от 1,454 ц/га на территории Южного ФО до 0,314 ц/га на севере Центрального ФО (Павлова В.Н., Сиротенко О.Д., 2012).

Полученные уравнения регрессии показывают, что положительное влияние на урожайность озимой пшеницы оказывают осадки мая на юге Центрального ФО, в Поволжье и на территории Южного ФО. Влияние наблюдаемых изменений осадков для достаточно увлажнённых в целом северных областей Центральной России либо не проявляется, либо оказывается отрицательным. Для областей Центрального ФО (Смоленская, Брянская, Владимирская, Московская, Рязанская, Калужская) рост осадков в мае на 10 мм приводит к снижению урожайности на 0,19 ц/га. Значимое положительное влияние роста зимних осадков на урожайность выявлено в Приволжском регионе, осенних – на юге Приволжского и Южного ФО.

Для зерновых и зернобобовых культур значимыми предикторами оказались температура воздуха и суммы осадков за май и июнь практически для всех рассмотренных регионов.

Таблица 9.13

Оценки влияния изменений температуры воздуха и атмосферных осадков на урожайность озимой пшеницы (коэффициенты a_i , b_i уравнений регрессии $\Delta y = a_i \Delta T_i + b_i \Delta P_i + c$)

Федеральный округ, регион	Температура воздуха, T				
	a_i (ц/га/°C)				
	май	июнь	зима	март-апрель	осень
Центральный (север)	-0,314	–	-0,307	0,245	0,568
Центральный (центр)	-0,583	–	–	–	0,641
Центральный (юг)	-0,821	–	0,450	-0,435	
Приволжский (север)	-0,680	-0,533	–	–	0,916
Приволжский (юг)	-1,399	–	–	–	1,107
Южный	-1,454	–	0,546	–	–
	Атмосферные осадки, P				
	b_i (ц/га/мм)				
Центральный (север)	–	–	–	–	-0,021
Центральный (центр)	-0,019	–	–	-0,035	-0,019
Центральный (юг)	0,036	–		-0,016	0,014
Приволжский (север)	0,092	–	0,032	–	–
Приволжский (юг)	0,111	–	0,030	–	0,017
Южный	0,043	–	–	0,024	0,014

Примечание. Прочерки (–) означают, что предиктор не входит в уравнение регрессии.

Рассчитанные оценки коэффициентов уравнений множественной регрессии для южных областей Приволжского ФО (Татарстан, Башкирия, Пензенская, Самарская, Саратовская и Оренбургская области) представлены в табл. 9.14. Можно видеть, что все полученные оценки имеют высокий уровень значимости (p -level), который 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 ($P_{май}$) в данном регионе. Для рядов урожайности зерновых и зернобобовых, которые объединяют яровые и озимые культуры, оказались значимы осадки осеннего периода. Отметим высокий уровень дисперсии ($R^2 \cdot 100$ %) урожайности, объясняемой выбранными метеорологическими факторами – 67 % для зерновых и зернобобовых в целом и 59 % – для ярового ячменя.

С помощью методологии разностного подхода оценены обусловленные изменениями температуры воздуха и осадков тренды урожайности основных сельскохозяйственных культур по регионам России. Перейдём к анализу результатов на основании полученных уравнений.

Таблица 9.14

**Оценки коэффициентов уравнений регрессии для расчёта урожайности
зерновых и зернобобовых и ярового ячменя для южных областей
Приволжского ФО**

Предикторы	β	B	σ_B	$t = B/\sigma_B$	p-level
Зерновые и зернобобовые, $R = 0,818$, $n = 183$					
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
$P_{май}$	0,338911	0,060245	0,009190	6,55561	0,000000
$P_{июнь}$	0,153601	0,023440	0,008233	2,84698	0,004927
$P_{осень}$	-0,175485	-0,018359	0,004654	-3,94446	0,000114
Яровой ячмень, $R = 0,765$, $n = 183$					
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
$P_{май}$	0,318883	0,065890	0,011736	5,61419	0,000000
$P_{июнь}$	0,148691	0,026375	0,010591	2,49044	0,013659

Примечание. R – множественный коэффициент корреляции, n – объём выборки, B – коэффициент регрессии, β – коэффициент регрессии в стандартизованном масштабе, σ_B – стандартная ошибка B .

Следует отметить, что полученные авторами уравнения множественной регрессии позволяют оценить влияние не только наблюдаемых за последние десятилетия, но и ожидаемых в ближайшие годы изменений климата на урожайность зерновых и зернобобовых культур по регионам России. Однако точность оценок и прогнозов зависит, с одной стороны, от точности используемых уравнений и, с другой – от надёжности данных об ожидаемых изменениях климата.

Оценки трендов температуры воздуха по крупным регионам России за период с 1975 по 2010 г. приведены в табл. 9.15 (Павлова В.Н., Сиротенко О.Д., 2012). Средние по области оценки трендов температуры и осадков в большей степени, чем оценки по выделенным крупным регионам, подвержены влиянию рельефа и других локальных факторов, связанных с особенностями расположения отдельных метеорологических станций. Региональные оценки за счёт большего пространственного сглаживания имеют более высокое отношение сигнал/шум и, следовательно, полученные на их основании оценки изменений урожайности более обоснованы для использования в качестве прогноза на ближайшие годы. Тренды температуры воздуха как по отдельным месяцам, так и по сезонам года положительны практически для всей рассматриваемой территории Российской Федерации, за исключением юго-запада Сибири (табл. 9.15). Как следует из этих данных, на европейской части России

минимальные положительные тренды температуры воздуха наблюдались в мае, а в сезонном разрезе – весной.

Таблица 9.15

**Линейные тренды среднемесячной температуры воздуха (°C/10 лет)
и месячных сумм осадков (мм/10 лет) за период с 1975 по 2010 г.**

Регион	Среднемесячная температура воздуха (°C/10 лет)							
	март	апрель	май	июнь	зима	весна	лето	осень
Северо-Западный (юг)	0,40	0,70	0,12	0,27	0,95	0,40	0,63	0,42
Центральный (север)	0,48	0,60	0,27	0,33	0,79	0,45	0,63	0,56
Центральный (центр)	0,64	0,54	0,16	0,27	0,76	0,45	0,66	0,52
Центральный (юг)	0,85	0,49	0,19	0,43	0,71	0,51	0,84	0,62
Приволжский (север)	0,61	0,48	0,31	0,24	0,49	0,47	0,51	0,62
Приволжский (юг)	1,04	0,35	0,03	0,43	0,56	0,48	0,62	0,68
Южный	0,73	-0,05	0,17	0,51	0,38	0,29	0,73	0,53
Уральский (юг)	0,71	0,12	0,50	0,03	0,26	0,45	0,25	0,64
Сибирский (юго-запад)	0,90	0,43	0,61	-0,14	-0,10	0,65	0,10	0,30
Сибирский (юго-восток)	0,68	0,54	0,53	0,45	0,16	0,58	0,45	0,18
Дальневосточный (юг)	0,44	0,24	0,26	0,41	0,44	0,31	0,26	0,44
	Месячные суммы осадков (мм/10 лет)							
	март	апрель	май	июнь	зима	весна	лето	осень
Северо-Западный (юг)	2,0	-2,6	4,7	1,1	4,0	4,1	1,0	-3,3
Центральный (север)	0,9	-0,5	-2,4	-5,9	-3,5	-2,0	-13,9	-5,5
Центральный (центр)	1,1	-1,5	2,9	-4,7	-2,5	2,5	-12,6	1,3
Центральный (юг)	2,0	-3,3	-1,5	-1,6	-2,8	-15,0	1,3	-1,3
Приволжский (север)	5,5	-2,8	1,5	-0,7	1,9	4,2	-10,6	-5,2
Приволжский (юг)	6,1	-0,6	2,2	-4,3	-0,7	7,6	-12,5	-4,7
Южный	8,8	-3,0	5,1	2,1	-1,2	10,8	-4,0	9,6
Уральский (юг)	4,5	-1,4	5,4	2,4	1,5	8,5	-2,9	-0,4
Сибирский (юго-запад)	0,5	2,8	1,3	0,1	2,4	4,2	4,2	-1,0
Сибирский (юго-восток)	0,8	1,1	0,0	0,4	0,8	1,5	6,6	4,3
Дальневосточный (юг)	0,7	5,2	-1,3	3,3	4,0	7,2	4,3	-2,2

В отличие от температуры воздуха, тренды осадков разнонаправлены по знаку и имеют большую изменчивость по территории. Отметим как положительный фактор для сельского хозяйства, что за последние три десятилетия количество выпавших осадков в мае–июне и за весенний период на территории Приволжского, Южного и юга Уральского федерального округа увеличивалось. Весенние осадки росли практически по всей территории России с развитым сельским хозяйством, за исключением северных и южных областей Центрального ФО.

Наличие разнонаправленных трендов осадков для отдельных месяцев как на территории отдельных областей, краёв, республик, так и на территории крупных регионов обуславливает достаточно сложную

картину реакции сельскохозяйственного производства на динамику климатических условий последних десятилетий. Максимальная скорость роста летней температуры зафиксирована в Центральном (юг) регионе – 0,84 °C/10 лет, а минимальная скорость – 0,10 °C/10 лет – на юго-западе Сибири. Отметим, что на Европейской территории Российской Федерации летние осадки уменьшались практически повсеместно.

Максимальная скорость снижения летних осадков отмечена на юге Приволжского (-12,5 мм/10 лет) и на севере Центрального ФО (-13,9 мм/10 лет). В Сибири и на Дальнем Востоке, как показывают данные табл. 9.15, осадки увеличиваются практически во все сезоны года.

Каковы же результаты расчётов оценок изменения продуктивности при изменении климата за последние десятилетия на территории зернопроизводящих регионов России? Обусловленные климатом изменения урожайности за период современного потепления, начиная с 70-х гг. прошлого века, будут представлены в следующей главе.

Региональные оценки

Часто для практических целей необходимо представить оценки наблюдаемых и ожидаемых изменений климата применительно к агроклиматическим условиям конкретного региона. Рассмотрим возможность применения методологии разностного подхода к построению функционалов «погода–урожай» и определим его эффективность при оценке влияния текущих изменений климата на продуктивность сельскохозяйственных культур на примере Калужской области.

Алгоритм расчёта оценок влияния текущих изменений климата на продуктивность с помощью метода разностей заключается в следующем:

1. Расчёт первых разностей, т.е. переход от временного ряда x_t ($t = 1, \dots, n$) к ряду $Z_{t1} = x_t - x_{t-1} = \nabla x_{t1}$ ($t = 2, \dots, n$). В качестве рядов x_t рассматриваются ряды урожайности (Y_i) и выбранных метеорологических факторов (T_i, R_i) – температуры воздуха и сумм осадков.

Аналогичным образом рассчитываются вторые разности и k -е разности:

$$Z_{t2} = x_t - x_{t-2}, \quad Z_{tk} = x_t - x_{t-k}.$$

2. Расчёт разностей второго порядка:

$$Z_t^2 = \nabla^2 x_t = \nabla(\nabla x_t) = x_t - 2x_{t-1} + x_{t-2}.$$

3. Расчёт оценок линейных трендов (а) временных рядов x_t ($t = 1, \dots, n$): например для временных рядов урожайности – $Y(i) = a \cdot t + b$.

4. Расчёт корреляционных матриц для среднеобластной урожайности (Y_i) и метеорологических переменных $cor(Y_i, T_i, R_i)$.

5. Построение уравнений множественной регрессии, связывающих урожайность и метеорологические параметры.

6. Расчёт и анализ оценок влияния изменений (колебаний) климата на урожайность.

Ниже представлены результаты расчётов, выполненные по изложенной выше методике для территории Калужской области. В табл. 9.16 приведены оценки трендов урожайности основных сельскохозяйственных культур (ярового ячменя, озимой пшеницы, зерновых и зернобобовых в целом), температуры воздуха и осадков за весенне-летние месяцы и по сезонам года за период с 1975 по 2006 год. Рассчитанные линейные тренды (t) характеризуют обусловленные климатом изменения рассматриваемых показателей, произошедшие за последние 30 лет в процентах, по сравнению с современным уровнем.

Таблица 9.16

Оценки линейных трендов (t) температуры воздуха ($^{\circ}\text{C}$), осадков (мм), урожайности (ц/га), посевных площадей (тыс. га) основных сельскохозяйственных культур на территории Калужской области за период с 1975 по 2006 г.

Параметры		Скорость изменения, t		Коэффициент корреляции, r
		ед./10 лет	%	
Урожайность	яровой ячмень	1,07	8,4	0,258
	озимая пшеница	2,07	14,4	0,496*
	зерновые и зернобобовые	1,20	10,1	0,366*
Посевная площадь	яровой ячмень	-48,0	53,7	0,891*
	озимая пшеница	-39,5	54,3	0,890*
	зерновые и зернобобовые	-142,5	45,0	0,942*
Температура воздуха	Март	0,04	-1,9	0,015
	Апрель	0,30	5,0	0,133
	Май	-0,16	-1,3	-0,074
	Июнь	0,18	1,1	0,087
	Зима	0,82	-0,1	0,329
	Весна	0,06	0,01	0,040
	Лето	0,55	0,03	0,466*
	Осень	0,38	0,08	0,292
Атмосферные осадки	Март	-0,58	-1,7	-0,032
	Апрель	1,08	3,0	0,064
	Май	4,34	9,6	0,165
	Июнь	-1,14	-1,4	-0,027
	Зима	-4,77	-0,04	-0,130
	Весна	4,84	0,04	0,139
	Лето	5,95	0,03	0,083
	Осень	11,65	0,07	0,220

Примечание. r^* – значимые на 5 %-ном уровне коэффициенты корреляции.

Из приведённых данных следует, что наблюдаемые с 1975 г. изменения климата на этой территории сопровождались ростом температуры во все сезоны года, особенно значительным в зимний период, $0,82^{\circ}\text{C}$ за 10 лет. Атмосферные осадки росли во все сезоны года, за исключением зимы, но при этом отмечалось некоторое уменьшение осадков в отдельные месяцы.

Оценим влияние первых разностей и разностного оператора второго порядка на тесноту корреляционных связей между урожайностью и климатическими переменными для территории Калужской области. В табл. 9.17 приведены оценки коэффициентов корреляции r , характеризующие тесноту линейных статистических связей между среднеобластной урожайностью основных сельскохозяйственных культур и метеорологическими переменными, которые представлены в исходной и разностной форме. Действие разностных операторов можно оценить, сопоставляя значения коэффициента корреляции для того или иного метеорологического параметра и урожайностью.

Таблица 9.17

Корреляционный анализ связей урожайности сельскохозяйственных культур и метеорологических параметров. Калужская область, 1975–2006 гг.

Урожайность сельскохозяйственных культур	Температура, °C		Осадки, мм	
	май, T_5	июнь, T_6	май, R_5	июнь, R_6
	x_t – исходные величины			
Яровой ячмень	0,04	-0,54	0,30	0,37
Озимая пшеница	-0,04	-0,20	0,22	-0,07
Зерновые и зернобобовые	0,03	-0,46	0,33	0,27
	$x_t - x_{t-1}$ – первые разности			
Яровой ячмень	-0,17	-0,67	0,37	0,56
Озимая пшеница	-0,21	-0,22	0,12	0,01
Зерновые и зернобобовые	-0,23	-0,64	0,39	0,49
	$x_t = x_t - 2x_{t-1} + x_{t-2}$ – разности второго порядка			
Яровой ячмень	-0,20	-0,67	0,40	0,61
Озимая пшеница	-0,29	-0,20	0,09	-0,00
Зерновые и зернобобовые	-0,35	-0,64	0,42	0,51

Переход к представлению рядов урожайности и метеорологических параметров в форме первых, вторых разностей и разностей второго порядка позволяет устранить «ближние» тренды, которые не связаны непосредственно с междугодичной изменчивостью метеорологических условий, что приводит, как правило, к росту тесноты оцениваемых статистических связей. Эффективными в этом плане оказались первые разности $x_t - x_{t-1}$. Близкие результаты получены при расчётах с разностями второго порядка $x_t - 2x_{t-1} + x_{t-2}$ (табл. 9.17). Применение первых разностей позволило значимо (на 16 % для температуры июня и на 5 и 17 % – для майских и июньских осадков) увеличить долю дисперсии урожайности ярового ячменя, которую можно объяснить изменчивостью метеорологических условий. Для озимой пшеницы использование разностных операторов не увеличило тесноту связей между урожайностью и метеорологией весенне-летнего периода. Наиболее вероятная причина этого факта – необходимость учёта метеорологических условий осени и ранней весны при расчёте корреляционных оценок для озимых культур.

Объективным комплексным показателем эффективности применения разностных операторов для оценки влияния метеорологических факторов на урожайность могут служить множественные коэффициенты корреляции для соответствующих уравнений регрессии. В табл. 9.18 приведены оценки коэффициентов множественной корреляции R предложенных разностных схем для средней по области урожайности Калужской области.

Таблица 9.18

Оценки коэффициентов множественной корреляции R уравнений регрессии для расчёта средней по области урожайности по температуре и осадкам за май, июнь

Сельскохозяйственная культура	Стандартное уравнение	Разностные уравнения	
	x_t	$x_t - x_{t-1}$	$\nabla^2 x_t$
Яровой ячмень	0,652	0,755	0,787
Зерновые и зернобобовые	0,577	0,701	0,704

Применение разностных схем первого и второго порядка позволило повысить коэффициент детерминации R^2 (учитываемую долю дисперсии разностей урожайности), по сравнению со стандартными уравнениями регрессии, на 15 % для ячменя, на 16 % для урожайности всех зерновых и зернобобовых культур. Для более детального анализа представим уравнения первых разностей для расчёта урожайности ярового ячменя, зерновых и зернобобовых культур в целом в 1975–2006 гг. в Калужской области на основании метеорологических данных:

$$Y_t - Y_{t-1} = 0,229\Delta T_5 - 0,550\Delta T_6^* + 0,033\Delta R_5 + 0,028\Delta R_6^* + 0,225 \quad R = 0,755; \quad (9.13)$$

$$Y_t - Y_{t-1} = 0,079\Delta T_5 - 0,423\Delta T_6^* + 0,021\Delta R_5 + 0,015\Delta R_6^* + 0,119 \quad R = 0,720. \quad (9.14)$$

Здесь * отмечены коэффициенты регрессии, значимые при 5 %-ном уровне.

Метеорологические переменные T_5 , T_6 , R_5 и R_6 в правой части уравнений (9.13–9.14) для компактности записи приведены в разностной форме, где Δ обозначает первые разности.

Оценим изменения урожайности ярового ячменя (ΔY_1) и зерновых и зернобобовых культур (ΔY_2), связанные с текущими наблюдаемыми изменениями климата за период с 1995 по 2006 г. по уравнениям (9.13) и (9.14):

$$\Delta Y_1 = 0,229 \cdot (-0,16) - 0,550 \cdot (0,18) + 0,033 \cdot (4,3) + 0,028 \cdot (-1,14) = -0,020 \text{ (ц/га/10 лет)};$$

$$\Delta Y_2 = 0,079 \cdot (-0,16) - 0,423 \cdot (0,18) + 0,021 \cdot (4,3) + 0,015 \cdot (-1,14) = -0,014 \text{ (ц/га/10 лет)};$$

Оценки ΔY_1 , ΔY_2 существенно не различаются. Можно заключить, что изменения климата за анализируемый период привели к незначительному снижению урожайности ярового ячменя и зерновых и зернобобовых

культур в Калужской области, а именно на -0,20 и -0,12 % соответственно. Таким образом, выявлены слабоотрицательные тренды урожайности, обусловленные климатическими изменениями последних десятилетий.

В то же время оценки трендов, полученные по фактическим данным об урожайности, имеют положительный знак. Причин наблюдаемого роста урожайности может быть несколько. На взгляд авторов, основные причины следующие. Во-первых, существенно сократились посевные площади зерновых культур, т.е. из оборота в первую очередь выведены земли с низкой продуктивностью. По данным Госкомстата, за период с 1975 по 2006 г. посевные площади зерновых и зернобобовых культур на территории Калужской области сократились почти в 3–4 раза. Второй, возможно не менее важной причиной, является рост концентрации углекислого газа, способствующий росту продуктивности C3–путь фотосинтеза культур.

Каково же влияние роста CO_2 на продуктивность? Концентрация CO_2 в атмосфере возросла с доиндустриального уровня (около 280 ppm) до 379 ppm в 2005 году. В последние десятилетия годовые темпы роста CO_2 (1,9 ppm/год) были выше средних за период непрерывных прямых атмосферных измерений за период с 1960 по 2005 г. (1,4 ppm/год) (Болин Б. и др., 1989). Если допустить, что наиболее вероятная оценка реакции C3–путь фотосинтеза растений, каждый дополнительный ppm приводит к 0,1 %-ному росту урожайности группы C3–путь фотосинтеза культур, тогда 14 %-ное ppm увеличение содержания CO_2 соответствует росту урожайности на 1,4 % за десятилетний период. Эти расчёты показывают, что эффект CO_2 компенсирует, вероятно, отрицательное влияние климатических метеорологических трендов (-0,12–0,20 % за 10 лет) с чистым положительным эффектом для урожайности.

Наблюдаемый положительный линейный тренд, выявленный в рядах урожайности зерновых культур за последние три десятилетия, также, по-видимому, может быть связан с повышением уровня плодородия пахотных земель, сохраняющимся в хозяйственном обороте, на фоне значительного общего сокращения сельскохозяйственных угодий. Статистический анализ позволил выявить отрицательные корреляционные связи между рядами среднеобластной урожайности зерновых и их посевными площадями. Так, в Калужской области сокращение посевных площадей на 100 тыс. га приводит к повышению урожайности ярового ячменя в среднем на 1,2 ц/га, озимой пшеницы – на 3,6 ц/га, зерновых и зернобобовых в целом – на 0,66 ц/га.

В настоящий момент указанные причины, по-видимому, являются доминирующими и перекрывают отрицательный тренд урожайности зерновых культур, вызванный реакцией на наблюдаемые изменения температуры и осадков весенне-летнего периода.

При анализе, помимо наблюдаемых изменений, следует учитывать потенциальные эффекты влияния изменений климата. Так, рост увлажнённости или улучшение условий проведения полевых работ немедленно сказываются на результатах хозяйственной деятельности. В работе (Сапожникова С.А., 1963) приведена оценка прироста урожайности зерновых, приходящейся на единицу тепла ($\Sigma t = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$). Эта величина составляет 1,5 ц/га. Следовательно, изменение теплообеспеченности со скоростью порядка $80\text{ }^{\circ}\text{C}/10$ лет приведёт к росту урожайности зерновых культур за 35 лет (с 1975 г.) на величину $(80^{\circ}/100^{\circ} \cdot 1,5\text{ ц/га} \cdot 3,5) = 4,2\text{ ц/га}$.

Таким образом, при анализе наблюдаемых изменений продуктивности сельскохозяйственных культур следует учитывать влияние наблюдаемых климатических изменений, прямое влияние роста концентрации CO_2 в атмосфере, а также существенные неклиматические факторы – технологические тренды и изменение продуктивности одного гектара сельскохозяйственных угодий при увеличении или уменьшении посевных площадей.

9.6. Оценка влияния изменений климата на сельское хозяйство методом агроклиматических аналогов

Исследования влияния изменений климата на сельскохозяйственное производство приобрели широкий размах из-за всеобщего внимания к проблемам обеспечения продовольственной безопасности растущего населения Земли.

Одним из эффективных средств прогнозирования откликов сельского хозяйства на изменения климата может служить метод пространственно-временных аналогов. Этот метод достаточно успешно использовался в XX веке для определения мировых агроклиматических аналогов для вновь осваиваемых земель с целью акклиматизации новых сельскохозяйственных культур и адаптации систем земледелия. Практика применения метода аналогов связана с именами Н. И. Вавилова, Г. Т. Селянинова, Ф. Ф. Давитая и др. Практическим результатом применения этого метода явилась карта мировых агроклиматических аналогов для субтропической зоны территории СССР, а также карты мировых аналогов для отдельных сельскохозяйственных культур: пшеницы, кукурузы, картофеля, винограда и др.

Классическая агроклиматология (Сапожникова С.А., 1979; Шашко Д.И., 1985) в качестве минимального набора показателей для поиска аналогов предлагает три параметра, характеризующих теплообеспеченность, влагообеспеченность и условия перезимовки сельскохозяйственных культур. В качестве меры близости агроклиматических условий удобно использовать сумму модулей относительных отклонений этих трёх показателей.

В работах (Сиротенко О.Д., Павлова В.Н., 2003, и др.) в качестве показателя теплообеспеченности предлагается использовать сумму за вегетационный период среднесуточных значений температуры воздуха за те сутки, когда она превышала 10°C ($\sum t_{>10^{\circ}\text{C}}$), а в качестве показателя влагообеспеченности – дефицит испарения (ΔE), равный разности между испаряемостью и испарением. Для характеристики условий перезимовки привлекается средняя температура самого холодного месяца года (T_{\min}), $^{\circ}\text{C}$.

В табл. 9.19 представлены результаты идентификации современных аналогов для ряда регионов Нечернозёмной зоны России в рамках сценария A2 изменения климата, рассчитанных с помощью климатической модели HadCM3 (Великобритания) для 2020–2030 и 2050–2060 гг. Параметр K характеризует меру близости климатов оригинала и аналога.

Изменения агроклиматических условий при потеплении климата по сценарию HadCM3 в целом можно интерпретировать как «перенос» климата, направленный с юго-запада на северо-восток. Так, к 2020–2030 гг. агроклиматические условия Новгородской области по этому сценарию должны оказаться следующими: $\sum t_{>10^{\circ}\text{C}} = 2247^{\circ}\text{C}$, $\Delta E = 94$ мм, $T_{\min} = -7^{\circ}\text{C}$. Наиболее близким современным аналогом для них являются агроклиматические условия Могилёвской области Республики Беларусь:

$$\sum T_{>10^{\circ}\text{C}} = 2214^{\circ}\text{C}, \quad \Delta E = 97 \text{ мм}, \quad T_{\min} = -7,5^{\circ}\text{C}. \quad (9.15)$$

При дальнейшем потеплении к 2050–2060 гг. движение в юго-западном направлении продолжится, и агроклиматическим аналогом Новгородской области станет Ровенская область (Украина).

Метод аналогов представляется достаточно эффективным средством исследования влияния изменений климата на сельское хозяйство. Этот метод позволяет найти и использовать для планирования мер по адаптации сельскохозяйственного производства к ожидаемым изменениям климата такую информацию, которую пока невозможно получить путём прямого моделирования. Так, например, основываясь на методе аналогов, можно предположить, что биоклиматический потенциал Новгородской области к 2020–2030 гг. должен возрасти на 19 % (Lobell D., Field C., 2007), а биоклиматический потенциал Ивановской области – на целых 39 %, поскольку её аналогом станет Черновицкая область (Украина), обладающая весьма продуктивным сельским хозяйством.

Вместе с тем метод агроклиматических аналогов имеет существенные ограничения, которые затрудняют интерпретацию полученных результатов. Найденные регионы-аналоги могут значительно отличаться от оригинала по почвенным условиям, которые в значительной мере определяют продуктивность и рентабельность сельскохозяйственного производства.

Таблица 9.19

**Аналоги агроклиматических условий субъектов Российской Федерации
в 2020–2030 и 2050–2060 гг. при изменении климата, рассчитанном
с помощью модели HadCM3 с использованием сценария A2**

Область, республика	Прогнозируемые агро- климатические условия			Современные агроклиматические аналоги	Современные агроклиматические условия аналогов			Степень близости оригинала и аналога, К
	$\Sigma t_{>10^{\circ}\text{C}},$ °C	ΔE , мм	$T_{\min},$ °C		$\Sigma t_{>10^{\circ}\text{C}},$ °C	ΔE , мм	$T_{\min},$ °C	
2020 – 2030 гг.								
Ленинградская	2054	61	-5,8	Ивано-Франковская	2134	66	-5,3	6,9
Новгородская	2247	94	-7,0	Могилевская	2214	97	-7,5	3,7
Ярославская	2228	131	-9,0	Брянская	2287	102	-8,1	14,3
Ивановская	2276	168	-9,9	Орловская	2241	252	-9,4	13,4
Московская	2411	189	-8,7	Курская ¹	2380	293	-8,8	12,6
Калужская	2518	142	-6,9	Черниговская	2480	142	-7,8	1,0
Рязанская	2711	340	-9,3	Липецкая	2427	325	-10,1	8,7
Марий Эл	2373	284	-11,6	Мордовия	2246	302	-12,0	5,0
Тамбовская	3010	417	-9,5	Волгоградская ² , зап.	2966	586	-9,5	10,1
Пензенская	2733	399	-10,4	Тамбовская	2429	388	-11,1	7,2
Татарстан	2547	397	-11,6	Тамбовская	2429	388	-11,1	3,9
Башкортостан, сев.	2523	441	-13,6	Самарская	2474	482	-13,6	3,3
2050 – 2060 гг.								
Ленинградская	2304	105	-3,4	Закарпатская	2546	116	-4,6	15,0
Новгородская	2518	145	-4,2	Ровенская	2484	134	-5,0	8,5
Ярославская	2445	185	-5,7	Житомирская	2445	194	-5,8	2,3
Ивановская	2506	212	-6,4	Житомирская	2445	194	-5,8	7,4
Московская	2683	233	-6,4	Тернопольская	2490	239	-5,2	11,1
Калужская	2806	184	-5,3	Житомирская	2445	194	-5,8	9,5
Рязанская	2989	367	-6,6	Полтавская ³	2771	480	-6,5	11,0
Марий Эл	2689	306	-7,1	Сумская	2504	276	-7,6	8,3
Тамбовская	3317	438	7,3	Луганская ⁴	2907	557	-7,5	12,7
Пензенская	3147	424	-8,0	Белгородская	2589	430	-8,2	8,5
Татарстан	2995	415	-8,4	Белгородская	2589	430	-8,2	7,4
Башкортостан, сев.	2980	455	-11,4	Волгоградская ⁵ , вост.	3097	667	-11,4	11,9

Примечания. Вторые аналоги: ¹ – Орловская область, $\Delta E = 252$ мм; ² – Белгородская область, $\Delta E = 430$ мм; ³ – Киевская область, $\Delta E = 328$ мм; ⁴ – Полтавская область, $\Delta E = 480$ мм; ⁵ – Саратовская область, $\Delta E = 578$ мм.

Глава 10

ВЛИЯНИЕ НАБЛЮДАЕМЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА НА АГРОСФЕРУ И СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЕ ПРОИЗВОДСТВО

Динамика агроклиматических ресурсов, биоклиматического потенциала и продуктивности сельского хозяйства

Комплекс агроклиматических и биоклиматических показателей, разработанный для государственной системы мониторинга климата, используется для всесторонней оценки влияния наблюдаемых изменений климата на сельское хозяйство и сельскохозяйственное землепользование. Выбор агроклиматических показателей основан на классическом агроклиматическом и климатическом районировании, выполненном Г.Т. Селяниновым, Ф.Ф. Давитая, Д.И. Шашко, С.А. Сапожниковой, Ю.И. Чирковым, М.И. Будыко и А.И. Будаговским в XX столетии. Этот комплекс расширен за счёт показателей, рассчитываемых в имитационной системе «климат – почва – урожай» (Сиротенко О.Д. и др., 1994, 1995, 2011).

Агроклиматические и биоклиматические показатели для комплексной оценки влияния изменений климата на сельское хозяйство и землепользование делятся на характеристики теплообеспеченности (термические ресурсы) и увлажнения, биоклиматического потенциала и климатически обусловленной урожайности.

Термические ресурсы

Характеристики термического режима включают агроклиматические показатели:

- суммы среднесуточных значений температуры воздуха за период календарного года со среднесуточной температурой, превышающей 0, 5 и 10 °С;
- даты устойчивого перехода среднесуточной температуры воздуха через 0, 5 и 10 °С весной и осенью;
- продолжительность периодов календарного года со среднесуточной температурой, превышающей 0, 5 и 10 °С;
- среднюю температуру самого холодного (январь) и самого тёплого (июль) месяцев календарного года.

В табл. 10.1 представлены оценки линейных трендов показателей температурного режима, осреднённые за период глобального потепления с 1976 по 2012 г. для основных зернопроизводящих регионов России (Доклад об особенностях ..., 2012).

Таблица 10.1

**Средние скорости изменения (тренды) показателей термических ресурсов
на территории РФ за 1976–2012 гг.**

Федеральный округ	Средняя температура, °C/10 лет		Сумма температур, °C/10 лет		Продолжительность периода >10 °C, сут/10 лет
	январь	июль	>10 °C	>5 °C	
Центральный	0,7	1,1	145,9	149,38	5,3
Северо-западный	0,9	0,8	111,9	113,90	5,1
Приволжский	0,5	0,8	112,4	123,73	3,8
Южный	0,3	0,7	152,5	150,52	3,8
Северо-Кавказский	0,1	0,4	138,9	130,08	4,5
Уральский	-0,1	0,3	83,7	85,96	4,3
Сибирский	-0,3	0,2	62,6	71,18	2,9
Дальневосточный	0,9	0,2	75,5	68,12	3,9
Россия	0,4	0,5	95,9	98,89	4,0

Оценки скорости изменения (трендов) сумм температур воздуха за период с температурой выше 10 °C – основной характеристики теплообеспеченности сельскохозяйственных культур – показывают, что наибольшая скорость роста обеспеченности теплом, превышающая величину 100 °C за 10 лет, наблюдается на всей европейской части Российской Федерации, достигая максимальной величины в Южном ФО – 152,5 °C/10 лет. На территории земледельческих районов Сибири и Дальнего Востока теплообеспеченность также увеличивается, но с меньшей скоростью – от 63 до 84 °C/10 лет (рис. 10.1). Повсеместно увеличивается продолжительность вегетационного периода с температурой выше 10 °C, при этом скорость роста в северных и северо-западных регионах составляет 5 суток за 10 лет (более двух недель за период с 1976 г.) (рис. 10.2). Скорость роста температуры июля положительна на большей части территории России (рис. 10.3). На ЕТР температура июля увеличивается со скоростью 0,8–1,0 °C/10 лет.

В работе (Brown et al., 2012) указано, что на 27 % площадей в зернопроизводящих регионах мира наблюдается существенное изменение продолжительности вегетационного сезона основных зерновых культур за 26 лет, начиная с 1981 года, причём для большинства из них продолжительность увеличивается в среднем на 2–3 суток.

Оценки линейных трендов температуры января, которая наряду с высотой снежного покрова определяет риски вымерзания озимых зерновых культур, остаются положительными в зернопроизводящих регионах практически повсеместно, за исключением Восточной Сибири, где оцениваемая величина тренда январских температур составляет -0,3 °C/10 лет за период с 1976 по 2012 г. (табл. 10.1). Изолинии трендов температуры января по территории России представлены на рис. 10.4.

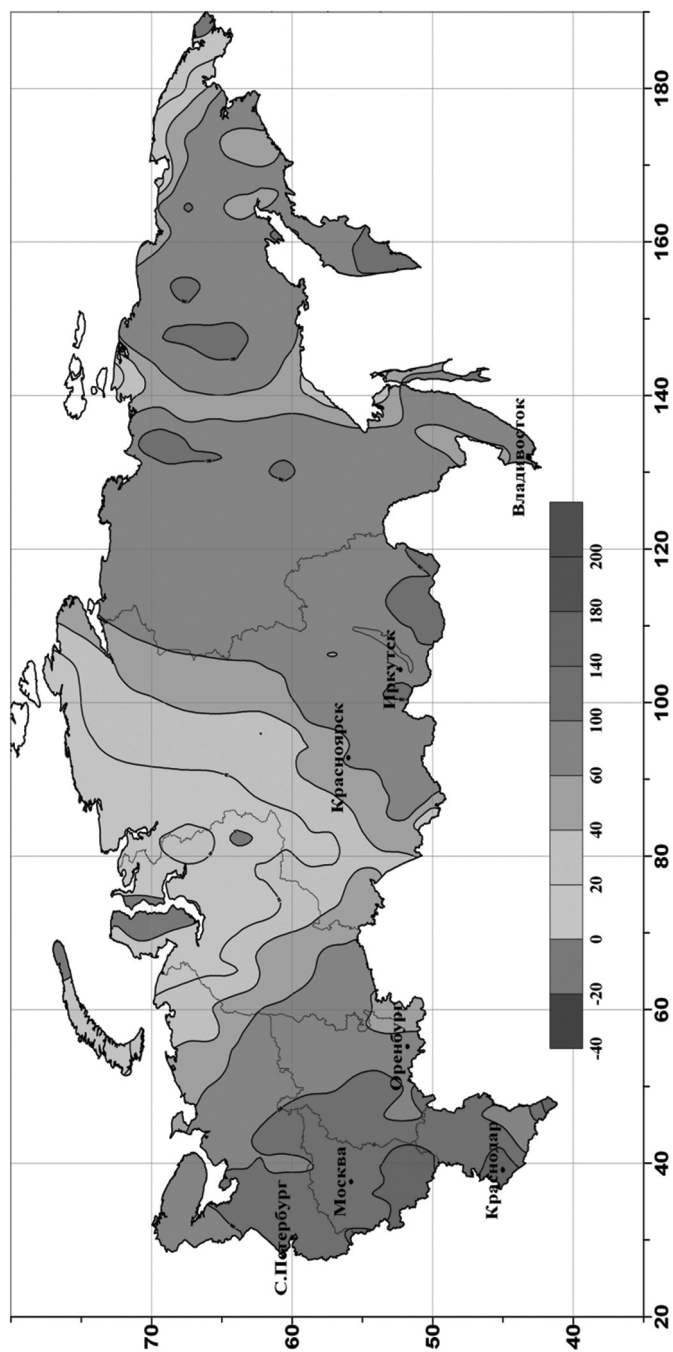


Рис. 10.1. Средняя скорость изменения (тренд) сумм температур выше 10 °C ($^{\circ}\text{C}/10$ лет) за период с 1976 по 2012 г.

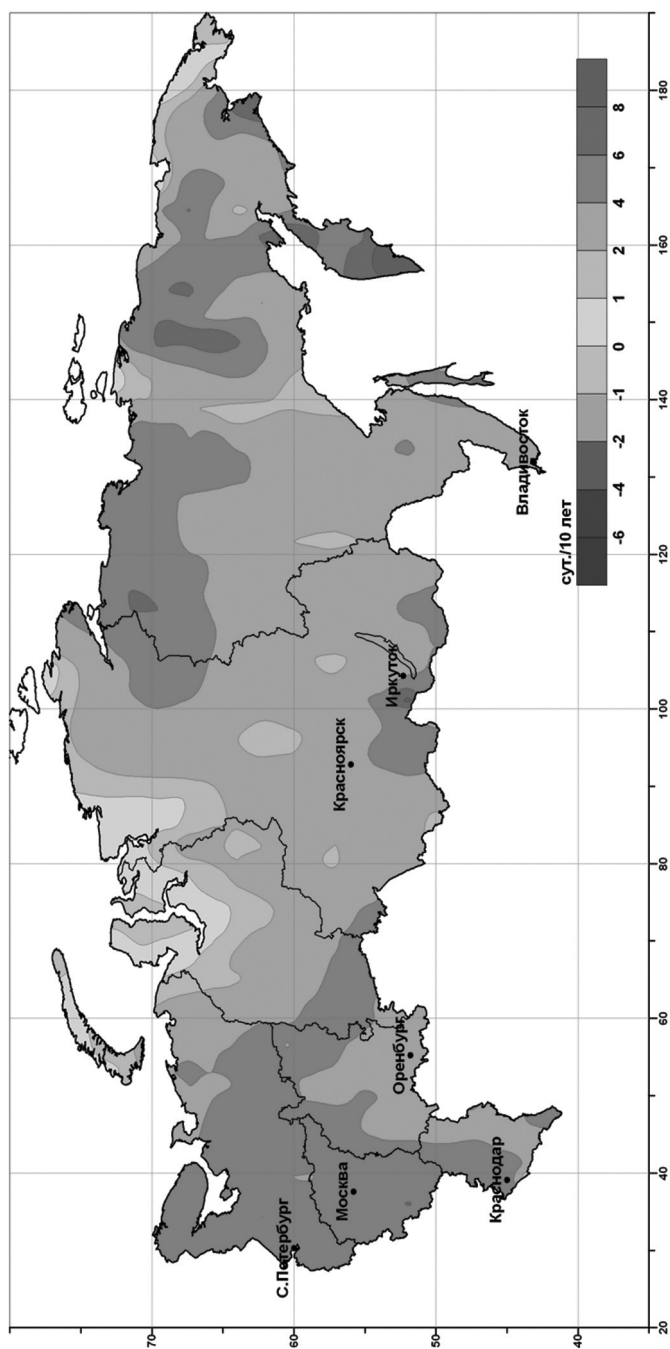


Рис. 10.2. Средняя скорость изменения (тренд) числа дней с температурой выше 10 °С (сут./10 лет) за период с 1976 по 2012 г.

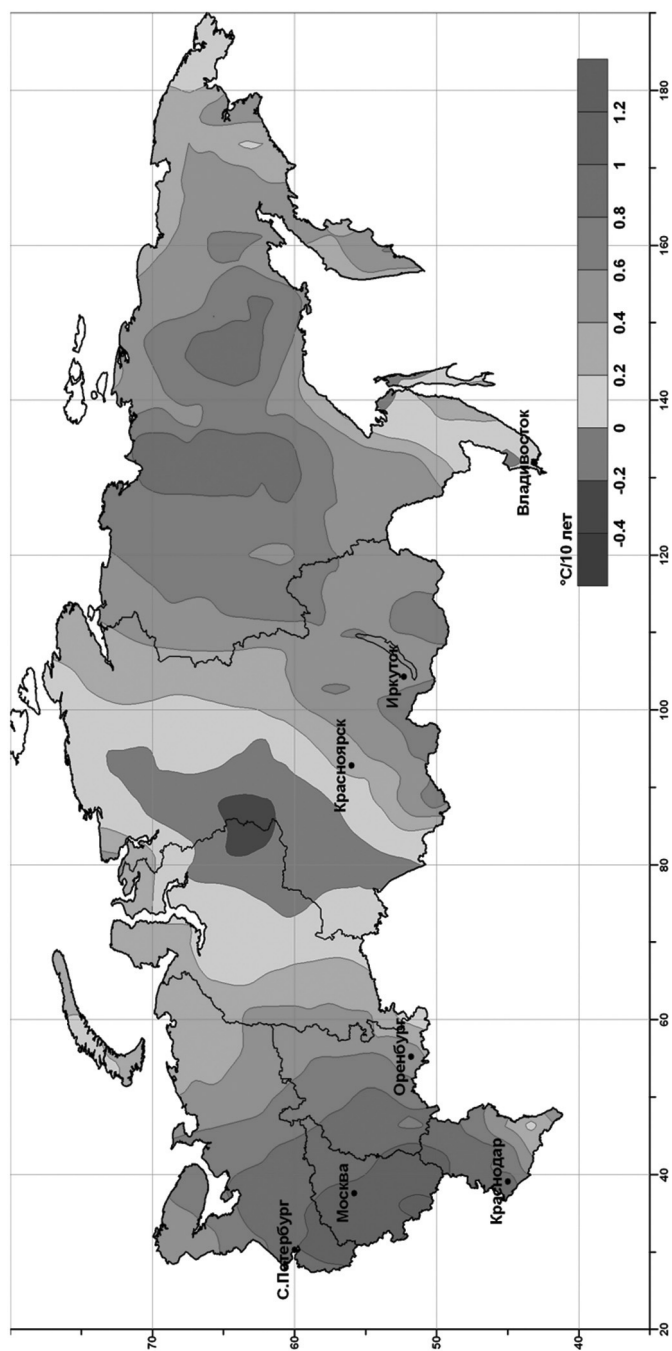


Рис. 10.3. Средняя скорость изменения (тренд) температуры июля ($^{\circ}\text{C}/10 \text{ лет}$) за период с 1976 по 2012 г.

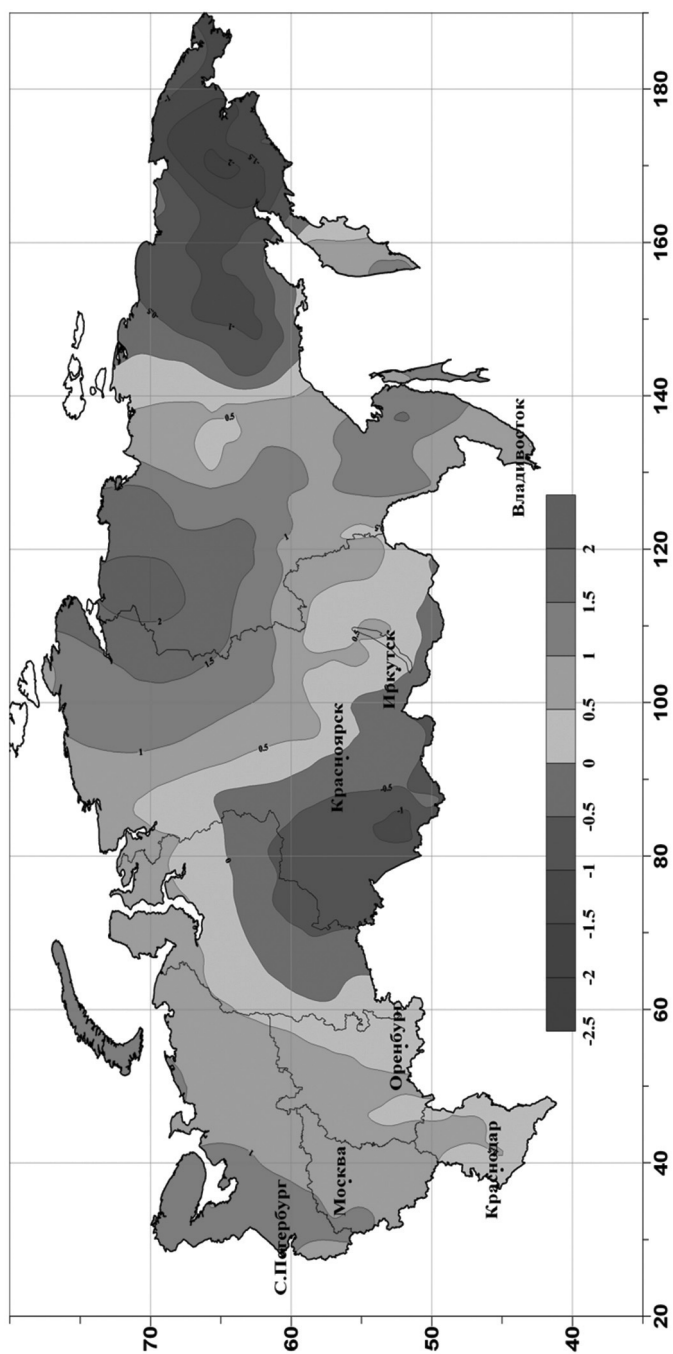


Рис. 10.4. Средняя скорость изменения (тренд) температуры января ($^{\circ}\text{C}/10$ лет) за период с 1976 по 2012 г.

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

Проведённые исследования показали, что вследствие повышения температуры воздуха в сентябре-октябре за 1980–2009 гг. на территории Приволжского ФО период осенней вегетации озимых культур увеличился на 6–8 суток, по сравнению с периодом до 1970–1975 гг. (Страшная А. И. и др., 2012). В этой же работе предложен метод прогноза оптимальных сроков сева озимых в изменившихся агроклиматических условиях с учётом прогноза погоды.

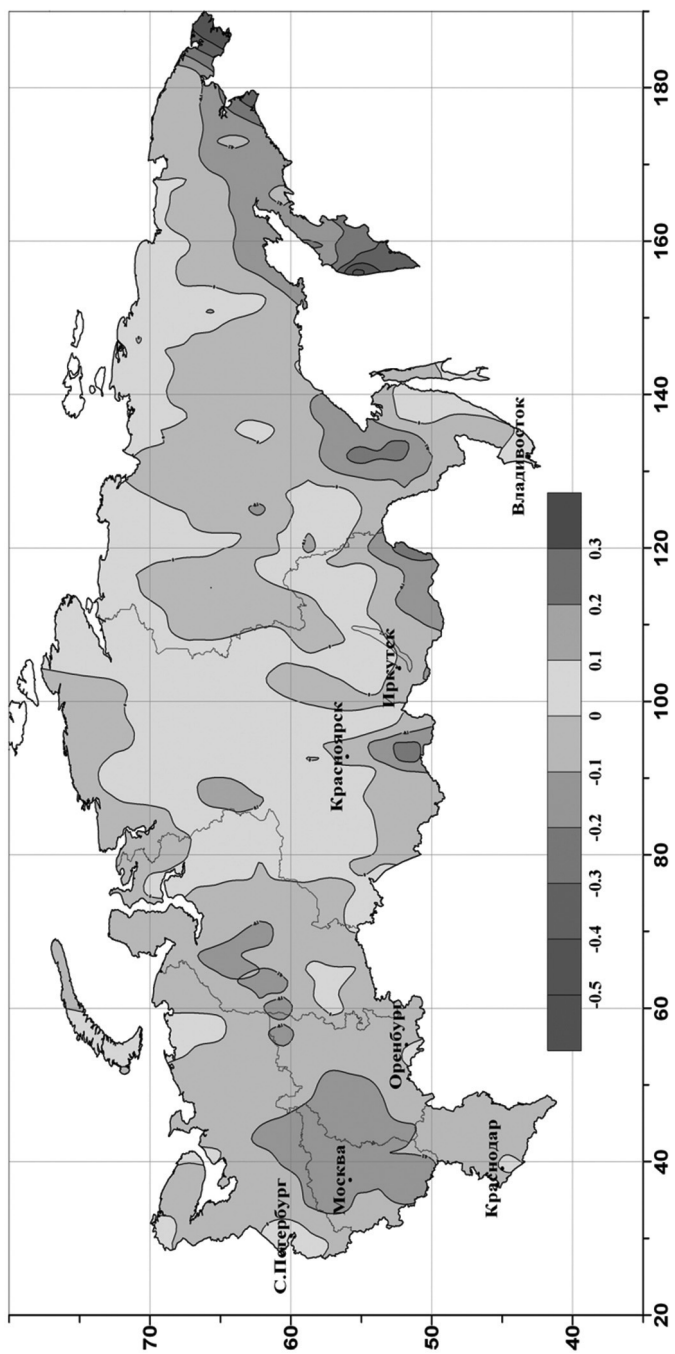
Ресурсы влагообеспеченности

Наблюдаемые изменения показателей увлажнённости почвы на территории Российской Федерации за период с 1976 по 2012 г. не столь однородны, как изменения термических показателей. Повышение температуры воздуха неизбежно приводит к росту испарения и как следствие – к росту дефицита почвенной влаги, который увеличивается или уменьшается в зависимости от суммы выпавших атмосферных осадков. Продуктивность агроэкосистем зависит от соотношения изменений температуры воздуха и количества выпавших атмосферных осадков, которые характеризуются классическими агрометеорологическими показателями – ГТК Г.Т. Селянинова и индексом сухости (ИС) по М.И. Будыко (табл. 10.2). Слабые линейные тренды – положительные для индекса сухости и отрицательные для ГТК – показывают, что увлажнённость на территории центральных областей ЕТР за последние 36 лет уменьшилась незначительно. В отдельных регионах Западной и Восточной Сибири и на Дальнем Востоке наблюдается положительный тренд увлажнённости (ГТК), которая увеличивается со скоростью 0,01–0,04 ед./10 лет (рис. 10.5).

Таблица 10.2

Средние скорости изменения (тренды) показателей увлажнённости почвы на территории РФ за 1976–2012 гг. (ед./10 лет)

Федеральный округ	Сумма осадков, мм				ИС,	$W_{весна}$,	$W_{июль}$,	N_{w10} ,
	зима	весна	лето	осень	мм/мм	мм	мм	сут
	1976–2012							
Центральный	-0,43	-0,35	-10,3	0,12	0,06	-1,2	-2,8	4,5
Северо-Западный	4,82	5,32	0,0	0,64	0,02	-0,7	-2,6	0,9
Приволжский	0,26	5,67	-10,1	-2,03	0,06	-0,9	-1,6	4,7
Южный	-2,50	13,25	-4,6	6,54	0,01	-0,4	-0,6	0,5
Северо-Кавказский	8,43	4,07	-1,7	7,14	-0,03	-0,6	0,1	-1,7
Уральский	-1,18	7,50	-4,2	-1,18	0,04	-0,2	-1,4	2,2
Сибирский	0,99	2,45	4,9	0,96	0,01	-0,1	-0,5	1,2
Дальневосточный	7,43	6,71	3,7	-1,34	0,01	-0,6	-1,2	1,1
Россия	2,01	5,03	-1,7	0,56	0,03	-0,5	-1,4	2,4

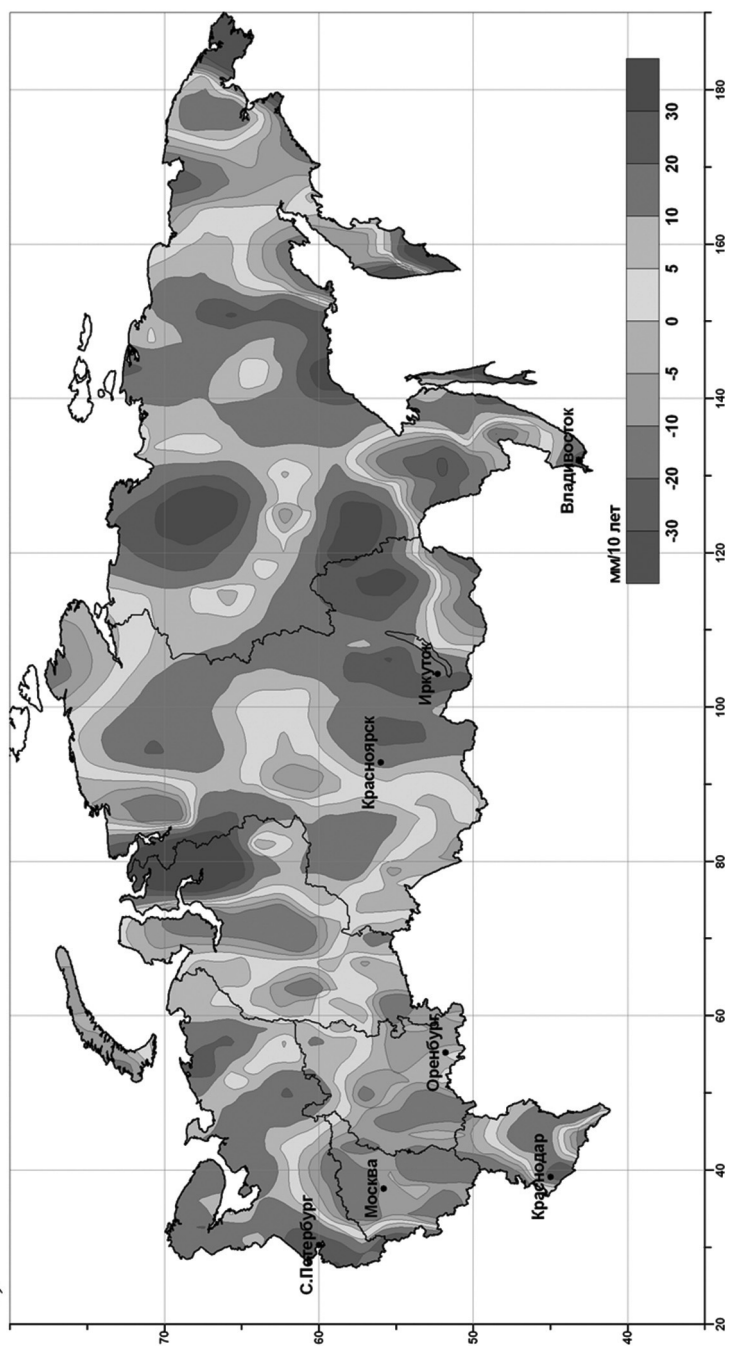


Тенденцию аридности климата в весенне-летний период на рассматриваемой территории подтверждают данные по величине влажности в метровом слое почвы на дату возобновления вегетации озимых культур, рассчитанные по динамической модели «климат – почва – урожай». Как показывают расчёты, оценки трендов весенних запасов влаги в почве ($W_{\text{весна}}$) отрицательны на всей рассматриваемой территории и составляют -0,5 мм/10 лет (в пахотном слое) в среднем по России (табл. 10.2). Ещё с большей скоростью снижается влажность почвы в июле – от -0,6 до -2,8 мм/10 лет на Европейской территории России. Практически повсеместно, за исключением Северо-Кавказского региона, увеличивается число суток вегетационного периода с влажностью пахотного слоя почвы менее 10 мм (N_{w10}): от 1,1 до 4,7 суток в Дальневосточном и Приволжском ФО соответственно. Отмечается отрицательная тенденция количества выпадающих летних осадков на территории всей земледельческой зоны, за исключением центральных областей ЕТР, и осенних осадков на территории Приволжского (-2,03 мм/10 лет), Уральского (-1,18 мм/10 лет) и Дальневосточного (-1,34 мм/10 лет) федеральных округов. В то же время количество осадков в весенний период практически повсеместно увеличивается (табл. 10.2).

На рис. 10.6 представлено пространственное распределение средней скорости изменения (тренд) годовых и сезонных сумм атмосферных осадков на территории России за 1976–2012 гг. Осреднённые тренды показателей увлажнения территории за период 1976–2012 гг. в земледельческой зоне России отрицательны – аридность климата увеличивается, особенно в центральных, центрально-чернозёмных областях и на юге европейской части России.

Земледельческие районы России почти ежегодно подвергаются воздействию опасных гидрометеорологических и агрометеорологических явлений. Для этого получены оценки возможных рисков неблагоприятных и опасных агрометеорологических условий, наносящих ущерб сельскому хозяйству (Клещенко А.Д., 2013). Применительно к озимым зерновым культурам наиболее частые риски опасных агрометеорологических условий связаны с условиями осеннего периода, периода перезимовки и весенне-летней вегетации. Для оценки рисков засушливых условий рассчитана вероятность (риск) атмосферных засух в августе за 1981–2010 гг. по 43 гидрометеорологическим станциям на территории ЕТР с использованием в качестве критерия засухи ГТК, равный 0,6 и менее. Показано, что к югу от линии, проходящей по центральным районам Оренбургской области, югу Самарской, Ульяновской, юго-востоку Пензенской, Воронежской областей, атмосферная засуха наблюдалась в 30–35 % лет, а в восточных районах Саратовской области, на большей части Волгоградской, в юго-восточных районах Ростовской области и на востоке Ставропольского края – до 40–50 % лет и более (Страшная А.И. и др., 2013).

a)



6)

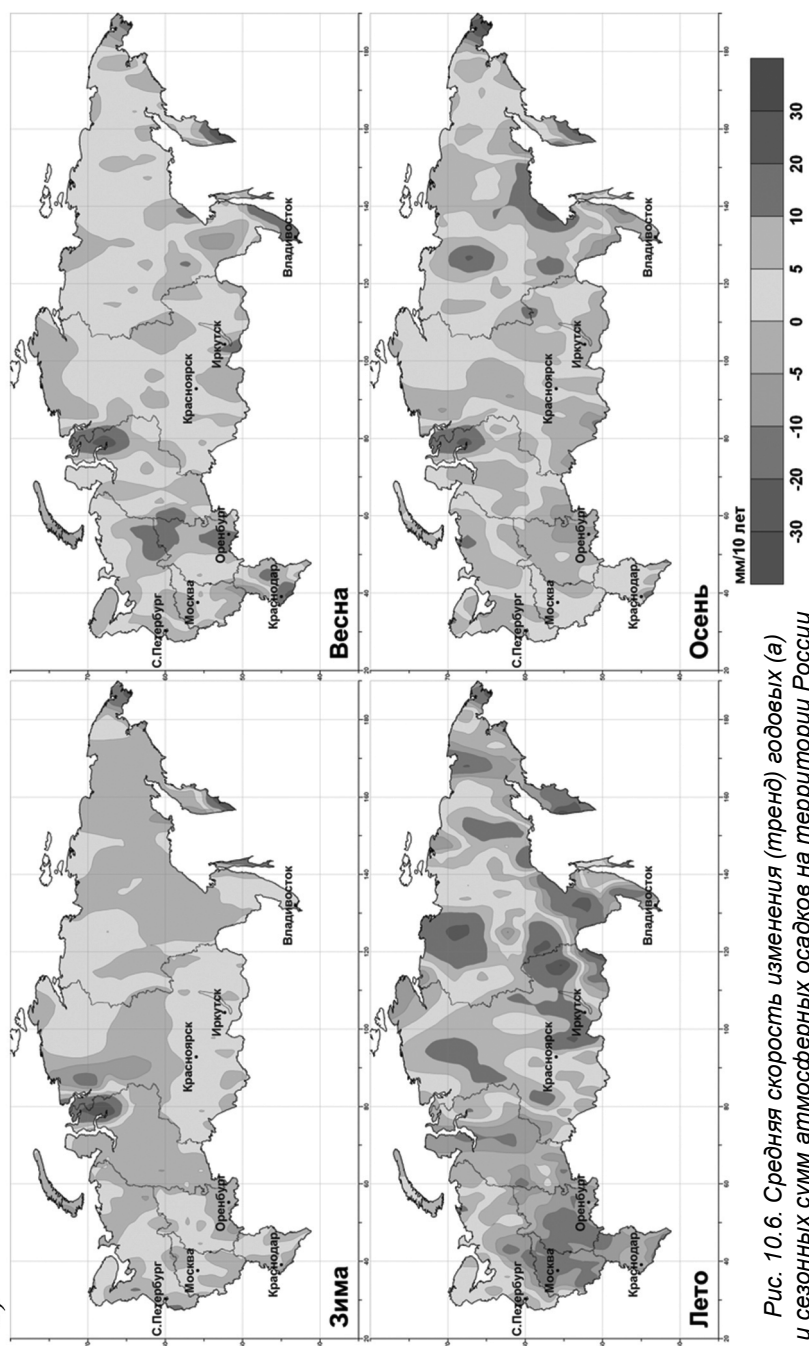


Рис. 10.6. Средняя скорость изменения (тренд) годовых (а) и сезонных сумм атмосферных осадков на территории России за период 1976–2012 гг.

Динамика продуктивности сельскохозяйственных культур

В работах (Павлова В.Н., 2010, 2012; Сиротенко О.Д. и др., 2012) приведены оценки изменений продуктивности сельскохозяйственных культур в 11 крупных регионах России с учётом принятого административного деления, относительно однородных по почвенно-климатическим условиям. В табл. 10.3 представлены оценки линейных трендов рядов урожайности сельскохозяйственных культур в ц/га/10 лет (данные Росстата), рассчитанные за периоды с 1975 по 2006 г. и с 1975 по 2010 г. для зерновых регионов РФ. Анализируя полученные оценки, можно сделать вывод о росте урожайности зерновых и зернобобовых культур в целом, озимой пшеницы и ярового ячменя практически для всей рассматриваемой территории за последние 36 лет. Расчёты показали, что максимальные тренды характерны для рядов урожайности озимой пшеницы, особенно в основных регионах её возделывания – на юге Центрального ФО и в Южном ФО. Есть свидетельство того, что скорость роста урожайности к концу рассматриваемого периода возросла. Оценки трендов фактической урожайности озимой пшеницы положительны практически на всей рассматриваемой территории России, за исключением Уральского региона. Оценки региональных трендов величин урожайности зерновых и зернобобовых культур положительны на всей территории Российской Федерации за период 1975–2010 гг.

Таблица 10.3

Сравнительные оценки линейных трендов фактической урожайности сельскохозяйственных культур, т/га/10 лет, по регионам России за периоды 1975–2006 гг. и 1975–2010 гг., т/га/10 лет

Регион	Оценка изменений урожайности, т/га/10 лет					
	Зерновые и зернобобовые		Озимая пшеница		Яровой ячмень	
	1975–2006	1975–2010	1975–2006	1975–2010	1975–2006	1975–2010
Северо-Западный (юг)	0,069	0,156	0,037	0,160	0,095	0,198
Центральный (север)	-0,014	0,050	0,128	0,188	0,141	0,113
Центральный (центр)	0,083	0,141	0,110	0,190	0,084	0,140
Центральный (юг)	0,205	0,249	0,194	0,240	0,176	0,204
Приволжский (север)	0,096	0,104	0,151	0,152	0,065	0,070
Приволжский (юг)	0,120	0,090	0,127	0,102	0,089	0,036
Южный	0,175	0,230	0,188	0,297	0,019	0,021
Уральский (юг)	0,023	0,031	0,033	-0,004	0,021	0,033
Сибирский (юго-запад)	0,058	0,100	–	–	0,091	0,133
Сибирский (юго-восток)	0,047	0,108	–	–	0,135	0,182
Дальневосточный (юг)	-0,042	0,009	–	–	-0,029	-0,0029
Россия	0,074	0,115	0,121	0,166	0,081	0,102

Примечание. Прочерк (–) означает, что посевные площади озимой пшеницы незначительны или озимая пшеница не высевается.

Можно предположить, что для ряда регионов с положительным трендом урожайности существенное влияние на знак тренда оказывает тенденция к сокращению посевных площадей рассматриваемых сельскохозяйственных культур в результате вывода из оборота наименее плодородных земельных участков. Так, по расчётам (Павлова В.Н., Сиротенко О.Д., 2012), коэффициент корреляции между урожайностью зерновых и зернобобовых культур в целом и занимаемыми ими посевными площадями составляет в Татарстане -0,73; в Липецкой и Орловской областях – -0,57; в Рязанской области – -0,54. В среднем в этих регионах суммарные посевные площади всех зерновых и зернобобовых культур сократились на 40 % с 70-х гг. XX столетия до начала XXI столетия.

Как показывают расчёты, в 2/3 случаев в рассматриваемых регионах наблюдается отрицательная корреляционная связь между посевными площадями и урожайностью зерновых и зернобобовых культур.

В.Г. Растяниковым и И.В. Дерюгиной (2009) проанализировано состояние зерновой проблемы в России на протяжении двух веков. По мнению авторов, на рубеже XX–XXI вв. начался новый, первый в XXI веке, большой цикл урожайности, показателем которого является 45 %-ный скачок продуктивности зерновых в РФ (с 11,8 ц/га до 17,1 ц/га за период с 1998–2000 по 2001–2003 гг.). Этот скачок «вытянул» вверх динамику урожайности до 2006 г. включительно. По аналогии с циклами урожайности в XIX и XX вв., авторы монографии полагают, что фаза подъёма этого цикла может длиться, по меньшей мере, до середины 20-х гг. XXI века.

Интегральными показателями оценки влияния наблюдаемых изменений климата на продуктивность сельского хозяйства могут служить климатически обусловленные тренды урожайности, которые идентифицированы с помощью соответствующих физико-статистических моделей (Сиротенко О.Д., Павлова В.Н., 2010, 2012). Важнейшие интегральные оценки влияния наблюдаемых изменений климата на продуктивность зерновых культур в России, полученные с помощью уравнений множественной регрессии в разностной форме, представлены в табл. 10.4 (Павлова В.Н., Сиротенко О.Д., 2012).

Зерновые и зернобобовые культуры. С 1976 г. урожайность всех зерновых и зернобобовых культур в результате изменений климата увеличивалась на большей части России. Лишь в трёх регионах (юг Приволжского ФО, центральная и южная части Центрального ФО) отмечено снижение урожайности, скорость которого не превышала 1,2 % за десятилетие. Урожайность зерновых культур возросла на юге Европейской территории России, а также на всей азиатской части России – на Урале, в Сибири и на Дальнем Востоке (табл. 10.4). Урожайность зерновых и зернобобовых культур увеличивалась за счёт изменений климатических условий на 0,2–6,1 % за десятилетие или на 1,8–22 % за последние 36 лет (относительно

средней урожайности за период 1975–2010 гг.). Средняя оценка роста климатически обусловленной урожайности для территории России оценивается величиной порядка 1,2 % за десятилетие или 4,5 % за период с 1975 по 2010 год.

Таблица 10.4

Климатически обусловленные тренды рассчитанной урожайности зерновых культур (ΔY) по земледельческим регионам России за период 1975–2010 гг.

Регион	Оценка изменений урожайности (ΔY)			
	Зерновые и зернобобовые		Яровой ячмень	
	т/га/10 лет	%/10 лет	т/га/10 лет	%/10 лет
Северо-Западный (юг)	0,020	1,6	0,00	0,0
Центральный (север)	0,022	2,0	-0,00	-0,3
Центральный (центр)	-0,017	-1,2	-0,017	-1,1
Центральный (юг)	-0,015	-0,8	-0,046	-2,4
Приволжский (север)	0,000	-0,0	-0,005	-0,3
Приволжский (юг)	-0,007	-0,5	-0,020	-1,5
Южный	0,044	1,9	-0,007	-0,4
Уральский (юг)	0,082	6,1	0,021	1,4
Сибирский (юго-запад)	0,035	2,8	0,025	1,9
Сибирский (юго-восток)	0,028	2,3	0,037	3,0
Дальневосточный (юг)	0,022	0,2	-0,00	-0,0
Россия	0,017	1,2	0,0004	0,032
	Озимая пшеница			
Центральный (север)	0,031	2,2		
Центральный (центр)	0,028	1,6		
Центральный (юг)	0,007	0,3		
Приволжский (север)	0,061	3,6		
Приволжский (юг)	0,088	4,9		
Южный	0,083	3,1		
Россия	0,050	2,6		

Яровой ячмень. Из данных, представленных в табл. 10.4, следует, что положительные тренды климатически обусловленной урожайности ярового ячменя прослеживаются лишь на азиатской части России – на Урале и в Сибирском регионе. На юго-востоке Сибири оценка линейного тренда урожайности ярового ячменя составляет 3 % за десятилетие. В то же время на всей Европейской территории России наблюдаемые изменения климатических условий привели к снижению урожайности ярового ячменя от -0,3 % /10 лет на севере Центрального ФО до -2,4 % /10 лет – на юге. В целом отрицательные тренды климатически обусловленной урожайности ярового ячменя на европейской части России компенсируются положительными трендами на азиатской территории. В результате суммарная оценка для всей территории России близка к нулю, т.е.

изменения агрометеорологических условий последних десятилетий практически не повлияли на урожайность ярового ячменя для территории России в целом.

Озимая пшеница. Прошедший тридцатилетний период был благоприятным по агрометеорологическим условиям для озимой пшеницы, урожайность которой росла во всех регионах её возделывания на территории России. При этом максимальный темп роста продуктивности озимой пшеницы (3,9 % за десятилетие) наблюдается на Северном Кавказе – в регионе, дающем 80 % валового сбора по стране. Высокие темпы климатически обусловленной урожайности озимой пшеницы наблюдались также в Поволжье. В целом по России рост климатически обусловленной урожайности озимых зерновых культур составил 0,05 т/га или 2,6 % за десятилетие за период с 1975 по 2010 год.

Агроклиматический потенциал территории Центральной Сибири в XXI веке рассмотрен в работе (Tchebakova et al., 2011). Авторы делают вывод, что ожидаемые изменения климата на 2020 и 2080 гг. по сценариям HadCM3 B1 и A2 будут в целом благоприятны для большей части территории Центральной Сибири (50 до 85 % площади), и только уровень почвенного плодородия будет ограничивать продвижение сельского хозяйства на север. Продуктивность посевов может возрасти вдвое. Ожидаемые климатические ресурсы Сибири смогут обеспечить потенциал для выращивания большого числа культур, которые в настоящее время не произрастают на этой территории.

В коллективной монографии (Эколого-географические ..., 2011) наряду с другими вопросами рассматриваются климатические ресурсы Западной Сибири (термические ресурсы, условия увлажнения) и тенденции возможных изменений состава растительного покрова на территории Западной Сибири в первой половине XXI века. Речь идет о тенденциях сдвига зональных границ, поскольку за несколько десятилетий ожидать его коренной перестройки нереально.

В коллективной монографии под. ред. С.М. Семенова «Методы оценки ...» (2012) рассмотрены методы оценки влияния изменений климата на продуктивность сельскохозяйственного производства. Показано, что наблюдаемая тенденция конца XX–начала XXI в. – увеличение климатически обусловленной урожайности зерновых культур на территории Сибири и Дальнего Востока. На большей части территории земледельческой зоны РФ наблюдаемые изменения климата за последние 30 лет обусловили тенденцию к росту урожайности для зерновых и зернобобовых культур на 3–17 %, по сравнению с современным уровнем, озимой пшеницы – на 2–26 %, ярового ячменя – на 1–6 %.

На фоне глобальной тенденции к снижению урожайности зерновых культур из-за потепления климата в России наблюдается рост

урожайности, обусловленный изменениями климата последних десятилетий (Lobell et al., 2011).

Известны расчёты, выполненные по моделям, связывающие урожаи четырёх основных сельскохозяйственных культур (кукурузы, пшеницы, риса и сои) с метеорологическими факторами. Показано, что общемировое производство пшеницы и ржи снизилось на 3,8 и 5,5 % соответственно, по сравнению с гипотетической ситуацией без изменений климата (табл. 10.5). Расчёты показали, что потери урожая в отдельных странах при изменениях климата были достаточно значительными, и рост урожайности вследствие изменения сельскохозяйственных технологий, роста CO₂ в атмосфере и прочих факторов не был сглажен потерями из-за изменений климата (Lobell et al., 2011, 2011a).

Таблица 10.5

Глобальные осреднённые оценки влияния изменений температуры воздуха и осадков на урожайность четырёх основных сельскохозяйственных культур (Lobell D. et al., 2011)

Сельскохозяйственная культура	Общемировая продуктивность (1998–2002), млн т/год	Отклик продуктивности на изменения (тренды), %				Суммарный отклик продуктивности, %
		<i>T</i>	<i>R</i>	<i>T+R</i>	CO ₂	
Кукуруза	607	-3,1 (-4,9, -1,4)	-0,7 (-1,2, -0,2)	-3,8	0,0	-3,8
Рис	591	0,1 (-0,9, 1,2)	-0,2 (-1,0, 0,5)	-0,1	3,0	2,9
Пшеница	586	-4,9 (-7,2, -2,8)	-0,6 (-1,3, -0,1)	-5,5	3,0	-2,5
Соя	168	-0,8 (-3,8, 1,9)	-0,9 (-1,5, 0,2)	-1,7	3,0	1,3

Примечание. *T* – температура воздуха, *R* – сумма осадков.

По оценкам, приведённым в этой работе, потери урожайности яровой пшеницы в России при изменении климата за период с 1980 по 2008 г. составили 15 %. Возможно, что такая оценка получена либо за счёт использования слишком агрегированной зависимости «погода–урожай» для столь обширного пространства, занимаемого Россией, либо за счёт недостаточно точной привязки глобальных метеорологических данных в узлах регулярной сетки к действительному распределению посевов зерновых культур по территории России.

Исследования последних лет показали, что потенциал адаптации мирового сельского хозяйства к современному потеплению климата достаточно велик (Schimmelpfennig et al., 1996; Reilly et al., 1996; IPCC, 2007). Оценки возможного роста продуктивности сельскохозяйственных культур за счёт адаптивной интенсификации аграрного сектора экономики представлены О.Д. Сиротенко и др. (2010).

Аналоговый прогноз биоклиматического потенциала

Приведённые ниже оценки биоклиматического потенциала получены с использованием методологии, основанной на имитационных динамических моделях продуктивности агроэкосистем. Такой подход предлагает ступенчатую систему оценок биоклиматического потенциала для ряда фиксированных уровней интенсификации земледелия: низкозатратного – $БКП_0$, интенсивного на базе химизации – $БКП_N$ и высокоинтенсивного на базе химизации и орошения – $БКП_{WN}$.

Наличие сопоставимых оценок биоклиматического потенциала для различных по уровню урожайности стран/регионов позволяет оценивать ожидаемую урожайность тех регионов, которые отстают по уровню использования $БКП$. Ожидаемая средняя урожайность зерновых культур рассчитывается по следующему алгоритму. Примем в качестве аналога территорию Швеции, где средний биоклиматический потенциал составляет 97 ц/га $БКП_a$, а средняя урожайность пшеницы за период с 1985 по 1991 г. равна 55,7 ц/га (y_a). Рассчитанная величина биоклиматического потенциала для Ленинградской области составляет 111,6 ц/га ($БКП_i$). Тогда урожайность пшеницы в Ленинградской области (y_i) при достижении уровня использования биоклиматического потенциала Швеции в 1985–1991 гг. должна составить:

$$y_i = \frac{БКП_i}{БКП_a} \cdot y_a = \frac{111,6}{97} \cdot 55,7 = 64,1 \text{ ц/га},$$

здесь y_a – средняя урожайность территории аналога; $БКП_i/БКП_a$ – отношение биоклиматического потенциала оцениваемой территории и аналога.

Величина ожидаемой урожайности, равная 64,1 ц/га, почти на 30 % превышает фактическую урожайность за 2005–2009 гг. в Ленинградской области. Аналоговые прогнозы урожайности зерновых культур по регионам России при условии достижения среднего для развитых стран ЕС уровня использования $БКП$ ($y_a/БКП_a = 0,5$) приведены в табл. 10.6 (Сиротенко О.Д., Павлова В.Н., 2010).

Ожидаемая урожайность зерновых при достаточном минеральном питании и при отсутствии дефицита влаги изменяется от 86 ц/га в Северо-Кавказском регионе до 53 ц/га в земледельческой зоне Восточной Сибири. Таков диапазон возможных изменений продуктивности сельского хозяйства России при интенсификации земледелия в течение ближайших десятилетий.

Таблица 10.6

**Аналоговый прогноз урожайности зерновых культур при достижении
западно-европейского уровня использования
биоклиматического потенциала (ц/га)**

Регион	Ожидаемая урожайность, ц/га	
	при достаточном минераль- ном питании	при достаточном минераль- ном питании и увлажнении
Северо-Западный	61,0	61,2
Центральный	63,5	65,0
Волго-Вятский	58,0	61,0
Центрально-Чернозёмный	62,0	74,0
Поволжье, север	54,5	67,0
Поволжье, юг	29,5	79,5
Северо-Кавказский	48,5	85,5
Уральский	50,0	63,5
Западно-Сибирский	53,5	59,0
Восточно-Сибирский	51,5	53,0
Дальневосточный	61,5	62,0
Россия в целом	54,0	66,4

Глава 11

ВОЗМОЖНЫЕ ПОСЛЕДСТВИЯ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА ДЛЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

11.1. Наиболее вероятные сценарии изменения климата России в XXI веке

Несмотря на появляющиеся в печати материалы с альтернативной точкой зрения на процесс глобального потепления, мировое научное сообщество считает: имеется доказательная база, подтверждающая, что процесс потепления продолжается и велика вероятность того, что такая тенденция сохранится до конца текущего столетия (Jones C. et al., 2005; Brohan P., 2006; Груза Г. В., Ранькова Э. Я., 2012).

Выводы Межправительственной группы экспертов по изменению климата МГЭИК о глобальном потеплении климата, которое происходит в настоящее время, продолжают находить подтверждение в данных наблюдений (рис. 11.1).

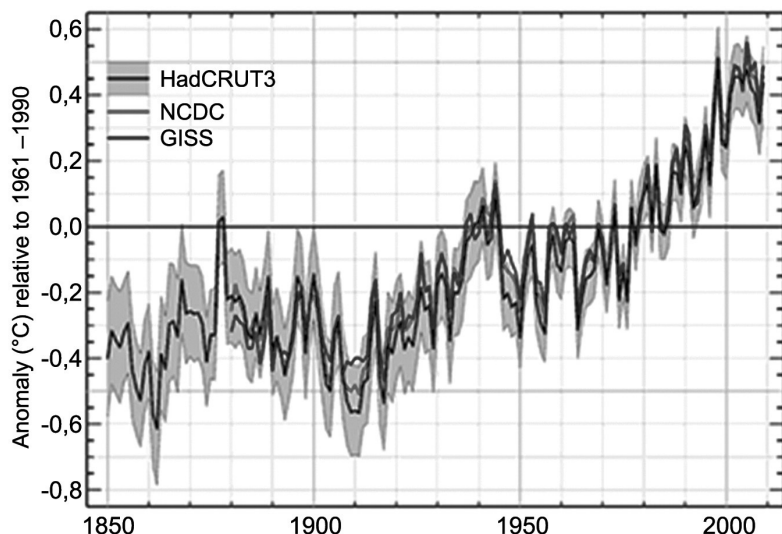


Рис. 11.1. Среднегодовые аномалии (по отношению к периоду 1961–1990 гг.) средней глобальной температуры с 1850 по 2009 г. по данным Центра Хэдли и Университета Восточной Англии, Великобритания (HadCRUT3, чёрная линия – средние значения, серая область – 95 %-ная достоверность), Национального центра климатических данных, США (NCDC, красная линия) и Института космических исследований Годдарда, США (GISS, голубая линия), WMO, 2009

МГЭИК разработала долгосрочные сценарии эмиссии парниковых газов и аэрозоля в атмосферу в XXI веке, которые опубликованы в Специальном докладе о сценариях выбросов (SRES, 2000). Эти сценарии основаны на обширном перечне демографических, экономических и технических факторов, определяющих эмиссии. Всего сценариев 40, и они объединены в шесть основных демонстрационных сценариев: A1 (A1FI, A1T, A1B), A2, B1 и B2.

Сценарное семейство A1 соответствует быстрому экономическому росту и увеличению населения Земли, внедрению новых и более эффективных технологий. Происходит постепенная интеграция регионов, активизация социальных взаимосвязей при уменьшении региональных различий в доходах на душу населения.

По сценарию A2 развитие происходит при опоре на собственные природные ресурсы, а также при росте общей численности населения в мире. Экономическое развитие имеет региональную направленность, а экономический рост и технологические изменения более фрагментарны и происходят медленнее по сравнению с другими сюжетными линиями.

Сценарное семейство B1 содержит описание роста населения в мире, как и в сюжетной линии 1, которое достигает максимальной численности в середине XXI столетия, а затем быстро уменьшается. Главное внимание уделяется глобальным решениям в интересах экономической, социальной и экологической устойчивости. Происходит внедрение экологически чистых и ресурсосберегающих технологий.

По сценарию B2 мировое развитие будет сосредоточено на решении локальных проблем экономической, социальной и экологической устойчивости Земли. Данный сценарий ориентирован на охрану окружающей среды и главное внимание в нём уделяется вопросам регионального развития. Этот сценарий близок к современному уровню развития, и прогнозистический рост эмиссии CO₂ в атмосферу примерно соответствуют его росту в конце XX века.

На рис. 11.2 представлена динамика концентраций парниковых газов (CO₂, CH₄, N₂O) в атмосфере в конце XX и XXI вв. (Оценочный доклад..., 2008).

Различие среднего глобального потепления между «жёстким» (A2) и «мягким» (B1) сценариями к концу XXI века составляют 1,5 °C, при этом стандартное отклонение, характеризующее межмодельный разброс, достигает 68 % в каждом сценарии (рис. 11.2 а). Соответствующая разность для России составляет 2,9 °C, а с учётом стандартного отклонения – 4,2 °C.

На основе сценариев эмиссий газов с помощью современных моделей климата получены климатические сценарии, использующие, как правило, ту же номенклатуру обозначений, что и сценарии эмиссий. Четвёртый

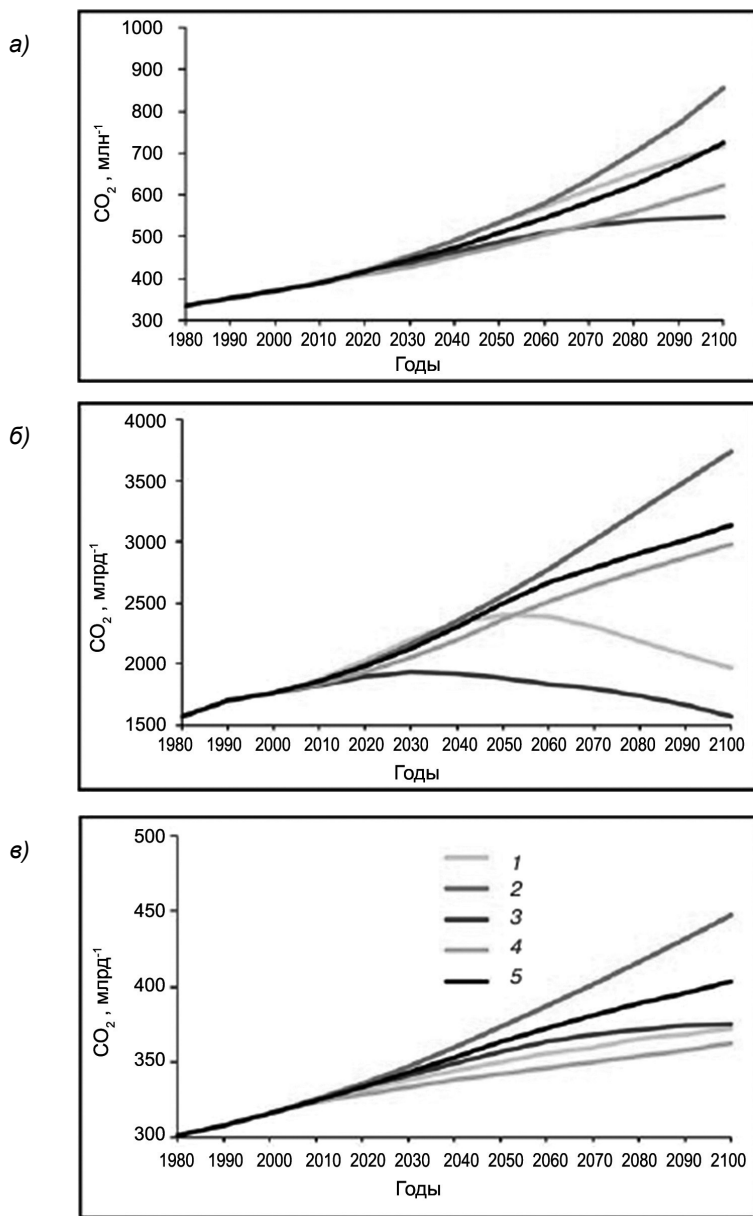


Рис. 11.2. Концентрации парниковых газов в атмосфере в конце XX и XXI вв.
а) CO_2 , б) CH_4 , в) N_2O , полученные по четырём демонстрационным
сценариям, использованным при подготовке ОДЗ и ОД4 МГЭИК.
1) A1B; 2) A2; 3) B1; 4) B2; 5) IS92a

Оценочный доклад МГЭИК (IPCC, 2007 г.) был сфокусирован на рассмотрении трёх климатических сценариев: B1, A1B и A2. Эти же сценарии были положены в основу «Оценочного доклада Росгидромета...» (2008) применительно к территории Российской Федерации. До середины XXI века различия между климатическими сценариями невелики, во всяком случае в средних глобальных оценках изменения климата, а к концу столетия ожидаются значительные различия между ними с более интенсивным потеплением в случае реализации сценария A2.

Согласно расчётам современных физико-математических моделей климата, в XXI в. рост температуры в Арктике будет более чем вдвое превосходить среднее глобальное потепление. Например, в случае реализации сценария A1B в конце XXI в., по сравнению с концом XX в., средняя глобальная температура может увеличиться на 2,8 °С, при этом на большей части суши – примерно на 3,5 °С, тогда как в Арктике – на 7 °С (рис. 11.3). Что касается ожидаемых изменений атмосферных осадков, то Арктика относится к числу регионов мира, где их относительное усиление в текущем столетии максимально.

О тенденции глобального похолодания

Метеорологические, океанографические и другие данные наблюдений, полученные в разных регионах, свидетельствуют, что в течение XX века

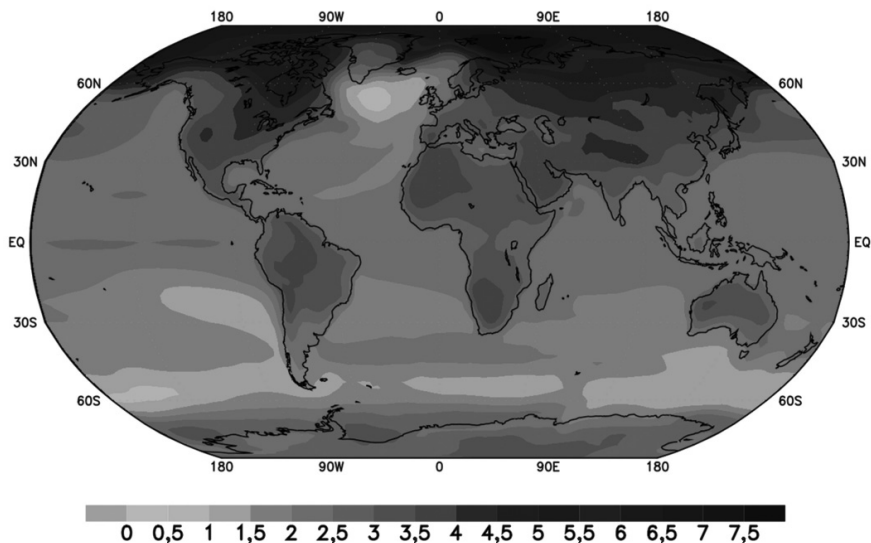


Рис. 11.3. Географическое распределение приземного потепления в конце XXI века. Приведён результат осреднения расчёта с помощью ансамбля из 16 климатических моделей для сценария A1B; показаны изменения температуры к 2080–2099 гг. по отношению к периоду 1980–1999 гг.

происходили значительные изменения климата Земли. В отчётах Межправительственной группы экспертов по проблемам изменения климата за 1990, 1995, 2001 и 2007 гг. сделан вывод о преобладании процесса потепления, вызванного парниковым эффектом. Но мнения климатологов о причинах изменения климата могут существенно расходиться. В ряде работ и зарубежных, и отечественных климатологов содержатся критические замечания, касающиеся «парниковой теории». Основной тезис альтернативной точки зрения на процесс глобального потепления состоит в том, что невозможно достоверно отфильтровать вклад в формирование глобального климата разных факторов, в том числе парникового эффекта атмосферы в результате роста концентрации парниковых газов. Считается, что парниковые свойства углекислого газа невелики и повышение уровня его концентрации в атмосфере в результате хозяйственной деятельности человека не может вызвать заметных изменений климата.

К. Я. Кондратьев (2002, 2004) так охарактеризовал существующее положение: «Ситуация в области исследований глобального климата вызывает глубокую озабоченность. Два доминирующих и противоречащих друг другу представления, как правило, сталкиваются между собой: концепция определённости (согласно этой концепции, современное глобальное потепление обусловлено главным образом антропогенным усилением парникового эффекта атмосферы, что диктует необходимость сокращения парниковых газов – ПГ), и концепция неопределённостей (дефицит данных наблюдений в глобальных масштабах за длительное время, исключительная сложность климатической системы с её многочисленными обратными связями между компонентами и многомасштабной нелинейной динамикой, что не позволяет адекватно проанализировать закономерности функционирования глобальной климатической системы)».

В ряде работ (Фролов И. Е. и др., 2010) предполагается, что одна из основных причин колебаний климата – изменение общего излучения солнца, включающего солнечную активность. Другой причиной климатической изменчивости является естественная долгопериодная изменчивость (квазипериодичность или цикличность). В масштабе десятков лет выявлены циклы продолжительностью около 60 лет (от максимума до максимума) – примерно от 1880 до 1940 и от 1940 до 2000 гг. Делается вывод, что в начале XXI века в ходе температуры воздуха, ледовитости арктических морей и ряде показателей общей циркуляции атмосферы наметился перелом к похолоданию климата, хотя содержание CO₂ в атмосфере продолжало расти (Фролов И. Е. и др., 2008; Гудкович З. М. и др., 2008). Прогнозы, основанные на учёте естественных климатических циклов существенно отличаются от результатов численных экспериментов по моделям климата (Фролов И. Е. и др., 2007; Frolov I. E. et al., 2009). Вместо повышения температуры воздуха и уменьшения ледовитости

предполагается повышение температуры к 2030–2040 гг. и повышение ледовитости. В дальнейшем должны сохраниться циклические колебания, характерные для XX века.

Вопрос об учёте 60-летнего цикла при прогнозировании ожидаемых изменений климата в настоящее время актуален. Снижение глобальной температуры вследствие 60-летнего колебания в первые 30 лет после точки максимума может составить $0,20\text{--}0,25\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Груза Г.В., Ранькова Э.Я., 2012). Но в то же время авторы отмечают, что относительный вклад концентрации CO_2 в изменчивость температуры во всех рассмотренных регионах значительно больше, чем влияние 60-летнего цикла. С учётом влияния обоих факторов (концентрации CO_2 и квази-60-летнее колебание) можно ожидать через 30 лет, от 1981–2010 к 2011–2040 гг., произойдёт повышение глобальной температуры на $\sim 0,58 \pm 0,17\text{ }^{\circ}\text{C}$, в том числе повышение на $\sim 0,72 \pm 0,11\text{ }^{\circ}\text{C}$ за счёт роста концентрации CO_2 и снижение на $\sim 0,14 \pm 0,06\text{ }^{\circ}\text{C}$ за счёт 60-летнего колебания. По отношению к базовому периоду – 30-летию 1961–1990 гг., это потепление составит в среднем $0,84 \pm 0,17\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Оценки будущих изменений климата на территории России

Вследствие большой термической инерции климатической системы скорость потепления определяется не столько текущим ростом содержания парниковых газов и аэрозолей в атмосфере, сколько их накоплением за весь предшествующий период. Оценки изменения климата на территории России слабо различаются между сценариями выбросов парниковых газов и аэрозолей в первые несколько десятилетий XXI века. Так, различия изменений температуры и других переменных (осадки, стоки) для разных сценариев оказываются меньшими по абсолютной величине, чем величина межмодельного разброса оценок изменений соответствующей переменной. Поэтому вполне правомерно рассматривать изменения климата в ближайшие десятилетия для одного из известных сценариев. В данном случае в качестве базового принят сценарий A2.

Важным источником неопределённости оценок изменения климата в ближайшие десятилетия является относительно малая величина антропогенного изменения климата на фоне естественной его изменчивости разного пространственного и временного масштабов.

Изменения температуры приземного воздуха

Расчёты показывают, что в среднем за год большая часть территории России, особенно Сибирь и субарктические регионы, будут находиться в области заметно большего потепления, по сравнению с глобальным. Потепление существенно зависит от времени года и региона. В течение XXI века все без исключения современные климатические модели

дают потепление климата на всей территории России. Наибольший рост температуры ожидается зимой, причём потепление возрастает к северу, достигая максимальных значений в Арктике. Летом, наоборот, потепление в полярной области минимально, и наибольшее потепление отмечается на континенте.

На зимы к 2011–2030 гг. на большей части ЕТР и Западной Сибири более 90 % моделей дают средний по ансамблю рост температуры (1–2 °C), а к середине столетия возможно значительное повышение (2–5 °C) достигается почти на всей территории России. С другой стороны, в летние месяцы 2011–2030 гг. потепление в большинстве административных регионов России будет превышать 1 °C, и эта величина оказывается меньше межмодельного разброса. Однако к середине XXI столетия летнее потепление составит 1–3 °C, что выше межгодовой естественной изменчивости на 65 % и более на всей территории России.

Средние тренды температуры приземного воздуха для всей России за период 1980–2005 гг., полученные по данным наблюдений и модельных расчётов, хорошо согласуются между собой и составляют примерно 0,4 °C/10 лет. Такое соответствие трендов позволяет считать достаточно достоверными модельные оценки изменений этой характеристики на ближайшую перспективу (Оценочный доклад ..., 2008).

К середине XXI века высока вероятность повышения наиболее низких в году суточных минимумов температуры приземного воздуха (годовых минимумов) на всей территории России. Наибольший их рост (4–6 °C) ожидается на юге и северо-западе Европейской территории России. В центральных районах ЕТР, на Урале и в Восточной Сибири увеличение самых низких в году суточных температур составит 2–4 °C. Рост наиболее высоких в году суточных температур приземного воздуха к середине XXI века будет меньшим, чем рост её годовых минимумов. На большей части России изменения годового максимума температуры не превысят 3 °C. На Северном Кавказе рост средней летней температуры оказался несколько меньшим, по сравнению с увеличением годовых максимумов.

К середине XXI века разность между самой низкой и самой высокой суточными температурами в году (годовой амплитуды экстремальной температуры) уменьшится на всей территории России и особенно на её европейской части. Ожидается сокращение на 6–8 суток периодов с экстремально низкими температурами зимой на северо-западе России и на Крайнем Севере. Заметное сокращение числа экстремально холодных суток в году также будет происходить на побережье Тихого океана с одновременным уменьшением числа суток с заморозком. В Центральной и Восточной Сибири и на Дальнем Востоке число суток с заморозком уменьшится на 10–15, а на ЕТР – на 15–30. Календарным днём с заморозком считается такой, когда минимальная температура за сутки не

превышает 0 °С. К середине XXI века почти все модели дают сокращение числа суток с заморозком, которое меньше стандартного отклонения межмодельного разброса на всей территории России. Это говорит о высокой достоверности полученной оценки.

Приведённые оценки изменения экстремальности термического режима качественно согласуются с тенденциями его изменения по данным наблюдений во второй половине XX века.

Изменения осадков

Согласно расчётам, в XXI веке осадки на территории России в целом будут возрастать, причём наиболее значительный их рост приходится на зиму. Распределение и интенсивность будущих изменений осадков сильно зависит от сезона. Зимой подавляющее большинство моделей показывают рост осадков на всей территории России. Если в начале XXI века рост осадков невелик, то к середине XXI века он оказывается значительным, с максимумом в восточных и северных регионах России. Летний рост осадков заметно меньше зимнего, и только примерно на половине территории России более 2/3 моделей дают рост осадков в период 2011–2030 гг. К середине XXI века наблюдаются области уменьшения осадков на юге ЕТР и в южных районах Сибири. Рост летних осадков ожидается только на севере и востоке России. С запада на восток, вдоль южных границ России, сформируется зона, отделяющая области значительного роста осадков на севере от области их убывания на юге. В этой промежуточной зоне оценки изменения осадков очень неопределённые, имеют разные знаки (число моделей, дающих изменения одного знака, не достигает 2/3 от их общего числа). С другой стороны, выделяются обширные области, в которых более 2/3 моделей показывают изменения осадков одного знака.

Летом во многих регионах будут возрастать конвективные осадки и уменьшаться осадки из облаков слоистых форм. Области наибольшего роста конвекции становятся достаточно выраженными к середине XXI века (рис. 11.4), когда более двух третей моделей указывают на их рост. Это означает, что в этих регионах следует ожидать роста повторяемости таких опасных явлений погоды, как грозы, ливни и летние паводки. С другой стороны, следует иметь в виду, что модели дают большой межмодельный разброс количества конвективных осадков, при котором стандартное отклонение превышает средние изменения в середине XXI века, указывая тем самым на большую неопределённость количественных оценок.

В середине XXI века летом на значительной части территории России следует ожидать увеличения осадков большой интенсивности – на 2–6 %. Увеличение экстремальных осадков в южных регионах России будет происходить одновременно с уменьшением числа случаев с такими

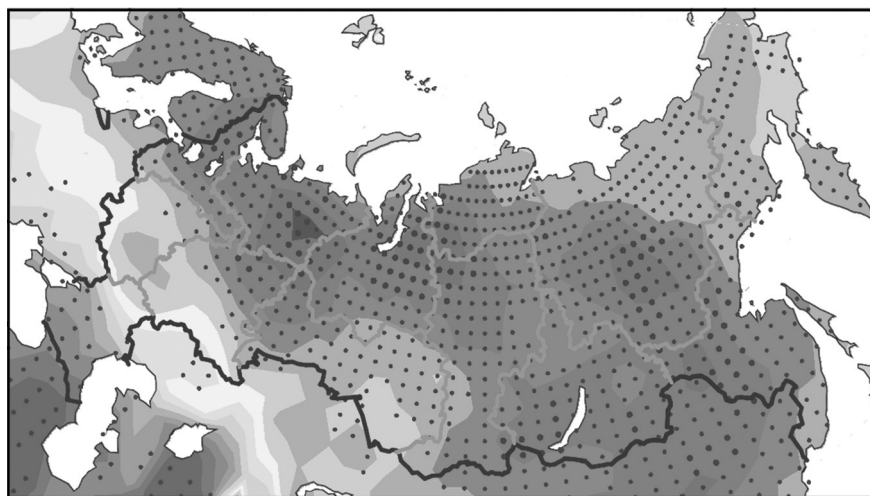
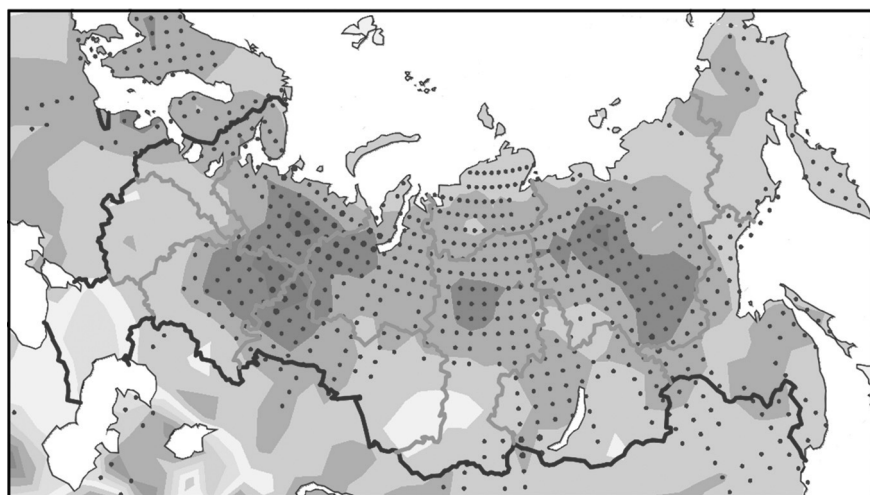


Рис. 11.4. Изменения конвективных осадков (%) в 2011–2013 гг. (сверху) и в 2041–2060 гг. (снизу) по отношению к базовому периоду 1980–1999 гг., рассчитанные по ансамблю из 16 климатических моделей для сценария А2. (Оценочный доклад ..., 2008)

осадками на фоне усиления там засушливых условий. Однако из-за большого межмодельного разброса достоверность изменений суточных сумм интенсивных осадков оказывается низкой.

11.2. Изменения размещения сельскохозяйственных культур и географии сельского хозяйства

Результаты расчётов по глобальным моделям общей циркуляции атмосферы позволяют утверждать, что в результате глобального антропогенного потепления температура в конце XXI столетия возрастёт на 4–5 °С. Естественно, что повышение температуры приведёт к увеличению продолжительности вегетационного периода в тех регионах, где в настоящее время она ограничена из-за недостатка тепла. Американские специалисты пришли к выводу, что негативный эффект влияния потепления климата, выявленный ранее (Розенцвейг С. и Иглесиас, 1994; Розенцвейг С. и др., 1994), преувеличен из-за недостаточного учёта возможной адаптации сельского хозяйства. Действительно, все оценки, полученные в упомянутых работах США, как и подобные оценки для России, не отражают возможностей адаптации сельского хозяйства к ожидаемым изменениям климата. Помимо влияния изменений климата на урожайность важнейших сельскохозяйственных культур, необходимо оценить возможные сдвиги границ, где целесообразно растениеводство.

Сравнивая современные и будущие агроклиматические условия, можно сделать определённые выводы о возможных направлениях адаптации сельского хозяйства в связи с глобальным потеплением климата. Возможные изменения природных условий России при глобальном потеплении по климатическому сценарию, разработанному в лаборатории геофизической гидродинамики (США) GFDL (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory), представлены на рис. 11.5 б. Эти изменения можно сопоставить с современными физико-географическими зонами (Будыко М.И., Григорьев А.А., 1956) (рис. 11.5 а). В результате потепления границы возможного растениеводства продвинулись на север территории России. Для зоны растениеводства северная граница проходит там, где сумма температур за период с температурой выше 5 °С составляет 1000 °С. Расчёты показывают, что повышение температуры на 1 °С приведёт к перемещению границы растениеводства в Северном полушарии на 150–200 км к северу и к повышению высотной границы в горах примерно на 150–200 м.

Физико-географическая зональность Российской Федерации, как следует из данных табл. 11.1, претерпит существенные изменения. Резко сократится площадь полярно-тундровой зоны. На европейской части страны тундра практически исчезнет, сохранившись узкой полосой на материковом арктическом побережье Сибири и на полуостровах – Ямале, Таймыре и Чукотском. Зона хвойных лесов (тайга) сместится к северу и

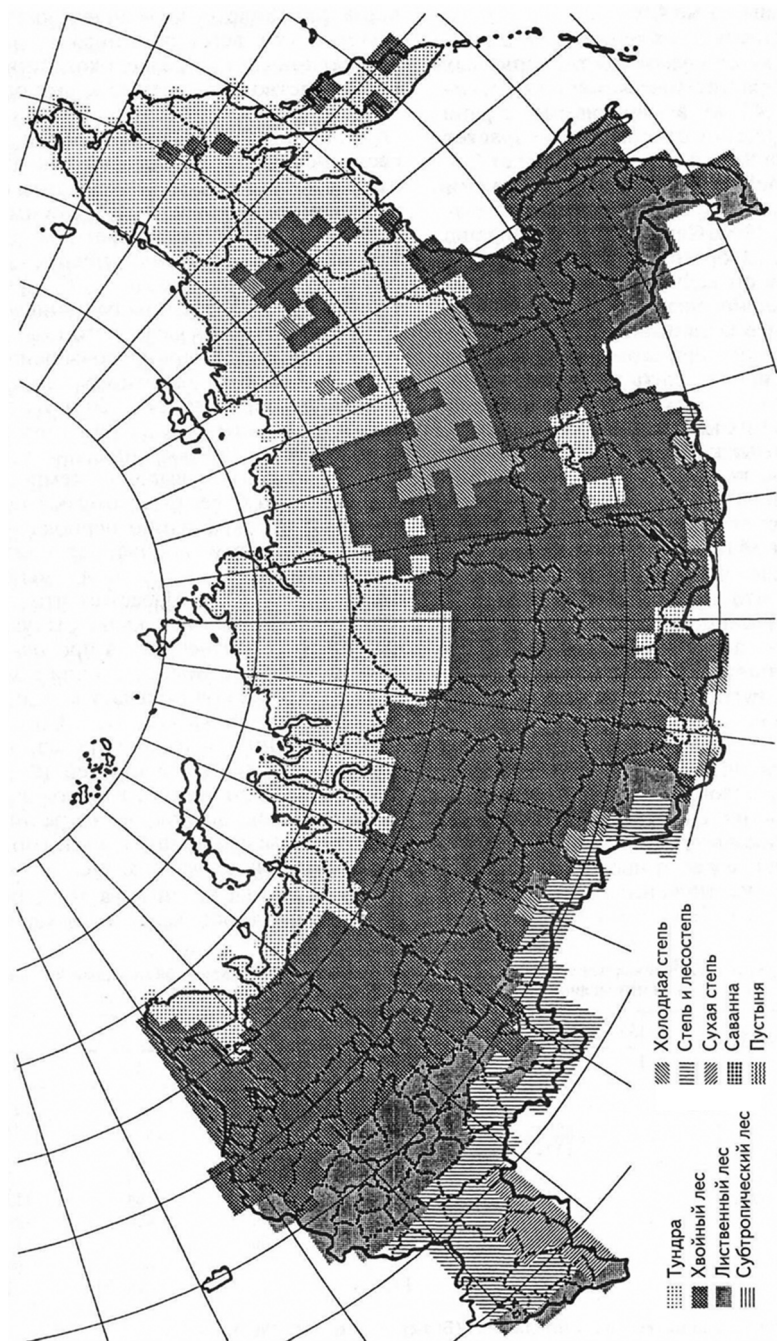


Рис. 11.5 а. Современная физико-географическая зональность Российской Федерации (Сиротенко, Абашина, 1998)



Рис. 11.5.б. Предполагаемое изменение физико-географической зональности Российской Федерации в случае глобального потепления (Сиротенко, Абашина, 1998)

сократится по площади, особенно значительно на европейской части России. Зона широколиственных лесов, занимающая сейчас сравнительно небольшую площадь на западе страны и на Дальнем Востоке, продвигается на север и восток и образует единую широтную зону от финской границы до Сахалина. Площадь этой зоны увеличится на 3,7–4,1 млн км², и она выйдет на второе место после тайги по степени распространённости. Степная и лесостепная зоны также расширятся на 2,2–1,1 млн км² и распространятся согласно сценарию GFDL (рис. 11.5б) к северу, вплоть до южных районов Московской, Владимирской и Нижегородской областей. По сценарию CCC продвижение степи на север не будет столь значительным. Особый интерес представляют ожидаемые изменения на Северном Кавказе. Степная зона в этом регионе, по-видимому, сменится не на сухостепную (полупустынную), как можно было бы ожидать, а на зону ксерофитной субтропической растительности – типа саванны (Сиротенко О. Д., Абашина Е. А., 1998).

Таблица 11.1

Площади S (тыс. км²) основных типов растительного покрова Российской Федерации при глобальном потеплении и их изменения ΔS по сравнению с современным климатом

Растительный покров	Современный климат	GFDL		CCC	
	S	S	ΔS	S	ΔS
Тундра	5355	1584	-3771	917	-4438
Тайга	8898	6384	-2514	7459	-1440
Лиственный лес	1343	5087	3744	5488	4145
Субтропический лес	–	45	45	65	65
Степь, лесостепь	1232	3487	2255	2364	1132
Горная степь	650	206	-444	434	-216
Сухая степь	275	19	-256	97	-178
Саванна	–	750	750	607	607
Пустыня	–	190	190	320	320

Сухие степи в Калмыкии и Астраханской области, по-видимому, сменит настоящая пустыня среднеазиатского типа. Общая площадь пустынь составит 0,19–0,32 млн км². Появление зоны пустынь на территории России столь же закономерное следствие потепления климата, как и сокращение площади тундры.

Данные табл. 11.1 свидетельствуют, что прогнозируемые изменения физико-географической зональности России по сценариям GFDL и CCC в основных чертах совпадают, хотя есть и различия в деталях. Картограмму на рис. 11.5 можно сопоставить также с мировой картой возможного равновесного распределения основных типов растительности, которая рассчитана по модели MAPSS для сценария GFDL при удвоении концентрации

CO₂ (Сиротенко О.Д. и др., 1995). В целом, несмотря на различия методик, обе карты свидетельствуют об одной и той же направленности возможных изменений физико-географической зональности РФ при глобальном потеплении – резком уменьшении площади тундры, увеличении площади лесов умеренной зоны, расширении и продвижении на север степной зоны.

Приведённая в Climate Change (1995) карта предполагает ещё более кардинальные изменения физико-географической зональности, чем показанные на рис. 11.5. Действительно, согласно этой карте степь продвигается по западным границам России вплоть до Балтийского моря, охватив всю территорию Украины, значительную часть Белоруссии и Эстонии. Степь в мозаичной форме может стать распространённым ландшафтом в Польше, Германии и даже на юго-востоке Англии. Конечно, при интерпретации этих результатов необходимо учитывать, что речь идёт лишь о вероятном изменении климатических условий, допускающих существование данного типа растительности на данной территории, т.е. эти карты отражают важные, но не достаточные условия смены растительного покрова. Многие авторы полагают, что климат будет изменяться быстрее, чем растительные сообщества способны реагировать на эти изменения, например путём миграции. Это отставание будет сохраняться несколько десятилетий, пока масштабные лесозаготовки, пожары и другие антропогенные воздействия не приведут к быстрому приспособлению возрождающихся ценозов к изменившимся условиям.

Таким образом, предстоящее изменение природной зональности в целом благоприятны для сельского хозяйства России. Это следует из того, что максимальное приращение при потеплении получает зона широколиственных лесов, которая ассоциируется с регионом устойчивого и высокопродуктивного земледелия, а также зона степи и лесостепи, где возможно эффективное зерновое хозяйство. Более точные данные по этому вопросу получают при использовании методов агроклиматического районирования. Классическим агроклиматическим показателем теплообеспеченности растений служат суммы температур воздуха за период с температурой более 10 °С. В табл. 11.2 представлены суммы температур, обеспечивающие созревание названных сельскохозяйственных культур в 90 % общего числа лет. Константы этой таблицы можно использовать для интеграции результатов расчётов, представленных в табл. 11.3 (градации сумм температур в ней выбраны в соответствии с критериями С.А. Сапожниковой и Д.И. Шашко).

Картограммы на рис. 11.5 показывают, как изменится положение тепловых поясов при потеплении. Особенно впечатляющим является смещение северной границы земледелия, совпадающей с изолинией суммы температур 1000 °С. Эта граница к середине XXI столетия достигнет побережья Белого и Карского морей, т.е. практически вся территория европейской части России станет пригодной для земледелия.

В Западной Сибири северная граница земледелия сдвинется за полярный круг, т.е. потенциально пригодной для земледелия станет вся территория региона, за исключением северной половины Ямало-Ненецкого автономного округа. В Восточной Сибири земледелие станет возможным на значительной части территории, за исключением Таймырского автономного округа и примерно половины южной Якутии. На Дальнем Востоке непригодной для земледелия останется лишь территория Чукотского автономного округа.

Таблица 11.2

Обеспеченность созревания или достижения хозяйственно-ценных фаз развития растений в 90 % общего числа лет (по Сапожниковой и Шашко)

Термический пояс	Показатель ресурсов тепла (сумма температур за период более 10 °С)	Культура
1	400	Овощные культуры в защищённом грунте
	400	Редис, салат, шпинат, лук на перо
	800	Репка, турнепс, капуста (р), картофель (р) при специальной агротехнике
2	1000	Ячмень (р), озимая рожь (р) на более тёплых участках
	1200	Ячмень (р), горох (р), лён на волокно (р)
	1400	Овес (р), ячмень (с)
3	1600	Ячмень (п), яровая пшеница (р), озимая пшеница, кукуруза (с) в фазе выметывания, сахарная свёкла на корм
	1800	Яровая пшеница (п), подсолнечник на зерно (р), сахарная свёкла для переработки на сахар (р)
4	2200	Кукуруза на зерно (р), фасоль (р), просо (п)
	2400	Кукуруза (с) в фазе молочно-восковой спелости (р), соя (р), виноград (р)
	2500	Абрикос (р), фасоль (п), подсолнечник (п) на зерно, рис (р)
5	2800	Кукуруза на зерно (с), кукуруза (п) в фазе молочно-восковой спелости, сорго (р)
	3000	Кукуруза на зерно (с), виноград (с)
	3200	Кукуруза на зерно (п), грецкий орех, каштан
6	3400	Соя (п), арахис (р), сорго (п), инжир, гранат, хурма
	3600	Хлопчатник (р), лимон, мандарин
7	4000	Хлопчатник (с), рис (п), виноград (п)
	4400	Маслины, апельсины
	4800	Хлопчатник (п), джут

Примечание. Каждая последующая сумма температур обеспечивает созревание всех указанных выше культур. Здесь использованы следующие обозначения: р – ранние, с – средние, п – поздние сорта.

Таблица 11.3

Площади S (тыс. км²) с различными суммами температур более 10 °С при глобальном потеплении и их изменение ΔS по отношению к современному климату (Сиротенко О. Д., Абашина Е. В., 1998)

Номер пояса	Градация сумм температур	Современный климат	Сценарий GFDL	
		S	S	ΔS
1	<1000	7787	3094	-4693
2	1000–1600	5974	3230	-2744
3	1600–2200	2448	4255	1807
4	2200–2800	932	3681	2749
5	2800–3400	439	2259	1820
6	3400–4000	152	603	451
7	>4000	–	611	611

Из данных табл. 11.3 следует, что площадь сельскохозяйственной зоны России при глобальном потеплении увеличится на 4,7–4,8 млн км², т. е. в 1,5 раза, по сравнению с современной. Если рассматривать отдельные пояса (табл. 11.2), то сократятся площади первого (непригодного для товарного земледелия) и второго поясов, где могут произрастать лишь ранние сорта зерновых. Площади всех остальных термических поясов увеличатся. В максимальной степени (на 2,7 млн км²) возрастёт по сценарию GFDL площадь четвёртого пояса, а по сценарию CCC – третьего (на 2,8 млн км²). Значительно увеличится площадь пятого пояса, на территории которого смогут вызревать среднеспелые и позднеспелые сорта кукурузы, виноград и другие теплолюбивые культуры. И, наконец, в России появятся земли (не менее 1 млн га), где суммы температур превысят 3400 °С (6-й и 7-й пояса). Это означает, что при потеплении климата на Северном Кавказе и в Нижнем Поволжье возникнет достаточно обширная зона субтропического земледелия, что позволит, по-видимому, создать базу для получения урожаев хлопка-сырца, удовлетворяющую потребностям страны.

Успешность возделывания зимующих сельскохозяйственных культур зависит от климатических условий как тёплого, так и холодного периодов года. Ареалы распространения и посевные площади таких важнейших сельскохозяйственных культур, как озимые зерновые (пшеница, рожь и ячмень) и многолетние травы, определяются успешностью их перезимовки. То же можно сказать и о плодово-ягодных культурах, винограде, распространение которых сильно коррелирует с показателями суровости зимы.

Для характеристики условий перезимовки растений Г.Т. Селянинов использовал среднюю температуру самого холодного месяца года. Этот показатель, по сравнению с абсолютным минимумом температуры, характеризует термическое воздействие за длительный период, в результате

чего с ним лучше связаны ареалы экологических типов зимующих культур. Для различных градаций средней температуры наиболее холодного месяца Г.Т. Селяниновым и Д.И. Шашко (1967) предложены характеристики условий перезимовки, которые приведены в табл. 11.4.

Таблица 11.4

Площади S (тыс. км²) территорий с различной суровостью зимы при глобальном потеплении и их изменение ΔS , по сравнению с современным климатом

№	Градация температуры января, °С	Характеристики суровости зимы и её тип по условиям перезимовки	Возможность перезимовки сельскохозяйственных культур	Современный климат	GFDL		CCC	
				S	S	ΔS	S	ΔS
1	>0	Очень мягкая	Полевые работы круглый год. Инжир, чай. Виноград без укрытия	0	66	66	1005	1005
2	-5...0	Мягкая	Неустойчивый снежный покров. Грецкий орех, персик, абрикос	165	755	590	2102	1937
3	-10...-5	Умеренно мягкая	Среднехолодостойкие сорта яблонь, груш; холодостойкие сорта абрикос	917	2446	1529	1346	429
4	-15...-10	Умеренно-холодная	Зимовка озимых нормальная. Среднерусские сорта яблонь. Груши, вишни и сливы	1981	3187	1206	2886	905
5	-20...-15	Холодная	Возможно вымерзание озимых и плодовых. Выращиваются местные сорта плодовых культур	2701	4005	1304	2617	-84
6	-25...-20	Очень холодная	Озимые и европейские плодовые культуры не выращиваются. Стланцевые формы зимостойких сортов плодовых	2842	3207	365	2553	-289
7	<-25	Суровая	То же	8794	3736	-5058	4892	-3902

По данным табл. 11.4 можно в общих чертах оценить последствия ожидаемых изменений климатических условий холодного периода года для сельского хозяйства России. По сценарию GFDL тёплые зимы на территории России не получают широкого распространения, не считая районов площадью 1000 км² на Северном Кавказе. Однако по этому, более суровому, сценарию, глобальное потепление коренным образом изменит условия зимовки сельскохозяйственных культур на территории России. Действительно, зона с умеренно-холодной и более тёплой зимой, где возможна нормальная перезимовка озимых культур, охватит всю

европейскую часть России и значительную часть юга западной Сибири и Дальнего Востока. Граница зоны с мягкой зимой, где могут произрастать такие требовательные к термическим условиям культуры, как грецкий орех, абрикос и персик, пройдет с севера на юг по меридиану Саратова, т.е. указанные культуры не будут вымерзать, во всяком случае в центральных районах России.

Об изменении гидротермических ресурсов Восточно-Европейской равнины при потеплении в XXI веке можно судить по данным, приведенным в коллективной монографии (Кислов А.В. и др., 2008; Эколого-географические последствия..., под ред. Н.С. Касимова и А.В. Кислова, 2011). Здесь представлен детальный анализ показателей влагообеспеченности и их динамики – гидротермического коэффициента Г.М. Селянинова 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 расчетов, представленные авторами, к середине XXI века повторяемость лет с условиями, близкими к норме, в летние месяцы уменьшается в центре Восточно-Европейской равнины (ВЕР) и здесь возрастает частота засушливых ситуаций. К северу от 56–58° с.ш. сохраняются благоприятные гидрометеорологические условия, возрастают увлажнение и температура, увеличивается 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 Селянинова и индекса Педя, достаточно хорошо согласуются между собой.

11.3. Изменения биоклиматического потенциала и углеродного режима пахотных почв

Перейдем теперь к вопросу об оценке возможного влияния глобального потепления на биоклиматический потенциал России. К настоящему времени предложен ряд способов сравнительной оценки (бонитировки) природных условий сельского хозяйства по климатическим факторам. В большинстве случаев биоклиматический потенциал (БКП) представляется в виде функции двух переменных, характеризующих тепло- и влагообеспеченность агроэкосистем. Обычно, как, например, в методике Д.И. Шашко (1967), теплообеспеченность характеризуется суммой температур более 10 °С, а влагообеспеченность – отношением осадков к испаряемости. В более совершенных методах, основанных на динамических моделях продуктивности, БКП рассчитывается как суммарный урожай надземной биомассы, накапливаемой травяной экосистемой за теплый период года.

Подобные методики более точны, но требуют детальной информации о водно-физических и агрохимических свойствах почв, что ограничивает их применение. В работе (Сиротенко О.Д. и др., 1998) для оценки БКП по всей территории России использован метод Д.И. Шашко, а для земледельческой зоны – разработанная динамическая модель «погода–урожай» (Абашина Е.В., Сиротенко О.Д., 1986). Результаты расчёта распределения БКП на территории России как при современных, так и ожидаемых (сценарии GFDL) климатических условиях представлены в табл. 11.5. При современном климате распределение площадей по градациям БКП имеет достаточно сложный характер – выделяются два максимума – для очень низкой (5,1 млн км²) и пониженной (4,2 млн км²) продуктивности агроэкосистем. При глобальном потеплении распределение площадей по градациям БКП резко изменяется. Так, максимум по сценарию GFDL смещается в градацию средней продуктивности. По данным табл. 11.5 определены следующие средние значения БКП для территории Российской Федерации:

- для современного климата – 1,41;
- для сценария GFDL – 1,88.

Таким образом, в результате глобального потепления биоклиматический потенциал России увеличится на 33 % для сценариев GFDL.

Таблица 11.5

Площади S (тыс. км²) территорий с различной биологической продуктивностью климата в результате глобального потепления и их изменение ΔS , по сравнению с современным климатом

Биологическая продуктивность климата	Относительные значения БКП	Современный климат	Климатический сценарий GFDL	
		S	S	ΔS
Очень низкая	<0,8	5125	2185	-2940
Низкая	0,8–1,2	2468	2333	-135
Пониженная	1,2–1,6	4206	2224	-1982
Средняя	1,6–2,2	4060	4560	500
Повышенная	2,2–2,8	1598	4153	2555
Высокая	2,8–3,4	231	2005	1774
Очень высокая	>3,4	44	271	227

Как следует из анализа материалов, распределение БКП по территории России указывает на крайне неравномерный характер роста БКП при потеплении. В два и более раза возрастут значения БКП в районах, прилегающих к северной границе земледелия. БКП современной земледельческой зоны Сибири повысится на 30–50 %. В Центральном районе, центрально-чернозёмных областях и на большей части Северного Кавказа БКП возрастет от 0 до 30 %. Вместе с тем чётко выделяется зона возможного уменьшения БКП, – это Волгоградская и Астраханская области,

Калмыкия и восточные районы Ставропольского края. Необходимо подчеркнуть, что изменение значений БКП нельзя интерпретировать как пропорциональное изменение урожайности тех или иных культур. Например, рост БКП при потеплении климата на 50 % не означает, что урожайность зерна фиксированных сортов яровой пшеницы или кукурузы в данном районе возрастёт на ту же величину. Напротив, при неизменных условиях увлажнения потепление приведёт к падению урожайности названных культур из-за более раннего их созревания. Чтобы реализовать в урожайности увеличение биоклиматического потенциала при потеплении, необходимо используемые в настоящее время сорта или культуры заменить на более позднеспелые, соответствующие возросшим термическим ресурсам. В результате этого фотосинтезирующая система будет работать более продолжительное время и продуктивность агроэкосистем повысится. Пропорциональность между изменениями БКП и урожайностью отдельных культур возможна лишь в случае полного использования всего вегетационного периода, т.е., другими словами, при идеальной адаптированности агроэкосистем к климатическим условиям. Итак, при глобальном потеплении по сценариям теории климата ожидается рост биоклиматического потенциала территории России в среднем на 30 %. Расчёты с помощью имитационной системы «климат–почва–урожай» для современной земледельческой зоны при условии сохранения нынешнего уровня плодородия почвы дают оценку роста БКП, равную 11 %. Можно констатировать определённую согласованность оценок, полученных разными методами. Одновременно с ростом БКП расчёты с помощью динамических моделей указывают на возможность падения средней урожайности зерновых в России на 8 % (Сиротенко О.Д. и др., 1994, 1995; Сиротенко О.Д., Грингоф И.Г., 2006).

Обобщая сказанное, можно заключить, что глобальное потепление приведёт к значительному увеличению возможностей аграрного сектора экономики России, которая может стать крупнейшим мировым производителем продовольствия. Однако реализация этого возможна лишь в случае подъёма и кардинальной адаптации сельскохозяйственного производства к климатическим условиям, синхронизированной с темпами их изменения. В противном случае потепление климата приведёт к падению среднего уровня урожайности и росту нестабильности сельскохозяйственного производства.

Ожидаемые изменения запасов органического углерода пахотных почв

При сравнительной оценке потенциала сельского хозяйства различных регионов мира по смягчению последствий изменения климата, в том числе за счёт увеличения запасов органического углерода (C) почвами,

потенциал России оценивается как шестой среди 22 рассмотренных регионов (Smith et al., 2007a; Smith et al., 2007b). Тем не менее биологически достижимый потенциал увеличения запасов С в почвах в несколько раз ниже реально возможного, прежде всего из-за экономических ограничений.

В совместном исследовании центра Хэдли и ГГИ 2010 г. «Climate impacts in Russia: changes in carbon storage and exchange» сообщается о возможном снижении запасов углерода пахотными почвами России при изменении климата. Основными факторами возможного длительного тренда снижения запасов углерода почвами авторы называют:

- снижение урожайности при увеличении повторяемости засух в 2020–2070 гг., которые прогнозируются по модели HadCM3 (Alcamo et al., 2007; Falloon et al., 2009);

- увеличение потерь углерода почвой за счёт интенсификации дыхания растений при потеплении климата. По расчетам Schwalm et al. (2012), частое повторение засух в течение нескольких лет снижает сток углерода в пахотные почвы за счёт двух описанных выше процессов более чем вдвое. Известны также аналогичные оценки (Jones et al., 2005), полученные на основе МОЦАО HadCM3LC для России до 2100 года.

Для пахотных почв Европейской территории России проведён совместный учёт прогнозных климатических, агроэкологических и экономических данных при создании сценариев будущих региональных систем сельскохозяйственного производства (Сиротенко и др., 2006; Smith et al., 2007c; 2007d; Романенков В.А. и др., 2009). Система расчётов базировалась на одновременной оценке изменения биоклиматического потенциала территории, урожайности сельскохозяйственных культур, запасов органического вещества почвы, экономических показателей земледелия и позволила устанавливать взаимосвязи между рентабельным ведением сельского хозяйства и устойчивым функционированием агроландшафтов.

Разработанная методика (Романенков В.А. и др., 2012) позволяет учитывать возможные меры по адаптации к изменениям климата: изменения в специализации сельскохозяйственного производства при смене севооборотов и размещения культур, изменение сроков посева и уборки, изменение объёмов внесения органических и минеральных удобрений, внедрение комплекса мер по созданию достаточной кормовой базы для животноводства.

Сравнительный анализ различных климатических сценариев до 2070 г. показывает, что при неизменном землепользовании большая часть почвенных контуров будет терять современные запасы органического углерода. Наибольшие потери происходят при реализации климатического сценария A1FI. Возможные потери за 70 лет составляют от 9 до 12 % от общего запаса углерода в пахотных почвах РФ в слое

0–20 см. Адаптационный сценарий (B2) позволяет за этот же период снизить потери на 30–45 %. Наиболее благоприятным оказывается для реализации адаптации климатический сценарий B2, прежде всего за счёт абсолютного роста запасов углерода в Северо-Западном, Центральном и Приволжском ФО, наименее благоприятным – A1FI за счёт увеличения более чем в 2,5 раза потерь углерода.

Абсолютная величина прироста показывает, что до 2050 г. заметно возрастание запасов углерода при реализации климатического сценария B2, но после 2050 г. этого приёма оказывается недостаточно – соответствующего увеличения запасов не происходит. Климатические сценарии A2 и B1 оказались достаточно близки между собой, при этом наиболее благоприятный период для накопления углерода возможен в 2020–2050 гг.

Расчёты для Северо-Западного и Центрального ФО показывают, что в период до 2070 г. комплекс адаптационных мер сможет обеспечивать рост урожайности при расширенном воспроизводстве плодородия почв, что позволит получить максимальную прибыль региональной системы ведения хозяйства.

Установлено, что для Нечернозёмной зоны влияние климата проявляется в большей степени в растениеводческом секторе, по сравнению с сектором животноводства. Данные регионы можно рассматривать как наиболее перспективные для осуществления адаптационных мер, которые могут иметь существенный выигрыш от изменения климата. Для этого должна быть обеспечена своевременность адаптационных программ, поскольку реализация их преимуществ, включая дополнительный вклад углерода, максимальна в период 2015–2040 гг. Увеличение ареала потенциальных потерь ранее накопленного углерода может произойти в 2050–2060 гг., прежде всего за счёт ожидаемой потери углерода для слабокультуренных почв.

Влияние различных климатических сценариев иллюстрируется на рис. 11.6, где сравнивается разница запасов органического углерода пахотных почв Европейской территории России.

Установлено, что многолетние травы играют существенную роль в снижении затрат при реализации эколого-экономического сценария адаптации B2, по сравнению с оптимальным экономическим A1FI. В областях Нечернозёмной зоны, относящихся к Центральному ФО, доля трав в севооборотах достаточна для обеспечения расширенного воспроизводства почвенного плодородия, что позволяет поддерживать положительный баланс органического вещества в ожидаемых условиях 2050 года.

В почвах нечернозёмной зоны Приволжского ФО доля трав в структуре севооборотов недостаточна для осуществления эколого-экономического устойчивого сценария B2, иногда значительно – дефицит доли трав в севооборотах может составлять 25–35 %. Снижение затрат на поддержание

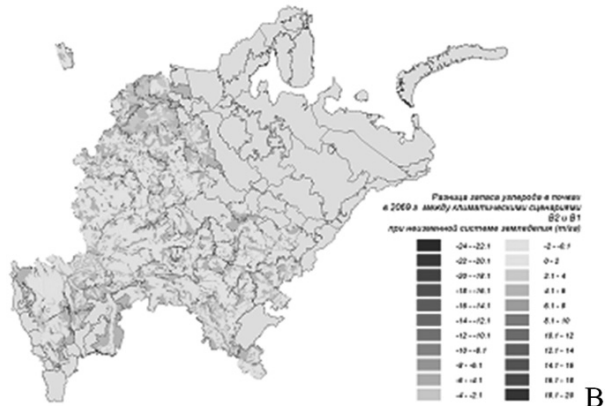
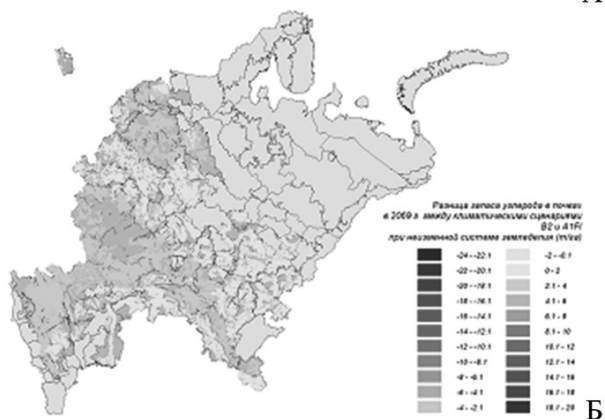
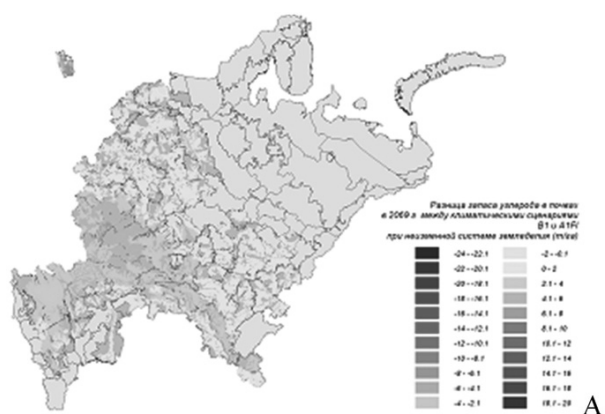


Рис. 11.6. Разница запасов органического углерода в почвах пахотных почв Европейской территории России в 2069 г. при реализации климатических сценариев B1 и A1FI(A), B2 и A1FI (Б) и B2 и B1(В); экономический сценарий – неизменное землепользование (Романенков и др., 2009)

запасов органического углерода почвы возможно за счёт планируемых изменений в секторе животноводства, что требует более детального анализа на районном уровне, а также на основе снижения доли пропашных культур в севооборотах. Одним из факторов, обеспечивающих поддержание бездефицитного баланса органического вещества, являются дозы применяемых органических удобрений, но органические удобрения оказывают значительно меньшее влияние по сравнению со структурой севооборота.

Сценарий изменения климата нового поколения CMIP5

Оценки влияния наблюдаемых и ожидаемых изменений климата на продуктивность и устойчивость сельского хозяйства наиболее полно отражены в «Оценочном докладе об изменениях климата и их последствиях на территории РФ» (2008) и в коллективной монографии «Оценка макроэкономических последствий изменений климата» (2011). Для территории России основные заключения, выводы и рекомендации по учёту изменений климата в различных секторах экономики и социальной сфере представлены также в сжатом виде в важнейшем государственном документе «Стратегический прогноз изменений климата Российской Федерации на период до 2010–2015 гг. и их влияние на отрасли экономики России» (2005). Проверка оправдываемости прогноза по разделу «Сельское хозяйство» показала, что при осреднении оценок по крупным регионам «Стратегический прогноз» ожидаемых изменений важнейших агроклиматических параметров, определяющих продуктивность сельскохозяйственных культур, можно признать в целом оправдавшимся.

Таким образом, первые оценки влияния наблюдаемых и ожидаемых изменений климата на агросферу и землепользование получены как на национальном, так и на глобальном уровнях. Но актуальность задачи остаётся – ведётся разработка новых климатических сценариев и совершенствуются существующие методы оценок влияния климата на сельское хозяйство по отдельным регионам России.

В части оценок последствий изменений климата в будущем для физических, биологических и социально-экономических систем целесообразно использовать новые модельные данные (расчёты климатических характеристик в узлах глобальных сеток для разных сценариев воздействия на климатическую систему), полученные при выполнении международного Проекта сравнения совместных моделей (CMIP5 – Coupled Model Intercomparison Project). Постоянно обновляющийся архив модельных расчётов содержит результаты экспериментов примерно по 40 моделям, включая эксперименты по ретроспективным расчётам климата до 2005 г. включительно.

Из всего множества сценариев изменения климата нового поколения в ГГО им. А.И. Воейкова был выбран вариант, включающий 31 сценарий изменения климата, а затем путём осреднения получен ансамблевый сценарий (AN_31 – в дальнейших обозначениях).

Предполагается рассмотреть влияние последствий изменений климата на продуктивность сельскохозяйственных культур на территории Российской Федерации на протяжении XXI века для двух сценариев антропогенного радиационного воздействия – RCP4.5 и RCP8.5 – Representative Concentration Pathways (Taylor et al., 2012; Peters, 2012). Сценарий RCP4.5 соответствует радиационному воздействию (radiation forcing) 450 Вт/м^2 («мягкий сценарий»), сценарий RCP8.5 – антропогенному радиационному воздействию 850 Вт/м^2 («жёсткий сценарий»).

Оценки агроклиматических характеристик и продуктивности в системе «климат–почва–урожай» выполнялись по следующим вариантам:

1. Будущий климат – «среднемодельный» или ансамблевый вариант (AN_31), полученный в ГГО осреднением результатов расчётов по 31 МОЦАО. Рассматривались периоды:

- S2: 2011–2030 гг.;
- S3: 2034–2053 гг. для сценария RCP4.5; 2028–2047 гг. для сценария RCP8.5;
- S4: 2041–2060 гг.;
- S3: 2080–2099 гг.

2. Будущий климат – сценарий глобального потепления климата на $1,5^\circ\text{C}$ по отношению к базовому периоду 1981–2000 гг. или на $2,0^\circ\text{C}$ по отношению к доиндустриальному периоду, полученный на основе выполненного в ИГКЭ Росгидромета статистического анализа данных о температуре воздуха.

11.4. Изменения влагообеспеченности и засушливости территории

В качестве примера проанализируем ожидаемые изменения агроклиматических условий на периоды 2011–2030 и 2034–2053 гг. на территории России по ансамблевому сценарию изменения климата при варианте антропогенного воздействия RSP8.5. Ожидаемые изменения агроклиматических показателей по этому сценарию к 2030 и 2053 гг. представлены в табл. 11.6. Характеристики термического режима включают агроклиматические показатели: суммы активных температур за период с температурой выше 10°C ($\sum T_{10}$), продолжительность периода вегетации (число суток с температурой выше 5°C , $N_{>5^\circ\text{C}}$), даты перехода температуры через 5°C (N_d), средняя температура января (T_1) и средняя температура периода вегетации ($T_{>5^\circ\text{C}}$).

Таблица 11.6

**Ожидаемые изменения показателей термических ресурсов
(отклонения от современного уровня) на территории России на периоды
2011–2030 и 2034–2053 гг. по ансамблевому сценарию
(вариант антропогенного воздействия RCP8.5)**

Федеральный округ	$T_1, ^\circ\text{C}$	$T_7, ^\circ\text{C}$	$T_{>5}, ^\circ\text{C}$	$\sum T_{10}, ^\circ\text{C}$	$N_{>5}, \text{сут}$	$N_d, \text{сут}$
2011–2030 гг.						
Северо-Западный	1,7	1,5	0,9	322	13	-7
Центральный	1,7	1,6	0,9	315	11	-5
Приволжский	1,8	1,3	0,9	300	11	-6
Южный	1,2	1,6	0,8	330	9	-4
Уральский	2,0	1,2	0,9	319	12	-6
Сибирский	1,8	1,3	0,9	281	11	-5
Дальневосточный	1,5	1,0	0,8	233	7	-3
Россия	1,7	1,4	0,9	308	11	-5
2034–2053 гг.						
Северо-Западный	2,8	2,3	1,3	499	21	-10
Центральный	2,7	2,4	1,4	511	18	-8
Приволжский	2,8	2,3	1,5	503	18	-8
Южный	1,9	2,5	1,3	551	15	-6
Уральский	2,9	2,3	1,6	516	18	-9
Сибирский	2,6	2,2	1,4	453	16	-8
Дальневосточный	2,4	1,9	1,3	407	12	-6
Россия	2,6	2,3	1,4	504	17	-8

Как показывает анализ данных, к 2030 и 2053 гг. можно ожидать рост температуры воздуха не только холодного, но и тёплого периода года – в среднем на 0,9 и 1,4 °C соответственно. Теплообеспеченность сельскохозяйственных культур повысится повсеместно: суммы активных температур возрастут на 300–500 °C, начало вегетационного периода сдвинется на более ранние сроки – от 5 до 8 суток. В целом продолжительность вегетационного и безморозного периодов увеличится на 11–17 суток, что, вероятно, приведёт к улучшению условий проведения сельскохозяйственных работ и уменьшению потерь продукции при уборке урожая.

Для характеристики увлажнённости используются агрометеорологические показатели в виде тех или иных функций от осадков и максимально возможного испарения (испаряемости). Анализ динамики увлажнённости на рассматриваемой территории выполнялся по следующим показателям: сумма осадков за вегетационный период ($R_{>5}, ^\circ\text{C}$), фактическое (АЕ) и потенциальное испарения (РЕ), гидротермический коэффициент Г. Т. Селянинова (ГТК), влагозапасы пахотного слоя почвы (0–20 см) на дату возобновления вегетации (W_{20}), влагозапасы почвы в слое 0–100 см на середину июля, число суток вегетационного периода с влажностью

пахотного слоя почвы 10 мм и ниже (nW_{10}). Как показывает анализ данных, при реализации ансамблевого сценария на территории земледельческой зоны РФ можно ожидать некоторого роста засушливости, которая проявляется через уменьшение гидротермического коэффициента (ГТК) и рост потенциального и фактического испарения (РЕ и АЕ). Изменения значений ГТК колеблются по территории в диапазоне от -0,09 (Южный ФО) до -0,25 (Северо-Западный ФО) к 2053 г. (табл. 11.7). Следует заметить, что величина ГТК, равная 0,6 и менее, является одним из критериев отнесения территории субъекта РФ неблагоприятной для производства сельскохозяйственной продукции территории. Снижение запасов влаги в почве на начало вегетации (W^4_{20}) и на середину июля (W^7_{100}) практически на всей рассматриваемой территории (за исключением отдельных областей Сибирского ФО) также указывает на ухудшение условий влагообеспеченности посевов сельскохозяйственных культур.

Таблица 11.7

**Ожидаемые изменения показателей увлажнённости
(отклонения от современного уровня) на территории России
на периоды 2011–2030 и 2034–2053 гг. по ансамблевому сценарию
(вариант антропогенного воздействия RCP8.5)**

Федеральный округ	Скорость изменения, ед./10 лет						
	$R_{\geq 5^\circ\text{C}}, \%$	АЕ, мм	РЕ, мм	ГТК, ед.	$W^4_{20}, \text{мм}$	$W^7_{100}, \text{мм}$	$nW_{10}, \text{сут}$
	2011–2030 гг.						
Северо-Западный	8	73	121	-0,15	-2	-9	4
Центральный	7	28	88	-0,10	-2	-4	2
Приволжский	7	22	85	-0,06	-2	-1	2
Южный	6	3	40	-0,05	-2	0	3
Уральский	6	17	107	-0,16	-3	-2	6
Сибирский	7	36	105	-0,08	1	-3	3
Дальневосточный	7	14	82	-0,03	-4	-13	0
Россия	7	27	88	-0,09	-2	-3	3
	2034–2053 гг.						
Северо-Западный	12	96	166	-0,25	-3	-8	4
Центральный	11	39	133	-0,18	-3	-5	5
Приволжский	11	27	123	-0,12	-1	-2	3
Южный	7	4	62	-0,09	-2	-1	4
Уральский	7	34	169	-0,22	-2	0	9
Сибирский	9	51	164	-0,15	1	-3	5
Дальневосточный	9	33	138	-0,11	-4	-14	0
Россия	10	37	132	-0,15	-2	-3	5

Расчёты показывают, что число суток вегетационного периода, когда влажность пахотного слоя почвы снижается до 10 мм, будет увеличиваться на 3 суток к 2030 г. и на 5 суток к 2053 г. (табл. 11.7). По федеральным

округам и по России в целом ожидаемые изменения этого показателя положительны и колеблются от 0 (Дальневосточный ФО) до 9 суток (Уральский ФО). Территория северо-западных и центральных областей России, где отмечается увеличение числа дней с критической степенью увлажнённости пахотного слоя до 4 суток, относится к зоне достаточного увлажнения.

Прогнозируемый рост теплообеспеченности сельскохозяйственных культур может способствовать росту сельскохозяйственного потенциала. Ожидаемое незначительное снижение уровня увлажнённости территории к 2030 г. (S2) не должно существенно сказаться на урожайности зерновых культур, за исключением аномально засушливых лет. В то же время прогнозируемый рост аридности территории земледельческой зоны России к концу столетия, вероятно, окажет отрицательное влияние на продуктивность сельскохозяйственных культур.

11.5. Изменения продуктивности и устойчивости сельскохозяйственного производства

Расчёты оценок изменения продуктивности по климатическим сценариям проводились с использованием разработанной динамической модели формирования урожайности сельскохозяйственных культур в рамках имитационной системы «климат–почва–урожай». Рассматривались два показателя продуктивности – урожайность яровых зерновых культур и биоклиматический потенциал (возможная суммарная урожайность биомассы кормовых многоукосных трав).

В табл. 11.8 и 11.9 приведены оценки изменений продуктивности сельскохозяйственных культур, рассчитанные по федеральным округам России по ансамблевому сценарию для периодов: 2011–2030 гг. (S2), 2034–2053 гг. (S3), 2041–2060 гг. (S4), 2080–2099 гг. (S5). Оценки получены при двух вариантах антропогенного воздействия RCP 4.5 и RCP 8.5 (Павлова В. Н., 2013).

Анализ результатов показывает, что при климатических изменениях, согласно ансамблевому сценарию (вариант RCP 4.5), биоклиматический потенциал в первой трети текущего столетия (S2) увеличится на 8,2 %, по сравнению с современным уровнем, а к концу столетия (S5) – на 25,1 % на территории земледельческой зоны России (табл. 11.8). По отдельным федеральным округам оценки колеблются значительно: максимальный прирост БКП отмечается в Северо-Западном ФО для всех временных срезов S2, S3, S4, S5 (13,2...43,3 %), минимальный – в Южном ФО, на юге зернового пояса России (Краснодарский и Ставропольский края, Ростовская область). По расчётам здесь до середины столетия (S3) будет наблюдаться тенденция к незначительному снижению уровня биоклиматического потенциала (-1,1 %), которая затем сменится положительной тенденцией (5,8 % к 2099 г.).

Таблица 11.8

Изменение продуктивности сельскохозяйственных культур по федеральным округам России в XXI веке по ансамблевому сценарию (RSP 4.5) при прогнозируемых уровнях CO₂

Федеральный округ	Изменение продуктивности, %							
	Биоклиматический потенциал				Зерновые			
	Период прогнозирования							
	S2	S3	S4	S5	S2	S3	S4	S5
	Рост содержания CO ₂ , %							
	20	35	43	67	20	35	43	67
Северо-Западный	13,2	23,0	26,8	43,3	18,7	25,4	27,0	38,0
Центральный	8,8	15,6	18,7	28,7	9,4	11,9	13,8	18,3
Приволжский	10,5	13,0	15,8	24,6	3,1	,3	1,8	4,5
Южный	-,2	-1,1	1,0	5,8	-5,1	-5,3	-5,0	-1,2
Уральский	6,2	10,7	16,7	26,2	-2,7	-7,7	-6,3	-4,8
Сибирский	9,2	13,5	17,3	27,0	-,8	-3,8	-1,8	1,2
Дальневосточный	8,6	12,9	15,5	27,9	13,0	17,0	19,6	30,8
Россия	8,2	12,3	15,6	25,1	3,6	3,0	4,4	8,5

При более «жёстком сценарии» RCP 8.5 урожайность зерновых культур снизится на 17,6 % к концу столетия, по сравнению с базовым периодом. В то же время реакция биоклиматического потенциала при реализации этого сценария незначительна – его уровень снизится на 1 % (табл. 11.9).

Таблица 11.9

Изменение продуктивности сельскохозяйственных культур по федеральным округам России в XXI веке по ансамблевому сценарию (RSP 8.5) при прогнозируемых уровнях CO₂

Федеральный округ	Изменение продуктивности, %							
	Биоклиматический потенциал				Зерновые			
	Период прогнозирования							
	S2	S3	S4	S5	S2	S3	S4	S5
	Рост содержания CO ₂ , %							
	28	39	51	80	28	39	51	80
Северо-Западный	13,4	22,3	26,1	21,4	15,9	21,9	20,4	14,2
Центральный	7,8	12,9	12,0	,1	6,9	8,0	4,9	-9,5
Приволжский	9,8	11,4	10,6	-2,8	2,0	-1,0	-5,0	-25,6
Южный	-1,4	-3,4	-6,6	-14,1	-5,8	-8,3	-8,0	-10,3
Уральский	6,7	11,5	12,7	-2,7	-3,5	-7,1	-14,2	-37,9
Сибирский	8,8	14,4	13,0	1,1	-1,4	-3,7	-9,6	-27,3
Дальневосточный	8,9	11,7	10,4	2,7	11,7	16,2	16,0	3,4
Россия	7,7	11,1	10,5	-0,8	2,2	1,1	-2,4	-17,6

К концу столетия при таком варианте глобального потепления 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 %) федеральных округах (табл. 11.9).

Наряду с приведёнными данными, свидетельствующими о достаточно позитивной реакции биоклиматического потенциала на ожидаемые изменения климата, 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.

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.

На рис.11.7–11.10 представлены карты, иллюстрирующие пространственное распределение изменений урожайности яровых зерновых культур и биоклиматического потенциала на территории земледельческой зоны России при реализации ансамблевого сценария при антропогенном воздействии RCP45 и RCP85 на периоды 2011–2030 и 2080–2099 гг.

Рассмотрим обобщённые оценки реакции урожайности сельскохозяйственных культур на возможные изменения климата и рост содержания CO₂ в атмосфере по различным сценариям: ансамблевому сценарию и сценарию ИГКЭ РАН на момент увеличения глобальной температуры воздуха на 1,5 °С, по сравнению с современным уровнем по России в целом (в % от современного уровня) (табл. 11.10).

Таблица 11.10

Изменение биоклиматического потенциала и продуктивности зерновых культур в XXI веке по климатическим сценариям на территории России (RCP 8.5)

Сценарий	Изменение продуктивности, % от современного уровня			
	Период, годы			
	2011–2030 гг.	2028–2047 гг.	2041–2060 гг.	2080–2099 гг.
	Биоклиматический потенциал			
AN_31	7,7	11,1	10,5	-0,8
ИГКЭ	–	8,5	–	–
GFDL CM3	3,9	7,2	3,4	-6,6
	Зерновые			
AN_31	2,2	1,1	-2,4	-17,6
ИГКЭ	–	2,9	–	–
GFDL CM3	-0,9	-4,5	-8,4	-16,4

Общий вывод, следующий из полученных оценок, – к середине XXI века глобальное потепление по всем рассматриваемым климатическим сценариям приведёт к росту БКП территории России на 7,2–11,1 %, по сравнению с современным уровнем. К концу текущего столетия уровень биоклиматического потенциала может снизиться до -6,6 % (сценарий GFDL CM3). Заметим, что расчёт значений БКП современной земледельческой зоны выполнялся при естественном увлажнении и современном уровне плодородия почв.

К концу столетия возможные потери продуктивности зерновых культур России в результате глобального потепления (при учёте положительного влияния обогащения атмосферы углекислым газом) могут составить 16–18 %. При расчётах по сценарию GFDL-CM3 выявляется отрицательный тренд продуктивности зерновых культур, от -0,9 % для периода 2011–2030 гг. до -16,4 % для периода 2080–2099 гг.

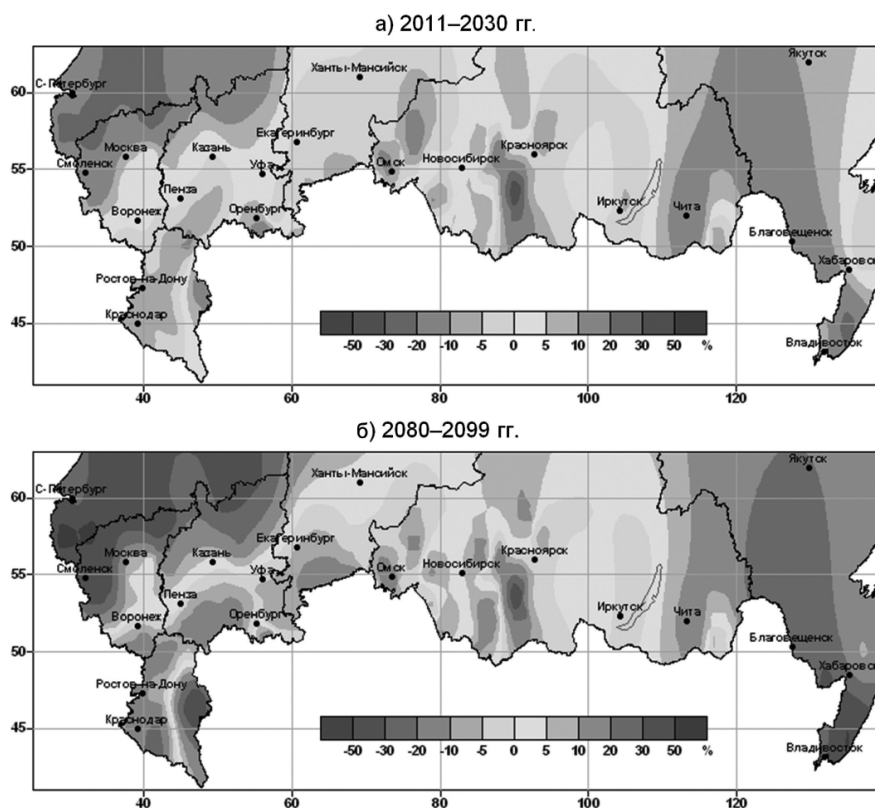
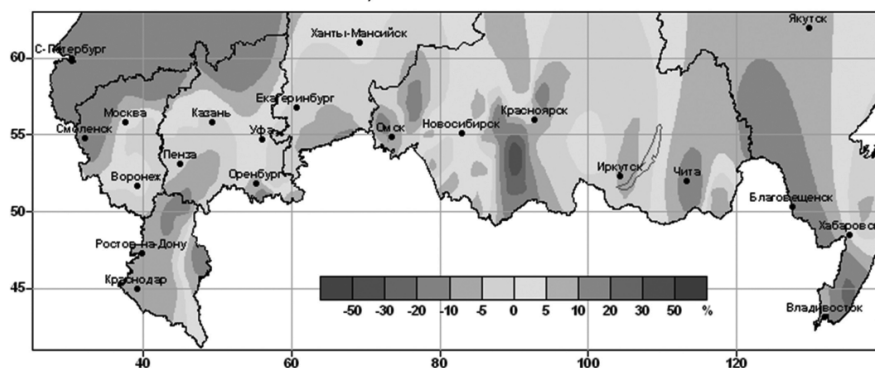


Рис. 11.7. Изменение продуктивности яровых зерновых культур (%) на территории России в XXI веке по ансамблевому сценарию изменения климата (RCP 4.5) на период: (а) 2011–2030 гг. и (б) 2080–2099 гг.

а) 2011–2030 гг.



б) 2080–2099 гг.

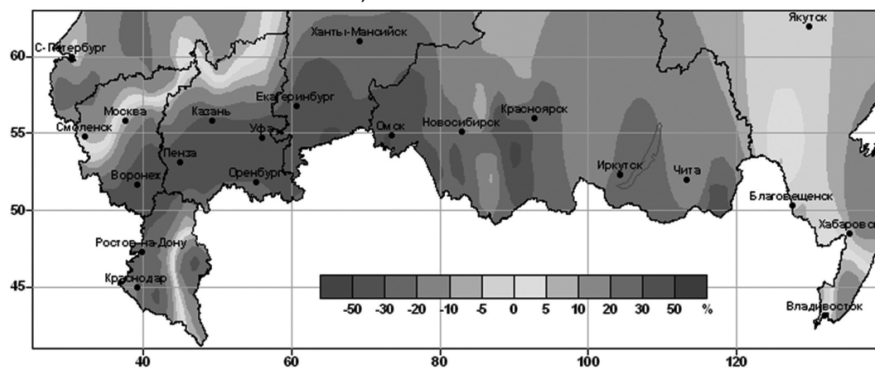
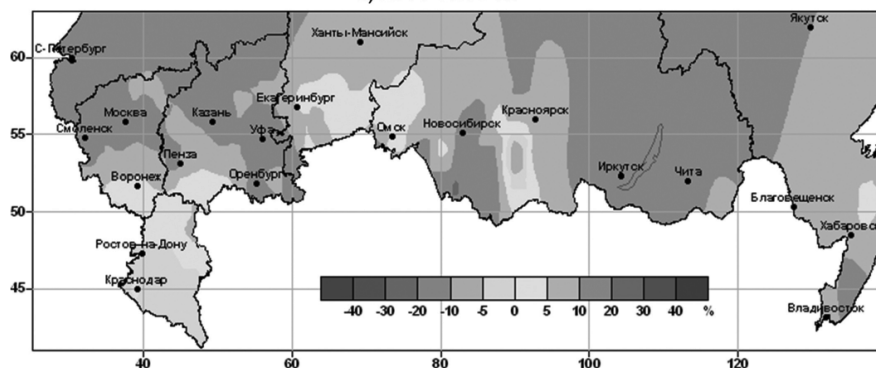


Рис. 11.8. Изменение продуктивности яровых зерновых культур (%) на территории России в XXI веке по ансамблевому сценарию изменения климата (RCP 8.5) на период: (а) 2011–2030 гг. и (б) 2080–2099 гг.

а) 2011–2030 гг.



б) 2080–2099 гг.

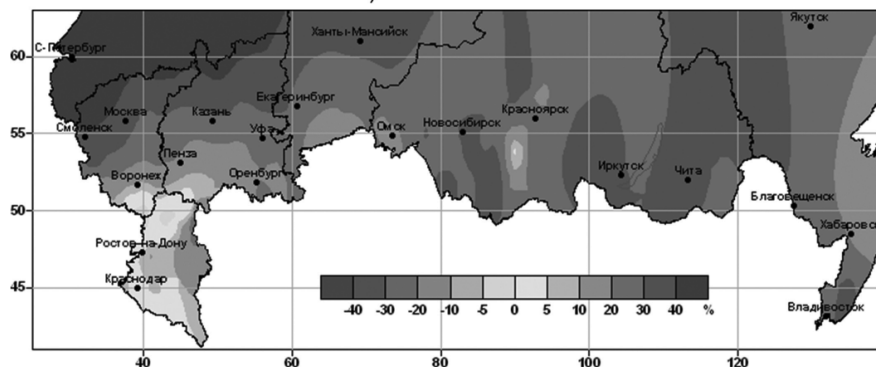


Рис. 11.9. Изменение продуктивности биоклиматического потенциала (%) на территории России в XXI веке по ансамблевому сценарию изменения климата (RCP 4.5) на период: 2011–2030 гг. (а) и 2080–2099 гг. (б)

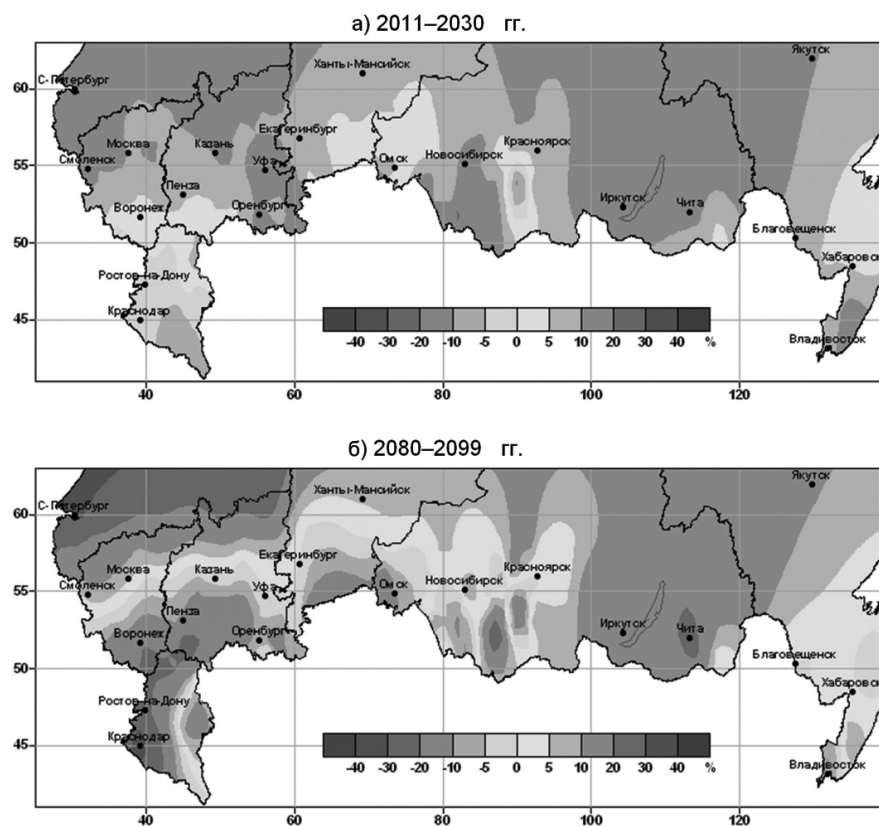


Рис. 11.10. Изменение биоклиматического потенциала культур (%) на территории России в XXI веке по ансамблевому сценарию изменения климата (RCP 8.5) на период: 2011–2030 гг. (а) и 2080–2099 гг. (б)

Вместе с тем необходимо отметить, что все оценки получены для современного агротехнического уровня сельскохозяйственного производства без учёта возможности его адаптации к наблюдаемым и ожидаемым изменениям климата. Как показывают исследования последних лет, потенциал адаптации мирового сельского хозяйства и России, в частности к современному потеплению климата, достаточно велик (IPCC, 2007; Schimmelpfennig et al., 1996; Акимов А., 2013; Проблема адаптации, 2012; Экономический анализ, 2013).

Глава 12

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ О ПОСЛЕДСТВИЯХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА В ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

12.1. Прогнозирование продуктивности сельского хозяйства на основании климатического мониторинга

Оценка текущих агрометеорологических условий формирования урожая всегда была в центре внимания агрометеорологов оперативных подразделений Росгидромета и решалась субъективно на основе принятых методов оценок и прогнозов, опыта и знаний специалиста. Динамические модели позволяют получать объективные количественные оценки для решения этой задачи.

Чтобы оценить условия формирования урожая в течение какого-либо отрезка вегетационного периода, следует определить степень их отличия от эталонных условий, в качестве которых могут быть заданы: норма, метеорологический оптимум, условия прошлого года и т.д. Естественной мерой отличия представляется отношение урожаев, рассчитанных по фактическим и эталонным данным за оцениваемый период:

$$Y_k = \frac{y}{y_k} \cdot 100 \%, \quad (12.1)$$

где Y_k – оценка агрометеорологических условий (мера отличия от условий k -го эталона); y и y_k – урожайность, рассчитанная по фактическим и эталонным данным соответственно. Для определения Y_k необходимо также задать метеорологические данные оставшейся части вегетационного периода – от даты расчёта до созревания. Как только этот вопрос решён (например, путём привлечения климатических норм в качестве эталона для оцениваемого периода или в качестве прогноза для оставшейся части вегетационного периода), реализация метода сводится к последовательному расчёту ряда условных прогнозов урожайности: $y_0, y_1, \dots, y_i, \dots, y_s$.

Здесь y_0 – прогнозируемая урожайность на дату всходов, y_1 – на конец первой декады, y_i – на конец i -й декады, y_s – на дату созревания. Первый прогноз y_0 рассчитывается полностью по климатическим данным и по средним влагозапасам на дату всходов, последний y_s , естественно, – целиком по фактическим метеорологическим данным, любой промежуточный – по фактической информации до даты прогноза и по климатическим данным после этой даты.

Рассчитывается следующая система оценок, дающая содержательную интерпретацию информации, ряду последовательных прогнозов урожайности:

- оценки декадных отрезков вегетационного периода $\frac{y_i}{y_{i-1}} \cdot 100 \%$;
- оценки прошедшей части вегетационного периода $\frac{y_i}{y_1} \cdot 100 \%$;
- оценки прошедшей части сельскохозяйственного года $\frac{y_i}{y_0} \cdot 100 \%$.

Важные частные случаи этих показателей таковы:

- оценка весенних влагозапасов $\frac{y_1}{y_0} \cdot 100 \%$;
- интегральная оценка вегетационного периода $\frac{y_s}{y_1} \cdot 100 \%$;
- интегральная оценка сельскохозяйственного года $\frac{y_s}{y_0} \cdot 100 \%$.

Равенство $Y_k = 100 \%$ означает, что агрометеорологические условия оцениваемого периода по влиянию на конечный урожай эквивалентны (точнее, эквифинальны¹) заданным эталонным условиям при фиксированном сценарии ожидаемых метеорологических условий.

Оценки зависят от выбранного эталона, как от масштаба, и в значительно меньшей степени – от метеорологического прогноза на оставшуюся часть вегетационного периода, поскольку эта информация используется одновременно при расчёте числителя и знаменателя любой оценки.

Задача прогнозирования урожая сложнее задачи оценивания текущих агрометеорологических условий, так как для её корректного решения необходим прогноз динамики гидрометеорологических условий до конца вегетационного периода. При любом способе прогноза погодных условий необходимо, чтобы рассчитанные по этим данным оценки урожайности были свободны от систематической ошибки, возникающей за счёт осреднения метеорологической информации. Численные эксперименты показали, что значения прогнозируемого урожая из-за нелинейности моделей могут существенно завышаться, если вместо фактических суточных значений метеозаписей используются осреднённые данные (например за декаду). Устранить систематическую ошибку прогноза урожайности можно в результате моделирования ансамбля реализаций вектора аномалий погодных условий за оставшуюся часть вегетационного периода. Урожай рассчитывается по каждой из реализаций, а затем осредняется. В качестве норм берутся данные метеорологического прогноза или при его отсутствии – климатические данные. Подробнее о методах расчётов и прогнозов в агрометеорологии рассказано в работе «Основы сельскохозяйственной метеорологии» в томе II, опубликованном в двух книгах (2012).

Приведём пример использования модели «погода–урожай» в квази-прогностическом режиме – табл.12.1 (Сиротенко О.Д., Абашина Е.В., 1982).

¹ Эквифинальный – т.е. равноценный, равнозначный конечной величине.

Таблица 12.1

**Динамика прогнозируемой урожайности яровой пшеницы, ц/га,
по данным агрометеостанции «Ершов» Саратовской области
(Δ – средняя по модулю ошибка прогноза)**

Год	Дата составления прогноза									
	Всходы	май			июнь			июль		Уборка
		декада			декада			декада		
		I	II	III	I	II	III	I	II	
1972	4,6	4,6	3,7	3,1	1,9	1,2	0,8	0,5	–	0,5
1973	11,1	–	11,2	12,2	12,2	10,6	11,1	16,3	19,2	19,6
1974	14,3	14,5	13,2	13,0	13,9	14,6	22,3	21,6	21,1	21,1
1975	8,2	6,9	4,9	4,0	1,7	1,0	0,9	0,9	–	0,9
1976	4,3	5,9	5,2	4,8	4,3	7,0	7,3	8,6	10,4	10,9
1977	13,5	13,5	10,7	10,5	5,8	6,3	9,4	7,9	8,0	8,0
1978	16,1	–	16,5	16,8	16,9	15,7	17,0	20,3	21,5	23,2
1979	15,7	–	15,4	13,9	11,9	9,4	8,5	9,7	11,3	10,7
1980	14,4	–	14,2	13,1	12,7	11,7	11,6	8,1	7,4	7,2
1981	16,2	–	15,6	15,1	12,3	10,2	6,6	6,3	5,8	5,6
Δ	6,87	–	6,03	5,48	4,53	3,98	2,88	1,17	–	–

При прогнозировании урожая яровой пшеницы до даты составления прогноза задавались фактические метеорологические данные, а далее – до созревания яровой пшеницы – использовалась климатическая информация. Материалы ежедекадных прогнозов за 10 лет на основании динамической модели (табл. 12.1) представляют широкий спектр агрометеорологических условий формирования урожая, характерный для континентального климата. Динамика охватывает условия катастрофических засух 1972 и 1975 гг. и условия формирования рекордных урожаев 1973, 1974 гг., и особенно 1978 года. Данные этой таблицы позволяют оценить прогностическую значимость «предыстории посева». Так, средняя (по модулю) ошибка прогноза к 20 июня (дате составления официальных прогнозов) уменьшилась практически в два раза, по сравнению с прогнозом на дату всходов. Начальные влагозапасы почвы как предиктор «срабатывают» не всегда. Так, в 1975 г. по начальным влагозапасам ожидался вдвое больший урожай, чем в 1976 году. Однако фактически в 1975 г. урожай полностью погиб, а в 1976 г. собран средний для данной зоны урожай. Величины Δ позволяют в первом приближении оценить роль метеорологического прогноза. Так, при наличии точного прогноза на июнь средняя ошибка прогнозирования урожая уменьшилась бы более чем на 30 % (с 6 до 4 ц/га). Из данных табл. 12.1 следует, что и декадные прогнозы погоды могут заметно повысить точность прогнозирования урожайности.

Система «климат–почва–урожай» позволяет осуществлять мониторинг агроклиматических показателей, непосредственно характеризующих

условия формирования урожайности, а также рассчитывать показатели продуктивности – климатически обусловленные урожайность и биоклиматический потенциал территории.

Рассмотрим в качестве примера оценки агроклиматических условий 2010 года как продукции климатического и агроклиматического мониторинга. Расчёты выполнены с использованием данных наблюдений по температуре воздуха месячного разрешения и месячных сумм осадков на сети 455 метеорологических станций России, стран СНГ и Балтии, из которых 198 станций расположены в земледельческой зоне РФ. Все оценки воспроизведены по данным «Доклада об особенностях климата на территории России за 2010 г.» (<http://climatechange.igce.ru>).

Особенности температурного режима в 2010 году

В среднем по территории России, среднегодовая температура приземного воздуха в 2010 г. превысила норму 1961–1990 гг. на 0,65 °С, что на 0,11 °С выше температуры 2009 года. Самым тёплым для России был 2007 г. (аномалия температуры +2,06 °С), за ним – 1995 г. (аномалия +2,04 °С) и 2008 г. (аномалия +1,88 °С). В ранжированном (по убыванию) временном ряду среднегодовых температур, осреднённых по территории России (за период наблюдений с 1936 г.), 2010 г. занимает всего лишь 22 место, так что этот год может квалифицироваться как незначительно теплее нормы. Однако сложился он из экстремально холодной зимы (8-е место по рангу холодных лет), рекордно жаркого лета (впервые с 1936 г.) и экстремально тёплой осени (5-е место по рангу тёплых лет). При этом во все три сезона экстремальные аномалии охватывали почти всю российскую территорию, кроме Восточной Сибири и Приамурья (зимой), Западной Сибири (летом и осенью) и Средней Сибири (осенью).

Хотя предшествующий 2009 г. по среднегодовой температуре отличался от 2010 г. всего на 0,11 °С (23 по рангу тёплых лет), но ни один из его сезонов не относился к экстремальным не только в среднем по России, но и по каждому из рассматриваемых регионов. Жаркое лето 2010 г. в России отмечается как одна из самых крупных в мире климатических аномалий текущего года. Для России в целом, для регионов европейской части страны (ЕЧС), Приамурья и Приморья таким жарким лето было впервые, для Восточной Сибири – это второй максимум, не дотянувший до рекордного 1991 г. всего 0,1 °С. Основной климатической особенностью летнего сезона 2010 г. были две области «необыкновенной жары» – в европейском и восточно-сибирском регионах. Эпицентром летней жары 2010 г. в России следует считать центр и юг ЕЧС в июне-июле. В Москве 28 июля 2010 г. зафиксирован новый абсолютный максимум температуры +38,2 °С (предыдущий максимум температуры +35,3 °С наблюдался 21 июля 1981 г.). Здесь дневные температуры держались выше

95-го процентиля¹ непрерывно с 8 июля до 17 августа (подряд 41 день). При этом с 14 июня по 10 августа (27 дней) они превышали также и календарные ежедневные максимумы 1961–1990 гг. с одним 3-дневным перебором с 29 по 31 июля (рис. 12.1).

Интегральным показателем агрометеорологических условий вегетационного периода является климатически обусловленная урожайность зерновых культур. Она рассчитана с помощью динамической модели «погода–урожай» на основании метеорологических данных, что даёт возможность исключить влияние факторов, не связанных с погодными условиями (удобрения, сроки сева, условия уборки урожая и т. д.).

Сохраняется тренд к повышению годовых температур на всей территории страны. В зимнем сезоне намечались некоторые признаки замедления темпов потепления; появилась дополнительная область со слабыми отрицательными трендами в Западной Сибири, при этом сохранилась и ранее выявленная область похолодания на северо-востоке страны, уменьшилась скорость потепления в европейском регионе и в Предбайкалье. Сохранилась также очень слабая тенденция к похолоданию на юге Западной Сибири летом. Несколько усилился тренд к потеплению летом на территории ЕЧС и осенью на юге Приволжского федерального округа и Западной Сибири.

Особенности режима осадков в 2010 году

Количество осадков, выпавших в целом за 2010 г. по всей территории России, было близким к норме. Годовые суммы осадков ниже нормы были на территории ЕЧС и в Западной Сибири, в остальных регионах – выше нормы. Наиболее влажным 2010 г. был в регионе Приамурье и Приморье – на шестом месте по количеству годовых осадков и на третьем месте – по количеству зимних осадков. Для России в целом самым влажным был декабрь – максимальное количество осадков с 1936 года. Лето 2010 года в целом для России попадает в число восьми самых сухих, а для региона ЕЧС лето оказалось третьим в ряду наиболее сухих лет (после 1938 и 1972 гг.). Самыми сухими месяцами были для России апрель и июль (третье и второе место по рангу сухих лет). Сухая погода в сочетании с беспрецедентной жарой в течение летнего сезона привели к засухе и пожарам в Центральном, Южном, Приволжском и Уральском ФО. Линейные тренды в ходе осадков на интервале 1976–2010 гг. ответственны за малую долю межгодовой изменчивости и указывают на преимущественную тенденцию к слабому увеличению осадков на территории России. На северо-востоке Восточной Сибири обнаруживается слабая тенденция к уменьшению осадков зимнего и летнего периодов.

¹ Процентиль (квантиль) – в математической статистике – число такое, что заданная случайная величина не превышает его лишь с фиксированной вероятностью.

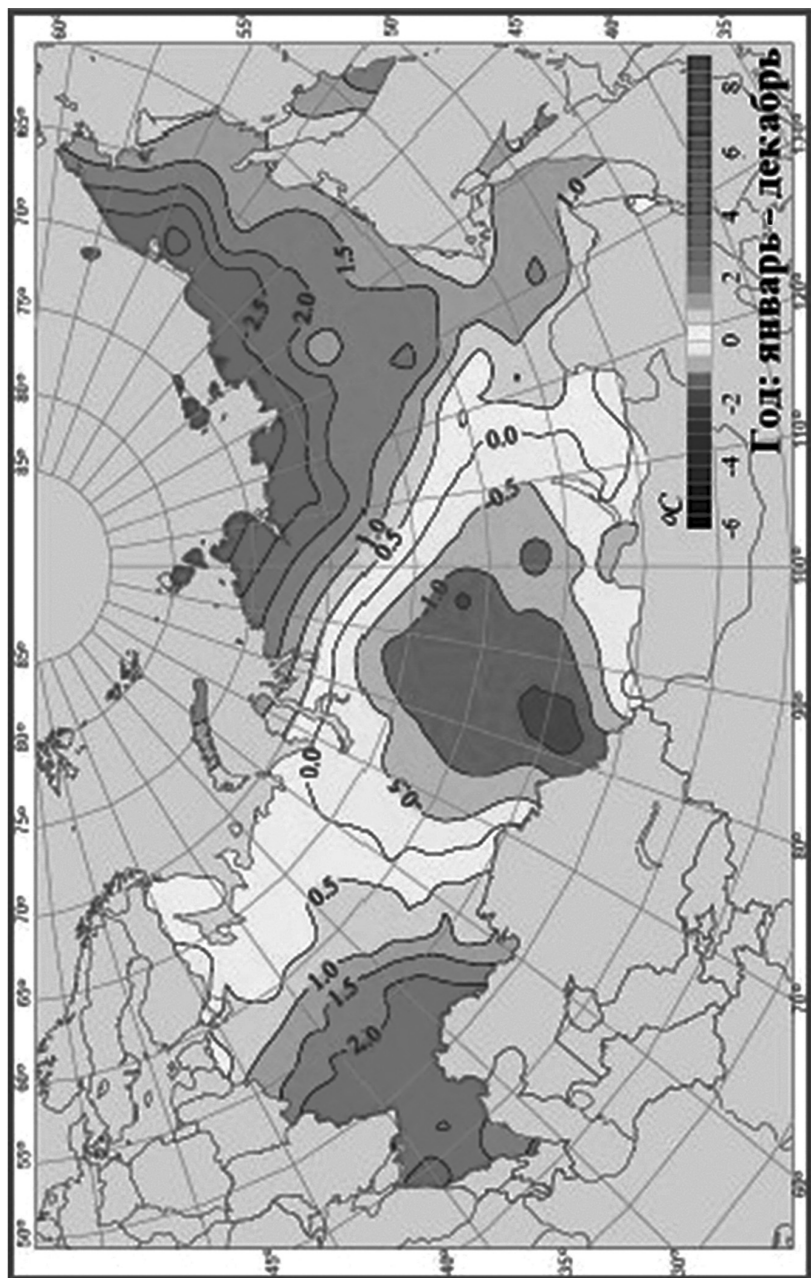


Рис. 12.1. Поля аномалий средней годовой температуры приземного воздуха на территории России в 2010 г.
(отклонения от средних за 1961 – 1990 гг.)

Агроклиматические условия 2010 года

2010 год характеризуется прежде всего крупномасштабной засухой, которая привела к значительному снижению урожайности яровых зерновых культур практически на всей Европейской территории России. Сопоставление контрастных по агрометеорологическим условиям, но хронологически близких лет – неурожайного 2010 г. и рекордного по урожайности 2008 г. – представляет редкую возможность оценить диапазон влияния погодных условий на продуктивность сельского хозяйства России при практически неизменном уровне агротехники. Падение валового сбора зерна на 50 млн т (почти в 2 раза) от 2008 г. к 2010 г. может служить оценкой возможного воздействия междугодовой изменчивости климата на продуктивность сельского хозяйства России. Для сравнительной оценки значимости засухи 2010 г. представим выборку лет с локальными минимумами урожайности, начиная с 1951 года. Приведённые в табл. 12.2 ежегодные потери урожайности от засух рассчитаны в системе «климат–почва–урожай», что позволило исключить агротехнические тренды и выделить влияние климатических факторов. Данные табл. 12.2 показывают, что засуха 2010 г. на европейской части России привела к недобору порядка 50 % урожая, что превышает потери за счёт засух 1972 и 1981 гг., составивших, соответственно, 43 и 49 % от уровня урожая 2008 года. Таким образом, можно утверждать, что засуха 2010 г. оказалась наиболее значимой за последние 60 лет по расчётным потерям сельскохозяйственной продукции.

Таблица 12.2

Сравнительная оценка потерь урожайности яровых зерновых в засушливые годы (изменения урожайности даны в % от последнего максимума в 2008 г.)

Федеральный округ	Потери урожайности в результате засух, %						
	1951	1972	1975	1981	1995	1998	2010
Центральный	-16,1	-45,9	-36,1	-53,3	-25,6	-34,2	-50,7
Северо-Западный	0,5	-39,7	2,0	-24,3	-9,7	-13,5	-35,3
Приволжский	-22,0	-35,6	-44,0	-58,1	-28,9	-60,0	-61,2
Южный	-18,1	-52,3	-49,0	-59,6	-30,3	-43,0	-56,5
ЕТР	-13,9	-43,4	-31,8	-48,8	-23,6	-37,7	-50,9
Уральский	27,5	72,8	-7,5	-5,2	27,2	-28,5	-11,4
Сибирский	12,2	50,4	0,9	9,2	19,9	-8,5	23,2
Дальневосточный	47,9	60,5	39,5	54,6	36,5	44,4	8,5

В 2010 г. расчётная климатообусловленная урожайность яровых зерновых культур (рис. 12.2) была ниже соответствующей урожайности 2008 г. более чем на 80 % в Самарской, Оренбургской, Пензенской, Саратовской областях и Республике Татарстан. Значительные, превышающие 60–70 %, потери урожайности зерновых культур, по сравнению с 2008 годом, наблюдались в Республике Башкортостан, Республике Мордовия, Чувашской Республике и Республике Калмыкия, а также в Курской,

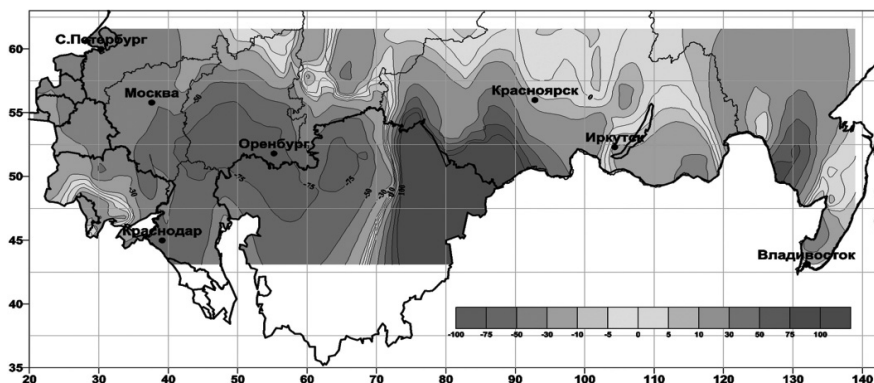


Рис. 12.2. Отклонения (в %) климатообусловленной расчётной урожайности яровых зерновых культур в 2010 г. от уровня 2008 г.

Липецкой и Тамбовской областях, Краснодарском и Ставропольском краях.

Для интегральной характеристики атмосферных засух часто используется гидротермический коэффициент (ГТК), представляющий собой отношение суммы осадков к сумме температур воздуха, умноженной на 0,1, который тесно связан с урожайностью зерновых культур. При сильной атмосферной засухе, когда за май-июнь $ГТК \leq 0,60$, урожайность яровой пшеницы не превышает 10 ц/га. В 2010 г. сильная атмосферная засуха охватила 14 субъектов РФ, а средняя по интенсивности засуха ($ГТК = 0,61 \dots 0,80$) была отмечена ещё в 6 субъектах РФ. Карта распределения ГТК за май-июнь 2010 г. представлена на рис. 12.3. На территории Северо-Западного федерального округа, а также в Сибири значимых проявлений атмосферной засухи в мае-июне 2010 г. не зафиксировано.

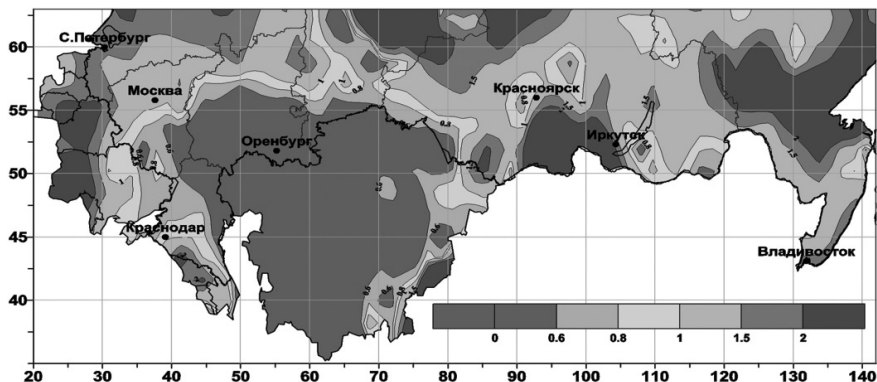


Рис. 12.3. Распределение гидротермического коэффициента за май-июнь 2010 г.

Обобщённые сравнительные оценки агрометеорологических условий 2010 и 2008 г. на территории России представлены в табл. 12.3. Несмотря на то, что весной 2010 г. выпало меньше осадков, чем в 2008 г., запасы продуктивной влаги на дату возобновления вегетации озимых культур в эти годы оказались практически идентичными. В Приволжском и Южном федеральных округах почвенная засуха средней интенсивности (влагозапасы ниже 15 мм) началась в мае. Сильная засуха в 2010 г. охватила территорию Центрального, Приволжского, Южного и Уральского федеральных округов в июне и июле, когда запасы продуктивной влаги в пахотном слое почвы упали ниже 10 мм, что свидетельствует о наступлении почвенной засухи высокой интенсивности. Распределение запасов продуктивной влаги в пахотном слое почвы в эти месяцы за 2010 г. представлено на рис. 12.4. В июле почвенная засуха средней интенсивности распространилась и на ряд регионов Северо-Западного федерального округа.

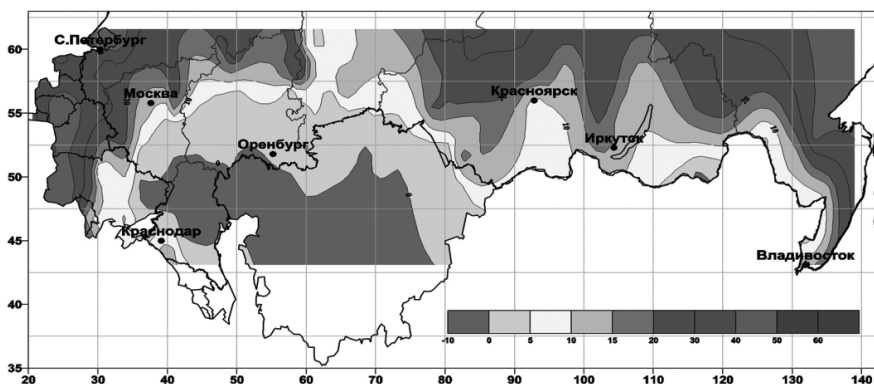
Таблица 12.3

Сравнительная характеристика агрометеорологических условий 2010 и 2008 г.

Федеральный округ	Температура, °С		Осадки, мм		ГТК	N, сутки	Запасы продуктивной влаги в пахотном слое почвы, мм				
	весна	лето	весна	лето			Начало вегетации озимых	май	июнь	июль	август
2010 год											
Центральный	7,5	22,7	104	123	0,61	71	44	20	10	5	11
Северо-Западный	4,3	18,1	125	211	1,26	76	59	39	29	12	21
Приволжский	6,1	22,7	80	85	0,47	72	37	13	6	3	8
Южный	11,2	26,2	172	99	0,42	89	33	12	4	4	4
Уральский	3,7	18,4	72	119	0,72	84	29	17	7	3	7
Сибирский	-0,8	16,3	76	191	1,30	98	46	30	16	20	16
Дальневосточный	-0,7	16,6	167	316	2,16	85	51	41	14	27	31
Беларусь	8,3	21,3	152	230	1,18	82	54	40	31	26	25
Россия	2,9	18,9	108	177	1,13	82	42	23	12	10	13
2008 год											
Центральный	7,9	18,1	164	225	1,39	99	44	26	15	21	18
Северо-Западный	3,5	15,2	129	263	1,90	97	52	35	22	23	31
Приволжский	7,1	18,8	117	190	1,15	101	42	19	15	14	11
Южный	12,4	23,7	199	148	0,69	97	30	22	8	13	3
Уральский	4	17,6	104	183	1,15	87	29	26	11	7	12
Сибирский	2,3	17,0	70	203	1,32	87	43	27	14	16	18
Дальневосточный	2,4	16,0	164	231	1,69	93	41	33	16	27	30
Беларусь	8,1	18,2	225	191	1,14	99	46	43	30	29	25
Россия	4,3	17,4	125	211	1,40	94	40	26	14	17	17

Примечание. ГТК – гидротермический коэффициент за период со среднесуточной температурой выше 10 °С; N – продолжительность периода всходы–уборка яровых зерновых культур.

а) июнь



б) июль

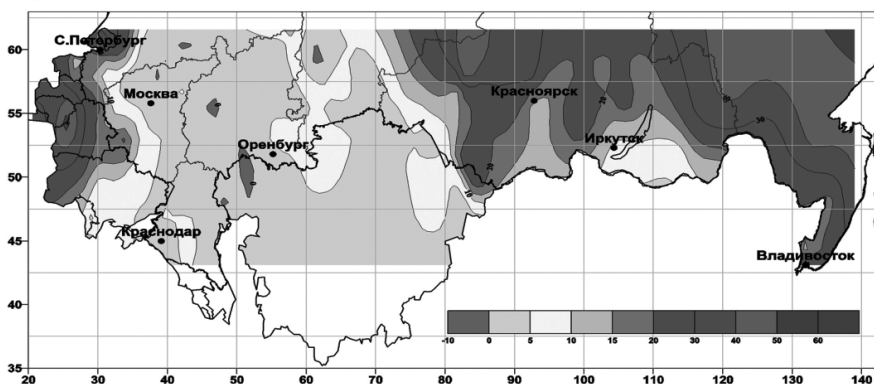


Рис. 12.4. Запасы продуктивной влаги в слое 0–20 см (мм) в июне (а) и июле (б) 2010 г.

В августе сильная почвенная засуха охватывала 29 регионов, включая, наряду с Европейской территорией страны, ряд областей Западной Сибири.

Весной 2010 и 2008 г. температурный режим на ЕТС существенно не различался. В 2010 г. в целом по стране было самое жаркое лето за последние 120 лет. В Южном, Северо-Кавказском и Приволжском федеральных округах 2010 год стал вторым самым тёплым годом за этот период.

В Центральном, Приволжском и Южном федеральных округах летняя температура воздуха в 2010 г. оказалась выше температуры рекордного по урожайности 2008 г. на 4,6, 3,9 и 2,5 °С соответственно. Летние осадки в засушливом 2010 г. составили 50–60 % от осадков влажного

2008 года. Указанные различия в температуре воздуха и атмосферных осадков – главная причина недобора 50 млн т зерна в 2010 г., по сравнению с 2008 годом. Помимо недостаточной влагообеспеченности недобор зерна усугубила рекордно высокая температура воздуха, которая вызвала более раннее (почти на месяц в Центральном и Приволжском федеральных округах) созревание зерновых культур.

Подчеркнём, что аномалии погодных условий и сформировавшиеся в результате их влияния экстремумы урожайности в 2010 и 2008 гг. наблюдались на фоне глобального потепления.

12.2. Адаптация земледелия к прогнозируемым изменениям климата

Особенности последствий изменений климата для экономики регионов России

В соответствии с Климатической доктриной РФ (2009) упреждающая адаптация к последствиям изменений климата относится к числу приоритетов политики в области климата. Комплексная адаптивная интенсификация развития сельского хозяйства должна содействовать снижению потерь и использованию выгод, связанных с климатическими изменениями. Меры адаптации должны в максимальной степени учитывать как наблюдаемые тенденции, так и перспективные оценки будущего климата, а также ожидаемые последствия этих изменений для сельского хозяйства России.

Сможет ли Россия использовать свои ресурсы и выполнить свою ключевую роль в обеспечении глобальной продовольственной безопасности, оказавшись перед лицом климатических изменений? Согласно Национальному докладу по проблемам изменения климата, подготовленному российским Министерством экономического развития и торговли (2002 г.), можно выделить целый ряд положительных последствий климатических изменений для растениеводства:

- расширение площадей, пригодных для сельского хозяйства;
- увеличение продолжительности вегетационного периода растений;
- увеличение продолжительности жарких периодов, оказывающих воздействие на теплолюбивые сельскохозяйственные культуры;
- улучшение зимних условий для полевых и садовых культур;
- улучшение условий для некоторых сельскохозяйственных работ, включая сбор урожая.

В то же время в Докладе отмечается, что реализовать преимущества, которые получит Россия по сравнению с другими странами – экспортёрами продовольствия, не удастся без осуществления действий, направленных на адаптацию сельского хозяйства к ожидаемым изменениям климата и природной среды. При этом необходимо отметить, что такая

адаптация необходима даже в тех регионах, где климатические изменения могут стать для сельского хозяйства более благоприятными.

Выше уже отмечалось, что в будущем сельскохозяйственный потенциал многих территорий, ныне не слишком пригодных к ведению сельского хозяйства, может повыситься, основные сельскохозяйственные районы, за отсутствием адекватных адаптационных мер, столкнутся с существенными потерями. В условиях роста глобального спроса на сельскохозяйственную продукцию наиболее важными задачами являются реализация адаптационных стратегий в ключевых сельскохозяйственных регионах и повышение эффективности сельскохозяйственного производства для усиления конкурентоспособности российской продукции на мировом рынке. Это особенно важно для производства яровой пшеницы – основы хлебопекарной промышленности.

Для обоснования мер по адаптации Агропромышленного комплекса (АПК) России к изменениям климата необходимо оценить, насколько эффективно используются современные климатические ресурсы страны. Для этой цели определён специальный коэффициент, равный отношению средней урожайности зерновых культур к биоклиматическому потенциалу (первичной биологической продуктивности агроценозов), который оценивает достигнутый уровень использования природных ресурсов. Для европейских стран с развитым аграрным производством коэффициент использования почвенно-климатических ресурсов составляет: Англия – 45 %, Франция – 33 %, ФРГ – 38 %, Венгрия – 29 % (Гордеев А. В. и др. 2006, 2008). Для Российской Федерации этот показатель в среднем равен 15 %. По отдельным экономическим регионам он изменяется от 26 (для Северного Кавказа) до 10–12 % (для Северо-Западного и Дальневосточного экономических районов).

Таким образом, сельскохозяйственное производство России по нерезализованным возможностям использования климатических и почвенных ресурсов территории превосходит развитые страны ЕС в 2–3 раза. Особенно велика доля неиспользованных природных ресурсов для Нечернозёмной зоны России. Приведённые данные свидетельствуют, что адаптационный потенциал сельского хозяйства России чрезвычайно высок и поэтому в условиях меняющегося климата необходим регулярный мониторинг и целенаправленное проведение дальнейших исследовательских работ по разработке мер адаптации сельскохозяйственного производства культур в РФ к этим изменениям.

В главе 11 были рассмотрены наиболее вероятные климатические сценарии и оценки отклика продуктивности сельскохозяйственных культур на соответствующие изменения метеорологических и агрометеорологических условий. Полученные оценки важны и используются при разработке адаптационных мер для каждого конкретного региона России.

Рассмотрим предлагаемую адаптационную программу для отдельных регионов (Сиротенко О.Д., Павлова В.Н., 2012).

Северо-Западный регион

В Северо-Западном регионе в 2011–2030 гг. ожидается значительное повышение температуры воздуха по отношению к 1980–1999 гг., особенно в восточной его части (зимой – на 1,7–2,0 °С; летом – на 0,9–1,0 °С). Увеличится изменчивость температуры воздуха, увеличится повторяемость оттепелей зимой и заморозков весной. Потепление будет происходить более интенсивно на севере и менее интенсивно на юге округа.

Рост обеспеченности теплом и увеличение продолжительности вегетационного периода существенно расширяют возможности для развития высокоинтенсивного сельского хозяйства западно-европейского типа. Возможности увеличения продуктивности земледелия представляются тем более значительными из-за того, что современный уровень использования биоклиматического потенциала региона составляет всего 12 %, что является одним из самых низких показателей для России.

В регионе могут улучшиться условия для животноводства в результате роста кормовой базы и сокращения периода стойлового содержания скота. Ожидается повышение продуктивности сенокосов и пастбищ, в том числе и за счёт увеличения продолжительности безморозного периода.

Центральный регион

В этом регионе зимняя температура по расчётам повысится зимой на 1,0–1,6 °С, летом – на 1,0–1,1 °С, участятся оттепели. Зимние осадки в среднем будут увеличиваться (при некотором уменьшении их летом). Вероятно уменьшение частоты весенних наводнений, вызванных снеготаянием. Ожидается дефицит воды для промышленных предприятий и хозяйственных нужд в отдельных районах.

На фоне положительных трендов урожайности всех зерновых и зернобобовых культур за период с 1975 по 2006 г. в Центрально-Чернозёмном районе прослеживалась тенденция снижения коэффициента увлажнения в течение тёплого периода года. В период до 2030 г. эта тенденция, по-видимому, может отрицательно сказаться на урожайности прежде всего яровых зерновых культур. Об этом же свидетельствует снижение величины гидротермического коэффициента и суммы осадков за летний период; максимальный для сельскохозяйственных районов России рост температуры воздуха в июле (более 1 °С за 10 лет). Вместе с тем улучшение условий увлажнения в осенний период и заметное уменьшение повторяемости лет с вымерзанием озимых культур смягчает отрицательные последствия роста засушливости климата. Наблюдаемый рост теплообеспеченности сельскохозяйственных культур в Центральном регионе и

менее значимый в Волго-Вятском регионе способствует повышению продуктивности сельского хозяйства и увеличению вклада этих регионов в зерновой баланс России, который в настоящее время достигает 15–16 %.

Южный регион

Ожидается минимальное для территории Российской Федерации повышение средней температуры воздуха, более сильное летом (до 1,3 °С) и вместе с тем увеличение продолжительности и интенсивности волн тепла. Вероятно небольшое уменьшение осадков летом при одновременном увеличении интенсивности ливневых осадков, возрастании засушливости.

В этом регионе, играющем ведущую роль в производстве зерна (около 20 % общероссийского объёма), наблюдается быстрый рост средней температуры самого холодного месяца года – января, что свидетельствует об уменьшении рисков вымерзания озимых зерновых культур. Уменьшение индекса сухости, наряду с ростом осадков осеннего периода, позволяет сделать благоприятный прогноз роста урожайности озимых зерновых. За последние 30 лет рост урожайности озимой пшеницы в Краснодарском и Ставропольском краях превышал 10 % за десятилетие при вдвое меньшем росте урожайности яровых зерновых культур. Выявлены обусловленные изменениями климата положительные тренды урожайности подсолнечника и сахарной свёклы, а также отрицательный тренд урожайности кукурузы в результате некоторого роста засушливости летнего периода.

На Северном Кавказе наблюдается повсеместный рост теплообеспеченности сельскохозяйственных культур. Темпы роста сумм температур выше 10 °С превысили в ряде районов 100 °С за 10 лет, что наряду с увеличением продолжительности вегетационного периода до 5–6 суток за 10 лет свидетельствует о возможности расширения посевов теплолюбивых культур. В связи с потеплением климата в дальнейшем в этом регионе возможно развитие зоны субтропического земледелия, расширение площадей посевов сои, дальнейшее развитие виноградарства и даже возделывание хлопчатника.

Приволжский регион

В регионе ожидается умеренное потепление зимой (0,9...1,3 °С) и летом (1,0...1,2 °С), увеличение количества летних экстремальных температур и небольшое увеличение количества осадков.

В последние десятилетия наблюдался рост теплообеспеченности сельскохозяйственных культур в Поволжье – самой засушливой территории России, на которую приходится 18 % общенационального производства зерна. Отмечен рекордно быстрый рост урожайности озимой

пшеницы (15 % за 10 лет), обусловленный изменениями климата, на территории Саратовской области; рост урожайности зерновых культур в целом за последние 30 лет составил 7–8 %. На территории Поволжья повсеместно наблюдается повышение зимних температур, например положительный тренд январских температур составляет 1,0 °C за десятилетие, что может свидетельствовать об улучшении условий перезимовки сельскохозяйственных культур. Обусловленные изменениями климата тренды роста урожайности за последнее десятилетие – кукурузы на 2,24 ц/га, сахарной свёклы – 5,32 ц/га и подсолнечника – на 0,35 ц/га – также свидетельствуют о положительном влиянии изменений климата.

Уральский регион

В регионе ожидается значительное потепление, более сильное на севере зимой и на юге летом (зимой – 1,5... 1,6 °C; летом – 0,9... 1,1 °C) и небольшое увеличение количества осадков зимой.

Показатели теплообеспеченности сельскохозяйственных культур за период 1975–2006 г. росли быстрыми темпами на севере региона, на который в целом приходится порядка 16 % производства зерна в Российской Федерации. Вместе с тем на юге региона потепление климата практически не проявлялось. Как негативное явление можно отметить понижение январских температур на части территории региона. Аридность территории, оцениваемая индексом сухости, заметно уменьшилась, а влагообеспеченность сельскохозяйственных культур увеличилась повсеместно, за исключением достаточно увлажнённых северных районов. Как и в большинстве регионов России, на Урале наблюдалось уменьшение степени континентальности климата. Климатически обусловленный рост урожайности зерновых культур составил 1–1,5 % за 10 лет. Изменения климатических условий благоприятствуют увеличению производства зерна яровых культур в регионе.

Сибирский регион

Наиболее заметные последствия температурных изменений в регионе связаны со значительным потеплением в зимний сезон в северной части (1,7–1,9 °C). Более умеренно оно проявляется в центральной и южной частях, причём не только зимой (1,1–1,3 °C), но и летом (0,8–1,1 °C). Ожидается существенное увеличение средних зимних осадков, особенно на севере (до 8–10 %), небольшой рост осадков летом на севере (3–4 %) и некоторое уменьшение на юге. В результате ожидается рост накопленной за зиму массы снега в сочетании с ускорением её таяния весной.

Сумма активных температур, характеризующая теплообеспеченность растений, возрастала на территории региона со скоростью порядка

50–100 °С за 10 лет, хотя скорость роста июльской температуры в некоторых районах уменьшалась. Наблюдается сравнительно быстрое увеличение продолжительности вегетационного периода, превышающее в отдельных районах 4 суток за 10 лет.

Потепление климата в Западной Сибири не сопровождается ростом засушливости, что создаёт благоприятные условия для развития сельского хозяйства и ведёт к повышению его продуктивности за счёт более широкого внедрения позднеспелых культур, сортов и гибридов. Потепление климата может способствовать укреплению кормовой базы животноводства за счёт многоукосных трав и пожнивных посевов. Климатообусловленный рост урожайности яровых зерновых культур в Западной Сибири за последние десятилетия составил 6 % за 10 лет, что свидетельствует о возможном значительном увеличении продуктивности зернового хозяйства региона за счёт более эффективного использования почвенно-климатических ресурсов. В восточно-сибирской части региона наблюдается самый быстрый на территории России рост сумм активных температур, сопровождаемый не менее быстрым повышением июльской температуры (более 1 °С за десятилетие на большей части региона). Аридный характер потепления климата в ряде районов снизил возможные темпы роста урожайности яровых зерновых культур до 1–1,5 % за десятилетие.

Дальневосточный регион

Последствия изменения климата в регионе во многом схожи с таковыми в Сибири. Ожидается потепление зимой, особенно значительное в северной части (1,5–1,7 °С), умеренное – летом (0,7–1,0 °С), а также увеличение среднего количества осадков зимой (6–10 %) и небольшое – летом (до 4 %).

Наблюдаемый повсеместно рост теплообеспеченности сельскохозяйственных культур, а также увеличение продолжительности вегетационного периода являются положительным фактором развития сельского хозяйства региона. В ряде районов увеличение аридности не ведёт к снижению продуктивности аграрного производства благодаря высокой исходной увлажнённости почвы. Изменения агрометеорологических условий территории региона в целом способствуют росту урожайности сельскохозяйственных культур, который в настоящее время составляет около 2 % за десятилетие. Возможно увеличение площадей озимых культур благодаря улучшению условий перезимовки, а также расширение посевов риса и сои в связи с увеличением тепловых ресурсов.

Таким образом, важнейшие направления адаптации сельского хозяйства России к ожидаемым изменениям климата следующие (табл. 12.4).

Таблица 12.4

**Важнейшие направления адаптации сельского хозяйства России
к изменениям климата**

Последствия изменений климата	Меры по адаптации
Увеличение теплообеспеченности сельскохозяйственных культур и увеличение продолжительности вегетационного периода.	Увеличение посевных площадей теплолюбивых высокоинтенсивных сельскохозяйственных культур: кукурузы, подсолнечника, сахарной свёклы, сои и др. Увеличение посевов пожнивных и кормовых культур. Расширение зоны субтропического земледелия на Северном Кавказе.
Снижение повторяемости повреждений и гибели зимующих сельскохозяйственных культур в результате повышения температуры и увеличения количества осадков.	Увеличение площадей озимых зерновых культур (пшеницы, ржи и ячменя) как более урожайных. Расширение площадей садовых насаждений и виноградарства.
Аридизация климата в результате роста испарения и сокращения осадков в тёплый период года.	Расширение применения влагосберегающих технологий. Расширение площадей посевов засухоустойчивых культур. Развитие орошаемого земледелия.
Рост экстремальности климатических условий, увеличение повторяемости и интенсивности засух, дестабилизирующих сельскохозяйственное производство.	Оптимизация размещения зерновых культур на основании данных о динамике климатообусловленных пространственно-временных связей урожайности на территории РФ. Увеличение страховых запасов продовольствия. Оптимизация импортно-экспортной политики с учётом климатообусловленных колебаний производства зерна в сопредельных странах и на глобальном уровне.

**12.3. Обеспечение продовольственной безопасности и проблема
устойчивого развития сельского хозяйства в условиях
изменяющегося климата**

Продовольственная проблема – это вопрос жизнеобеспечения людей. Когда неурожай приводит к нехватке продовольствия, проблема оказывается острой для развивающихся стран, но по каналам мировой торговли она затрагивает и развитые регионы. Продовольственная и сельскохозяйственная организация ООН ФАО (FAO) ввела определение продовольственной безопасности. Согласно этому определению, продовольственная безопасность обеспечивается тогда, когда для каждого человека в любое время физически, социально и экономически доступна питательная и безопасная пища в достаточном количестве для удовлетворения его потребностей и пищевых предпочтений для активной и здоровой жизни. Согласно рекомендациям ФАО, продовольственная безопасность страны

считается обеспеченной, если объём переходящих от года к году запасов зерна соответствует 60 дням его потребления (при среднем уровне потребления в стране) или превосходит эту потребность.

Глобализация сельскохозяйственного производства и продовольственного комплекса ставит на первый план проблему об ограниченности природных ресурсов для ведения сельского хозяйства – сельскохозяйственных земель и пресной воды. Именно это сочетание необходимо для производства продовольствия, но далеко не все государства имеют эти ресурсы в нужном сочетании. В самых населённых странах мира – Китае и Индии – ситуация с площадью пахотной земли и доступностью пресной воды для поливного земледелия стремительно ухудшается. В Китае на одного человека приходится примерно десять соток (0,1 га) пахотной земли, в Индии – 15. Обеспеченность пресной водой в Китае находится на уровне, который характеризуется как «низкий», а в Индии как «очень низкий» (Акимов А., 2013).

В отличие от многих других стран, Россия обеспечена природными ресурсами для ведения сельскохозяйственного производства в масштабах, обеспечивающих не только внутреннее потребление, но и экспорт твёрдого зерна и других продуктов. В настоящее время этот потенциал используется далеко не полностью. В качестве одного из инструментов решения этой проблемы в России разработана и принята национальная «Доктрина продовольственной безопасности Российской Федерации» (2010).

Согласно п. 2 Доктрины, «продовольственная безопасность Российской Федерации (далее – продовольственная безопасность) является одним из главных направлений обеспечения национальной безопасности страны в среднесрочной перспективе, фактором сохранения её государственности и суверенитета, важнейшей составляющей демографической политики, необходимым условием реализации стратегического национального приоритета – повышения качества жизни российских граждан путём гарантирования высоких стандартов жизнеобеспечения». Пункт 15 Доктрины обозначает пути внешнеэкономической политики, включающей меры таможенно-тарифного регулирования для целей рационального соотношения экспорта и импорта сельскохозяйственной и рыбной продукции; сырья и продовольствия; активное использование защитных мер при растущем импорте сельскохозяйственной и рыбной продукции, сырья и продовольствия, а также в случаях демпинга¹ и применения в зарубежных странах субсидий при экспорте; эффективную работу системы санитарного, ветеринарного и фитосанитарного контроля с

¹ Демпинг – продажа товаров по искусственно заниженным ценам. Демпинговые цены существенно ниже рыночных цен, а иногда ниже себестоимости товара (от англ. dumping – сброс).

учётом международных правил и стандартов; поэтапное снижение зависимости отечественного агропромышленного и рыбохозяйственного комплексов от импорта технологий, машин, оборудования и других ресурсов.

В позиции России важным фактором является то, что она уже в течение ряда лет – крупный экспортёр зерна. Таким образом, она играет активную роль в сфере обеспечения международной продовольственной безопасности.

Продовольственная безопасность страны определяется стабильностью производства зерна, которая существенно зависит от климата. Она может быть оценена через вероятность низких урожаев одновременно в важнейших районах возделывания ключевых сельскохозяйственных культур. Урожайность сельскохозяйственной культуры, осреднённую по некоторой территории (области, экономического района, страны), можно рассматривать как случайную величину x с плотностью распределения $p(x)$.

Согласно М. Parry (1990), для n территориальных единиц рассмотрим многомерную случайную величину (случайный вектор) $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ с плотностью распределения $p(x)$. Она характеризуется, в частности, вектором математических ожиданий $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n$ и ковариационной матрицей (m_{ij}) , $i, j = 1, 2, \dots, n$.

Пусть Q – произвольная область (связная или даже несвязная) n -мерного пространства R^n . Задача состоит в нахождении приближённой оценки S интеграла

$$S \approx \int_Q P(X) dx, \quad (12.2)$$

где $P(X)$ – заданная плотность распределения вероятностей такая, что $S = 1$ при $Q = R^n$.

Для нахождения S используется метод Монте-Карло. При этом предполагается, что случайные величины x_1, x_2, \dots, x_n статистически не зависимы, и распределение каждой из них нормальное. «Розыгрыш» случайного вектора X есть совокупность результатов независимых «розыгрышей» случайных величин x_1, x_2, \dots, x_n . После проведения N «розыгрышей» случайного вектора X в качестве оценки S принимается отношение числа его реализаций, попавших в заданную область Q к N .

Описанная выше процедура позволяет оценивать вероятность любых событий, связанных с распределением урожайности для регионов с заданным территориальным делением при наличии статистических данных об урожаях или моделей, позволяющих восстанавливать ряды урожайности по метеорологическим данным. В табл. 12.5 приведены результаты расчётов повторяемости S_n аномалий урожайности всех зерновых культур, различных по масштабам, т.е. охватывающих одновременно сразу n регионов России, $n = 2, 3, \dots, 10$. Приведённые в таблице данные ранжированы по величине валовых сборов зерна. Аномалией в данном

случае называется событие, состоящее в том, что урожайность оказывается ниже (или выше) нормы одновременно в 1, 2, ..., n экономических районах. В случае независимости законов распределения урожайности вероятность аномалии, охватывающей одновременно n регионов, определяется по формуле

$$S_n^* = \left(\frac{1}{2}\right)^n. \quad (12.3)$$

Поскольку обусловленные погодой межгодовые колебания урожайности при осреднении по большой территории определяются практически полностью условиями атмосферной циркуляции, т.е. барическими образованиями с пространственными масштабами до нескольких тысяч километров, эти колебания нельзя считать независимыми в разных регионах. Действительно, согласно табл. 12.5, фактическая повторяемость аномалий урожайности одного знака, охватывающих одновременно все 10 регионов, равна 3 %. Если бы колебания урожаев были независимы, вероятность такого события составила бы примерно 0,1 %, что соответствует одному разу за 1000 лет для всей территории России. В действительности же такое событие случается не менее, чем в трёх годах за 100-летний период.

Таблица 12.5

Фактическое S_n и расчетное S_n^* значения повторяемости (в %) отрицательных аномалий урожаев зерновых культур, охватывающих одновременно регионы России, представленные в порядке убывания валового сбора

Регион	Посевная площадь, тыс. га	Урожайность, ц/га	Валовой сбор, млн т	Доля в зерновом балансе, %	Суммарный вклад регионов в зерновой баланс России, %	Повторяемость отрицательных аномалий урожаев (%), охватывающих одновременно регионы России	
						S_n	S_n^*
Северо-Кавказский	6895	26,5	18,3	19,3	19,3	50,0	50,00
Поволжский	12495	13,4	16,7	17,6	36,9	34,2	25,00
Уральский	11765	12,7	14,9	15,7	52,6	24,0	12,50
Западно-Сибирский	9962	13,1	13,0	13,7	66,3	13,2	6,20
Чернозёмный центр	5217	19,3	10,1	10,6	76,9	11,0	3,10
Центральный	6313	15,3	9,6	10,1	87,0	8,8	1,56
Волго-Вятский	3626	14,8	5,4	5,7	92,7	8,0	0,78
Восточно-Сибирский	3525	14,5	5,1	5,3	98,1	5,8	0,39
Дальневосточный	928	11,5	1,1	1,2	99,4	3,8	0,20
Северо-Западный	469	12,4	0,6	0,6	100,0	3,0	0,10

Повторяемость аномалий урожайности одного знака одновременно в Северо-Кавказском, Поволжском и Уральском регионах, производящих совместно 53 % зерна в стране, составляет 24 %. Повторяемость ещё

более крупных аномалий одного знака, охватывающих одновременно 5 регионов, которые производят более 75 % зерна, составляет 11 %. И, наконец, повторяемость аномалий, охватывающих одновременно все зернопроизводящие регионы районы России, превышает 3 %. Эти оценки в значительной мере определяют степень продовольственной безопасности страны. Их следует учитывать при разработке мер по её обеспечению (страховые запасы зерна, ёмкость зернохранилищ, импортно-экспортную политику и т.п.). Исследования изменений этих оценок за последние десятилетия в связи с глобальными изменениями климата – задача ближайшего времени.

Рекомендуемая литература к Части 1

Агрометеорологические аспекты перезимовки растений / Под ред. Ф. Ф. Дави-
тая и В. А. Моисейчик. – Л.: Гидрометеиздат, 1977. – 232 с.

Агроклиматические ресурсы. Справочники по областям, краям, республикам. –
Л.: Гидрометеиздат, 1971–1978.

Алпатыев А. М., Кулик М. С., Разумова Л. А., Сапожникова С. А., Чирков Ю. И.
Агроклиматическая характеристика основных сельскохозяйственных районов
СССР применительно к возделыванию зерновых культур и обоснованию агро-
технических и мелиоративных мероприятий // Мелиорация почв в СССР. Науч-
ный совет по проблемам почвоведения и мелиорации почв. – М.: Наука, АН СССР,
1971. – С. 5–30.

Атлас запасов продуктивной влаги в почве под озимыми и ранними яровыми
зерновыми культурами на европейской части СССР / Под ред. Л. С. Кельчевской;
ВНИИСХМ и ГУГК при Совете Министров СССР. – М., 1987.

Бабушкин Л. Н. Основы агрометеорологии в Узбекистане. – Ташкент, 2004. – 288 с.

Баталов Ф. З. Сельскохозяйственная продуктивность климата для яровых
зерновых культур. – Л.: Гидрометеиздат, 1980. – 112 с.

Биологические часы / Под ред. С. Э. Шноля; пер. с англ. – М.: Мир, 1964.

Будыко М. И. Тепловой баланс земной поверхности. – Л.: Гидрометеиздат,
1956. – 255 с.

Будыко М. И. Климат и жизнь. – Л.: Гидрометеиздат, 1971. – 472 с.

Вериго С. А., Разумова Л. А. Почвенная влага и её значение в сельскохозяй-
ственном производстве. – Л.: Гидрометеиздат, 1963. – 289 с.

Вериго С. А., Разумова Л. А. Почвенная влага. – Л.: Гидрометеиздат, 1973. – 249 с.

Гордеев А. В., Клещенко А. Д., Черняков Б. А., Сиротенко О. Д. Биоклиматиче-
ский потенциал России: теория и практика / Под ред. А. В. Гордеева; Товарищество
научных изданий КМК. – М.: ИМ, 2006. – 510 с.

Грингоф И. Г., Пасечнюк А. Д. Агрометеорология и агрометеорологические
наблюдения. Учебник для гидрометеорологических средних специальных учеб-
ных заведений Росгидромета. – Л.: Гидрометеиздат, 2005. – 552 с.

Грингоф И. Г., Клещенко А. Д. Основы сельскохозяйственной метеорологии.
Том I. Потребность сельскохозяйственного производства погодные условия. Уч.
пособие для студентов вузов, обучающихся по направлению «Гидрометеороло-
гия» и специальностям «Метеорология» и «Агрономия». – Обнинск, 2011. – 806 с.

Грингоф И. Г., Бабушкин О. Л. Климат, погода и пастбищное животноводство. –
Обнинск, 2010. – 352 с.

Гулинова Н. В. Методы агроклиматической обработки наблюдений. – Л.: Гидро-
метеиздат, 1974. – 151 с.

Гулинова Н. В. Агрометеорологические условия, баланс кормов и продуктив-
ность животноводства. – Л.: Гидрометеиздат, 1988. – 247 с.

Даниелов С. А., Борисова О. А. К вопросу распознавания образов в задаче агро-
климатической оценке декады // Труды ВНИИСХМ. – 1981. – Вып. 4. – С. 58–71.

Димо В. Н., Роде А. А. Тепловой и водный режим почв СССР. – М.: Наука, 1968.

Димо В. Н. Тепловой режим почв СССР. Почвенный институт им. В. В. Докучаева. – М.: Колос, 1972. – 360 с.

Ефимова Н. А. Основные особенности метеорологического режима на полях озимой пшеницы и озимой ржи // Труды ГГО. – Вып. 229. – Л.: Гидрометеиздат, 1968.

Ефимова Н. А. Влияние типа травостоя на формирование фитолимата сельскохозяйственных посевов // Агроклиматические ресурсы природных зон СССР и их использование. – Л.: Гидрометеиздат, 1970. – С. 141–152.

Жуков В. А., Полевой А. Н., Витченко А. Н., Даниелов С. А. Математические методы оценки агроклиматических ресурсов. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 207 с.

Жуков В. А., Даниелов С. А. Сравнительная оценка агроклиматических ресурсов территории СССР и Северной Америки методами распознавания образов // Труды ВНИИСХМ. Вып. 24. Вопросы агроклиматологии. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – С. 104–113.

Зойдзе Е. К., Овчаренко Л. И. Сравнительная оценка сельскохозяйственного потенциала климата территории РФ и степени использования её агроклиматических ресурсов сельскохозяйственными культурами. – СПб.: Гидрометеиздат, 2000. – 75 с.

Кароль И. Л., Катцов В. М., Кисилев А. А., Кобышева Н. В. Климат по существу и всерьез. – СПб. – 2008. – 55 с.

Кельчевская Л. С. Методы обработки наблюдений в агроклиматологии. Метод. пособие. – Л.: Гидрометеиздат, 1971. – 215 с.

Кельчевская Л. С. Влажность почв европейской части СССР. – Л.: Гидрометеиздат, 1983. – 183 с.

Колосков П. И. Климатический фактор сельского хозяйства и агроклиматическое районирование. – Л.: Гидрометеиздат, 1971. – 328 с.

Курец В. К. Установки искусственного климата для опытов с растениями. СО АН СССР, Сибирский Институт физиологии и биохимии растений. – М.: Наука, 1969. – 134 с.

Куртнер Д. А., Чудновский А. Ф. Агрометеорологические основы тепловой мелиорации почв. – Л.: Гидрометеиздат, 1979. – 231 с.

Личикаки В. М. Перезимовка озимых культур. – М.: Колос, 1974. – 207 с.

Мельник Ю. С. Климат и произрастание подсолнечника. – Л.: Гидрометеиздат, 1972. – 143 с.

Микроклимат СССР / Под ред. И. А. Гольцберг. – Л.: Гидрометеиздат, 1967. – 286 с.

Микроклимат холмистого рельефа и его влияние на сельскохозяйственные культуры / Под ред. И. А. Гольцберг. – Л.: Гидрометеиздат, 1962. – 250 с.

Мищенко З. А. Биоклимат дня и ночи. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 280 с.

Мищенко З. А. Учёт микроклимата при размещении виноградников и садов. АН Молдавской ССР. Институт экологической генетики. – Кишинёв: Штиинца, 1986. – 103 с.

Мищенко З. А. Агроклиматология. Учебник для вузов. – Киев: Изд-во КНТ, 2009. – 511 с.

Моисейчик В. А. Агрометеорологические условия и перезимовка озимых культур. – Л.: Гидрометеиздат, 1975. – 295 с.

Мухин В. М. О распределении глубины промерзания почвы на ЕТС // Вестник МГУ, серия географическая, 1965. – № 5.

Наставление гидрометеорологическим станциям и постам, вып. 11. Агрометеорологические наблюдения на станциях и постах. Часть I. Основные агрометеорологические наблюдения. 5-е. изд. Книга 1. – М.: Росгидромет. – 2000. – 347 с. (РД 52.33.217–99).

Рекомендации по оценке микроклиматических ресурсов Нечернозёмной зоны РСФСР. – М.: Гидрометеиздат, 1981. – 81 с.

Реймерс Н. Ф. Природопользование // Словарь-справочник. – М.: Мысль, 1994. – 367 с.

Роде А. А. Основы учения о почвенной влаге. Том I. Водные свойства почвы и передвижение почвенной влаги. 1965. – 663 с.; Том II. Методы изучения водного режима почв. – Л.: Гидрометеиздат, 1969. – 287 с.

Романова Е. Н., Мосолова Г. И., Береснева И. А. Микроклиматология и её значение для сельского хозяйства. – Л.: Гидрометеиздат, 1983. – 245 с.

Руководство по изучению микроклимата для целей сельскохозяйственного производства. – Л.: Гидрометеиздат, 1979. – 152 с.

Сапожникова С. А. Опыт агроклиматического районирования СССР // Вопросы агроклиматического районирования СССР. – М.: Изд-во Минсельхоза СССР, 1958. – С. 14–37.

Селянинов Г. Т. Принципы агроклиматического районирования территории СССР // Вопросы агроклиматического районирования СССР. – М.: Изд-во Минсельхоза СССР, 1958. – С. 7–13.

Синицина Н. И., Гольцберг И. А., Струнников Э. А. Уч. пособие для студентов вузов, обучающихся по гидрометеорологическим специальностям / Под ред. И. А. Гольцберг. – Л.: Гидрометеиздат, 1973. – 344 с.

Слейтер Р., Макилрой И. Практическая микроклиматология. Преимущественно о роли воды в системе «почва–растение–атмосфера» / Под ред. С. А. Вериги и С. А. Сапожниковой. – М.: Прогресс, 1964. – 307 с.

Справочник. Средние многолетние и вероятностные характеристики запасов продуктивной влаги под озимыми и ранними яровыми культурами. Том 1 (Европейская территория СССР, Свердловская, Курганская и Челябинская области) / Под ред. Л. С. Кельчевской. – Л.: Гидрометеиздат, 1979. – 292 с.

Страшная А. И. Агрометеорологические условия перезимовки и формирования урожая семян многолетних трав на европейской части СССР. – Л.: Гидрометеиздат, 1988. – 157 с.

Судницын И. И. Движение почвенной влаги и водопотребление растений. – М.: Изд-во МГУ им. М. В. Ломоносова. – 1979. – 254 с.

Толковый словарь по сельскохозяйственной метеорологии / Под ред. И. Г. Грингофа и А. М. Шамена. – СПб., 2002. – 471 с.

Тюрк Л. Баланс почвенной влаги // Пер. с фр. и редакция Л. Р. Струзера. – Л.: Гидрометеиздат, 1958.

Уланова Е. С., Сиротенко О. Д. Методы статистического анализа в агрометеорологии. – Л.: Гидрометеоиздат, 1968. – 198 с.

Уланова Е. С., Забелин В. Н. Методы корреляционного и регрессионного анализа в агрометеорологии. – Л.: Гидрометеоиздат, 1990. – 203 с.

Харин Н. Г., Кирильцева А. А., Грингоф И. Г. Сезонные явления природы. – СПб.: Гидрометеоиздат, 1993. – 135 с.

Хромов С. П., Мамонтова Л. И. Метеорологический словарь. – Л.: Гидрометеоиздат, 1974. – 568 с.

Хромов С. П., Петросянц М. А. Метеорология и климатология. Учебник для вузов. – М.: Изд-во МГУ, КолосС, 2004. – 582 с.

Хэнкс Р. Дж., Ашкрофт Дж. Л. Прикладная физика почв. Температура и влажность почвы / Пер. с англ. Г. Г. Череваня, под ред. В. Ф. Гридасова. – Л.: Гидрометеоиздат, 1985. – 151 с.

Чекерес А. И. Погода, климат и отгонно-пастбищное животноводство. – Л.: Гидрометеоиздат, 1973. – 175 с.

Чирков Ю. И. Агрометеорология. Учебник для студентов вузов / Под ред. И. Г. Грингофа. – Л.: Гидрометеоиздат, 1986. – 296 с.

Чичасов Г. Н. Численные методы обработки и анализа гидрометеорологической информации. – М., 2013. – 235 с.

Чудновский А. Ф. Теплофизика почв. – М.: Наука, 1976. – 352 с.

Шашко Д. И. Агроклиматическое районирование СССР. – Колос, 1967. – 335 с.

Шашко Д. И. Агроклиматические ресурсы СССР. – Л.: Гидрометеоиздат, 1985. – 247 с.

Шульгин А. М. Климат почвы и его регулирование. 2-е изд. – Л.: Гидрометеоиздат, 1972. – 341 с.

Шульгин А. М. Агрометеорология и агроклиматология. Уч. пособие для студентов вузов / Под ред. Э. А. Струнникова. – Л.: Гидрометеоиздат, 1978. – 200 с.

Шульгин А. М. Снежная мелиорация и климат почвы. – Л.: Гидрометеоиздат, 1986. – 70 с.

Шульгин И. А. Растение и Солнце. – Л.: Гидрометеоиздат, 1973. – 251 с.

Шульгин И. А. Солнечные лучи в зелёном растении. – М.: Изд-во МГУ, 2009. – 213 с.

Яковлев Н. Н. Климат и зимостойкость озимой пшеницы. – Л.: Гидрометеоиздат, 1966. – 419 с.

Рекомендуемая литература к Части 2

Абашина Е. В., Сиротенко О. Д. Прикладная динамическая модель формирования урожая для имитационных систем агрометеорологического обеспечения сельского хозяйства // Труды ВНИИСХМ. – 1986. – Вып. 21.

Акимов А. Продовольственная безопасность – новый фактор международных отношений // Международная жизнь. – 2013. – № 5. – С. 87–100.

Антропогенные изменения климата. – Л.: Гидрометеиздат, 1987. – 406 с.

Болин Б., Деес Б. Р., Ягер Д., Уоррик Р. Парниковый эффект. Изменение климата и экосистемы. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 357 с.

Будаговский А. И. Испарение почвенной влаги. – М.: Наука, 1964. – 244 с.

Будыко М. И. Влияние человека на климат. – Л.: Гидрометеиздат, 1972. – 47 с.

Будыко М. И. Глобальная экология. – М.: Мысль, 1977. – 327 с.

Будыко М. И. Климат в прошлом и будущем. – Л.: Гидрометеиздат, 1980. – 352 с.

Глобальные изменения климата и прогноз рисков в сельском хозяйстве / Под ред. А. Л. Иванова и В. И. Кирюшина. – М.: Российская академия сельскохозяйственных наук, 2009. – 517 с.

Гордеев А. В., Клещенко А. Д., Черняков Б. А., Сиротенко О. Д. Биоклиматический потенциал России: теория и практика. – М., 2006. – 512 с.

Гордеев А. В., Клещенко А. Д., Черняков Б. А., Сиротенко О. Д. и др. Биоклиматический потенциал России: методы мониторинга в условиях изменяющегося климата. – М., 2007. – 236 с.

Гордеев А. В., Клещенко А. Д., Черняков Б. А., Сиротенко О. Д. и др. Биоклиматический потенциал России: меры адаптации в условиях изменяющегося климата. – М., 2008. – 208 с.

Груза Г. В., Ранькова Э. Я. Наблюдаемые и ожидаемые изменения климата России: температура воздуха. – М.: ИГКЭ, 2012. – 193 с.

Гудкович З. М., Карклин В. П., Ковалев Е. Г., Смоляницкий В. М., Фролов И. Е. Изменения морского ледяного покрова и других составляющих климатической системы в Арктике и Антарктике в связи с эволюцией полярных вихрей // Проблемы Арктики и Антарктики. – 2008. – № 1(78). – С. 48–58.

Дегтярева Г. В. Погода, урожай и качество зерна яровой пшеницы. – Л.: Гидрометеиздат, 1981. – 216 с.

Доклад об особенностях климата на территории России за 2010 год. <http://climatechange.igc.ru>.

Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2012 год. <http://www.climatechange.ru>.

Доктрина продовольственной безопасности Российской Федерации. 2010. <http://kremlin.ru/acts/6752>.

Израэль Ю. А. Глобальная система наблюдений. Прогноз и оценка изменений состояния окружающей среды. Основы мониторинга // Метеорология и гидрология. – 1974. – № 7. – С. 3–8.

Катцов В. М., Вавулин С. В., Говоркова В. А., Павлова Т. В. Сценарии изменения климата Арктики в XXI веке // Метеорология и гидрология. – 2003. – № 10. – С. 5–19.

Катцов В. М., Мелешко В. П. Сравнительный анализ моделей общей циркуляции атмосферы и океана, предназначенных для оценки будущих изменений климата // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2004. – Т. 40, № 6. – С. 647–658.

Клещенко А. Д., Павлова В. Н. Наблюдаемые и прогнозируемые в XXI столетии изменения агроклиматических ресурсов и биоклиматического потенциала Калужской области // Труды регионального конкурса научных проектов в области естественных наук. – Калуга, 2013. – Вып. 18. – С. 187–191.

Климатическая доктрина Российской Федерации, 2009 год. <http://meteoinfo.ru/climatedoctrine>.

Кислов А. В., Евстигнеев В. М., Малхазова С. М., Соколичина Н. Н., Суркова Г. В., Торопов П. А., Чернышев А. В., Чумаченко А. Н. Прогноз климатической ресурсообеспеченности Восточно-Европейской равнины в условиях потепления XXI века. – М., 2008. – 290 с.

Кондратьев К. Я. Глобальные изменения климата: факты, предположения и перспективы разработок // Оптика атмосферы и океана. – 2002. – Т. 13, № 10. – С. 1–16.

Кондратьев К. Я. Изменения глобального климата: нерешённые проблемы // Метеорология и гидрология. – 2004. – № 6. – С. 118–126.

Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем / Под ред. С. М. Семенова. – М.: Росгидромет, 2012. – 508 с.

Мищенко З. А. Суточный ход температуры воздуха и его агроклиматическое значение. – Л.: Гидрометеиздат, 1962. – 200 с.

Национальный доклад по проблемам изменения климата, подготовленный российским Министерством экономического развития и торговли. 2002.

Одум Ю. Основы экологии. – М.: Мир, 1975. – 740 с.

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, 2011. – 450 с.

Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. – М.: Росгидромет, 2008. – Том I. – 227 с.

Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Техническое резюме. 2008. – 89 с.

Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Том II. Последствия изменений климата. – М.: Росгидромет, 2008. – 288 с.

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

Павлова В. Н. Проблема оценки влияния изменений климата на продуктивность агросферы России: методология, модели, результаты расчётов // Труды Самарского университета. – 2009. – Т. 11, № 1(7). – С. 1559–1565.

Павлова В. Н., Сиротенко О. Д. Наблюдаемые изменения климата и динамика продуктивности сельского хозяйства России // Труды Главной геофизической обсерватории. – СПб., 2012. – Вып. 565. – С. 132–151.

Павлова В. Н. Агроклиматические ресурсы и продуктивность сельского хозяйства России при реализации новых климатических сценариев в XXI веке // Труды ГГО. – 2013. – Вып. 56. – С. 20–37.

Полуэктов Р. А., Смоляр Э. И., Терлеев В. В., Топаж А. Г. Модели продукционного процесса сельскохозяйственных культур. – СПб.: Изд. С.-Петербургского университета, 2006. – 392 с.

Предстоящие изменения климата. Совместный советско-американский отчёт о климате и его изменениях / Под ред. М. И. Будыко, Ю. А. Израэля, М. С. Маккрэна, А. Д. Хекта. – Л.: Гидрометеиздат, 1991. – 272 с.

Проблема адаптации // Научно-исследовательский отчет OXFAM. Октябрь 2012. www.oxfam.org.

Растянкин В. Г., Дерюгина И. В. Урожайность хлебов в России, 1795–2007. – М.: ИВ РАН, 2009. – 191 с.

Розен Р. Принцип оптимальности в биологии. – М.: Мир, 1969. – 215 с.

Романенков В. А., Сиротенко О. Д., Рухович Д. И., Романенко И. А., Шевцова Л. К., Королева П. В. Прогноз динамики запасов органического углерода пахотных земель Европейской территории России. – М.: ВНИИА, 2009. – 96 с.

Сапожникова С. А. Агроклиматическое районирование пяти основных сельскохозяйственных культур на территории социалистических стран. Опыт интегральной сельскохозяйственной оценки климата территории социалистических стран Европы. – София: Изд-во Болгарской академии наук, 1979. – 123 с.

Сиротенко О. Д. Математическое моделирование водно-теплового режима и продуктивности агроэкосистем. – Л.: Гидрометеиздат, 1981. – 167 с.

Сиротенко О. Д. Имитационная система «климат–урожай» СССР // Метеорология и гидрология. – 1991. – № 4. – С. 67–73.

Сиротенко О. Д. Методы оценки изменений климата для сельского хозяйства и землепользования. Метод. пособие. – М.: Росгидромет, 2007. – 77 с.

Сиротенко О. Д. Основы сельскохозяйственной метеорологии. Том II. Книга 1. – Обнинск, 2012. – 136 с.

Сиротенко О. Д., Абашина Е. В. Об использовании динамических моделей для оценки агрометеорологических условий формирования урожаев // Метеорология и гидрология. – 1982. – № 8.

Сиротенко О. Д., Абашина Е. В. Влияние глобального потепления на агроклиматические ресурсы и продуктивность сельского хозяйства России // Метеорология и гидрология. – 1994. – № 4. – С. 101–112.

Сиротенко О. Д., Абашина Е. В., Павлова В. Н. Чувствительность сельского хозяйства России к изменениям климата, химического состава атмосферы и плодородия почв // Метеорология и гидрология. – 1995. – № 4. – С. 107–114.

Сиротенко О. Д., Абашина Е. В., Павлова В. Н. Парниковый эффект и будущий биоклиматический потенциал России // Труды ВНИИСХМ. Проблемы агрометеорологии. – 1998. – Вып. 31.

Сиротенко О. Д., Израэль Ю. А. Моделирование влияния изменений климата на продуктивность сельского хозяйства России // Метеорология и гидрология. – 2003. – № 6.

Сиротенко О.Д., Павлова В.Н. Оценка влияния изменений климата на сельское хозяйство методом пространственно-временных аналогов // Метеорология и гидрология. – 2003. – № 8. – С. 89–99.

Сиротенко О.Д., Грингоф И.Г. Оценка влияния ожидаемых изменений климата на сельское хозяйство Российской Федерации // Метеорология и гидрология. – 2006. – № 8. – С. 92–101.

Сиротенко О.Д., Романенков В.А., Грингоф И.Г. Моделирование процессов депонирования атмосферного углерода агроферой // Метеорология и гидрология. – 2006. – № 11. – С. 81–88.

Сиротенко О.Д., Груза Г.В., Ранькова Э.Я., Абашина Е.В., Павлова В.Н. Современные климатические изменения теплообеспеченности, увлажнённости и продуктивности агроферы России // Метеорология и гидрология. – 2007. – № 8. – С. 90–103.

Сиротенко О.Д., Абашина Е.В., Павлова В.Н. Проблема оценки влияния изменений климата на продуктивность агроферы: модели, сценарии и результаты для сельского хозяйства России // Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. – СПб., 2009. – Т. 166. – С. 567–573.

Сиротенко О.Д., Павлова В.Н. Аналоговый прогноз урожайности зерновых культур и основные направления оптимизации размещения сельскохозяйственного производства с учётом изменений климата // Труды ВНИИСХМ. – 2010. – Вып. 37. – С. 22–41.

Сиротенко О.Д., Павлова В.Н. Новый подход к идентификации функционалов «погода–урожай» для оценки последствий изменений климата // Метеорология и гидрология. – 2010. – № 2. – С. 92–100.

Сиротенко О.Д., Клещенко А.Д., Черняков Б.А., Павлова В.Н. Адаптация сельского хозяйства России к меняющимся погодно-климатическим условиям // Сборник докладов научно-практической конференции ТСХА. – 2010. – С. 39–46.

Сиротенко О.Д., Клещенко А.Д., Павлова В.Н., Абашина Е.В., Семёндяев А.К. Мониторинг изменений климата и оценка последствий глобального потепления для сельского хозяйства // Агрофизика. – 2011. – № 3. – С. 31–39.

Сиротенко О.Д., Абашина Е.В., Павлова В.Н. Стратегический прогноз изменений климата и оценка их влияния на состояние и продуктивность сельского хозяйства Центрального федерального округа России // Труды регионального конкурса научных проектов в области естественных наук. – Калуга, 2012. – Вып. 17.

Сиротенко О.Д., Абашина Е.В., Павлова В.Н. Динамика климатообусловленных изменений теплообеспеченности, увлажнённости и продуктивности земледельческой зоны России // Труды ВНИИСХМ. – 2013. – Вып. 38. – С. 41–53.

Спорышев П.В., Мирвис В.М., Катцов В.М., Мелешко В.П., Ранькова Э.Я. Антропогенный вклад в изменение климата // Оценочный доклад Росгидромета «Изменения климата и их последствия на территории Российской Федерации» / Под ред. А.И. Бедрицкого и др. – М., 2008. Т. 1. С. 152–173.

Стратегический прогноз изменения климата Российской Федерации на период до 2010–2015 гг. и их влияние на отрасли экономики России. – М.: Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, 2005. – 28 с.

Страшная А. И., Максименкова Т. А., Чуб О. В. Оперативное агрометеорологическое обеспечение аграрного сектора экономики России в условиях изменения агроклиматических ресурсов // Труды ФГБУ «ВНИИСХМ». – 2013. – Вып. 38. – С. 21–40.

Тооминг Х. Г. Солнечная радиация и формирование урожая. – Л.: Гидрометеоиздат, 1977. – 200 с.

Фролов И. Е., Гудкович З. М., Карклин В. П., Ковалев Е. Г., Смоляницкий В. М. Научные исследования в Арктике. Т. 2. Климатические изменения ледяного покрова морей Евразийского шельфа. – СПб.: Наука, 2007. – 136 с.

Фролов И. Е., Гудкович З. М., Карклин В. П., Смоляницкий В. М. 60-летняя цикличность в изменениях климата полярных регионов // Материалы гляциологических исследований. – 2008. – Т. 105. – С. 158–165.

Фролов И. Е., Гудкович З. М., Карклин В. П., Смоляницкий В. М. Изменения климата Земли – результат действия естественных причин // Экологический вестник России. – 2010. – № 1. – С. 49–54.

Шашко Д. И. Агроклиматическое районирование СССР. – М.: Колос, 1967. – 334 с.

Шашко Д. И. Агроклиматические ресурсы СССР. – М.: Гидрометеоиздат, 1985. – 243 с.

Шульгин И. А. Растение и солнце. – Л.: Гидрометеоиздат, 1973. – 251 с.

Эколого-географические последствия глобального потепления климата XXI века на Восточно-Европейской равнине и Западной Сибири / Под ред. Н. С. Касимова, А. В. Кислова. – М.: МГУ, географический факультет, 2011. – 493 с.

Экономический анализ влияния изменения климата на сельское хозяйство России: национальные и региональные аспекты (на примере производства зерна) // Научно-исследовательский отчет OXFAM. Апрель 2013 год. <http://grow.clcr.ru>.

ACIA: Arctic Climate Impact Assessment. – Cambridge: Cambridge University Press, 2005. – 1042 p.

Alcamo J., Dronin N., Endejan M., Golubev G., Kirilenko A. A new assessment of climate change impacts on food production shortfalls and water availability in Russia // Global Environ. Change. – 2007. – V. 17. – P. 429–444.

Brohan P., Kennedy J. J., Harris I., Tett S. F. B. and Jones P. D. Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: a new dataset from 1850 // J. Geophys. Res. – 2006. – V. 111. D12106. Doi:10.1029/2005JD006548.

Brown M. E., de Beurs K. M., Marshall M. 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. – 2012. – V. 126. – P. 174–183.

Climate Change 1995. Impacts, Adaptation and Mitigation of Climate Change: Scientific – Technical Analyses – Contribution of WGII to the Second Assessment Report of the IPCC. Cambridge University Press. – 876 p.

Falloon P., Smith P., Betts R., Jones C. D., Smith J., Hemming D., Challinor A. Carbon sequestration and greenhouse gas fluxes in cropland soils – climate opportunities and threats / S. N. Singh. Climate Change and Crops. 2009. – Berlin: Springer. Chapter 5. – P. 81–111.

Frolov I.E. et al. Climate Change in Eurasian Arctic Shelf Seas. Centennial Ica Cover Observations. Praxis Publishing Ltd, Chichester, UK. 2009. – 164 p.

IPCC, 2007(a). Climate Change: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds. S. Solomon et al. – Cambridge: Cambridge University Press.

IPCC, 2007(b). Climate Change: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds. M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden, C.E. Hanson. Cambridge: Cambridge University Press. – 976 p.

Jones C., McConnell C., Coleman K., Cox P., Falloon P., Jenkinson D., Powlson D. Global climate change and soil carbon stocks; predictions from two contrasting models for the turnover of organic carbon in soil // *Glob. Change Biol.* – 2005. – V. 11. – P. 154–166.

Jones P.D., Lister D.H., Osborn T.J., Harpham C., Salmon M. and Morice C.P. Hemispheric and large-scale land surface air temperature variations: an extensive revision and an update to 2010 // *J. Geophys.* – 2012. Doi: 10.1029/2011JD017139.

Kattsov V., Kallen E. Future climate change: modeling and scenarios for Arctic, in Arctic Climate Impact Assessment (ACIA). – Cambridge: Cambridge University Press, 2005. – P. 99–150.

Lobell D.B., Schlenker W., Roberts J.C. Climate trends and global crop production since 1980 // *Science Express.* – 2011. www.sciencexpress.org/5 May 2011.

Lobell D.B., Schlenker W., Roberts J.C. Supporting online material for Climate trends and global crop production since 1980. – 2011. www.sciencemag.org/cgi/contentfull/science.1204531/DC1.

Lobell D.B., Field C.B. Global scale climate-crop yield relationships and the impacts of recent warming // *Environ. Res. Let.* – 2007. – V. 2. – P. 1–7.

Peters G.P. et al. Nature Climate Change. – 2012. – V. 3. – P. 4–6.

Randal D.A., Wood R.A., Bony S., Colman R., Fichetef T. et al. Climate Models and Their Evaluation // Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Avekyrt, M. Tignor, H.L. Miller (eds.). – Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, Cambridge University Press.

Reilly J. et al. In Impacts, Adaptation and Mitigation of Climate Change, Contribution of Working Group I to the Second Assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds. R.T. Watson, M.C. Zinyowera, R.H. Moss. – Cambridge: Cambridge University Press, 1996.

Schimmelpfennig D., Lewandowski J., Reilly J., Tsigas M. and Parry I. Agricultural adaptation to climate change: Issues of Long run-sustainability // An Economic Research Service Report. – 1996. – P. 1–57.

Schwalm C.R., Williams C.A., Schaefer K., Baldocchi D., Black N.A., Goldstein A.H., Law B.E., Oechel W.C., Paw K.T., Scott R.L. Reduction in carbon uptake during turn of the century drought in western North America // *Nature Geoscience.* – 2012. – V. 5. – P. 551–556.

Smith J. U., Smith P., Wattenbach M., Gottschalk P., Romanenkov V.A., Shevtsova L. K., Sirotenko O. D., Rukhovich D. I., Koroleva P. V., Romanenko I. A., Lisovoi N. V. Projected changes in cropland soil organic carbon stocks in European Russia and the Ukraine, 1990–2070 // *Global Change Biology*. – 2007d. – V. 13. – P. 342–356.

Smith P., Martino D., Cai Z., Gwary D., Janzen H. H., Kumar P., McCarl B., Ogle S., O'Mara F., Rice C., Scholes R. J., Sirotenko O., Howden M., McAllister T., Pan G., Romanenkov V., Schneider U., Towprayoon S., Wattenbach M., Smith J. U. Greenhouse gas mitigation in agriculture // *Philosophical Transactions of the Royal Society. B*. – 2007a. – V. 363. – P. 789–813.

Smith P., Martino D., Cai Z., Gwary D., Janzen H. H., Kumar P., McCarl B., Ogle S., O'Mara F., Rice C., Scholes R. J., Sirotenko O. *Agriculture*. In: Metz B., Davidson O. R., Bosch P. R., Dave R., Meyer L. A. (Eds): *Climate Change 2007: Mitigation*. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 2007b. Chapter 8. – Cambridge: Cambridge University Press.

Smith P., Smith J. U., Franko U., Kuka K., Romanenkov V. A., Shevtsova L. K., Wattenbach M., Gottschalk P., Sirotenko O. D., Rukhovich D. I., Koroleva P. V., Romanenko I. A., Lisovoi N. V. Changes in soil organic carbon stocks in the croplands of European Russia and the Ukraine, 1990–2070; comparison of three models and implications for climate mitigation // *Regional Environmental Change*. – 2007c. – V. 7. – P. 105–119.

SRES: *Emission Scenarios Summary for Policymakers*. IPCC Special Report of working Group III. WMO/UNEP. SRES. – 20 p.

Taylor K. E., Stouffer R. J., Meehl G. A. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 93. – 2012. – P. 495–498.

Tchebakova N. M., Parfenova E. I., Luzanova G. I. and Soja A. J. Agroclimatic potential across central Siberia in an altered twenty-first century // *Environ. Res. Let.* – V. 6(2011).

WMO *statement* on the status of the global climate in 2009. WMO-No. 1055. – P. 2. Fig. 2. http://www.wmo.int/pages/publications/showcase/documents/1055_en.pdf.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

- БКП – биологический потенциал
ВМО – Всемирная метеорологическая организация
ГГИ – Государственный гидрологический институт, Росгидромет
ГГО – Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова, Росгидромет
МС – гидрометеорологическая станция
ГТК – гидротермический коэффициент Г. Т. Селянинова
ЕТР – Европейская территория России
ЕТС – Европейская территория страны
ЕЧС – европейская часть страны
ИГКЭ – Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН
ИС – индекс сухости М. И. Будыко
КП – Киотский протокол
КУ – коэффициент увлажнения С. А. Сапожниковой
МГЭИК – Межправительственная группа экспертов по изменению климата
МОЦАО – (объединённая) модель общей циркуляции атмосферы и океана
ОДЗ – Третий оценочный доклад МГЭИК
ОД4 – Четвёртый оценочный доклад МГЭИК
ООН – Организация Объединённых Наций
ПГ – парниковые газы
РАН – Российская академия наук
РКИК – Рамочная конвенция ООН об изменении климата
РКМ ГГО – региональная климатическая модель ГГО
Росгидромет – Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды
РФ – Российская Федерация
ФО – федеральный округ
ASIA – Arctic Climate Impact Assessment (Доклад «Оценка климатических последствий в Арктике»)
FAO – Food and Agriculture Organization (Продовольственная и сельскохозяйственная организация)
GFDL – Geophysical Fluid Dynamic Laboratory (Лаборатория геофизической гидродинамики, США)
HadCM3 – abbreviation for Hadley Centre Coupled Model, version 3 (Великобритания)
CMIP – Coupled Model Intercomparison Project (Проект сравнения объединённых моделей – МОЦАО)
CMIP3 – третья фаза проекта CMIP
CMIP5 – пятая фаза проекта CMIP
IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change
SRES – Emission Scenarios Summary for Policymakers

Оглавление

Предисловие	4
Часть 1. Оновы агроклиматологии	7
Введение	7
Агроклиматология как наука.....	7
Предмет и задачи агроклиматологии	14
Место агроклиматологии среди научных дисциплин о Земле	17
Глава 1. Методы агроклиматической обработки многолетних материалов наблюдений.....	19
1.1. Общие вопросы агроклиматической обработки материалов наблюдений	19
1.2. Методы агроклиматической обработки метеорологических и агрометеорологических рядов наблюдений.....	27
1.3. Методы обработки материалов наблюдений за влажностью и промерзанием почвы	33
1.4. Методы обработки материалов фенологических наблюдений.....	37
Глава 2. Агроклиматические показатели, принципы и методы сельскохозяйственной оценки климатов	49
2.1. Агроклиматические показатели.....	49
2.2. Принципы и методы сельскохозяйственной оценки климата	53
Глава 3. Агроклиматические ресурсы Российской Федерации	63
3.1. Методы оценки радиационных ресурсов территории	63
3.2. Методы оценки термических ресурсов территории.....	67
3.3. Методы оценки ресурсов увлажнения территории.....	76
3.3.1. Методы оценки условий влагообеспеченности посевов по влагозапасам в корнеобитаемом слое почвы	85
3.3.2. Водный баланс сельскохозяйственного поля	93
3.4. Методы оценки условий перезимовки сельскохозяйственных культур	98
3.4.1. Комплексная оценка агроклиматических условий перезимовки озимых культур	105
3.4.2. Методы оценки перезимовки плодово-ягодных культур	108
3.4.3. Методы оценки зооклиматических условий зимнего периода в пастбищном животноводстве.....	112
3.5. Биоклиматический потенциал территории Российской Федерации.....	116
Глава 4. Методы агроклиматического районирования территории	127
4.1. Общее агроклиматическое районирование	128
4.2. Специальное (или частное) агроклиматическое районирование	138
Глава 5. Агроклиматические аналоги.....	153
Глава 6. Мезоклимат, микроклимат и фитоклимат. Значение их изучения для сельскохозяйственного производства.....	158
6.1. Основные понятия.....	158
6.2. Физические основы формирования микроклимата	166

6.3. Особенности микроклимата дневного и ночного режимов температуры воздуха в тёплое полугодие	171
6.4. Микроклимат ландшафтов, фитоклимат сельскохозяйственных полей	176
6.5. Пути и методы улучшения фитоклимата сельскохозяйственных угодий	187
6.6. Использование камер искусственного климата в растениеводстве.....	191
6.7. Учёт микроклимата в сельскохозяйственном производстве.....	197
Глава 7. Климат почвы и его регулирование	203
7.1. Понятие о климате почвы	203
7.2. Общие закономерности теплового и водного режимов почвы	206
7.3. Климат почвы в тёплое полугодие	218
7.4. Климат почвы в холодное полугодие.....	226
7.5. Основы регулирования климата почвы (мелиорации)	232
7.6. Принципы и методы районирования климата почвы.....	235
Часть 2. Влияние изменений климата на экосистемы, агросферу и сельскохозяйственное производство	243
Глава 8. Современное глобальное потепление и агросфера	243
8.1. Глобальный парниковый эффект и генезис современных изменений климата	243
8.2. Как прогнозируются изменения климата	248
8.3. Причинно-следственные связи в системе «климат–почва–сельское хозяйство»	258
Глава 9. Методы оценки влияния изменений климата на продуктивность сельского хозяйства.....	264
9.1. Методы анализа временных рядов агрометеорологических наблюдений в условиях изменяющегося климата.....	264
9.2. Оценки изменений агроклиматических ресурсов и прогнозирование рисков в земледелии.....	268
9.3. Оценка биоклиматического потенциала и продуктивности сельскохозяйственного производства	273
9.3.1. Биоклиматический потенциал.....	273
9.3.2. Урожайность.....	275
9.3.3. Качество сельскохозяйственной продукции	277
9.4. Методы мониторинга изменений климата для сельского хозяйства	278
9.5. Оценка влияния наблюдаемых изменений климата по уравнениям множественной регрессии	283
9.6. Оценка влияния изменений климата на сельское хозяйство методом агроклиматических аналогов	294
Глава 10. Влияние наблюдаемых изменений климата на агросферу и сельскохозяйственное производство	297
Динамика агроклиматических ресурсов, биоклиматического потенциала и продуктивности сельского хозяйства	297

Глава 11. Возможные последствия изменений климата для сельского хозяйства	315
11.1. Наиболее вероятные сценарии изменения климата России в XXI веке	315
11.2. Изменения размещения сельскохозяйственных культур и географии сельского хозяйства	324
11.3. Изменения биоклиматического потенциала и углеродного режима пахотных почв	332
11.4. Изменения влагообеспеченности и засушливости территории	339
11.5. Изменения продуктивности и устойчивости сельскохозяйственного производства	342
Глава 12. Использование данных о последствиях изменений климата в экономической деятельности	349
12.1. Прогнозирование продуктивности сельского хозяйства на основании климатического мониторинга	349
12.2. Адаптация земледелия к прогнозируемым изменениям климата	359
12.3. Обеспечение продовольственной безопасности и проблема устойчивого развития сельского хозяйства в условиях изменяющегося климата	365
Рекомендуемая литература к Части 1	370
Рекомендуемая литература к Части 2	374
Приложение. Список сокращений	381

И. Г. Грингоф, В. Н. Павлова

Основы сельскохозяйственной метеорологии

Том III

Часть 1. Основы агроклиматологии.

Часть 2. Влияние изменений климата на экосистемы, агросферу и сельскохозяйственное производство

Корректор: *Н. А. Иванова*

Компьютерная вёрстка: *Н. Б. Хомченкова*

Оригинал-макет подготовлен в ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД»

249035, Калужская обл., г. Обнинск, ул. Королёва, 6