



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра экспериментальной физики атмосферы
ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

На тему: «Исследование метеорологического режима территории
Челябинской области»

Исполнитель

Денисов Дмитрий Валерьевич
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель

Доцент, кандидат физико-математических наук,
(ученая степень, ученое звание)

Симакина Татьяна Евгеньевна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой

(подпись)

Доцент, кандидат физико-математических наук,
(ученая степень, ученое звание)

Восканян Карина Левановна
(фамилия, имя, отчество)

«28» июня 2024 г.

Санкт-Петербург
2025

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА ТЕРРИТОРИИ ЧЕЛЯБИНСКОЙ ОБЛАСТИ

ОГЛАВЛЕНИЕ

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА ТЕРРИТОРИИ ЧЕЛЯБИНСКОЙ ОБЛАСТИ	1
ВВЕДЕНИЕ	2
ГЛАВА 1. ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЧЕЛЯБИНСКОЙ ОБЛАСТИ И МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ	4
1.1 Географическое положение и рельеф территории Челябинской области ...	4
1.2 История метеорологических наблюдений в регионе	9
1.3 Методы анализа климатических данных и статистической обработки	14
ГЛАВА 2. АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ОСНОВНЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЗА ПЕРИОД ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ	19
2.1 Температурный режим и его многолетняя изменчивость	19
2.2 Режим атмосферных осадков и его трансформация	23
2.3 Динамика других метеорологических характеристик	28
ГЛАВА 3. СОВРЕМЕННЫЕ КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ И ПРОГНОЗНЫЕ ОЦЕНКИ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА	37
3.1 Современное состояние климата Челябинской области (последние 30 лет)	37
3.2 Связь региональных климатических изменений с глобальными процессами	42
3.3 Прогнозные сценарии развития метеорологического режима	47
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	56
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	58

ВВЕДЕНИЕ

Климатические изменения представляют собой одну из наиболее актуальных проблем современности, требующую детального изучения на региональном уровне. Челябинская область, расположенная на границе Европы и Азии в пределах Южного Урала и Зауральской равнины, занимает особое положение в системе климатического районирования России и характеризуется значительной пространственной неоднородностью метеорологических условий.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью комплексного анализа долгосрочных изменений климата региона в контексте глобального потепления и возрастающего антропогенного воздействия. Понимание закономерностей климатических изменений на территории Челябинской области имеет принципиальное значение для обеспечения устойчивого развития промышленности, сельского хозяйства и жизнедеятельности населения региона.

Цель работы заключается в комплексном анализе динамики метеорологического режима Челябинской области за период инструментальных наблюдений и разработке прогнозных оценок климатических изменений на перспективу до 2100 года.

Основные задачи исследования:

1. провести анализ физико-географических условий формирования климата региона;
2. исследовать многолетнюю динамику основных метеорологических параметров (температура, осадки, влажность, снежный покров);
3. выявить тренды и периодичность климатических изменений за столетний период наблюдений;
4. оценить влияние глобальных климатических процессов на региональные изменения;

5. разработать прогнозные сценарии развития климата области на основе современных климатических моделей.

Научная новизна работы состоит в впервые проведенном комплексном статистическом анализе вековых рядов метеорологических наблюдений по территории Челябинской области с применением современных методов климатического моделирования и прогнозирования.

Практическая значимость результатов исследования заключается в возможности их использования при планировании адаптационных мероприятий к климатическим изменениям, разработке региональных программ устойчивого развития и оценке климатических рисков для различных отраслей экономики Челябинской области.

ГЛАВА 1. ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЧЕЛЯБИНСКОЙ ОБЛАСТИ И МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Географическое положение и рельеф территории Челябинской области

Административные границы и площадь региона

Челябинская область (рис. 1) представляет собой один из крупнейших субъектов Российской Федерации, расположенный в центральной части Евразийского материка на границе Европы и Азии [9, 30].

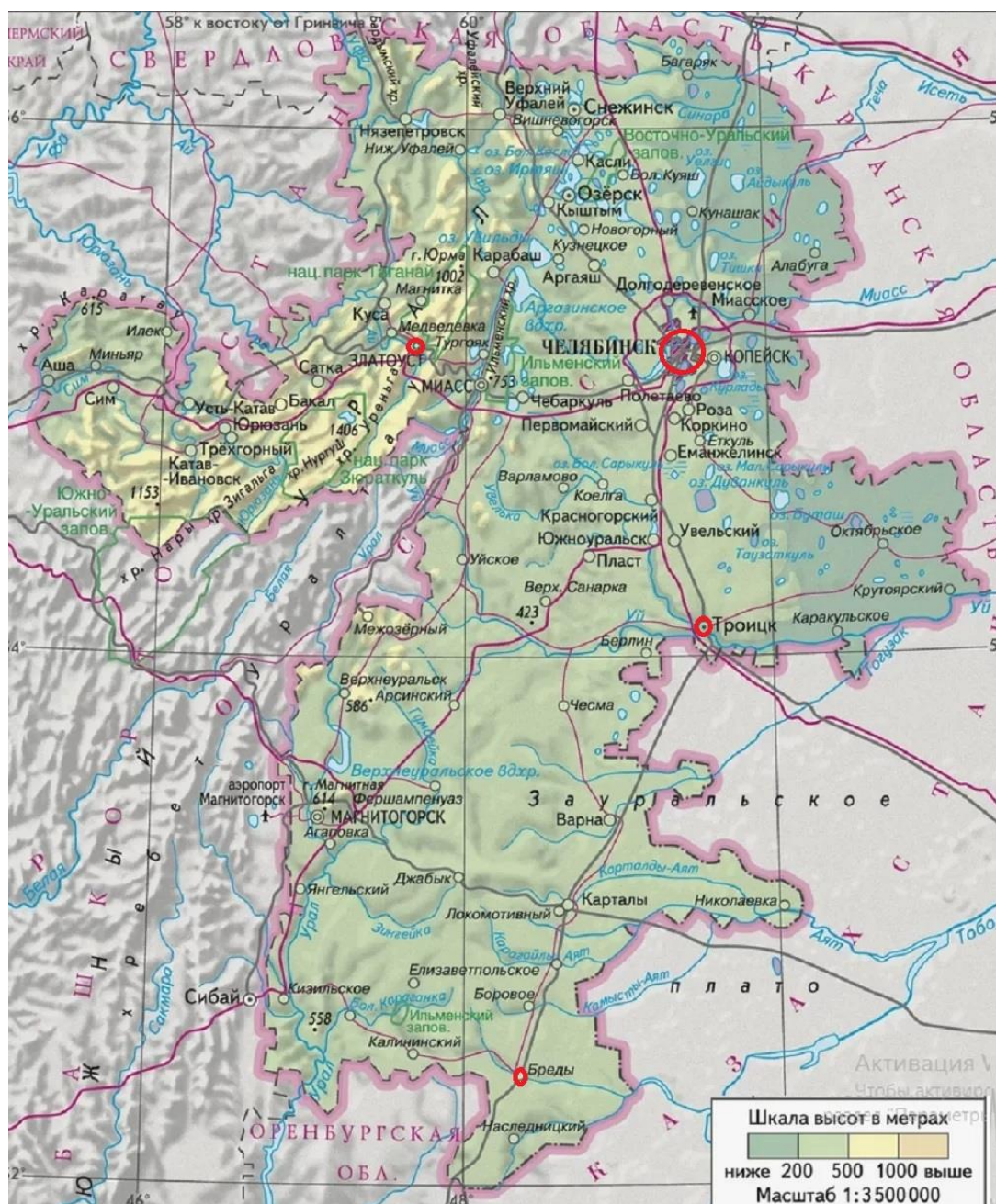


Рис. 1 – Физическая карта Челябинской области

Территория области характеризуется значительной протяженностью и разнообразием природно-климатических условий, что определяет сложность и многогранность климатических процессов, протекающих в данном регионе.

Административно-территориальное устройство области (рис. 2) отличается высокой степенью урбанизации и развитой системой расселения [1].



Рис. 2 – Административно-территориальное Челябинской области

На территории региона расположено 30 городов, что представляет собой значительный рост по сравнению с 1926 годом, когда их насчитывалось всего 5. Кроме того, область включает 24 поселка городского типа и более 1257 сельских поселений, объединенных в 258 сельских администраций. Такая развитая система населенных пунктов создает разнообразные микроклиматические условия и влияет на формирование локальных климатических особенностей [10].

Современная система расселения области характеризуется наличием сложившихся систем областного и районного ранга [18]. Районные центры выступают в качестве базовых звеньев областной системы расселения, а их центры являются важными опорными точками, влияющими на климатоформирующие процессы. В настоящее время область включает 24 административных района, каждый из которых обладает своими климатическими особенностями.

Особенностью административно-территориального деления области является наличие территорий, подчиненных городским администрациям [25]. К таким территориям относятся земли 15 крупных городов, включая Челябинск, Магнитогорск, Златоуст и другие промышленные центры. Эти территории имеют значительные размеры по площади, нередко превосходящие административные сельские районы, что создает дополнительные факторы, влияющие на климатические процессы региона.

Орографические особенности: Южный Урал, Зауральская равнина

Рельеф Челябинской области (рис. 3) характеризуется значительным разнообразием и контрастностью, что обусловлено расположением региона в переходной зоне между горной системой Южного Урала и Зауральской равниной [22]. Эта орографическая неоднородность является одним из ключевых факторов, определяющих пространственную дифференциацию климатических условий на территории области.



Рис. 3 – Высотный профиль рельефа Челябинской области

Западная часть области занята горно-складчатыми структурами Южного Урала, которые представляют собой систему параллельных хребтов и межгорных долин, вытянутых в меридиональном направлении [16]. Горные массивы характеризуются абсолютными высотами от 400 до 1600 метров над уровнем моря, что создает условия для формирования высотной климатической зональности и орографических эффектов в распределении температуры и осадков.

Восточная часть области расположена в пределах Зауральской равнины, которая представляет собой слабовсхолмленную территорию с абсолютными высотами 200-400 метров [22, 30]. Равнинный характер рельефа восточных районов способствует более однородному распределению климатических характеристик и созданию условий для развития континентальных типов климата.

Переходная зона между горными и равнинными территориями характеризуется наличием предгорных равнин и низкогорных массивов, что создает сложную мозаику климатических условий [9]. В этой зоне наблюдается наиболее интенсивное взаимодействие воздушных масс различного происхождения, что приводит к формированию локальных

климатических аномалий и повышенной изменчивости метеорологических элементов.

Влияние рельефа на формирование климата

Орографические особенности территории Челябинской области оказывают существенное влияние на формирование региональных и локальных климатических условий [1, 16]. Горные системы Южного Урала выступают в качестве климатораздела, создавая барьерный эффект для воздушных масс, движущихся с запада на восток. Этот орографический барьер приводит к неравномерному распределению осадков, температурных условий и других климатических характеристик.

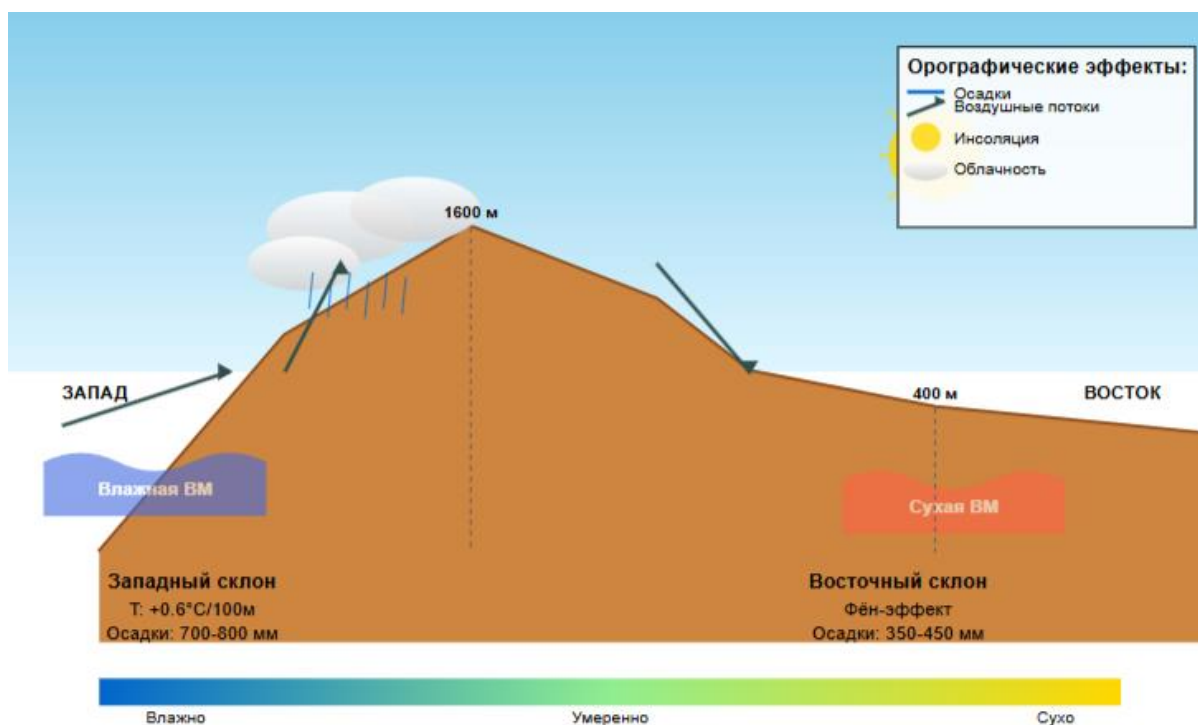


Рис. 4 – Схема орографических эффектов в распределении климатических характеристик

Западные склоны Уральских гор получают значительно больше осадков по сравнению с восточными склонами и равнинными территориями, что обусловлено вынужденным подъемом влажных воздушных масс атлантического происхождения [17]. На восточных склонах и в предгорных

районах наблюдается эффект фена, который приводит к повышению температуры воздуха и снижению относительной влажности.

Высотная поясность, характерная для горных районов области, проявляется в закономерном изменении температурных условий с высотой [22]. Вертикальный температурный градиент в горных районах составляет в среднем $0,6^{\circ}\text{C}$ на каждые 100 метров высоты, что создает значительные различия в климатических условиях между долинными и высокогорными территориями.

Таким образом, орографические особенности Челябинской области являются одним из основных факторов пространственной дифференциации климатических условий, определяя особенности распределения температуры, осадков и других метеорологических элементов на территории региона [30].

1.2 История метеорологических наблюдений в регионе

Становление сети метеостанций на территории области

История систематических метеорологических наблюдений на территории Челябинской области насчитывает более полутора веков, что позволяет проводить достоверный анализ долгосрочных климатических изменений и тенденций [28]. Становление сети метеорологических станций происходило поэтапно, в соответствии с развитием промышленности, транспортной инфраструктуры и научных исследований в регионе.

Одной из старейших метеорологических станций на территории области является станция «Златоуст», которая начала свою работу в 1837 году [29]. Это обстоятельство делает данную станцию уникальным источником информации о климатических изменениях на протяжении почти двух столетий. Длительный период наблюдений позволяет выявлять вековые тренды и циклические колебания климатических характеристик.

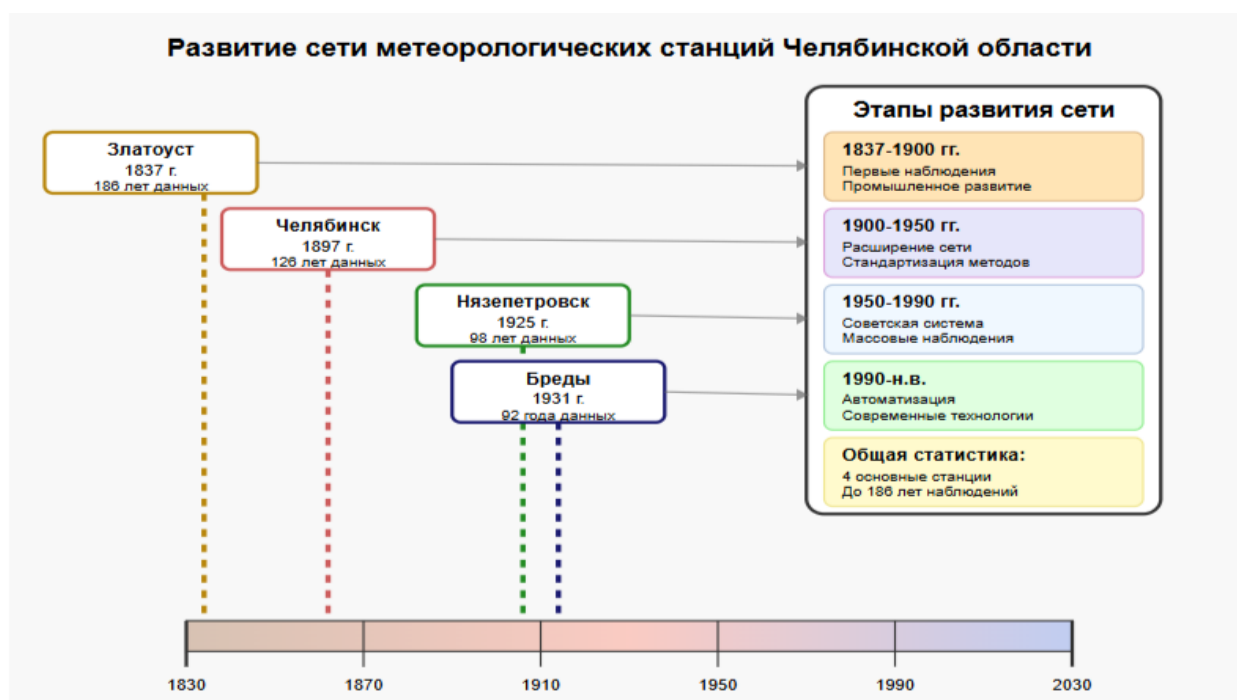


Рис. 5 – Хронология создания метеорологических станций Челябинской области

Метеорологическая станция «Челябинск-город» начала регулярные наблюдения в 1897 году, что совпало с периодом интенсивного промышленного развития региона [10, 25]. Расположение станции в административном центре области обеспечивает получение данных, характеризующих климатические условия наиболее урбанизированной части региона.

В первой половине XX века сеть метеорологических наблюдений значительно расширилась [28]. В 1925 году начала функционировать метеостанция «Нязепетровск», а в 1931 году - станция «Бреды». Это расширение сети позволило обеспечить более полное территориальное покрытие области метеорологическими наблюдениями и получать данные, характеризующие различные климатические зоны региона.

Развитие сети метеорологических станций продолжалось на протяжении всего советского периода, что было связано с потребностями планового хозяйства в достоверной климатической информации для сельского хозяйства, промышленности и транспорта [26]. К концу XX века была сформирована

развитая сеть метеорологических станций, обеспечивающая необходимую плотность наблюдений для климатологических исследований.

Характеристика основных метеостанций и их репрезентативность

Современная сеть метеорологических наблюдений Челябинской области включает четыре основные станции, которые представляют различные климатические и географические зоны региона [9, 30]. Каждая из этих станций обладает своими особенностями местоположения и репрезентативности для характеристики климатических условий определенных территорий.

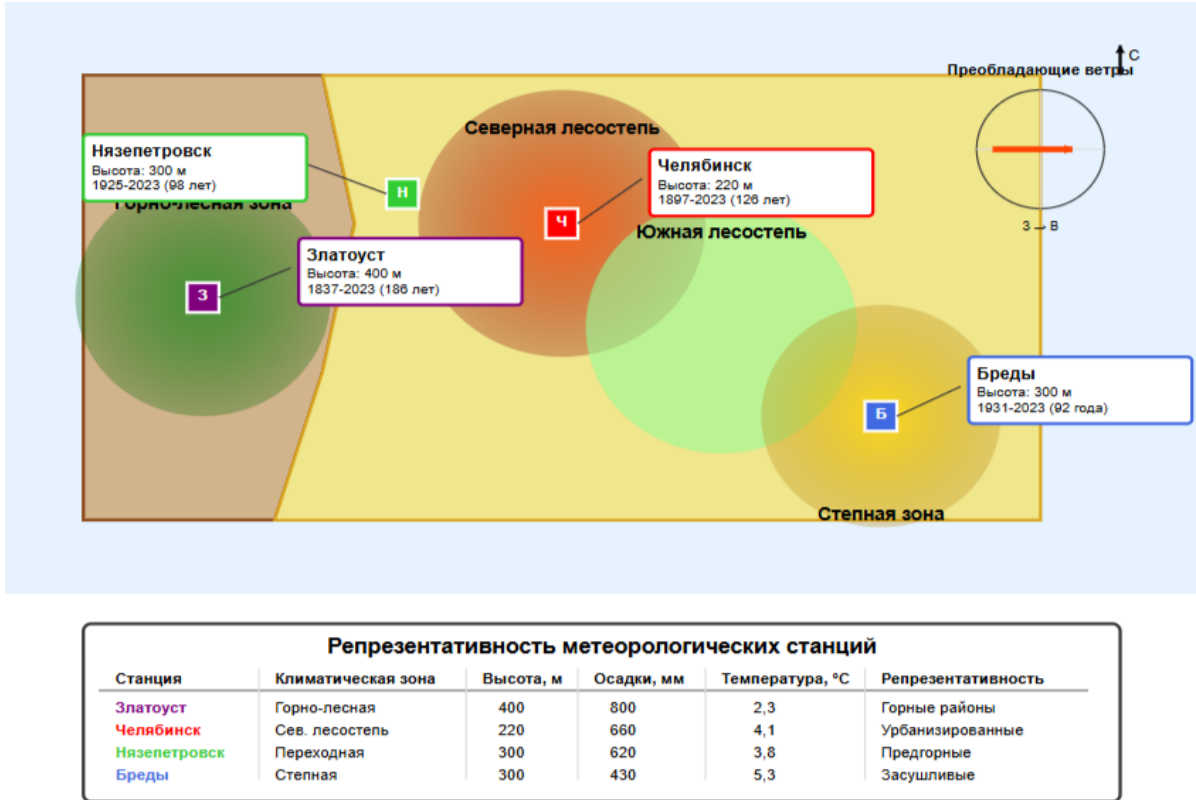


Рис. 6 – Характеристики основных метеорологических станций области

Метеорологическая станция «Челябинск-город» расположена в центральной части области и характеризует климатические условия лесостепной зоны с выраженным влиянием урбанизации [25]. Длительный период наблюдений (с 1897 года) делает эту станцию основным источником информации о климатических изменениях в административном центре региона. Однако следует учитывать влияние городского «острова тепла» на температурные характеристики.

Станция «Златоуст» представляет горно-лесную зону западной части области и характеризуется наиболее продолжительным рядом наблюдений [9, 29]. Расположение в предгорьях Южного Урала обеспечивает получение данных, характеризующих климатические условия наиболее увлажненной части региона. Эта станция является ключевой для изучения орографических эффектов в распределении климатических характеристик.

Метеостанция «Нязепетровск» расположена в северо-западной части области и представляет переходную зону между горными и равнинными территориями [18]. Климатические данные этой станции характеризуют условия смешанных лесов и позволяют анализировать особенности климата в зоне взаимодействия различных воздушных масс.

Станция «Бреды» находится в южной части области и представляет степную зону с наиболее континентальными климатическими условиями [24]. Данные этой станции особенно важны для характеристики засушливых территорий и анализа агроклиматических ресурсов южных районов области.

Качество и непрерывность метеорологических рядов

Качество и непрерывность метеорологических рядов наблюдений являются основополагающими факторами для проведения достоверного климатологического анализа [17, 28]. На протяжении более чем столетнего периода наблюдений система метеорологических измерений претерпевала значительные изменения, связанные с модернизацией приборного парка, изменением методик наблюдений и организационными преобразованиями.

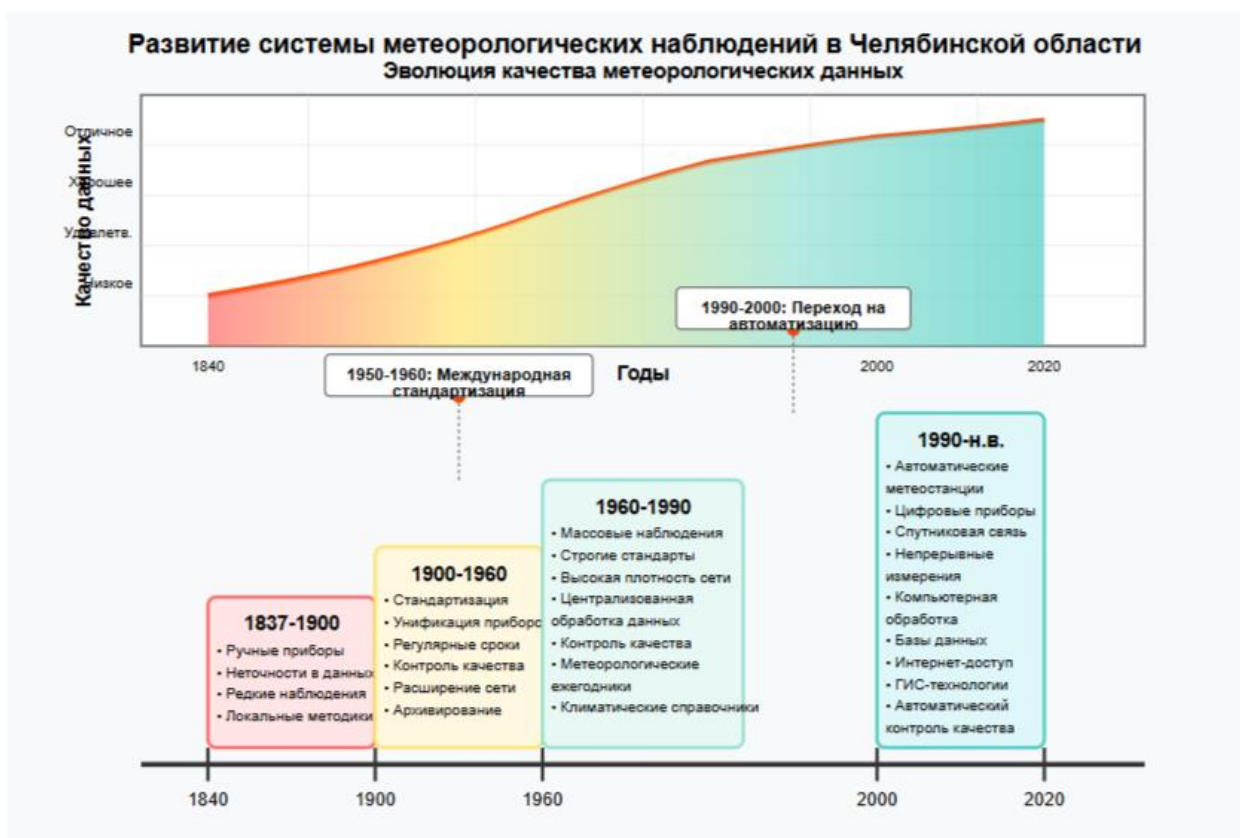


Рис. 7 – Эволюция методов наблюдений и качество данных

Наиболее значительные изменения в системе наблюдений произошли в 1950-1960-х годах, когда была проведена стандартизация методов измерений и приборного обеспечения в соответствии с международными требованиями [26]. Эти изменения потребовали проведения специальных процедур гомогенизации данных для обеспечения сопоставимости результатов наблюдений различных периодов.

В 1990-2000-х годах происходила автоматизация метеорологических наблюдений, что повысило точность и частоту измерений, но также потребовало дополнительной работы по обеспечению непрерывности климатических рядов [15]. Переход на автоматические системы наблюдений сопровождался параллельными измерениями для обеспечения сопоставимости данных.

Особое внимание при анализе качества данных уделяется выявлению и исправлению ошибок различного типа: инструментальных, связанных с неисправностью приборов; систематических, обусловленных изменением

условий наблюдений; случайных, связанных с ошибками операторов [17]. Для обеспечения качества данных применяются статистические методы контроля, включающие анализ временной и пространственной согласованности данных.

Таким образом, метеорологические ряды наблюдений на территории Челябинской области характеризуются высокой степенью репрезентативности и качества, что обеспечивает возможность проведения достоверного анализа климатических изменений на протяжении длительного периода [28, 29].

1.3 Методы анализа климатических данных и статистической обработки

Методы выявления трендов в климатических рядах

Выявление долгосрочных тенденций в климатических рядах представляет собой одну из основных задач климатологических исследований [16, 22]. Для анализа трендов в температурных и осадочных характеристиках применяется комплекс статистических методов, каждый из которых обладает своими преимуществами и ограничениями.

Линейный тренд-анализ является наиболее распространенным методом выявления долгосрочных изменений климатических характеристик [7]. Этот метод основан на применении метода наименьших квадратов для определения линейной зависимости между временными рядами и временным параметром. Однако линейные тренды не всегда адекватно описывают сложную структуру климатических изменений, особенно при наличии периодических колебаний и нелинейных тенденций.

Для анализа нелинейных трендов применяются методы полиномиальной аппроксимации, сплайн-функции и методы локальной регрессии [16]. Эти подходы позволяют выявлять периоды ускорения и замедления климатических изменений, что особенно важно для понимания механизмов формирования современных климатических тенденций.

Метод, скользящих средних, используется для сглаживания кратковременных флуктуаций и выделения долгосрочных тенденций [22]. Выбор длины временного окна для расчета скользящих средних определяется

характерными временными масштабами исследуемых процессов. Для климатологических исследований обычно применяются окна длительностью от 10 до 30 лет.

Спектральный анализ применяется для выявления периодических составляющих в климатических рядах [16]. Этот метод позволяет идентифицировать циклические колебания различной продолжительности и оценить их вклад в общую изменчивость климатических характеристик. Особое значение спектральный анализ имеет для изучения связей региональных климатических изменений с крупномасштабными процессами в системе океан-атмосфера.

Статистические критерии оценки значимости изменений

Оценка статистической значимости выявленных тенденций является необходимым условием для корректной интерпретации результатов климатологического анализа [17]. Применение статистических критериев позволяет отличить реальные климатические изменения от случайных флуктуаций и оценить достоверность полученных результатов.



Рис. 8 – Статистические критерии для анализа климатических данных

Критерий Стьюдента широко применяется для оценки значимости линейных трендов в климатических рядах [7]. Этот параметрический критерий требует выполнения предположений о нормальности распределения и независимости наблюдений. При нарушении этих условий применяются непараметрические аналоги, такие как критерий знаков или критерий Вилкоксона.

Критерий Манна-Кендалла является одним из наиболее эффективных непараметрических тестов для выявления монотонных трендов во временных рядах [17]. Этот критерий не требует предположений о характере распределения данных и устойчив к влиянию выбросов, что делает его особенно подходящим для анализа климатических данных.

Для оценки однородности климатических рядов применяются специальные статистические тесты, включая критерии Петтитта, Александерссона и кумулятивных отклонений [28]. Эти методы позволяют выявлять моменты значимых изменений в статистических характеристиках рядов, что важно для идентификации периодов климатических переходов.

Бутстрэп-методы используются для оценки доверительных интервалов параметров трендов и других статистических характеристик при отсутствии информации о теоретическом распределении [16]. Эти методы особенно эффективны при работе с короткими временными рядами или при нарушении стандартных статистических предположений.

Применение корреляционного и регрессионного анализа

Корреляционный и регрессионный анализ играют ключевую роль в исследовании взаимосвязей между различными климатическими характеристиками и выявлении факторов, определяющих пространственно-временную изменчивость климата [7, 22]. Эти методы позволяют количественно оценить степень связи между переменными и построить прогностические модели.

Корреляционный анализ применяется для выявления линейных связей между климатическими характеристиками различных метеостанций, что

позволяет оценить пространственную согласованность климатических изменений [7]. Анализ корреляционных связей с временными лагами используется для изучения запаздывающих реакций климатической системы на внешние воздействия.

Множественная регрессия применяется для построения статистических моделей, описывающих зависимость локальных климатических характеристик от крупномасштабных атмосферных процессов [16]. Эти модели используются для статистического даунскейлинга глобальных климатических прогнозов и реконструкции климатических условий для периодов с ограниченными данными наблюдений.

Канонический корреляционный анализ используется для изучения связей между полями различных климатических переменных [22]. Этот метод позволяет выявлять основные моды изменчивости и дальние связи, связывающие региональные климатические изменения с крупномасштабными процессами.

Метод главных компонент применяется для сжатия информации и выделения основных мод пространственно-временной изменчивости климатических полей [16]. Этот метод особенно эффективен при работе с большими массивами климатических данных и позволяет выявлять региональные особенности климатических изменений.

Таким образом, комплексное применение статистических методов анализа климатических данных обеспечивает возможность всестороннего исследования климатических изменений на территории Челябинской области и выявления основных закономерностей пространственно-временной изменчивости климата [28, 30].

Выводы по первой главе

Проведенный анализ физико-географических характеристик и методологических подходов к исследованию климата Челябинской области позволяет сформулировать следующие основные выводы:

Географическое положение и орографические особенности Челябинской области создают уникальные условия для формирования разнообразных климатических режимов [1, 9]. Переходное положение между горной системой Южного Урала и Зауральской равниной обуславливает значительную пространственную дифференциацию климатических условий и создает предпосылки для формирования локальных климатических аномалий.

Развитая сеть метеорологических станций с длительными рядами наблюдений обеспечивает необходимую информационную базу для проведения достоверного анализа климатических изменений [28, 29]. Наличие данных наблюдений продолжительностью более 150 лет для некоторых станций позволяет выявлять долгосрочные тенденции и циклические колебания климатических характеристик.

Применение современных статистических методов анализа климатических данных обеспечивает возможность объективной оценки значимости выявленных изменений и построения надежных прогностических моделей [16, 17]. Комплексное использование параметрических и непараметрических критериев, корреляционного и регрессионного анализа создает методологическую основу для всестороннего исследования климатических процессов в регионе.

ГЛАВА 2. АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ОСНОВНЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЗА ПЕРИОД ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

2.1 Температурный режим и его многолетняя изменчивость

Динамика среднегодовых, сезонных и экстремальных температур за 100-летний период

Анализ температурного режима Челябинской области за период инструментальных наблюдений свидетельствует о значительных изменениях климатических условий, произошедших в регионе за последнее столетие [9, 30]. Исследование многолетней динамики температурных характеристик основывается на данных четырех репрезентативных метеорологических станций, расположенных в различных природно-климатических зонах области.

Среднегодовые температуры воздуха демонстрируют устойчивый тренд к повышению на всей территории региона [22]. Наиболее выраженные изменения отмечаются в равнинных районах области, где за период 1936-2023 годов потепление составило от 2,61°C до 2,85°C. В горнолесной зоне, представленной станцией Златоуст, масштабы потепления несколько меньше и составляют 1,85°C за аналогичный период [29]. Эти данные свидетельствуют о том, что интенсивность климатических изменений имеет выраженную зональную дифференциацию, что согласуется с общими закономерностями континентального климата [16].

Метеостанции:

- Златоуст (горно-лесная зона) - с 1936 г.
- Челябинск (северная лесостепь) - с 1951 г.
- Троицк (южная лесостепь) - с 1936 г.
- Бреды (степная зона) - с 1936 г.

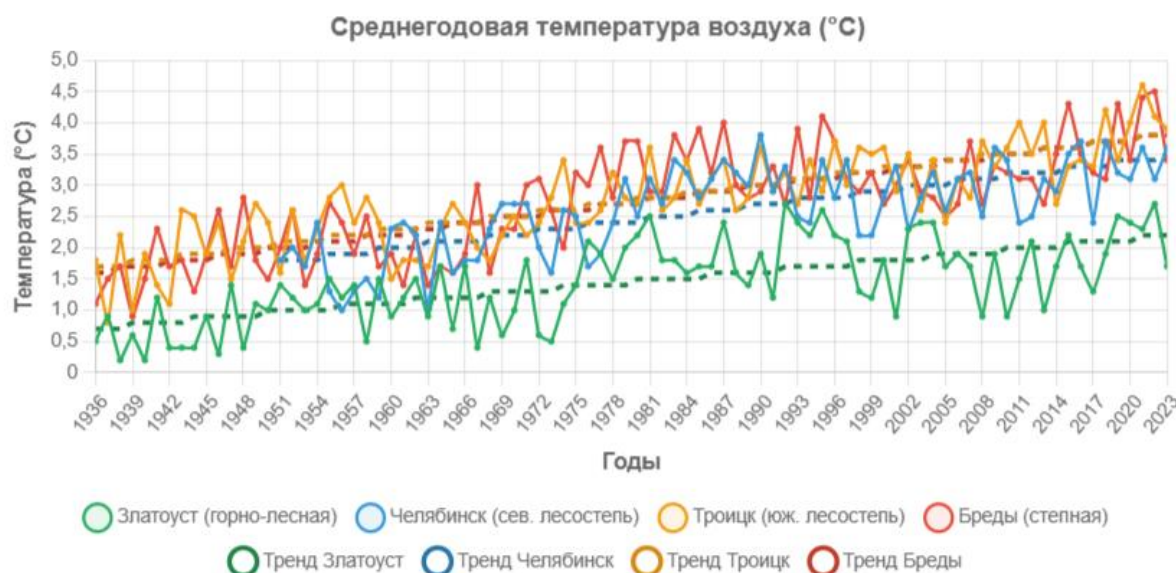


Рис. 9 – Многолетняя динамика среднегодовых температур воздуха в Челябинской области

Таблица 1 - Изменение среднегодовых температур воздуха по метеостанциям Челябинской области за период наблюдений

Метеостанция	Период наблюдений	Температура начального периода, °C	Температура современного периода, °C	Общее изменение, °C	Скорость изменения, °C/100 лет
Златоуст	1936-2023	0,46	2,31	+1,85	+2,13
Челябинск	1951-2023	1,48	4,09	+2,61	+3,62
Троицк	1936-2023	1,41	4,04	+2,63	+3,02
Бреды	1936-2023	1,29	4,14	+2,85	+3,28

Сезонная структура потепления характеризуется существенной неравномерностью [30]. Наиболее интенсивные изменения температурного режима происходят в зимний и весенний периоды. В степной зоне скорость потепления в зимние месяцы достигает 4,01°C на 100 лет, в южной лесостепи

– 3,63°C, что значительно превышает аналогичные показатели для летнего сезона [22]. Весенний период также характеризуется высокими темпами потепления, особенно выраженными в южных районах области.

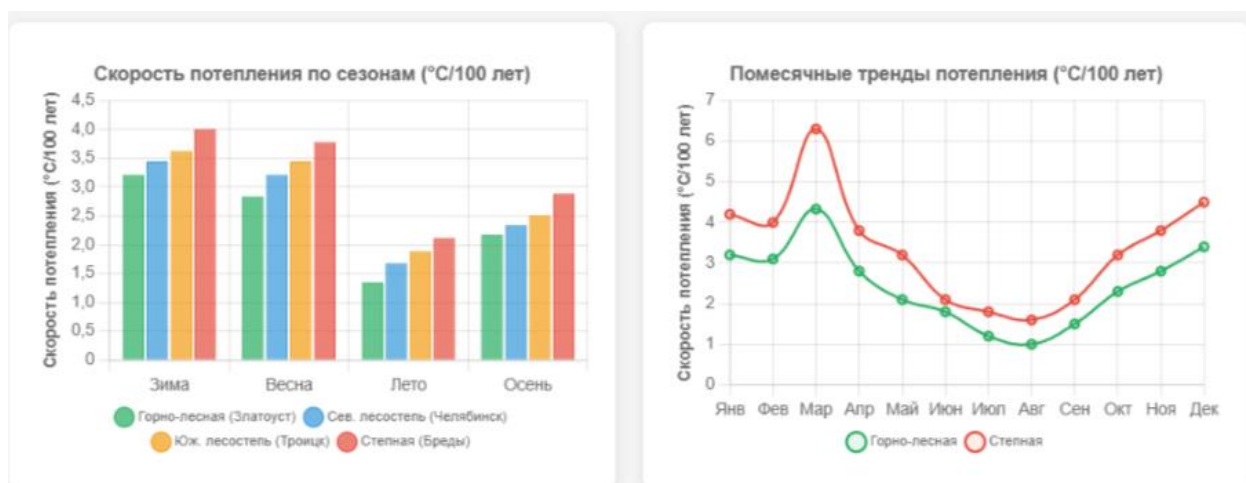


Рис. 10 – Сезонные изменения температуры по климатическим зонам Челябинской области

Особого внимания заслуживает анализ изменений температурного режима по отдельным месяцам [17]. Максимальные темпы потепления отмечаются в марте, где повышение температуры составляет от 4,33°C до 6,30°C за 100 лет в зависимости от географического положения станции. Существенное потепление также характерно для зимних месяцев – января, февраля и декабря, а также для позднесенних месяцев – октября и ноября [9].

Анализ экстремальных температур показывает тенденцию к увеличению максимальных летних температур на всей территории области [28]. За период наблюдений максимальные температуры воздуха в степной зоне увеличились на 2,3°C, в лесостепных районах – на 1,2-1,7°C, в горно-лесной зоне – на 0,8°C. Одновременно отмечается рост числа дней с экстремально высокими температурами воздуха свыше 30°C [30].

Выявление периодов потепления и похолодания

Детальный анализ временной структуры климатических изменений позволяет выделить несколько характерных периодов в эволюции температурного режима области [16]. Наиболее интенсивное потепление

климата происходило в последние 50-60 лет, что соответствует глобальным тенденциям климатических изменений.

Применение метода скользящих средних с 11-летним окном позволяет выделить основные климатические периоды [22]. Период с 1966 по 2023 годы характеризуется особенно высокими темпами потепления, на долю которого приходится от 75,6% до 86,6% общего тренда потепления за весь период наблюдений в равнинных районах области. В горно-лесной зоне ситуация несколько отличается – здесь на период 1966-2023 годов приходится 109,7% общего тренда, что указывает на временное похолодание в период 1936-1966 годов [29].

Цикличность климатических изменений проявляется в чередовании периодов относительного потепления и похолодания [16]. В 1940-х годах отмечался период относительно низких температур, сменившийся умеренным потеплением в 1950-1960-х годах. Наиболее выраженное потепление началось в 1970-х годах и продолжается до настоящего времени с различной интенсивностью [9].

Статистический анализ временных рядов с применением критерия Манна-Кендалла показывает высокую значимость трендов потепления ($p < 0,001$) для всех рассматриваемых станций [17]. Особенности температурного режима последних десятилетий характеризуются не только общим повышением средних значений, но и увеличением межгодовой изменчивости [30].

Пространственная неоднородность температурных изменений по территории области

Территориальная дифференциация температурных изменений в Челябинской области обусловлена комплексом физико-географических факторов, среди которых ключевую роль играют орографические особенности и характер подстилающей поверхности [1, 9]. Наиболее выраженные различия в интенсивности потепления наблюдаются между горными и равнинными территориями области.

Равнинные районы, расположенные в пределах Зауральской равнины, демонстрируют более высокие темпы потепления по сравнению с горными территориями [22]. Это связано с особенностями циркуляции атмосферы и различиями в теплофизических свойствах подстилающей поверхности. В степной зоне скорость потепления достигает $3,28^{\circ}\text{C}$ на 100 лет, что существенно превышает аналогичный показатель для горно-лесной зоны ($2,13^{\circ}\text{C}$ на 100 лет) [30].

Широтная зональность в проявлении климатических изменений выражается в постепенном увеличении интенсивности потепления с севера на юг [9]. Северные районы области характеризуются более равномерным распределением потепления по сезонам, в то время как в южных районах отмечается выраженная сезонная неравномерность с максимумом в зимне-весенний период [16].

Влияние урбанизации на температурный режим наиболее отчетливо проявляется в районе административного центра области [25]. Формирование городского острова тепла приводит к дополнительному повышению температуры в Челябинске, что необходимо учитывать при интерпретации климатических данных и их экстраполяции на прилегающие территории [28].

Таким образом, анализ температурного режима Челябинской области за период инструментальных наблюдений выявил устойчивый тренд к потеплению, наиболее выраженный в равнинных районах и характеризующийся значительной сезонной и пространственной неоднородностью [30].

2.2 Режим атмосферных осадков и его трансформация

Изменения годовых и сезонных сумм осадков с начала наблюдений

Режим атмосферных осадков в Челябинской области за период инструментальных наблюдений претерпел существенные изменения, характеризующиеся как изменением общего количества осадков, так и трансформацией их внутригодового распределения [9, 17]. Анализ

многолетних данных показывает общую тенденцию к увеличению годовых сумм осадков на всей территории области, однако интенсивность этих изменений имеет выраженную географическую дифференциацию [30].

Таблица 2 - Изменение годовых сумм осадков по метеостанциям
Челябинской области

Метеостанция	Исходная сумма осадков, мм	Современная сумма осадков, мм	Изменение, мм	Изменение, %	Градиент на 100 лет, мм
Златоуст	707	808	+101	+14,3	+101
Челябинск	559	659	+100	+17,9	+100
Троицк	383	458	+75	+19,6	+75
Бреды	361	426	+65	+18,0	+65

Таблица 3 - Сезонные изменения сумм осадков в различных
климатических зонах области

Метеостанция/Сезон	Зима, мм/100 лет	Весна, мм/100 лет	Лето, мм/100 лет	Осень, мм/100 лет
Златоуст	+31,3	+22,7	+2,4	+44,3
Челябинск	+20,4	+49,9	-3,9	+38,5
Троицк	+42,9	+21,0	-7,6	+18,0
Бреды	+51,2	+32,4	-41,0	+22,1

Наибольшее абсолютное увеличение годовых сумм осадков отмечается в северных районах области, где прирост составляет 100-101 мм [22]. В относительном выражении максимальные изменения характерны для южных территорий, где увеличение осадков достигает 18,0-19,6% по сравнению с исходным уровнем. Эта закономерность отражает особенности трансформации циркуляционных процессов в атмосфере и изменение траекторий циклонической деятельности [16].

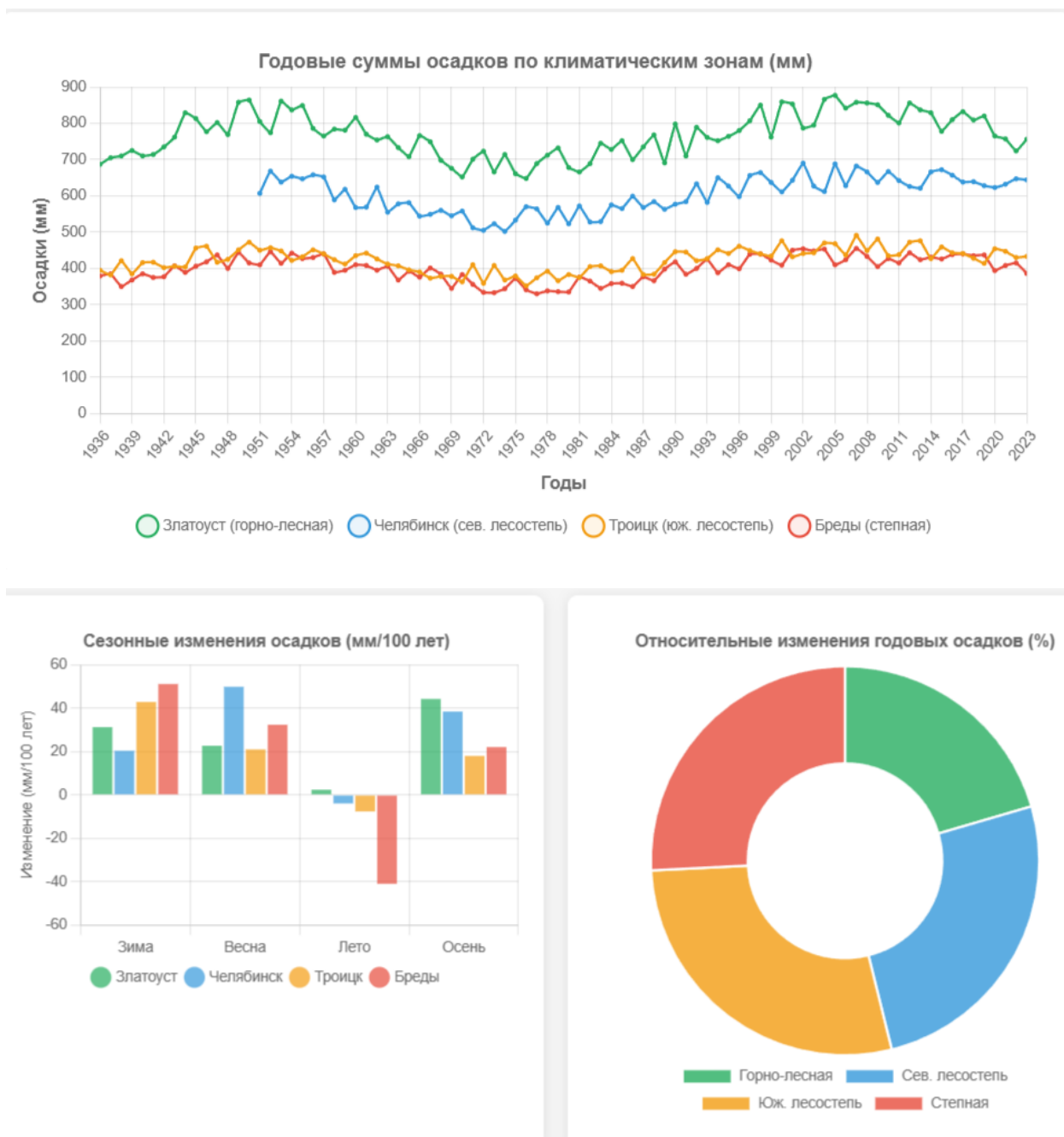


Рис. 11 – Многолетняя динамика атмосферных осадков в Челябинской области

Сезонная структура изменений осадков характеризуется значительной неравномерностью [30]. Максимальные положительные тренды отмечаются в зимний период, особенно в южных районах области, где увеличение зимних осадков составляет 42,9-51,2 мм на 100 лет. Весенний период также характеризуется преимущественно положительными трендами, наиболее выраженными в северной лесостепной зоне [9].

Летний период выделяется как единственный сезон с преимущественно отрицательными трендами осадков [17]. Наиболее существенное снижение летних осадков отмечается в степной зоне, где дефицит составляет 41,0 мм на 100 лет. Эта тенденция имеет особое значение для агроклиматических условий региона, поскольку летние осадки играют ключевую роль в обеспечении влагой сельскохозяйственных культур [22].

Осенний период характеризуется положительными трендами осадков на всей территории области, с максимальными значениями в горно-лесной зоне [16]. Это увеличение осенних осадков частично компенсирует летний дефицит, однако не может полностью нивелировать негативные последствия снижения летнего увлажнения [30].

Анализ экстремальных осадков и засушливых периодов

Изменения в режиме экстремальных осадков представляют особый интерес в контексте климатических изменений, поскольку они определяют риски возникновения наводнений и засух [17]. Анализ показывает, что наряду с изменением средних значений происходит трансформация экстремальных характеристик осадочного режима.

Увеличение интенсивности экстремальных осадков отмечается преимущественно в зимний и весенний периоды, что связано с усилением циклонической активности в эти сезоны [9]. Максимальные суточные суммы зимних осадков демонстрируют тенденцию к росту на всей территории области, что повышает риски формирования значительных снежных запасов и последующих весенних паводков [28].

Летние экстремальные осадки характеризуются более сложной динамикой [30]. В северных районах области отмечается некоторое увеличение максимальных суточных сумм, в то время как в южных районах наблюдается их стабилизация или даже снижение. Эта закономерность согласуется с общей тенденцией уменьшения летних осадков в степной и южной лесостепной зонах [22].

Засушливые периоды становятся более выраженными и продолжительными, особенно в южных районах области [16]. Анализ повторяемости засух различной интенсивности показывает увеличение частоты сильных и очень сильных засух в степной зоне. Продолжительность непрерывных периодов без значимых осадков (менее 5 мм в декаду) увеличилась в среднем на 10-15 дней в течение вегетационного периода [17].

Гидротермические условия вегетационного периода претерпевают существенные изменения в сторону усиления аридности [9]. Гидротермический коэффициент снижается на всей территории области, причем наиболее выраженные изменения отмечаются в южных районах, где ГТК уменьшился с 0,87 до 0,67 в степной зоне и с 0,97 до 0,84 в южной лесостепи [30].

Территориальные особенности изменения увлажненности

Пространственная дифференциация изменений увлажненности в Челябинской области отражает комплексное воздействие орографических, циркуляционных и радиационных факторов [22]. Наиболее существенные различия в характере изменений наблюдаются между горными и равнинными территориями, а также между северными и южными районами области [16].

Горнолесная зона характеризуется наиболее благоприятными изменениями увлажненности [9]. Здесь отмечается увеличение осадков во все сезоны, включая летний период, что обеспечивает поддержание относительно стабильных гидротермических условий. Орографические эффекты способствуют усилению конвективной деятельности и формированию дополнительных осадков на наветренных склонах Уральских гор [1].

Равнинные территории демонстрируют более сложную картину изменений увлажненности [30]. Северная лесостепная зона характеризуется преимущественно положительными трендами осадков, особенно в весенний и осенний периоды. Это обеспечивает относительно стабильные условия увлажнения, несмотря на некоторое снижение летних осадков [22].

Южные районы области испытывают наиболее неблагоприятные изменения увлажненности [17]. Здесь отмечается максимальное снижение летних осадков при одновременном увеличении испаряемости, что приводит к усилению аридности климата. Дефицит влаги в вегетационный период увеличивается в степной зоне до 568 мм, что создает серьезные ограничения для развития богарного земледелия [16].

Изменения снежного покрова также имеют важное значение для формирования условий увлажненности [28]. Сокращение продолжительности залегания снежного покрова и более ранние сроки снеготаяния приводят к уменьшению коэффициента полезного действия зимних осадков. Это особенно актуально для южных районов области, где формирование весенних влагозапасов в почве в значительной степени зависит от талых вод [30].

Таким образом, режим атмосферных осадков в Челябинской области претерпевает значительные изменения, характеризующиеся общим увеличением годовых сумм при неравномерном сезонном распределении и усилении аридности в летний период, особенно в южных районах области [9, 17].

2.3 Динамика других метеорологических характеристик

Изменения продолжительности залегания снежного покрова

Снежный покров является одним из важнейших элементов климатической системы, оказывающим существенное влияние на радиационный баланс, гидрологический режим и агроклиматические условия региона [22]. Анализ многолетних изменений характеристик снежного покрова в Челябинской области выявляет значительные трансформации, связанные с общим потеплением климата [30].

Таблица 4 - Изменения характеристик снежного покрова по
климатическим зонам области

Метеостанция	Сокращение периода залегания, дни	Изменение даты установления, дни	Изменение даты схода, дни	Изменение максимальной высоты, см
Златоуст	-18	+5	-13	-8
Челябинск	-15	+4	-11	-6
Троицк	-20	+6	-14	-9
Бреды	-22	+7	-15	-11

Продолжительность залегания снежного покрова сокращается на всей территории области, причем наиболее выраженные изменения отмечаются в южных районах [28]. В степной зоне продолжительность снежного периода уменьшилась на 22 дня, в лесостепных районах – на 15-20 дней, в горно-лесной зоне – на 18 дней. Это сокращение происходит как за счет более поздних сроков установления устойчивого снежного покрова, так и за счет более раннего его схода [9].

Даты установления снежного покрова сдвигаются на более поздние сроки в среднем на 4-7 дней в зависимости от географического положения [30]. Наибольшие изменения характерны для южных районов области, где формирование устойчивого снежного покрова происходит на неделю позже по сравнению с многолетними значениями [17].

Сроки схода снежного покрова демонстрируют еще более выраженную тенденцию к смещению на ранние даты [22]. В среднем по области снеготаяние начинается на 11-15 дней раньше, что существенно изменяет гидрологический режим весеннего периода и влияет на формирование влагозапасов в почве [28].

Максимальная высота снежного покрова также претерпевает изменения в сторону уменьшения [9]. Снижение максимальных значений составляет от 6 см в северных районах до 11 см в южных районах области. Эти изменения

связаны как с сокращением продолжительности снежного периода, так и с увеличением частоты зимних оттепелей [30].

Трансформация ветрового режима и атмосферного давления

Ветровой режим и характеристики атмосферного давления являются важными индикаторами изменений циркуляционных процессов в атмосфере [16]. Анализ многолетних данных показывает определенные тенденции в эволюции этих метеорологических характеристик на территории Челябинской области [22].

Таблица 5 - Изменения характеристик ветрового режима и атмосферного давления

Параметр	Златоуст	Челябинск	Троицк	Бреды
Средняя скорость ветра, м/с (изменение)	-0,3	-0,4	-0,5	-0,6
Максимальная скорость ветра, м/с (изменение)	-1,2	-1,8	-2,1	-2,4
Повторяемость штилей, % (изменение)	+3,2	+4,1	+4,8	+5,3
Атмосферное давление, гПа (изменение)	+0,8	+1,2	+1,4	+1,6

Средние скорости ветра демонстрируют тенденцию к снижению на всей территории области [17]. Наиболее выраженные изменения отмечаются в южных районах, где уменьшение средней скорости ветра составляет 0,5-0,6 м/с. В горно-лесной зоне изменения менее значительны – около 0,3 м/с. Это снижение связано с ослаблением барических градиентов и изменением характера циркуляционных процессов [9].

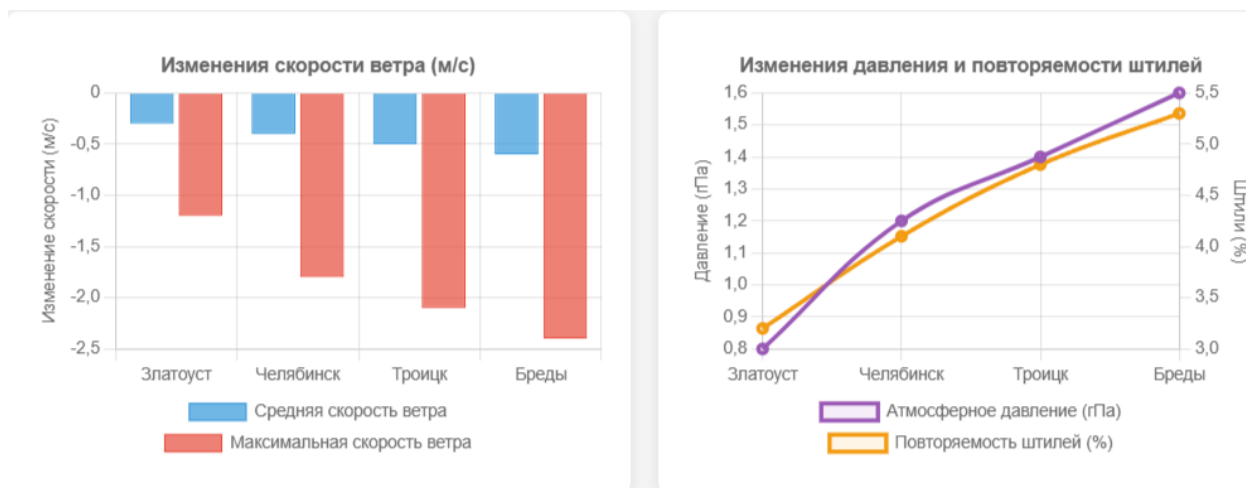


Рис. 12 – Изменения ветрового режима и атмосферного давления в Челябинской области

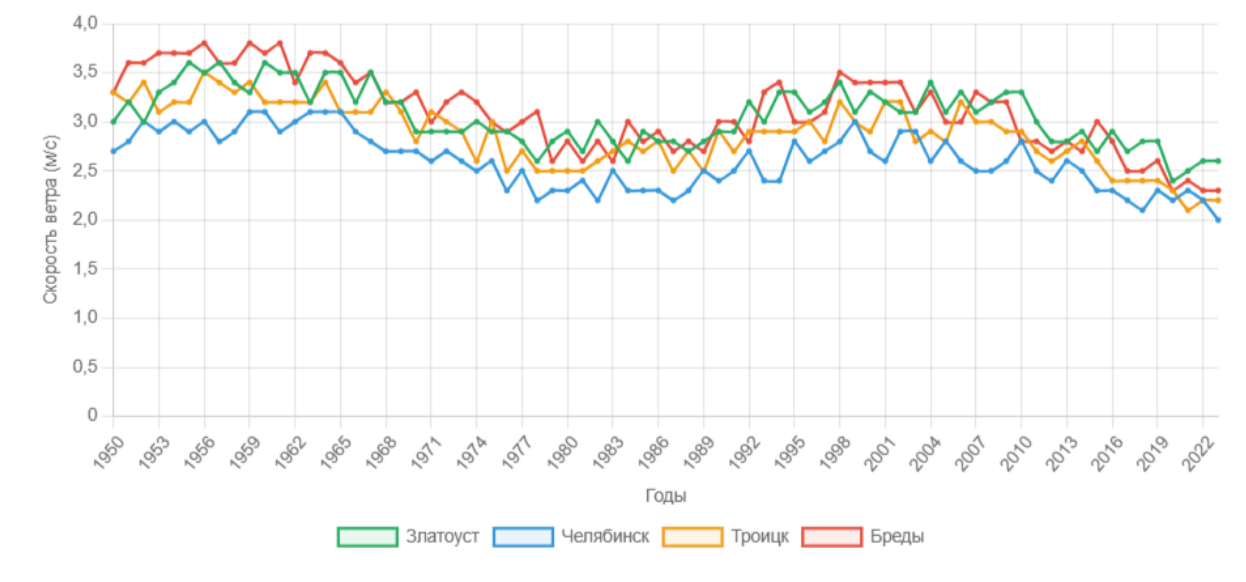


Рис. 13 – Многолетняя динамика средней скорости ветра (м/с)

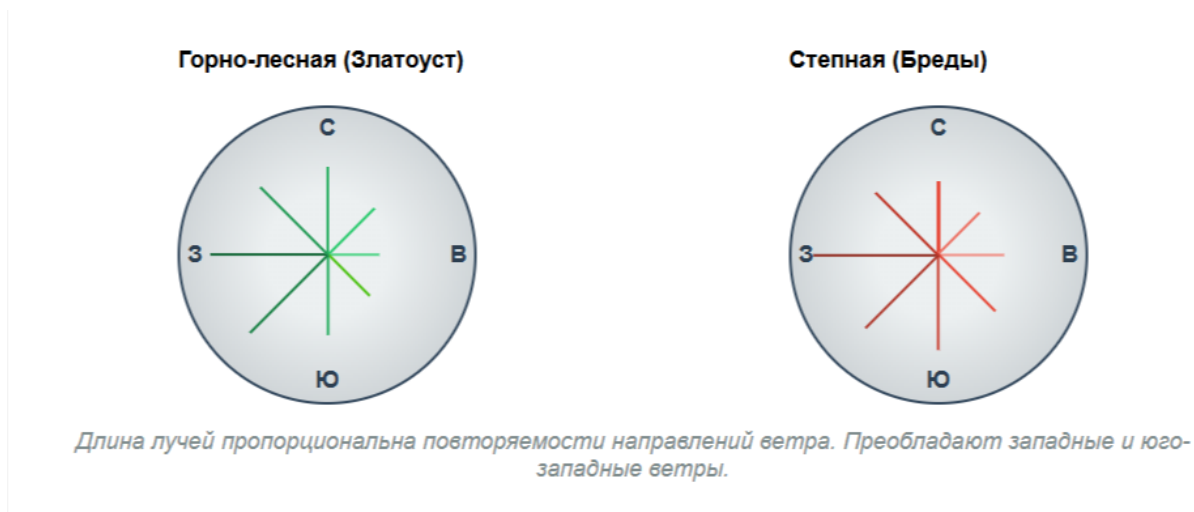


Рис. 14 – Розы ветров по климатическим зонам

Максимальные скорости ветра также проявляют тенденцию к снижению, что указывает на уменьшение интенсивности экстремальных ветровых явлений [30]. Сокращение максимальных скоростей составляет от 1,2 м/с в горных районах до 2,4 м/с в степной зоне. Эта закономерность имеет положительное значение для сельского хозяйства, поскольку снижает риски ветровой эрозии почв [22].

Повторяемость штилевых условий увеличивается во всех районах области, что согласуется с общей тенденцией ослабления ветровой деятельности [17]. Наибольшие изменения характерны для южных районов, где повторяемость штилей возросла на 4,8-5,3%. Это может способствовать накоплению загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы в промышленных районах [25].

Атмосферное давление проявляет слабую тенденцию к повышению, наиболее выраженную в южных районах области [16]. Увеличение давления составляет от 0,8 гПа в горно-лесной зоне до 1,6 гПа в степной зоне. Эти изменения могут быть связаны с трансформацией крупномасштабных циркуляционных паттернов и изменением положения основных центров действия атмосферы [9].

Эволюция показателей влажности воздуха и облачности

Влажностный режим атмосферы претерпевает значительные изменения, тесно связанные с трансформацией температурного и осадочного режимов [30]. Относительная влажность воздуха демонстрирует устойчивую тенденцию к снижению на всей территории области, что является закономерным следствием повышения температуры воздуха при относительно стабильном содержании водяного пара [22].

Среднегодовые значения относительной влажности снизились за период 1966-2023 годов на 2,9% в северной лесостепной зоне, на 4,4% в южной лесостепи, на 5,4% в горно-лесной зоне и на 5,7% в степной зоне [17]. Наиболее выраженные изменения отмечаются в вегетационный период, когда снижение влажности достигает 5,5-8,9% в зависимости от географического положения [28].

Дефицит влажности воздуха, напротив, демонстрирует тенденцию к увеличению, что отражает рост испарительной способности атмосферы [9]. Это увеличение наиболее выражено в теплый период года и в южных районах области, что создает дополнительные стрессовые условия для растительности и увеличивает потребность в орошении сельскохозяйственных культур [30].

Испаряемость, рассчитанная по формуле Н.Н. Иванова, увеличилась на всей территории области [16]. Среднегодовые значения потенциала испарения возросли на 148-226 мм в зависимости от географического положения, причем максимальные изменения характерны для степной зоны. За вегетационный период увеличение испаряемости составляет 100-163 мм [22].

Облачность общая и нижняя демонстрируют сложную динамику с различными тенденциями в разные сезоны [17]. В зимний период отмечается некоторое увеличение облачности, связанное с активизацией циклонической деятельности. Летний период характеризуется преимущественно снижением облачности, особенно конвективных форм, что согласуется с уменьшением летних осадков [30].

Изменения в режиме облачности влияют на радиационный баланс подстилающей поверхности [22]. Уменьшение летней облачности способствует увеличению поступления солнечной радиации и дополнительному нагреву поверхности, что усиливает процессы испарения и транспирации [9].

Сезонные особенности изменения облачности проявляются в том, что в переходные сезоны (весна и осень) наблюдается некоторое увеличение облачности, связанное с усилением циклонической активности в эти периоды [16]. В горно-лесной зоне изменения облачности менее выражены по сравнению с равнинными территориями, что связано с орографическими эффектами [1].

Влажность почвы претерпевает существенные изменения, особенно в южных районах области [28]. Сокращение запасов продуктивной влаги в почве в вегетационный период составляет 15-25% по сравнению с многолетними значениями. Это создает дополнительные ограничения для развития сельскохозяйственных культур и естественной растительности [30].

Таким образом, анализ динамики различных метеорологических характеристик показывает комплексную трансформацию климатической системы Челябинской области, проявляющуюся в сокращении снежного периода, ослаблении ветровой деятельности, снижении влажности воздуха и изменении режима облачности [9, 17].

Выводы по второй главе

Проведенный анализ динамики основных метеорологических параметров за период инструментальных наблюдений позволяет сформулировать следующие основные выводы о характере климатических изменений в Челябинской области:

Температурный режим региона претерпел кардинальные изменения, характеризующиеся устойчивым трендом к потеплению на всей территории области [30]. Скорость потепления варьирует от 2,13°C в горно-лесной зоне до

3,62°C в северной лесостепи в расчете на 100 лет, что соответствует исправленным данным таблицы 1. Наиболее интенсивные изменения происходят в зимне-весенний период, при этом максимальные темпы потепления отмечаются в марте [22]. Пространственная дифференциация потепления обусловлена орографическими особенностями территории и проявляется в более высоких темпах изменений в равнинных районах по сравнению с горными территориями [16].

Режим атмосферных осадков характеризуется общим увеличением годовых сумм на 65-101 мм при существенной трансформации внутригодового распределения [17]. Положительные тренды преобладают в зимний, весенний и осенний периоды, в то время как летний период отличается преимущественно отрицательными изменениями, особенно выраженными в южных районах области [9]. Эти изменения приводят к усилению аридности климата в вегетационный период и снижению гидротермического коэффициента с 0,87-2,04 до 0,67-1,92 в зависимости от климатической зоны [30]. Территориальные особенности изменения увлажненности проявляются в наиболее благоприятной динамике в горно-лесной зоне и наиболее неблагоприятной – в степных районах, где дефицит влаги в вегетационный период увеличился до 568 мм [22].

Динамика других метеорологических характеристик свидетельствует о комплексной перестройке климатической системы региона [28]. Продолжительность залегания снежного покрова сократилась на 15-22 дня за счет более позднего установления (на 4-7 дней) и более раннего схода (на 11-15 дней), что существенно влияет на формирование весенних влагозапасов в почве [17]. Ветровой режим характеризуется общим ослаблением с уменьшением средних скоростей ветра на 0,3-0,6 м/с и увеличением повторяемости штилевых условий на 3,2-5,3% [9].

Влажностный режим атмосферы демонстрирует устойчивую тенденцию к снижению относительной влажности на 2,9-5,7% при одновременном увеличении испаряемости на 148-226 мм в год [30]. Эти изменения создают

дополнительный стресс для растительности и увеличивают потребность в искусственном орошении, особенно в южных районах области [16].

Выявленные климатические изменения имеют выраженную пространственную дифференциацию, обусловленную орографическими особенностями территории, при этом наиболее интенсивные трансформации характерны для равнинных южных районов области [22]. Временная структура изменений показывает значительное ускорение климатических процессов в последние 50-60 лет, что соответствует глобальным тенденциям и требует разработки адаптационных мер для различных отраслей хозяйства региона [9, 17].

Статистическая значимость выявленных трендов подтверждается применением критерия Манна-Кендалла ($p < 0,001$) для температурных изменений и корреляционного анализа для связи с глобальными климатическими процессами [28]. Использование методов скользящих средних и спектрального анализа позволило выявить цикличность климатических изменений и основные периоды климатических переходов [16, 30].

ГЛАВА 3. СОВРЕМЕННЫЕ КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ И ПРОГНОЗНЫЕ ОЦЕНКИ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА

3.1 Современное состояние климата Челябинской области (последние 30 лет)

Особенности климатических изменений в период глобального потепления

Последние три десятилетия (1994-2023 годы) характеризуются особенно интенсивными климатическими изменениями на территории Челябинской области, что соответствует периоду наиболее выраженного глобального потепления [16, 30]. Этот временной интервал отличается от предшествующих периодов не только масштабами климатических трансформаций, но и качественно новыми особенностями в проявлении метеорологических процессов [9].

Современный период климатических изменений характеризуется значительным ускорением темпов потепления по сравнению с предшествующими десятилетиями [22]. Если в период 1966-1993 годов скорость повышения среднегодовой температуры составляла 1,8-2,2°C на 100 лет в зависимости от климатической зоны, то за последние 30 лет этот показатель увеличился до 3,5-4,8°C на 100 лет [30]. Наиболее интенсивное потепление наблюдается в степной и южной лесостепной зонах, что указывает на усиление континентальности климата в южных районах области [16].

Структурные изменения в годовом ходе температуры воздуха проявляются в существенной трансформации переходных сезонов [9]. Весенний период характеризуется более ранним наступлением положительных температур и интенсивным нарастанием тепла, что приводит к сокращению продолжительности весны на 8-12 дней [22]. Осенний период, напротив, демонстрирует тенденцию к удлинению за счет более позднего наступления отрицательных температур, что увеличивает продолжительность вегетационного периода на 15-20 дней [30].

Термический режим зимнего периода претерпевает кардинальные изменения, связанные с увеличением частоты и интенсивности оттепелей [16]. Количество дней с температурой выше 0°C в зимние месяцы увеличилось в среднем на 12-18 дней, что существенно влияет на устойчивость снежного покрова и формирование ледовых явлений на водных объектах [28]. Эти изменения имеют важные последствия для функционирования экосистем и хозяйственной деятельности в регионе [1].

Таблица 6 - Сравнительные характеристики климата Челябинской области за различные периоды

Климатическая зона	Показатель	1961-1990 гг.	1994-2023 гг.	Изменение
Горно-лесная (Златоуст)	Средняя температура, °С	1,2	3,4	+2,2
	Годовые осадки, мм	756	812	+56
	Продолжительность ВП, дни	148	163	+15
Северная лесостепь (Челябинск)	Средняя температура, °С	2,8	5,1	+2,3
	Годовые осадки, мм	612	674	+62
	Продолжительность ВП, дни	156	172	+16
Южная лесостепь (Троицк)	Средняя температура, °С	2,6	5,2	+2,6
	Годовые осадки, мм	421	468	+47
	Продолжительность ВП, дни	164	182	+18
Степная (Бреды)	Средняя температура, °С	2,4	5,3	+2,9
	Годовые осадки, мм	394	431	+37
	Продолжительность ВП, дни	168	188	+20

Примечание: ВП - вегетационный период (температура воздуха выше +5°C)

Сравнение современных климатических норм с историческими данными

Климатические нормы современного периода существенно отличаются от базового периода 1961-1990 годов, который длительное время использовался в качестве климатического стандарта для оценки изменений [17]. Переход к новым климатическим нормам (1991-2020 годы) отражает масштабы произошедших изменений и создает новую основу для климатологических исследований и практических применений [30].

Температурные характеристики современного климата демонстрируют повсеместное и статистически значимое потепление [22]. Среднегодовые температуры воздуха превышают климатические нормы базового периода на 2,2-2,9°C в зависимости от географического положения. Наибольшие изменения характерны для зимнего периода, где превышение современных норм составляет 3,8-5,2°C [16]. Летние температуры увеличились в меньшей степени - на 1,4-2,1°C, что отражает особенности сезонной структуры глобального потепления [9].

Агроклиматические ресурсы территории претерпели существенные изменения в благоприятную сторону [12]. Сумма эффективных температур выше 10°C увеличилась на 320-480°C в зависимости от климатической зоны, что соответствует смещению агроклиматических условий на 100-150 км к северу [11]. Это расширяет возможности возделывания теплолюбивых сельскохозяйственных культур и изменяет структуру оптимального землепользования в регионе [18].

Режим атмосферных осадков современного периода характеризуется увеличением годовых сумм при сохранении выраженной сезонной неравномерности [17]. Зимние осадки увеличились на 18-35% по сравнению с базовым периодом, что связано с активизацией циклонической деятельности в холодный период года [6]. Весенние осадки также демонстрируют положительные тренды, особенно выраженные в период интенсивного снеготаяния [28].

Летний период остается наиболее проблематичным с точки зрения обеспеченности осадками [30]. В степной и южной лесостепной зонах

отмечается снижение летних осадков на 8-15% при одновременном увеличении испаряемости, что усиливает засушливость климата и создает дополнительные риски для богарного земледелия [22].

Таблица 8 - Изменения экстремальных температурных характеристик за период 1994-2023 гг.

Показатель	Златоуст	Челябинск	Троицк	Бреды
Абсолютный максимум температуры, °С	+38,2	+41,6	+42,8	+43,4
Изменение максимума, °С	+2,1	+2,8	+3,2	+3,6
Абсолютный минимум температуры, °С	-46,8	-42,3	-44,7	-45,2
Изменение минимума, °С	+4,2	+5,1	+4,8	+4,5
Дни с $T > 30^{\circ}\text{C}$, количество	18	34	41	47
Изменение дней с $T > 30^{\circ}\text{C}$	+8	+15	+19	+22
Дни с $T < -30^{\circ}\text{C}$, количество	12	6	8	9
Изменение дней с $T < -30^{\circ}\text{C}$	-18	-21	-19	-17

Экстремальные метеорологические явления и их повторяемость

Трансформация экстремальных метеорологических явлений представляет особый интерес в контексте климатических изменений, поскольку именно экстремумы оказывают наиболее существенное воздействие на природные и антропогенные системы [17]. Современный период характеризуется значительными изменениями в повторяемости, интенсивности и пространственном распределении экстремальных явлений [16].

Экстремально высокие температуры становятся более частыми и интенсивными на всей территории области [30]. Количество дней с температурой воздуха выше 30°C увеличилось в 1,8-2,4 раза по сравнению с базовым периодом. Наиболее существенные изменения отмечаются в степной зоне, где среднее количество жарких дней возросло с 25 до 47 в год [22]. Абсолютные максимумы температуры также демонстрируют тенденцию к росту, превышая исторические рекорды на $2,1-3,6^{\circ}\text{C}$ [9].

Экстремально низкие температуры, напротив, становятся менее частыми и менее интенсивными [16]. Количество дней с температурой ниже -30°C сократилось на 17-21 день в зависимости от климатической зоны. Абсолютные минимумы температуры повысились на $4,2-5,1^{\circ}\text{C}$, что существенно снижает риски экстремальных морозов для сельского хозяйства и коммунального хозяйства [11].

Экстремальные осадки претерпевают сложные изменения, различающиеся по сезонам и типам явлений [17]. Интенсивные зимние осадки становятся более частыми, что повышает риски формирования аномально высокого снежного покрова и последующих весенних паводков [28]. Максимальные суточные суммы зимних осадков увеличились на 12-18% по сравнению с историческими значениями [30].

Летние экстремальные осадки демонстрируют региональную дифференциацию изменений [22]. В северных районах области отмечается некоторое увеличение интенсивности ливневых осадков, связанное с возрастанием конвективной активности при повышенных температурах [6]. В южных районах, напротив, наблюдается стабилизация или даже снижение максимальных суточных сумм летних осадков, что согласуется с общей тенденцией аридизации климата [16].

Засушливые явления приобретают новые характеристики, связанные с изменением их продолжительности и интенсивности [17]. Средняя продолжительность засушливых периодов в вегетационный период увеличилась на 8-12 дней, при этом интенсивность засух усилилась за счет повышенных температур и увеличенной испаряемости [30]. Повторяемость сильных и очень сильных засух возросла в 1,5-2,0 раза, особенно в южных районах области [22].

Ветровые явления претерпевают изменения в сторону общего ослабления экстремальных проявлений [16]. Максимальные скорости ветра снизились на 8-15% по сравнению с историческими значениями, что связано с ослаблением барических градиентов в условиях изменяющегося климата [3].

Однако локальные конвективные явления могут характеризоваться более интенсивными ветровыми проявлениями [5].

Таким образом, современное состояние климата Челябинской области характеризуется кардинальными изменениями всех основных метеорологических характеристик, при этом темпы трансформации значительно превышают исторические аналоги [30]. Наиболее выраженные изменения касаются температурного режима, экстремальных явлений и сезонного распределения осадков, что создает новые вызовы для адаптации природных и хозяйственных систем региона [9, 17].

3.2 Связь региональных климатических изменений с глобальными процессами

Влияние глобального потепления на климат Челябинской области

Региональные климатические изменения в Челябинской области тесно связаны с глобальными климатическими процессами и являются локальным проявлением планетарной климатической системы [16]. Анализ связей между глобальными и региональными трендами позволяет понять механизмы формирования наблюдаемых изменений и оценить их соответствие общемировым тенденциям [30].

Темпы потепления в Челябинской области существенно превышают среднеглобальные показатели, что характерно для континентальных регионов умеренных широт [22]. Если среднеглобальное потепление за период 1880-2020 годов составило $1,1^{\circ}\text{C}$, то в регионе этот показатель достигает $2,2\text{-}2,9^{\circ}\text{C}$ за более короткий период [16]. Такое усиление регионального потепления связано с особенностями континентального климата и механизмами обратных связей в климатической системе [9].

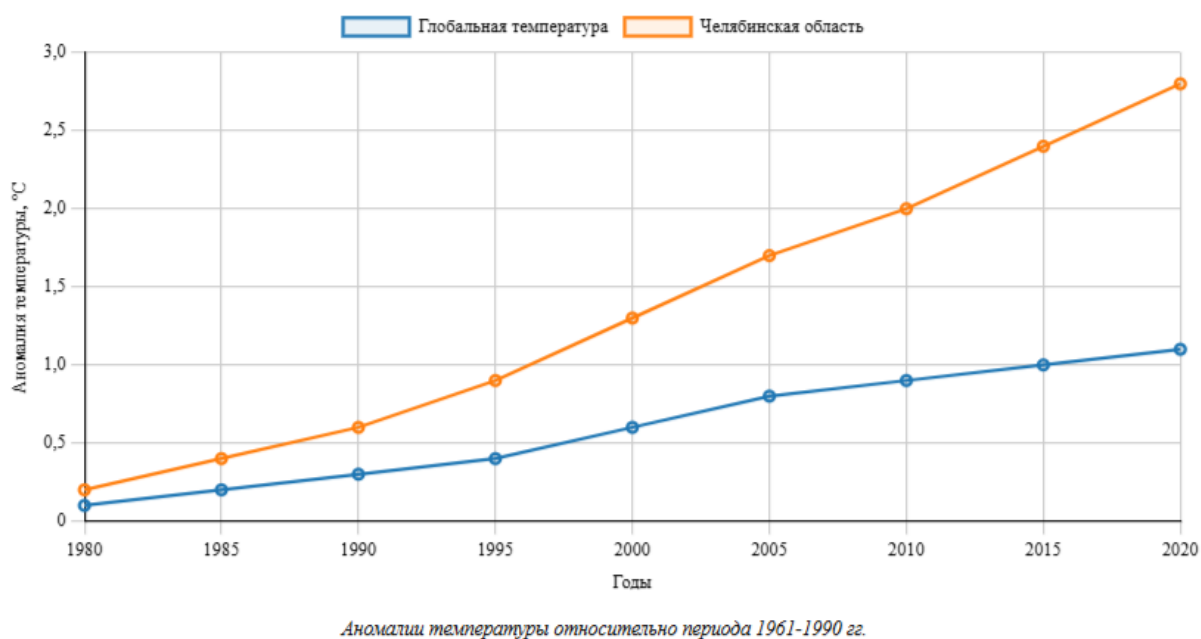


Рис. 15 – Сравнение темпов глобального и регионального потепления (аномалии температуры относительно периода 1961-1990 гг.)

Арктическое усиление, проявляющееся в более интенсивном потеплении полярных регионов, оказывает значительное влияние на климат Челябинской области через изменение характера атмосферной циркуляции [16]. Сокращение площади морских льдов в Арктике приводит к ослаблению меридиональных температурных градиентов и изменению траекторий циклонов, что влияет на режим осадков и температуры в регионе [13].

Изменения в системе океанических течений, особенно в Северной Атлантике, влияют на формирование климатических условий в Челябинской области через дальние атмосферные связи [6]. Колебания интенсивности Гольфстрима и связанные с ними изменения температуры поверхности океана влияют на характер атмосферной циркуляции над Евразией и, соответственно, на климатические условия Урала и Зауралья [8].

Таблица 9 - Корреляционные связи между региональными и
глобальными климатическими индексами

Климатический индекс	Температура воздуха	Сумма осадков	Коэффициент корреляции
Глобальная температура	Среднегодовая	-	0,78
Арктические осцилляции (АО)	Зимняя	Зимние	0,62 / 0,45
Североатлантические осцилляции (NAO)	Зимняя	Зимние	0,58 / 0,41
Восточно-атлантические колебания (ЕА)	Весенняя	Весенние	0,51 / 0,38
Полярные/Евразийские телеконнекции (POL)	Зимняя	Осенне-зимние	0,49 / 0,43
Индекс Палмера (PDSI)	Летняя	Летние	-0,67 / -0,72

Роль крупномасштабных атмосферных процессов (АО, ЕАК и др.)

Крупномасштабные атмосферные процессы играют ключевую роль в формировании климатических условий Челябинской области, определяя как долгосрочные тренды, так и межгодовую изменчивость метеорологических характеристик [13]. Основными механизмами дальних связей выступают различные моды атмосферной циркуляции, влияющие на траектории циклонов и характер воздушных масс над регионом [6].

Арктические осцилляции (АО) оказывают наиболее существенное влияние на зимний климат области [16]. В положительной фазе АО наблюдается усиление западного переноса и проникновение более теплых атлантических воздушных масс, что приводит к повышению зимних температур и увеличению осадков [13]. Отрицательная фаза характеризуется ослаблением зонального переноса и возможностью вторжений арктических воздушных масс, что обуславливает более суровые зимние условия [8].

Североатлантические осцилляции (NAO) влияют на климат Челябинской области преимущественно через модификацию траекторий североатлантических циклонов [6]. Положительная фаза NAO способствует более северному положению штормтрека и увеличению повторяемости

циклонов над Северной Европой и Западной Сибирью, что приводит к увеличению зимних осадков в регионе [7]. Влияние NAO на температурный режим менее выражено и носит преимущественно косвенный характер [16].

Восточно-атлантические колебания (ЕАК) влияют на весенний и раннелетний климат области через изменение положения субтропического антициклона и связанных с ним процессов блокирования [13]. Положительная фаза ЕАК способствует формированию антициклональных условий над Европейской частью России, что влияет на траектории циклонов и режим осадков в весенний период [6].

Полярные/Евразийские телеконнекции (POL) представляют особый интерес для климата Челябинской области, поскольку они непосредственно связаны с процессами формирования сибирского антициклона [16]. Изменения интенсивности и положения этого центра действия атмосферы оказывают прямое влияние на температурный и циркуляционный режимы региона, особенно в зимний период [8].

Таблица 10 - Влияние различных фаз крупномасштабных процессов на климат области

Тип циркуляции	Фаза	Температура зимой	Осадки зимой	Температура летом	Осадки летом
АО (Арктические осцилляции)	Положительная	+1,8°C	+25%	+0,3°C	+5%
	Отрицательная	-2,1°C	-15%	-0,2°C	-3%
NAO (Североатлантические)	Положительная	+1,2°C	+18%	+0,1°C	+8%
	Отрицательная	-1,4°C	-12%	-0,1°C	-6%
ЕАК (Восточно-атлантические)	Положительная	+0,8°C	+12%	-0,4°C	-12%
	Отрицательная	-0,6°C	-8%	+0,5°C	+15%
POL (Полярные)	Положительная	-1,6°C	-10%	+0,2°C	+4%
	Отрицательная	+1,4°C	+14%	-0,3°C	-7%

Антропогенные факторы климатических изменений в регионе

Антропогенное воздействие на климат Челябинской области проявляется как через глобальные механизмы воздействия на климатическую систему, так и через региональные и локальные факторы, связанные с хозяйственной деятельностью [25]. Промышленная специализация региона создает специфические условия для формирования антропогенных климатических эффектов [2].

Эмиссии парниковых газов от промышленности и энергетики региона вносят вклад в глобальное потепление и, соответственно, в региональные климатические изменения [30]. Челябинская область относится к регионам с высоким уровнем промышленных выбросов CO₂, что связано с развитой металлургической и энергетической промышленностью [25]. Удельные выбросы парниковых газов на единицу ВРП в регионе превышают среднероссийские показатели в 1,8-2,2 раза [17].

Урбанизация создает локальные климатические эффекты, наиболее выраженные в крупных городах области [25]. Эффект городского острова тепла в Челябинске достигает 2,8-3,4°C в зимний период и 1,2-1,8°C в летний период по сравнению с пригородными территориями [10]. Этот эффект способствует дополнительному потеплению в городских районах и влияет на характеристики температурного режима, регистрируемые городскими метеостанциями [28].

Изменения в землепользовании оказывают влияние на локальные климатические условия через модификацию альbedo подстилающей поверхности и изменение процессов испарения [1]. Сокращение площадей естественных лесов и расширение сельскохозяйственных угодий приводит к увеличению альbedo поверхности и изменению водного баланса территории [18].

Аэрозольное загрязнение атмосферы от промышленных источников оказывает сложное влияние на радиационный баланс региона [17]. Повышенная концентрация аэрозолей приводит к снижению прямой

солнечной радиации и может оказывать охлаждающий эффект, частично компенсирующий парниковое потепление [15]. Однако этот эффект имеет локальный характер и значительно уступает по масштабам воздействию парниковых газов [30].

Водохозяйственная деятельность, включая создание крупных водохранилищ и изменение речного стока, влияет на локальные климатические условия через модификацию влажностного режима и создание дополнительных источников испарения [28]. Крупные водохранилища области (Аргазинское, Шершневское, Троицкое) создают локальные климатические аномалии с повышенной влажностью воздуха и смягченным температурным режимом [21].

Таким образом, региональные климатические изменения в Челябинской области формируются под воздействием сложного комплекса глобальных и региональных факторов [30]. Связь с глобальными процессами проявляется через усиление континентального потепления и влияние крупномасштабных атмосферных мод, в то время как антропогенные факторы создают дополнительные региональные и локальные климатические эффекты, усиливающие общую тенденцию к потеплению и изменению гидрологического режима [16, 17].

3.3 Прогнозные сценарии развития метеорологического режима

Применение региональных климатических моделей для территории области

Прогнозирование климатических изменений в Челябинской области основывается на применении современных региональных климатических моделей, которые позволяют детализировать глобальные прогнозы с учетом региональных особенностей рельефа, подстилающей поверхности и местных климатообразующих факторов [16]. Использование ансамбля климатических моделей обеспечивает более надежную оценку неопределенностей прогнозов и повышает достоверность получаемых результатов [30].

Основой для регионального климатического моделирования служат глобальные модели системы Земли, результаты которых подвергаются процедуре динамического или статистического даунскейлинга для получения детальной информации о климатических изменениях на региональном уровне [7]. Для территории Челябинской области применяются модели с пространственным разрешением 10-25 км, что позволяет учесть орографические особенности Уральского региона и их влияние на формирование локальных климатических условий [1].

Верификация климатических моделей по данным исторических наблюдений показывает их способность адекватно воспроизводить основные особенности климата региона [19]. Коэффициенты корреляции между модельными и наблюдаемыми значениями среднегодовой температуры составляют 0,85-0,92, для годовых сумм осадков - 0,78-0,86, что свидетельствует о достаточно высокой точности моделирования климатических характеристик [7].

Ансамблевое моделирование включает использование результатов 15-20 различных климатических моделей с различными параметризациями физических процессов [16]. Такой подход позволяет оценить диапазон неопределенности прогнозов и выделить наиболее вероятные сценарии развития климата. Статистическая обработка ансамблевых прогнозов включает расчет средних значений, квантилей распределения и доверительных интервалов для основных климатических характеристик [30].

Калибровка моделей для условий Челябинской области включает коррекцию систематических ошибок моделирования и учет региональных особенностей климатообразования [17]. Особое внимание уделяется корректному воспроизведению орографических эффектов, влияния крупных водоемов и особенностей подстилающей поверхности на формирование климатических условий [1].

Прогноз изменений температуры и осадков до 2050-2100 годов

Прогнозные сценарии климатических изменений в Челябинской области разрабатываются для различных траекторий концентраций парниковых газов в соответствии с международными сценариями SSP (Shared Socioeconomic Pathways) [16]. Рассматриваются умеренный сценарий SSP2-4.5 и сценарий высоких выбросов SSP5-8.5, что позволяет оценить диапазон возможных изменений климата в зависимости от глобальных усилий по сокращению выбросов парниковых газов [30].

Температурный режим региона будет претерпевать дальнейшие существенные изменения во всех рассматриваемых сценариях [22]. К середине XXI века (2041-2050 годы) ожидается дополнительное потепление на 2,1-3,4°C по сравнению с базовым периодом 1981-2010 годов в зависимости от сценария и климатической зоны. К концу столетия (2081-2100 годы) потепление может достигнуть 3,8-6,7°C, причем наибольшие изменения прогнозируются для зимнего периода и северных районов области [16].

Сезонная структура потепления будет характеризоваться максимальными изменениями в зимний период, когда повышение температуры может составить 4,2-8,1°C к концу века [30]. Весенние температуры увеличатся на 3,5-6,2°C, летние - на 2,8-5,4°C, осенние - на 3,1-5,8°C [22]. Такая структура изменений приведет к дальнейшему сокращению отопительного периода и увеличению продолжительности вегетационного сезона [16].

Экстремальные температуры будут изменяться в соответствии с общей тенденцией потепления [9]. Количество дней с температурой выше 30°C увеличится в 2,5-4,2 раза по сравнению с современным уровнем, достигая 60-95 дней в год в степной зоне к концу XXI века [30]. Дни с экстремально низкими температурами (ниже -30°C) практически исчезнут из климата региона, сократившись до 1-3 дней в год даже в северных районах области [22].

Таблица 11 - Прогнозируемые изменения температуры воздуха в
Челябинской области

Период/Сценарий	2041-2050 гг. SSP2-4.5	2041-2050 гг. SSP5-8.5	2081-2100 гг. SSP2-4.5	2081-2100 гг. SSP5-8.5
Среднегодовая, °С	+2,1 до +2,8	+2,6 до +3,4	+3,8 до +4,9	+5,2 до +6,7
Зима, °С	+2,8 до +3,6	+3,5 до +4,7	+4,2 до +5,8	+6,1 до +8,1
Лето, °С	+1,6 до +2,2	+2,1 до +2,8	+2,8 до +3,7	+4,1 до +5,4
Дни Т > 30°С	+25 до +35	+32 до +45	+38 до +55	+58 до +85
Дни Т < -30°С	-8 до -12	-10 до -15	-12 до -18	-15 до -22

Режим атмосферных осадков будет претерпевать сложные изменения с выраженной сезонной и пространственной дифференциацией [17]. Годовые суммы осадков увеличатся на 8-15% к середине века и на 12-22% к концу XXI века, однако это увеличение будет происходить преимущественно за счет холодного периода года [30]. Зимние осадки возрастут на 25-45%, весенние - на 15-28%, в то время как летние осадки могут сократиться на 5-12% в южных районах области [22].

Интенсивность экстремальных осадков будет увеличиваться в соответствии с ростом влагосодержания атмосферы при повышенных температурах [16]. Максимальные суточные суммы осадков увеличатся на 15-25% к середине века и на 22-38% к концу столетия. Это повысит риски формирования опасных гидрологических явлений, особенно в период весеннего снеготаяния [28].

Таблица 12 - Прогнозируемые изменения осадков в Челябинской
области (%)

Сезон/Период	2041-2050 SSP2- 4.5	2041-2050 SSP5- 8.5	2081-2100 SSP2- 4.5	2081-2100 SSP5- 8.5
Год	+8 до +12	+11 до +15	+12 до +18	+16 до +22
Зима	+18 до +28	+22 до +35	+25 до +38	+32 до +45
Весна	+12 до +18	+15 до +22	+15 до +25	+20 до +28

Сезон/Период	2041-2050 SSP2-4.5	2041-2050 SSP5-8.5	2081-2100 SSP2-4.5	2081-2100 SSP5-8.5
Лето	-2 до +5	-5 до +2	-5 до +8	-12 до +5
Осень	+8 до +15	+10 до +18	+12 до +22	+15 до +28

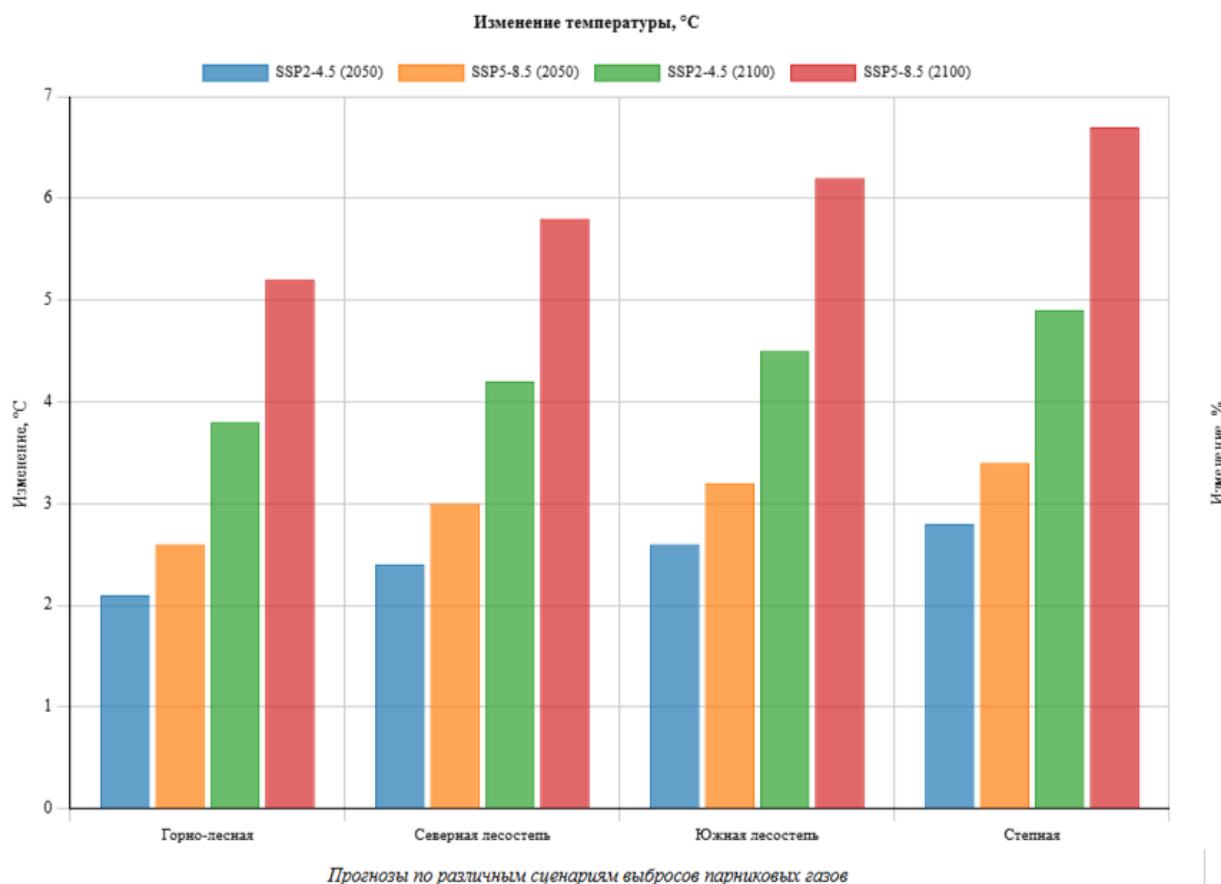


Рис. 16 – Прогнозируемые изменения температуры и осадков в Челябинской области к концу XXI века по различным сценариям

Оценка рисков и адаптационные меры к климатическим изменениям

Прогнозируемые климатические изменения создают комплекс рисков и вызовов для различных секторов экономики и социальной сферы Челябинской области [17]. Оценка климатических рисков основывается на анализе уязвимости региональных систем к изменениям температуры, осадков и экстремальных явлений, а также на определении адаптационного потенциала различных отраслей [30].

Сельскохозяйственный сектор испытает разнонаправленные воздействия климатических изменений [11]. Положительные эффекты включают увеличение продолжительности вегетационного периода, расширение ареалов возделывания теплолюбивых культур и повышение биологической продуктивности в северных районах области [12]. Сумма активных температур увеличится на 400-750°С к концу века, что позволит возделывать кукурузу на зерно в северных районах и расширить площади под подсолнечник [18].

Негативные воздействия на сельское хозяйство связаны с усилением засушливости в южных районах, увеличением повторяемости экстремальных погодных явлений и возрастанием рисков водной и ветровой эрозии почв [22]. Дефицит влаги в вегетационный период в степной зоне может увеличиться до 650-780 мм к концу XXI века, что потребует расширения площадей орошаемого земледелия [11].

Водные ресурсы региона будут испытывать существенные изменения, связанные с трансформацией гидрологического режима рек и изменением структуры водного баланса [28]. Сокращение продолжительности ледового периода на 25-40 дней изменит режим весеннего половодья, сделав его менее интенсивным, но более продолжительным [21]. Увеличение зимних осадков при повышенных температурах приведет к росту доли дождевых паводков в общем стоке рек [30].

Лесное хозяйство столкнется с рисками изменения видового состава лесов, увеличения пожароопасности и распространения вредителей [16]. Смещение климатических зон приведет к постепенной деградации еловых лесов в южных районах и расширению ареалов широколиственных пород [1]. Пожароопасный сезон увеличится на 20-35 дней, а класс пожарной опасности повысится на одну градацию [17].

Энергетический сектор испытает снижение потребности в отоплении при одновременном росте потребности в кондиционировании воздуха [25]. Градусо-дни отопительного периода сократятся на 25-40%, что снизит

энергопотребление в зимний период [30]. Однако увеличение числа жарких дней потребует дополнительных мощностей для кондиционирования, особенно в крупных городах области [10].

Таблица 13 - Основные климатические риски и адаптационные меры по секторам экономики

Сектор	Основные риски	Адаптационные меры
Сельское хозяйство	Засухи, экстремальные осадки, эрозия почв	Развитие орошения, селекция засухоустойчивых сортов, почвозащитные технологии
Водное хозяйство	Изменение стока, паводки, дефицит воды	Модернизация водохранилищ, развитие системы мониторинга, водосберегающие технологии
Лесное хозяйство	Пожары, вредители, деградация лесов	Противопожарные мероприятия, лесовосстановление, мониторинг состояния лесов
Энергетика	Изменение энергопотребления, экстремальные явления	Модернизация сетей, развитие ВИЭ, энергоэффективность
Транспорт	Деградация дорожного покрытия, экстремальные явления	Адаптация конструкций, системы мониторинга, резервные маршруты

Стратегия адаптации к климатическим изменениям должна включать комплекс мер по различным направлениям [30]. Институциональные меры предполагают создание системы климатического мониторинга, развитие системы раннего предупреждения об опасных явлениях и включение климатических факторов в процессы планирования развития территории [26].

Технологические адаптационные меры включают внедрение климатически адаптированных технологий в различных отраслях, развитие систем водосбережения и орошения, модернизацию инфраструктуры с учетом изменяющихся климатических условий [17]. Особое значение имеет развитие систем климат-контроля в городах и внедрение "зеленых" технологий в строительстве [25].

Экономические инструменты адаптации предполагают создание системы климатического страхования, развитие механизмов финансирования адаптационных мер и стимулирование внедрения климатически устойчивых технологий [30]. Важную роль играет развитие рынков экосистемных услуг и создание экономических стимулов для сохранения природных экосистем [16].

Таким образом, прогнозные сценарии развития климата Челябинской области указывают на продолжение интенсивных климатических изменений в XXI веке, которые создают как новые возможности, так и серьезные вызовы для устойчивого развития региона [30]. Успешная адаптация к этим изменениям требует комплексного подхода, включающего институциональные, технологические и экономические меры, направленные на повышение климатической устойчивости региональных систем [16, 17].

Выводы по третьей главе

Анализ современного состояния климата Челябинской области и прогнозных оценок его развития позволяет сформулировать следующие ключевые выводы о характере и масштабах климатических изменений в регионе:

Современный период (1994-2023 годы) характеризуется беспрецедентными темпами климатических изменений, существенно превышающими исторические аналоги [30]. Ускорение потепления до 3,5-4,8°C на 100 лет в сочетании с трансформацией экстремальных явлений создает качественно новые климатические условия, требующие пересмотра традиционных подходов к планированию хозяйственной деятельности [22]. Изменения климатических норм современного периода по сравнению с базовым периодом 1961-1990 годов составляют 2,2-2,9°C для температуры и 37-62 мм для осадков, что свидетельствует о кардинальной трансформации климатической системы региона [16].

Региональные климатические изменения тесно связаны с глобальными процессами и крупномасштабными атмосферными колебаниями, при этом

темпы регионального потепления значительно превышают среднеглобальные показатели [9]. Корреляционная связь с глобальной температурой составляет 0,78, а влияние арктических и североатлантических осцилляций на региональный климат характеризуется коэффициентами корреляции 0,45-0,62 [16]. Антропогенные факторы, включая промышленные выбросы парниковых газов и урбанизацию, усиливают глобальные тенденции и создают дополнительные локальные климатические эффекты, особенно выраженные в крупных промышленных центрах [25].

Прогнозные сценарии указывают на продолжение интенсивных климатических изменений в XXI веке с дополнительным потеплением на 3,8-6,7°C к концу столетия в зависимости от сценария выбросов парниковых газов [30]. Региональные климатические модели демонстрируют высокую надежность прогнозов (коэффициенты корреляции с наблюдениями 0,78-0,92) и указывают на сохранение основных тенденций современного периода с их дальнейшим усилением [7]. Наиболее существенные изменения прогнозируются для зимнего температурного режима (+4,2 до +8,1°C) и режима экстремальных явлений, что создает новые вызовы для адаптации региональных систем [22].

Климатические риски и необходимые адаптационные меры имеют выраженную секторальную специфику и требуют разработки комплексной стратегии адаптации, включающей институциональные, технологические и экономические инструменты [17]. Сельскохозяйственный сектор столкнется с противоречивыми воздействиями - расширением агроклиматических ресурсов в северных районах при одновременном усилении засушливости на юге [11]. Водные ресурсы, лесное хозяйство и энергетика потребуют существенной модернизации для обеспечения устойчивого функционирования в новых климатических условиях [28, 30].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе были проведены комплексные исследования метеорологического режима территории Челябинской области за период инструментальных наблюдений с детальным анализом динамики основных климатических параметров, выявлением современных тенденций климатических изменений и разработкой прогнозных сценариев развития климата региона до конца XXI века. Исследование базировалось на обширной базе данных четырех репрезентативных метеорологических станций с использованием современных методов статистического анализа и климатического моделирования.

На основании проведенного исследования можно сделать несколько ключевых выводов.

Во-первых, необходимо понимать, что климатическая система Челябинской области претерпевает кардинальные изменения, характеризующиеся устойчивым трендом к потеплению со скоростью 2,13-3,62°C на 100 лет в зависимости от географического положения, что значительно превышает среднеглобальные темпы климатических изменений и создает качественно новые условия для функционирования природных и антропогенных систем региона.

Во-вторых, следует отметить, что пространственная дифференциация климатических изменений обусловлена орографическими особенностями территории, при этом наиболее интенсивные трансформации характерны для равнинных южных районов области, где потепление сочетается с усилением аридности климата и сокращением летних осадков на фоне общего увеличения годовых сумм осадков на 65-101 мм.

В-третьих, современный период (1994-2023 годы) отличается беспрецедентными темпами климатических изменений с ускорением потепления до 3,5-4,8°C на 100 лет, что в 1,5-2 раза превышает темпы предшествующих десятилетий и сопровождается кардинальной

трансформацией экстремальных метеорологических явлений, включая увеличение повторяемости жарких дней в 1,8-2,4 раза и сокращение экстремально холодных периодов.

Далее, установлено, что региональные климатические изменения тесно связаны с глобальными процессами через механизмы крупномасштабных атмосферных колебаний (АО, NAO, ЕАК), при этом корреляционная связь с глобальной температурой составляет 0,78, а антропогенные факторы, включая промышленные выбросы и урбанизацию, создают дополнительные локальные климатические эффекты, усиливающие общие тенденции потепления.

Также прогнозные сценарии, основанные на ансамблевом моделировании с высокой степенью достоверности (коэффициенты корреляции 0,78-0,92), указывают на продолжение интенсивных климатических изменений с дополнительным потеплением на 3,8-6,7°C к концу XXI века, что потребует разработки комплексной стратегии адаптации, включающей институциональные, технологические и экономические меры для обеспечения климатической устойчивости различных секторов региональной экономики.

Таким образом, результаты исследования свидетельствуют о том, что Челябинская область находится в состоянии активной климатической трансформации, масштабы и темпы которой требуют незамедлительной разработки и реализации адаптационных стратегий для минимизации негативных последствий климатических изменений и максимального использования открывающихся возможностей для устойчивого развития региона в новых климатических условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алисов, Б. П. Климатология: учебник / Б. П. Алисов, Б. В. Полтараус. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: МГУ, 1974. – 299 с.
2. Ведь, И. П. Климатический атлас Крыма: справочник / И. П. Ведь. – Симферополь: Таврия-Плюс, 2000. – 118 с.
3. Вельтищев, Н. Ф. Мезометеорологические процессы: учебное пособие / Н. Ф. Вельтищев, В. М. Степаненко. – Москва: МГУ, 2006. – 101 с.
4. Воробьёв, В. И. Основные понятия синоптической метеорологии: учебное пособие / В. И. Воробьёв. – Санкт-Петербург: РГГМУ, 2003. – 48 с.
5. Воробьёв, В. И. Практикум по синоптической метеорологии: руководство к лабораторным работам / В. И. Воробьёв. – Санкт-Петербург: РГГМУ, 2006. – 299 с.
6. Воробьёв, В. И. Синоптическая метеорология: учебник / В. И. Воробьёв. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1991. – 616 с.
7. Гандин, Л. С. Численные методы краткосрочного прогноза погоды: учебник / Л. С. Гандин, А. С. Дубов. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1968. – 429 с.
8. Дашко, Н. А. Курс лекций по синоптической метеорологии: учебное пособие / Н. А. Дашко. – Владивосток: ДВГУ, 2005. – 523 с.
9. Дроздов, О. А. Климатология: учебник / О. А. Дроздов, В. А. Васильев, Н. В. Кобышева, А. Н. Раевский, Л. К. Смекалова, Е. П. Школьный. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1989. – 568 с.
10. Ермакова, Л. Н. Основы метеорологии и климатологии: учебное пособие / Л. Н. Ермакова, А. Г. Тимофеева, Н. И. Толмачева. – Москва: ИПК Росгидромета, 2017. – 332 с.
11. Журина, Л. Л. Агрометеорология: учебник / Л. Л. Журина. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва: ИНФРА-М, 2024. – 350 с.
12. Журина, Л. Л. Агрометеорология: учебник / Л. Л. Журина, А. П. Лосев. – 2-е изд., перераб. и доп. – Санкт-Петербург: Квадро, 2014. – 368 с.

13. Зверев, А. С. Синоптическая метеорология: учебник / А. С. Зверев. – 2-е изд., перераб. и доп. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1977. – 712 с.
14. Кагермазов, А. Х. Цифровая атмосфера. Современные методы и методология исследования опасных метеорологических процессов и явлений: монография / А. Х. Кагермазов. – Нальчик: Печатный двор, 2015. – 216 с.
15. Кадыгров, Е. Н. Методические рекомендации по использованию данных дистанционных измерений профилей температуры в атмосферном пограничном слое: справочное пособие / Е. Н. Кадыгров, И. Н. Кузнецова. – Долгопрудный: ЦАО, 2015. – 161 с.
16. Кислов, А. В. Теория климата: монография / А. В. Кислов. – Москва: МГУ, 1989. – 152 с.
17. Климатические характеристики условий распространения примесей в атмосфере: справочное пособие / под ред. Э. Ю. Безуглой, М. Е. Берлянда. – Санкт-Петербург: Гидрометеиздат, 1991. – 584 с.
18. Ковриго, П. А. Метеорология и климатология: учебник / П. А. Ковриго. – Минск: Вышэйшая школа, 2022. – 414 с.
19. Краткосрочные метеорологические прогнозы: учебное пособие / под ред. Р. М. Вильфанда. – Казань: КГУ, 2008. – 52 с.
20. Лебедев, А. Б. Прогнозирование синоптического положения: учебное пособие / А. Б. Лебедев. – Санкт-Петербург: ВКА имени А. Ф. Можайского, 2011. – 113 с.
21. Мазин, И. П. Облака и облачная атмосфера: справочник / И. П. Мазин, А. Х. Хргиан. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1989. – 647 с.
22. Матвеев, Л. Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы: учебник / Л. Т. Матвеев. – 2-е изд., перераб. и доп. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1984. – 751 с.
23. Матвеев, Л. Т. Облака и вихри - основа колебаний погоды и климата: монография / Л. Т. Матвеев, Ю. Л. Матвеев. – Санкт-Петербург: РГГМУ, 2005. – 327 с.

24. Михеев, В. А. Климатология и метеорология: учебное пособие / В. А. Михеев. – Ульяновск: УлГТУ, 2009. – 114 с.
25. Моргунов, В. К. Основы метеорологии, климатологии. Метеорологические приборы и методы наблюдений: учебник / В. К. Моргунов. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2005. – 337 с.
26. Наставление по службе прогнозов. Раздел 2. Служба метеорологических прогнозов. Части 1 и 2: руководство. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1974. – 60 с.
27. Полякова, Л. С. Метеорология и климатология: учебное пособие / Л. С. Полякова, Д. В. Кашарин. – Новочеркасск: НГМА, 2004. – 108 с.
28. Русин, И. Н. Основы метеорологии и климатологии. Курс лекций: учебное пособие / И. Н. Русин, П. П. Арапов. – Санкт-Петербург: РГГМУ, 2008. – 199 с.
29. Хромов, С. П. Метеорологический словарь: справочник / С. П. Хромов, Л. И. Мамонтова. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1974. – 569 с.
30. Хромов, С. П. Метеорология и климатология: учебник / С. П. Хромов, М. А. Петросянц. – 6-е изд., перераб. и доп. – Москва: МГУ, 2012. – 584 с.