На правах рукописи



Лавров Александр Сергеевич

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА МЕТОДАМИ КВАНТИЛЬНОЙ РЕГРЕССИИ ПО ДАННЫМ СТАНЦИОННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

1.6.18 Науки об атмосфере и климате

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Обнинск - 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении «Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных» (ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД»)

Научный руководитель:

Стерин Александр Маркович
доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник,
Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных», главный научный сотрудник

Официальные оппоненты:

Рубинштейн Константин Григорьевич
доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник,
Федеральное государственное бюджетное учреждение «Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации» (ФГБУ «Гидрометцентр России»)

Чернокульский Александр Владимирович
кандидат физико-математических наук,
Федеральное государственное учреждение науки Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук,

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова»

Защита состоится 2 февраля 2027 г. в 15 часов на заседании Диссертационного совета 26.1.002.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении «Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации» (ФГБУ «Гидрометцентр России») по адресу: 123376, Россия, г. Москва, Большой Предтеченский переулок, д.11.

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

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

Ученый секретарь Диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук М.В. Шатунова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Оценочные доклады Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК), специальные доклады МГЭИК, другие многочисленные результаты и обобщения исследований в области изменений климата подтверждают связь между наблюдаемым ростом средней глобальной температуры, обусловленным преимущественно антропогенным увеличением концентрации парниковых газов в атмосфере, и ростом интенсивности, частоты, пространственных и временных масштабов близких к экстремальным метеорологических и климатических явлений. Растущее число метеорологических явлений, близких к экстремальным, и серьезность вызванных ими социально-экономических последствий указывают на важность анализа не только средних значений, но и значительно более широкого перечня характеристик распределений метеовеличин, таких, как моменты второго и более высоких порядков, квантили, статистические характеристики т.н. «хвостов» распределений метеовеличин. В условиях меняющегося климата нужны оценки долгопериодных тенденций изменений характеристик распределений метеовеличин. Между тем традиционно применяемые в климатологии для оценки климатических трендов статистические методы регрессионного анализа, основанные на классическом Методе Наименьших Квадратов (МНК), оценивают лишь долгопериодные тенденции изменений условного матожидания метеовеличин.

Перспективным инструментом более детального, чем МНК регрессия, анализа тенденций изменений свойств распределений является квантильная регрессия, предложенная Роджером Конкером и Гилбертом Бассетом в 1978 году [Koenker, Basset, 1978]. В отличие от МНК регрессии, метод квантильной регрессии (МКР) является непараметрическим методом и позволяет получить характеристики регрессии для квантилей любых уровней τ от 0 до 1 распределения зависимой переменной. Кроме того, квантильная регрессия значительно менее чувствительна, чем МНК, к выбросам в данных и к возможным нарушениям предположений о характере распределений метеовеличин.

Оценки климатических трендов для разных уровней квантилей τ, получаемые с помощью МКР, позволяет оценить долгопериодные тенденции изменения изменчивости в любой части распределения метеовеличины.

Проведение исследований тенденций изменения климатических трендов для приземных температуры и осадков в разных частях диапазона квантилей от 0 до 1 особенно важно для РФ, с учетом большой территории, многообразия климатических процессов, ростом интенсивности и частоты явлений, близких к экстремальным, большей, по сравнению со средней, скоростью потепления, особенно в северных регионах, где проявляется полярное усиление, приводящее к изменению характеристик субсезонной изменчивости метеовеличин.

Важными являются также мониторинг и оценки долгопериодных тенденций изменения климата свободной атмосферы. Свободная атмосфера (тропосфера, нижняя стратосфера) является одной из важнейших составных частей климатической системы. К числу определенных ГСНК т.н. Существенных климатических переменных (ECV), описывающих состояние климатической

системы свободной атмосферы, относятся, в том числе, температура и скорость и направление ветра.

В условиях ограничений информационного обмена существующие в Российской Федерации схемы анализа текущего состояния и изменений климата должны опираться на информационные ресурсы, формируемые, прежде всего, за счет собственных технологий сбора и подготовки информационных продуктов мониторинга климата. В полной мере это относится к мониторингу климата свободной атмосферы.

Цели и задачи работы.

Целью работы является количественная оценка и качественный анализ изменений вероятностных параметров ключевых климатических показателей в условиях глобального потепления.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

1. детализация климатических трендов приземной температуры воздуха и суточных сумм осадков по станционным данным на территории Российской Федерации методами квантильной регрессии;
2. многомерный кластерный анализ полученных на основе квантильной регрессии трендов приземной температуры и совместный анализ полученных на основе квантильной регрессии трендов приземной температуры и суточных сумм осадков на территории Российской Федерации;
3. анализ особенностей уменьшения изменчивости субсезонного масштаба приземной температуры воздуха на территории Российской Федерации с применением квантильной регрессии;
4. детализация климатических трендов температуры в свободной атмосфере методом квантильной регрессии;
5. мониторинг и оценка текущих изменений характеристик температуры и ветра в свободной атмосфере на основе глобального массива данных аэрологического зондирования, собираемого во ВНИИГМИ-МЦД. Верификация получаемых результатов оценки климатических изменений температуры свободной атмосферы на основе сопоставления с результатами, независимо получаемыми другими крупными центрами.

Научная новизна.

Впервые методами квантильной регрессии осуществлены расчеты квантильных трендов приземной температуры и суточных сумм осадков для более чем 1400 метеостанций на территории России.

По итогам расчетов квантильных трендов, с использованием многомерного кластерного анализа показана возможность выделения географически компактных областей на территории Российской Федерации, для которых сходным образом проявляются:

- детализированные по диапазону уровней квантилей от 0,01 до 0,99 оценки трендов приземной температуры,

- совместно анализируемые детализированные по диапазону уровней квантилей от 0,01 до 0,99 оценки трендов приземной температуры и суточных сумм осадков.

С применением метода квантильной регрессии к анализу станционных временных рядов приземной температуры подтверждено положение об адвективной природе ослабления внутрисезонной климатической изменчивости вследствие полярного усиления, выдвинутое в работе J. Screen 2014 года [Screen, 2014] и других публикациях. Впервые с применением квантильной регрессии проанализированы географические и сезонные особенности ослабления внутрисезонной климатической изменчивости приземной температуры для территории Российской Федерации.

Впервые методами квантильной регрессии исследованы особенности трендов температуры в тропосфере и нижней стратосфере Северного полушария в разных частях диапазона уровней квантилей от 0,05 до 0,95;

На основе собираемых и обрабатываемых во ВНИИГМИ-МЦД радиозондовых данных построены и проанализированы климатические ряды аномалий температуры и характеристик ветра в свободной атмосфере. Полученные результаты подтверждают проявление трех важнейших климатических сигналов в свободной атмосфере: усиливающееся потепление в тропосфере, значительное похолодание в нижней стратосфере за период до конца прошлого века и ослабление похолодания в нижней стратосфере в XXI веке.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Полученные результаты детализированного анализа трендов приземной температуры и осадков методом квантильной регрессии, дающие развернутую картину тенденций изменения характеристик вариабельности климата в разных регионах на территории Российской Федерации, могут быть использованы:

- для уточнения климатического районирования территории РФ с учетом характера проявления и скорости изменения важнейших для приземного климата переменных.
- для учета многолетних тенденций изменения зависящих от квантилей климатических индексов, используемых в выработке решений по адаптации к изменениям климата и в прикладной климатологии (социальное планирование, здравоохранение, строительство, производство, транспорт, жилищно-коммунальное хозяйство, и др.).

Результаты мониторинга и анализа режимов температуры и ветра в свободной атмосфере используются:

- для подготовки соответствующих разделов в ежегодном «Докладе об особенностях климата на территории Российской Федерации», издаваемом Росгидрометом.
- для учета параметров климата свободной атмосферы в задачах конструирования и эксплуатации летательных аппаратов, в задачах проектирования объектов энергетики.

Исследования, отраженные в диссертации, были проведены в рамках темы 3.2 плана научно-исследовательских и технологических работ (НИТР) Росгидромета по направлению «Мониторинг глобального климата, климата РФ и ее регионов. Развитие методов и технологий

мониторинга, специализированных баз климатических данных. Исследование климатической изменчивости на масштабах от внутрисезонного до нескольких десятилетий и основных ее факторов».

Методология и методы исследования. Для решения сформулированных в диссертационной работе задач использованы методы статистической обработки данных, их пространственного и временного обобщения, оценки климатических трендов, полученных как традиционными методами регрессионного анализа, так и методами квантильной регрессии, кластерный анализ, методы статистической графики и визуализации данных.

Положения, выносимые на защиту

1. В условиях глобального потепления численные оценки трендов приземной температуры и сумм осадков на территории России, полученные с применением квантильной регрессии, неравномерны по диапазону уровней квантилей. Численные оценки трендов температуры в свободной атмосфере Северного полушария, полученные с применением квантильной регрессии, также неравномерны по диапазону уровней квантилей.
2. С использованием многомерного кластерного анализа возможно выделение географически компактных областей на территории Российской Федерации, для которых сходным образом проявляются детализированные по диапазону уровней квантилей от 0,01 до 0,99 оценки трендов приземной температуры и суточных сумм осадков;
3. С помощью метода квантильной регрессии подтверждено положение об адвективной природе ослабления внутрисезонной климатической изменчивости вследствие полярного усиления. На территории Российской Федерации ослабление внутрисезонной изменчивости приземной температуры воздуха в большей степени проявляется в высоких широтах и в холодные периоды года.
4. Оценки состояния и тенденций изменения температурного режима в свободной атмосфере, полученные на основе собираемых во ВНИИГМИ-МЦД радиозондовых данных, подтверждают проявление трех важнейших климатических сигналов для температуры в свободной атмосфере, а именно: усиливающегося потепления в тропосфере, значительного похолодания в нижней стратосфере, продолжавшегося до окончания 90-х годов прошлого века, и значительного ослабления похолодания в нижней стратосфере с начала XXI столетия, и хорошо согласуются с известными в литературе оценками на основе данных других типов и других независимо формируемых информационных продуктов.

Степень достоверности результатов работы. Обоснованность научных положений и выводов, приведенных в диссертационной работе, обусловлена обработкой и обобщением большого объема аэрологических данных и приземных метеорологических данных Единого государственного фонда данных, прошедших дополнительный контроль качества, и корректным использованием современных статистических методов анализа данных, прежде всего квантильной регрессии и кластерного анализа. Достоверность полученных результатов пространственного и временного обобщения температуры в свободной атмосфере и соответствующих результатов ее мониторинга подтверждена их сравнением с имеющимися в

мировой литературе аналогичными рядами спутниковых наблюдений и массивов реанализов, а также сравнением с рядами, получаемыми в других центрах на основе других методик обобщения радиозондовых данных.

Использование результатов диссертации. При подготовке разделов Ежегодных докладов Росгидромета об особенностях климата на территории РФ используются результаты оценки текущего состояния и тенденций изменения температуры и ветра в свободной атмосфере. Решением Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и гелиофизическим прогнозам от 14 марта 2019 г. методика «Климатический мониторинг ветрового режима в свободной атмосфере» рекомендована к внедрению в качестве основной в ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД».

Апробация работы. Результаты диссертационной работы были представлены на научно-практической конференции «Современные информационные технологии в гидрометеорологии и смежных с ней областях» в 2017 году (Обнинск, Россия), на всероссийской конференции «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды» в 2018 году (Санкт-Петербург, Россия), на международных конференциях и школах молодых ученых по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды ENVIROMIS в 2018 и 2022 годах (Томск, Россия), на международных молодежных школах и конференциях по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде CITES в 2021 и 2023 годах (Москва, Россия), на всероссийских конференциях «Изменение климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования» в 2019 и 2023 годах (Москва, Россия), на международной онлайн-конференции «Климатические и погодные экстремальные явления: данные, анализ и воздействие» в 2020 году (Томск, Россия), на научно-технической конференции «Моделирование параметров атмосферы при применении систем вооружения» в 2020 и 2022 годах (Королев, Россия), на всероссийской научной конференции «Мониторинг состояния и загрязнения окружающей среды: приземный климат, загрязняющие и климатически активные вещества» в 2023 году (Москва, Россия), на международной конференции к 70-летию Геофизического центра РАН и 300-летию РАН «Наука о данных, геоинформатика и системный анализ в изучении Земли» в 2024 г (Суздаль, Россия).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 25 работ, в том числе 7 статей в журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией (ВАК), 13 публикаций в материалах международных и российских конференций**.**

Личный вклад автора.

Все результаты, составляющие основное содержание диссертационной работы, получены автором лично или при его непосредственном участии в соавторстве с научным руководителем работы доктором физико-математических наук Стериным Александром Марковичем и кандидатом физико-математических наук Хохловой Анной Владимировной. Автором лично выполнено детальное исследование климатических трендов метеопараметров с помощью метода квантильной регрессии, который позволяет оценить тенденции изменения метеовеличин (в частности, температуры, сумм осадков) во всем диапазоне квантилей значений метеовеличин от

0 до 1, в том числе значений, близких к экстремальным, лично выполнены кластеризация рассчитанных детализированных по диапазону значений квантилей климатических трендов приземной температуры и совместно рассчитанных климатических трендов приземной температуры и суточных сумм осадков, подбор гиперпараметров кластеризации. Автор принимал активное участие в разработке методики мониторинга ветра в свободной атмосфере. Анализ особенностей температуры и ветра в свободной атмосфере, в том числе, подготовка данных, табличного и графического материала, расчеты, написание соответствующих разделов ежегодного Доклада Росгидромета об особенностях климата на территории Российской Федерации выполняются автором лично в рамках работ по мониторингу температуры и скорости ветра в свободной атмосфере.

Автором выполнены сопоставление и анализ климатических характеристик, полученных из разных источников, в том числе, по реанализам нескольких климатических центров. Автор принимал непосредственное участие в написании статей и в представлении научных докладов, в том числе в качестве докладчика.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений, списка литературы из 187 наименований и 1 приложения. Основное содержание диссертации представлено на 183 страницах, включая 44 рисунка и 13 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении даётся обоснование актуальности темы исследования, формулируется цель работы и задачи, решаемые в ходе ее выполнения. Аргументируется научная новизна проводимого исследования, теоретическая и практическая значимость работы. Приводятся научные положения, выносимые на защиту, а также сведения о публикациях автора по теме диссертации, апробации работы и личном вкладе автора.

Глава 1 носит обзорный характер.

В **Разделе 1.1** кратко упоминаются вызовы, связанные с продолжающимися процессами потепления климата и роста частоты и интенсивности экстремальных явлений. Отмечается, что при анализе статистик экстремальных явлений следует рассматривать особенности плотностей распределений метеовеличин, не ограничиваясь анализом только средних значений и стандартных отклонений. В работе [Kircher, Proistosescu, Sriver, 2025] подчеркивается, что в условиях глобального потепления и роста числа экстремальных явлений наблюдаемые распределения приземной температуры воздуха не являются гауссовыми. Поэтому для определения частоты экстремальных температурных явлений необходимы моменты, выходящие за рамки дисперсии. Результаты этой работы показывают, что ненулевые асимметрия и эксцесс возникают из-за нелинейности усредненного по времени меридионального температурного профиля.

При оценке климатических трендов температуры, в том числе в условиях отклонений ее плотностей распределений от гауссовых, существенным фактором являются различия трендов в различных частях диапазона возможных значений температуры, приводящих к долгопериодным

изменениям субсезонной изменчивости приземной температуры. К числу важнейших процессов в климатической системе относится полярное усиление – более быстрое потепление Арктики по сравнению с со скоростью потепления в более низких широтах. В основополагающей работе [Screen, 2014] рассматриваются возможные механизмы уменьшения внутрисезонной изменчивости приземной температуры воздуха для средних и высоких широт Северного полушария за счет влияния арктического усиления. Отмечается, что арктическое усиление наблюдается во все сезоны, кроме летнего, и наиболее выражено в осенний сезон. В качестве основного из возможных механизмов влияния арктического усиления, рассматривается более быстрое нагревание холодных арктических масс воздуха, поступающих в меридиональном направлении с севера на юг, чем нагревание теплых масс воздуха, перемещающихся в противоположном направлении с юга на север. Таким образом, в более холодные дни, которым соответствуют значения, более близкие к левому хвосту распределения температуры, тренды потепления оказываются выше, чем тренды потепления в более теплые дни, которым соответствуют значения, более близкие к правому хвосту распределения.

В разделе проводится обзор публикаций, посвященных связи арктического усиления с уменьшением субсезонной изменчивости приземной температуры.

В **Разделе 1.2** приводится краткое описание метода квантильной регрессии (МКР), позволяющего оценивать параметры регрессии для квантилей любых уровней τ от 0 до 1 распределения зависимой переменной, а также приводятся примеры использования квантильной регрессии в климатологии, прежде всего, для детализации климатических трендов по диапазону уровней квантилей от нуля до единицы.

Раздел 1.3 посвящен обзору результатов исследований текущего состояния и долгопериодных тенденций температуры в свободной атмосфере. Обсуждаются проблемы, связанные с воспроизведением температуры в тропосфере и в нижней стратосфере основных климатических сигналов для свободной атмосферы:

- продолжающегося потепления в тропосфере,
- похолодания в нижней стратосфере, наблюдавшегося с начала инструментальных наблюдений за температурой в свободной атмосфере, до конца XX века,
- замедления похолодания в нижней стратосфере на рубеже XX и XXI веков, и практически полного прекращения похолодания в нижней стратосфере в XXI веке.

Глава 2 посвящена данным, используемым для анализа трендов метеовеличин для приземного климата (температура воздуха и суммы осадков) и для климата в свободной атмосфере (температура воздуха и ветер), и методам их обработки. Основное внимание уделяется методике расчета климатических трендов с использованием аппарата квантильной регрессии. Для пространственного обобщения результатов анализа квантильных трендов аномалий приземной температуры и сумм осадков используется кластеризация методом k-средних (k-means).

Раздел 2.1 посвящен описанию данных, используемых в работе. Основным источником данных для исследования трендов приземной температуры и осадков являются

метеорологические данные с 1454 метеорологических станций на территории России за период с 1987 года по настоящее время.

Для мониторинга температуры и ветра в свободной атмосфере основным источником данных выступает массив радиозондовых данных АЭРОСТАС, собираемый во ВНИИГМИ-МЦД. Аэрологические данные при создании массива проходят процедуру комплексного контроля качества, включая гидростатический, горизонтальный и вертикальный контроль качества [Алдухов, Черных, 2013]. В настоящее время число станций, с которых собираются данные, составляет порядка 900-930 и варьирует от месяца к месяцу. При этом около 700 станций глобальной сети расположены в Северном полушарии.

Полученные результаты для температуры в свободной атмосфере сопоставляются с аналогичными результатами, полученными по данным других независимых источников, в перечень которых входят набор данных радиозондирования RATPAC, наборы данных спутникового зондирования UAH и RSS и данные реанализов ERA-Interim, ERA5, JRA-55, NCEP-DOE, NCEP-CFSR.

В Разделе 2.2 изложены основы метода квантильной регрессии (МКР, впервые предложен Koenker R., Bassett G. Jr., в 1978 году). Идея МКР для линейной модели подразумевает, что для произвольного уровня квантиля $0<\tau<1$ можно ввести понятие линейной условной функции $Q(\tau|X=x)=x^T\beta(\tau)$. В случае, если квантильная регрессия линейна, каждому значению τ в интервале от 0 до 1 соответствует своя прямая, тангенс угла наклона которой к оси независимой переменной равен $\hat{\beta}(\tau)$. По пучку прямых для разных значений τ можно построить график зависимости $\hat{\beta}(\tau)$ от τ в интервале от 0 до 1, называемый процесс-диаграммой.

Решение задачи линейной квантильной регрессии для произвольного уровня квантиля τ ($0<\tau<1$) ведется путем оптимизации следующего выражения:

$$\hat{\beta}=argmin\left[\sum_{i\in\{i:\,y_i\geq x_i'\beta\}}\tau\left|y_i-x_i^T\beta\right|+\sum_{i\in\{i:\,y_i<x_i'\beta\}}(1-\tau)\left|y_i-x_i^T\beta\right|\right].$$

В отличие от решения задачи линейной регрессии методом наименьших квадратов (МНК), решение для задачи линейной квантильной регрессии (линейного МКР) не может быть найдено аналитически, но данная оптимизационная задача может быть переформулирована в виде задачи линейного программирования. В тексте диссертации приводится описание некоторых алгоритмов решения этой задачи линейного программирования: симплекс-метод, метод внутренней точки и алгоритм конечного сглаживания. Также приводится описание методов оценки доверительных интервалов коэффициентов регрессии аналитически либо методом бутстрепа.

Разность между коэффициентами квантильной регрессии для квантилей разных порядков может служить характеристикой тенденций изменения вариабельности значений метеовеличины, например: $T(M)=\hat{\beta}(\tau=0{,}75)-\hat{\beta}(\tau=0{,}25)$ характеризует тенденции изменения в центре распределения метеовеличины, уменьшение или увеличение вариабельности. Качественно оценить тенденцию изменения вариабельности можно легко с помощью процесс-диаграммы. На рисунке 1 представлены временные ряды аномалий температуры и соответствующие им процесс-диаграммы на двух станциях, на которых наблюдается уменьшение и увеличение вариабельности

температуры.

В заключении данного раздела дается описание задач, решаемых в данной работе с помощью МКР: исследование тенденций изменения аномалий средней, минимальной и максимальной суточной температуры, а также суточных сумм осадков на территории Российской Федерации, и исследование тенденций изменения суточных значений аномалий температуры в свободной атмосфере Северного полушария.

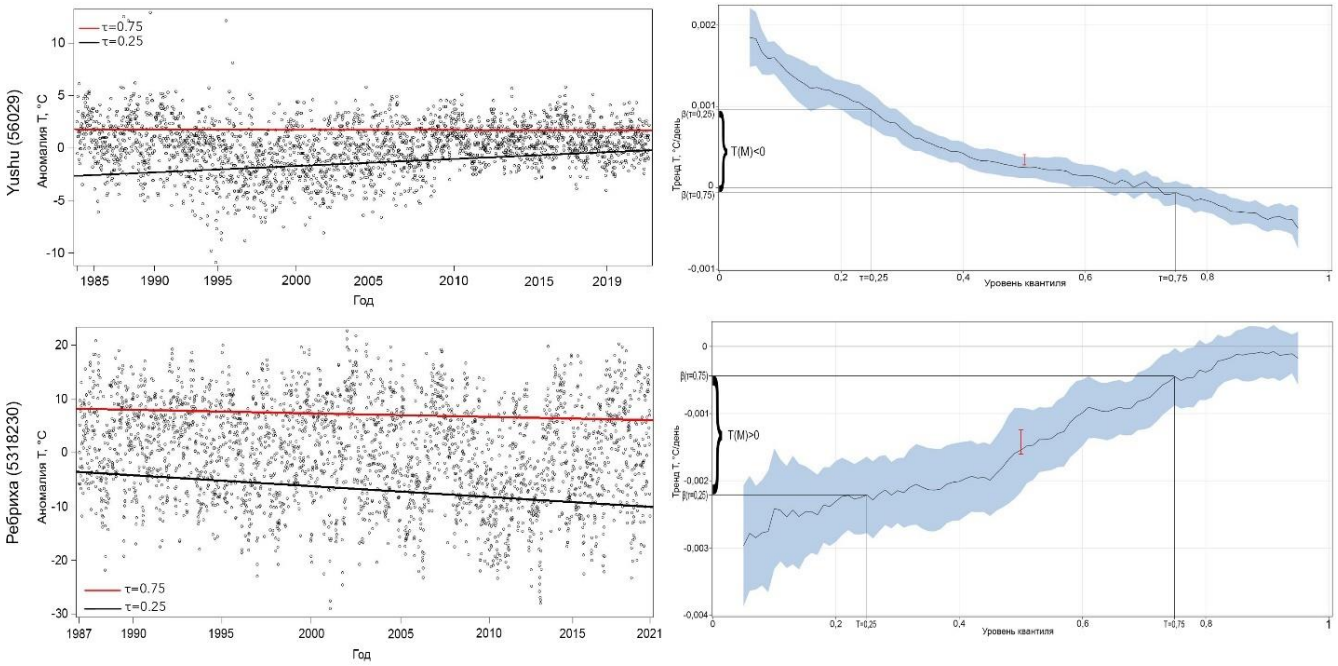


Рисунок 1 – Временные ряды (левый столбец) и процесс-диаграммы с отмеченными T(M) (правый столбец) для летних аномалий температуры на станции Yushu (56029, Китай, 50 гПа) (верхняя строка) и аномалий зимней средней суточной приземной температуры на станции Ребриха (5318230, Алтайский край)

Во всех случаях использовалась простая линейная модель

$$y_i = \beta_{0i} + x_i\beta_{1i} + \varepsilon_i,$$

где x_i – временной отсчет, а ε_i – случайные ошибки.

Для приземных характеристик по данным 1454 метеорологических станций на территории России оценки трендов были рассчитаны для 21 уровня квантилей: 0,01; интервал уровней квантилей от 0,05 до 0,95 с шагом 0,05; 0,99. Для аномалий температуры в свободной атмосфере оценки трендов были рассчитаны для 90 уровней квантилей: от 0,05 до 0,95 с шагом 0,01 – по данным 363 аэрологических станций на 14 стандартных изобарических поверхностях от 1000 гПа до 30 гПа.

Временные ряды характеристик составлялись из суточных значений, сгруппированных по четырем сезонам: зима DJF, весна MAM, лето JJA и осень SON. Временные ряды приземных характеристик включали в себя данные за период 1987-2021 гг., а временные ряды аномалий температуры в свободной атмосфере – за период 1979-2021 гг. для российских станций и за период 1984-2021 гг. для зарубежных станций.

Таким образом число наблюдений в каждом временном ряду за более чем 30-летний период составляло порядка 3000. Для решения оптимизационных задач такого размера использовался

модифицированный симплекс-метод, а доверительные интервалы считались бутстреп-методом MCMB [He, Hu 2002] для уровней τ от 0,05 до 0,95. Всего в работе было рассчитано более 23000 процесс-диаграмм для приземных характеристик на территории России (три типа температуры и суммы осадков для четырех сезонов) и более 20000 процесс-диаграмм для температуры в свободной атмосфере.

В разделе 2.3 дается описание метода кластеризации k-средних (k-means) и определения гиперпараметров кластеризации (начального числа «зародышей» N и минимального числа станций в кластере M), использованных для пространственного обобщения метеорологических станций РФ на основе близости их детальной структуры МКР-трендов приземной температуры и сумм осадков.

Для кластеризации вводились специальные переменные для каждого из четырех сезонов. Для приземной температуры (минимальной, максимальной и средней суточной) это были разности между коэффициентами тренда β для разных уровней квантилей (0,25 и 0,05; 0,75 и 0,25; 0,95 и 0,75), а также среднее значение тренда по всем рассчитанным уровням квантилей. Для суточных сумм осадков в качестве переменных выступали значения квантильных трендов для квантилей порядков τ, равных 0,65, 0,75, 0,85 и 0,95. Рассчитывалась также средняя сезонная сумма осадков.

Суть процедуры кластеризации сводится к разделению 1454 метеорологических станций на k кластеров таким образом, чтобы минимизировать сумму квадратов внутрикластерных расстояний до центра кластера в пространстве выбранных переменных: $D = \sum_{i=1}^{k} \sum_{x \in C_i} d(x, c_i)$, где c_i – центр (центроида) кластера C_i, $d(x, c_i)$ – евклидово расстояние между станцией x и центром кластера C_i.

Число кластеров, на которые должны быть разбиты метеорологические станции на территории РФ не задается, а ведется уменьшение заведомо избыточного числа кластеров путем удаления небольших кластеров (с числом станций меньше M) и перераспределения их станций к ближайшим кластерам.

Результаты кластеризации, в частности число полученных кластеров, варьируются в зависимости от трех факторов: выбора начальных «зародышей», числа начальных «зародышей» N и минимального числа объектов в кластере M – которые выступают в качестве гиперпараметров кластеризации и должны быть определены заранее.

Выбор начальных «зародышей» осуществлялся по следующему алгоритму:

1. Перемешивание объектов (метеорологических станций) в случайном порядке;
2. Выбор первых N объектов в качестве потенциальных «зародышей»;
3. Последовательная проверка всех объектов. Объект заменяет одного из «зародышей», если минимальное расстояние между «зародышами» при такой перестановке увеличится.

Таким образом в качестве начальных «зародышей» выступают удаленные друг от друга станции в пространстве переменных кластеризации, но при этом сохраняется элемент

случайности, что приводит к разным начальным «зародышам» при проведении нескольких кластеризаций.

Для определения гиперпараметров N и M были проведены экспериментальные расчеты – по сто кластеризаций для разных комбинаций N и M. На рисунке 2 представлены минимальное, максимальное и среднее число итоговых кластеров, рассчитанное по сотне результатов кластеризации, в зависимости от N и M. Ожидаемое число итоговых кластеров должно лежать в пределах от 9 до 18, именно такое число квази-однородных климатических регионов находится на территории России. Такому условию удовлетворяет минимальное число станций в кластере M равное 20 и число начальных «зародышей» N – 60. При такой комбинации гиперпараметров число результирующих кластеров меняется от 9 до 16 и в среднем равно 12.

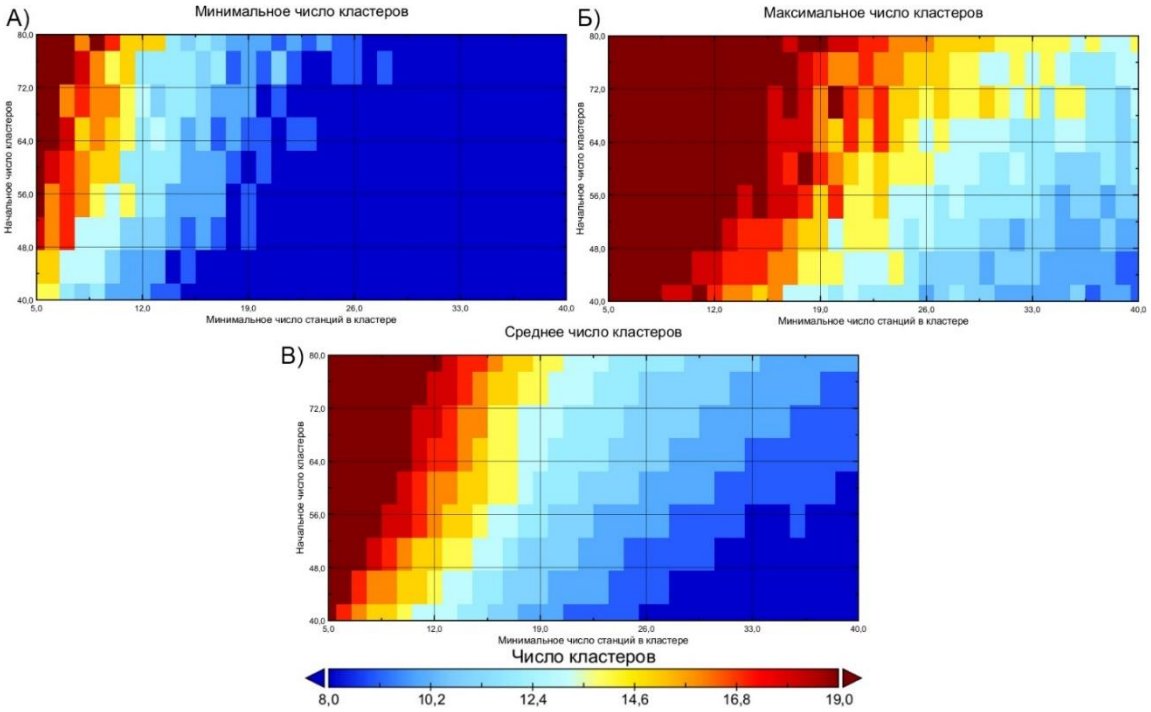


Рисунок 2 – Минимальное (А), максимальное (Б) и среднее (В) число результирующих кластеров по результатам ста кластеризаций для каждой комбинации начального число кластеров N (вертикальная ось) и минимального числа объектов в кластере M (горизонтальная ось)

В Главе 3 проводится анализ трендов метеовеличин для приземного климата (температура воздуха и суммы осадков) на территории Российской Федерации.

В **разделе 3.1** приводится краткое описание пространственного обобщения результатов применения метода квантильной регрессии для исследования тенденций изменения аномалий минимальной, максимальной и средней суточной температуры, а также суточных сумм осадков по данным 1454 метеорологических станций на территории РФ за период 1987-2021 гг. Были рассчитаны квантильные тренды для различных уровней квантиля τ для более чем 23000 процесс-диаграмм временных рядов характеристик, сгруппированных по четырем сезонам. Для анализа такого числа процесс-диаграмм было решено сгруппировать их с помощью кластеризации методом k-средних.

Группировка станций по кластерам на основе их процесс-диаграмм проводилась сразу по всем четырем сезонам и по нескольким метеовеличинам в двух сериях расчетов.

В первой серии проводилась кластеризация на основе квантильных трендов аномалий минимальной, максимальной и средней суточной температуры. Во второй серии расчетов проводилась кластеризация на основе квантильных трендов максимальной суточной температуры и суточных сумм осадков.

В разделах 3.2 и 3.3 приводятся результаты двух серий расчетов соответственно. Важно отметить, что при проведении кластеризации ни в первой, ни во второй серии расчетов не использовалась никакая информация о географическом положении станций. При этом в первой серии расчетов в процессе кластеризации станций были выделены 13 кластеров, расположенных географически компактно. Это свидетельствует о том, что станции, расположенные в одном географическом регионе, имеют схожий характер изменения температуры в широком диапазоне уровней квантилей.

Во второй серии расчетов были сформированы 15 географически компактных кластеров станций (рисунок 3). Характеристики полученных кластеров и межцентроидные расстояния между ними для этой серии расчетов приведены в таблице 1.

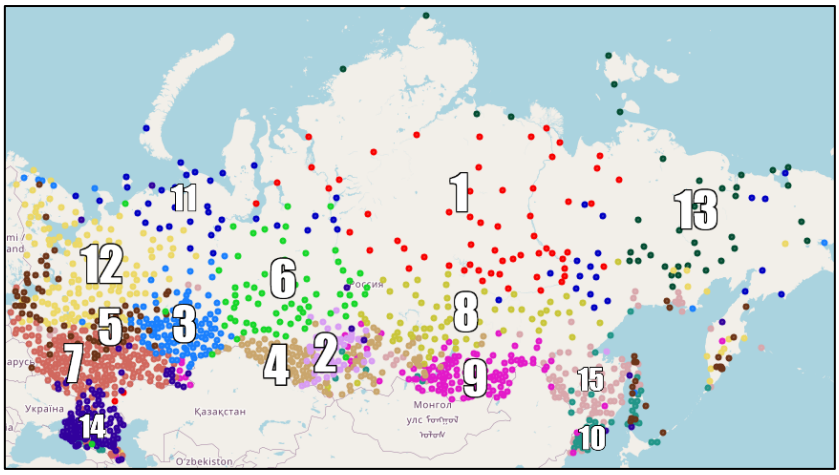


Рисунок 3 – Кластеры метеорологических станций на территории РФ, объединенные по схожести характеристик МКР трендов аномалий приземной температуры и суточных сумм осадков, рассчитанных за период 1987-2021 гг.

О вкладах некоторых из используемых во второй серии расчетов переменных в объяснение многомерной межкластерной дисперсии позволяет судить содержание таблицы 2. Величина *D* представляет отношение межкластерной дисперсии *RSQ* к внутрикластерной дисперсии (1- *RSQ*) для данной стандартизованной переменной. Отметим, что в число десяти переменных с наибольшими значениями *D* из рассматриваемых тридцати шести переменных входят три переменных, характеризующих квантильные тренды суточных сумм осадков летнего сезона.

Результаты кластеризации двух серий расчетов (выделенные кластеры) схожи между собой, и разделение территории России на кластеры схоже с разделением территории России на квази-однородные климатические регионы, использующиеся для пространственного обобщения метеорологических величин при подготовке Ежегодных докладов Росгидромета о состоянии и изменении климата на территории РФ.

Для оценки зависимости результатов кластеризации от случайного выбора «начальных

зародышей» в первой **(Раздел 3.2)** и во второй **(Раздел 3.3)** сериях расчетов было проведено 1000 повторений кластеризации с рандомизацией «начальных зародышей» и было показано, что при учете квантильных трендов сумм осадков уменьшается влияние случайного выбора начальных «зародышей» кластеров на результат.

Таблица 1 – Статистики и межцентроидные расстояния для пятнадцати выделенных кластеров, условные единицы. N – число станций в кластере, STD – внутрикластерная стандартная ошибка расстояний объектов кластера до центроида кластера, **Ω** *– радиус кластера – максимальное по всевозможным парам объектов кластера расстояние между объектами кластера в евклидовой метрике.*

Кластер	**N**	**STD**	**Ω**	**Расстояние до центроидов других кластеров**														
				1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**	**15**
1	61	0,82	8,86	.	7,62	6,46	6,08	7,74	7,11	6,03	4,78	6,35	9,33	4,83	6,06	5,30	6,58	6,88
2	65	0,69	7,41	7,62	.	5,75	3,31	6,72	4,59	6,64	4,91	5,25	6,19	6,27	6,10	7,80	7,43	5,30
3	123	0,67	8,34	6,46	5,75	.	4,91	5,29	4,17	4,08	4,44	4,97	5,44	5,04	4,51	6,26	5,58	3,92
4	123	0,62	5,56	6,08	3,31	4,91	.	6,66	4,54	6,04	3,39	4,05	6,28	5,60	5,64	6,58	6,66	4,12
5	91	0,81	12,79	7,74	6,72	5,29	6,66	.	5,85	4,95	5,92	6,89	6,02	6,29	3,78	7,11	7,92	5,15
6	71	0,73	10,28	7,11	4,59	4,17	4,54	5,85	.	6,41	4,75	6,66	5,21	5,00	5,49	6,81	7,58	4,52
7	211	0,68	7,66	6,03	6,64	4,08	6,04	4,95	6,41	.	5,20	4,90	6,48	5,91	5,12	6,45	4,30	5,21
8	66	0,68	5,92	4,78	4,91	4,44	3,39	5,92	4,75	5,20	.	3,93	6,70	5,16	4,89	6,29	6,51	4,39
9	128	0,69	14,00	6,35	5,25	4,97	4,05	6,89	6,66	4,90	3,93	.	7,26	6,47	5,60	6,99	5,61	4,94
10	63	0,96	13,93	9,33	6,19	5,44	6,28	6,02	5,21	6,48	6,70	7,26	.	7,76	6,76	9,34	7,91	3,81
11	55	0,85	8,01	4,83	6,27	5,04	5,60	6,29	5,00	5,91	5,16	6,47	7,76	.	4,14	4,62	6,45	5,60
12	144	0,66	6,61	6,06	6,10	4,51	5,64	3,78	5,49	5,12	4,89	5,60	6,76	4,14	.	5,43	6,69	4,46
13	41	0,97	11,34	5,30	7,80	6,26	6,58	7,11	6,81	6,45	6,29	6,99	9,34	4,62	5,43	.	7,09	6,89
14	134	1,08	20,96	6,58	7,43	5,58	6,66	7,92	7,58	4,30	6,51	5,61	7,91	6,45	6,69	7,09	.	6,44
15	101	0,74	7,20	6,88	5,30	3,92	4,12	5,15	4,52	5,21	4,39	4,94	3,81	5,60	4,46	6,89	6,44	.

Таблица 2 – Десять переменных с наибольшими значениями D – отношения межкластерной дисперсии RSQ к внутрикластерной дисперсии (1-RSQ) для данной переменной.

Переменная, условное название	**Описание переменной**	**RSQ**	**D**
ave_Max_son	Осредненный квантильный тренд аномалий максимальной суточной температуры для осеннего сезона (SON)	0,65	1,84
ave_Max_djf	Осредненный квантильный тренд аномалий максимальной суточной температуры для зимнего сезона (DJF)	0,63	1,72
ave_Max_jja	Осредненный квантильный тренд аномалий максимальной суточной температуры для летнего сезона (JJA)	0,61	1,56
qvalue_75_25_Max_djf	Разность квантильных трендов аномалий максимальной суточной температуры для τ=0,75 и 0,25 для зимнего сезона (DJF)	0,55	1,21
ave_Max_mam	Осредненный квантильный тренд аномалий максимальной суточной температуры для весеннего сезона (MAM)	0,53	1,12
precip_85_JJA	Квантильный тренд суточных сумм осадков летнего сезона (JJA) для τ=0,85	0,51	1,05
qvalue_75_25_Max_son	Разность квантильных трендов аномалий максимальной суточной температуры для τ=0,75 и 0,25 для осеннего сезона (SON)	0,50	1,01
precip_75_JJA	Квантильный тренд суточных сумм осадков летнего сезона (JJA) для τ=0,75	0,50	1,00
precip_JJA	Средние сезонные суммы осадков для летнего сезона (JJA)	0,50	1,00
qvalue_25_5_Max_son	Разность квантильных трендов аномалий максимальной суточной температуры для τ=0,25 и 0,05 для осеннего сезона (SON)	0,49	0,98

Для сопоставления разных вариантов кластеризации друг с другом, каждый вариант проверялся на соответствие разделению России на квази-однородные климатические регионы.

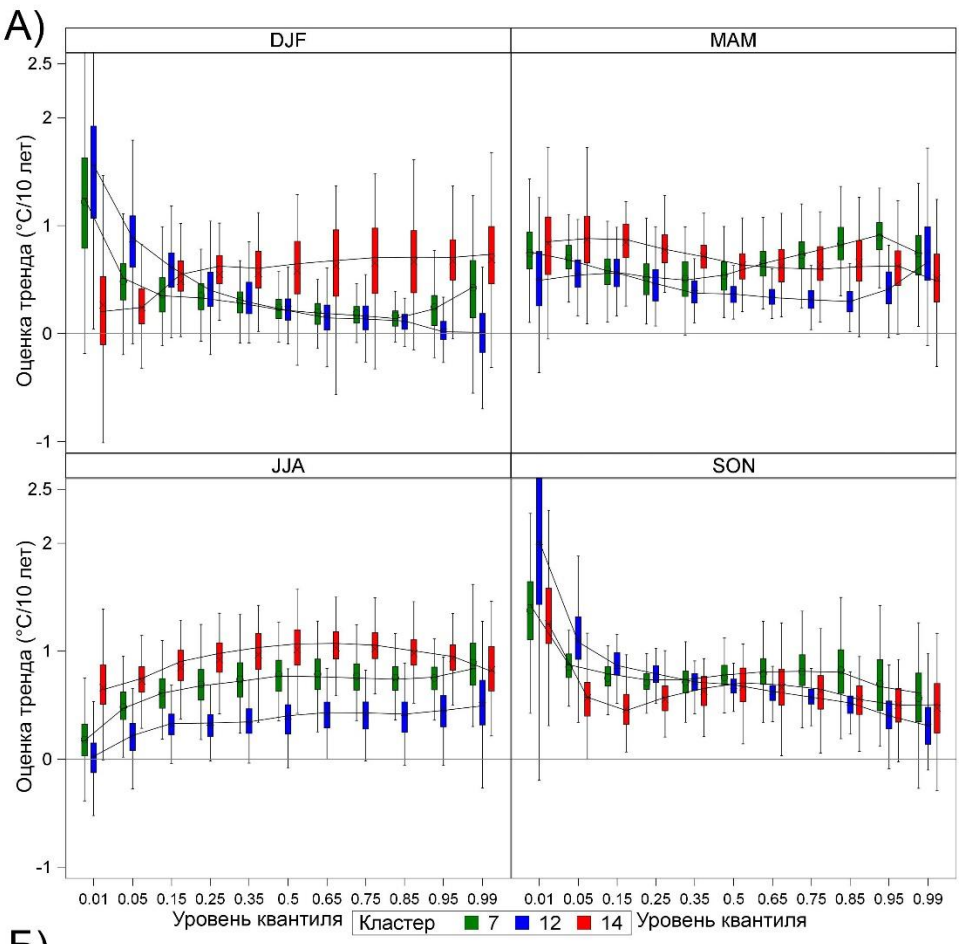
Результаты 1000 рандомизаций случайного выбора «зародышей» показывают, что в первой серии расчетов (**Раздел 3.2**, только квантили аномалий температуры) степень соответствия кластеризации климатическим регионам меняется от 59 до 82% в зависимости от «начальных зародышей» кластеров и в среднем составляет 70%. Во второй серии расчетов (**Раздел 3.3**) степень соответствия меняется от 60 до 73% и в среднем составляет 66%.

Таким образом, включение в процедуру кластеризации квантильных трендов сумм осадков, при небольшом уменьшении среднего соответствия, значительно уменьшает разброс соответствия климатическим регионам. То есть варианты кластеризации при разных «начальных зародышах» меньше отличаются друг от друга в случае совместных трендов приземной температуры и сумм осадков, чем при использовании только трендов приземной температуры.

Каждому кластеру во второй серии расчетов (**Раздел 3.3**) для отнесенных в этот кластер метеорологических станций были поставлены в соответствие графики типа «ящик с усами» (Box-and-whisker plots), демонстрирующих зависимость разбросов квантильных трендов пунктов наблюдения (метеорологических станций) кластера от значений квантиля. Для каждого из 15 кластеров строились графики типа «ящик с усами» для квантильных трендов аномалий максимальной суточной температуры (4 графика, соответствующих четырем сезонам) и квантильных трендов суточных сумм осадков (4 графика, соответствующих четырем сезонам). Полученная группа 8 графиков составляет «образец» (паттерн) pattern) проявления в соответствующем кластере квантильных трендов температуры и осадков для четырех различных сезонов года. Графики паттернов квантильных трендов и полная таблица с описанием локализации кластера и особенностей паттернов для всех 15 кластеров метеорологических станций на территории Российской Федерации представлены в приложении к диссертации.

Анализ полученных квантильных оценок всех 15 кластеров показал, что наиболее общей их характеристикой является уменьшение субсезонной изменчивости температуры за счет более быстрого роста низких температур по сравнению с высокими температурами. На рисунках 4 и 5 представлены графики типа «ящик с усами» каждого из четырех сезонов, объединенные для троек кластеров. Кластеры 7, 12 и 14 на рисунке 4.а и кластеры 1, 8 и 9 на рисунке 4.б расположены в одном долготном регионе: ЕЧР и Восточная Сибирь соответственно. Синим цветом на графиках изображен наиболее северный кластер в тройке, красным – наиболее южный.

Как следует из приведенных на рисунке 4.а графиков, на одних и тех же долготах ЕЧР севернее 50 с.ш. (7 и 12 кластеры) зимой и, в большей степени, осенью низкие температуры растут значительно быстрее высоких, причем в 12 кластере разница между оценками трендов низких и высоких температур больше, чем в отнесенным к умеренным широтам 7 кластере. На станциях расположенного южнее 14 кластера больший рост низких температур также наблюдается осенью. Это свидетельствует о сокращении изменчивости температур зимой и осенью, более выраженной в северных широтах. Аналогичная картина наблюдается и в Восточной Сибири (рисунок 4.б). Там также низкие температуры растут быстрее высоких в холодное время года, причем чем севернее расположен кластер, тем выше оценки трендов. Такой характер изменения температуры наблюдается и на остальных кластерах.



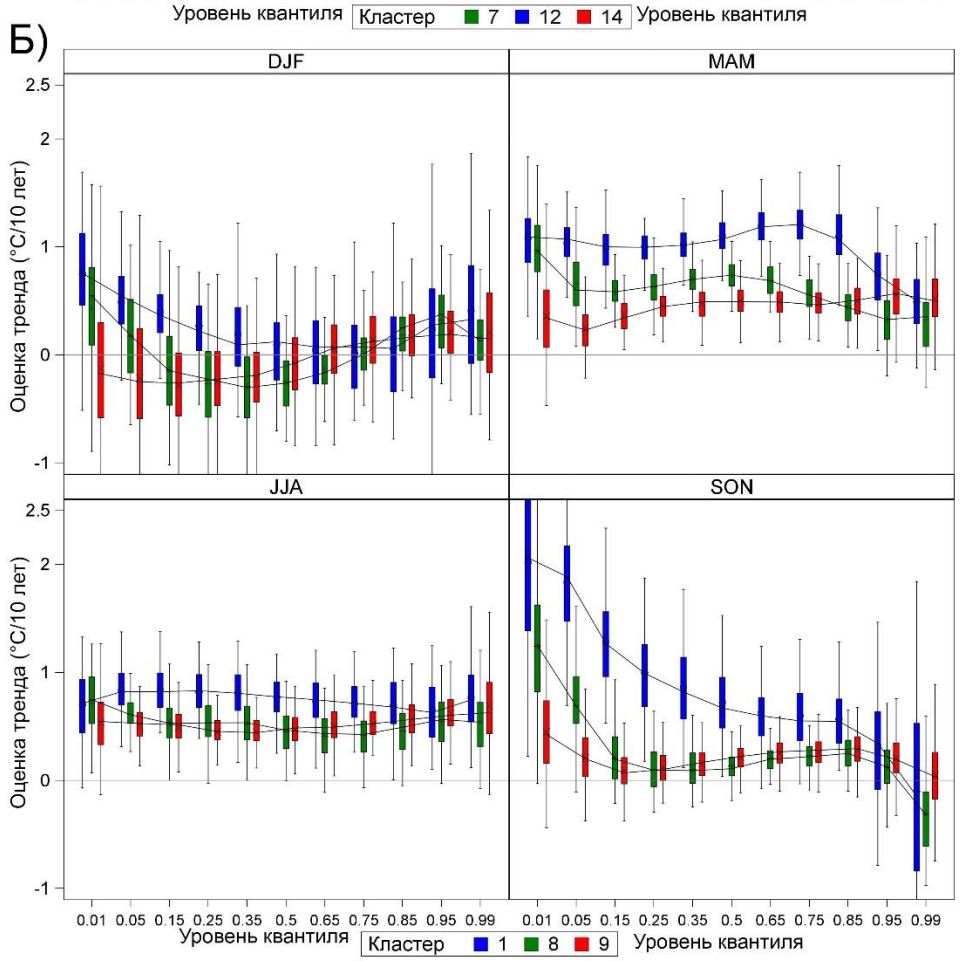


Рисунок 4 – Графики типа «ящик с усами» каждого из четырех сезонов для троек разных кластеров с единым масштабом вертикальной оси.
(А) Кластеры 7, 12 и 14, для долгот в ЕЧР;
(Б) кластеры 1, 8 и 9 для долгот в Восточной Сибири;
В каждой тройке синим цветом изображен наиболее северный кластер, красным – наиболее южный.

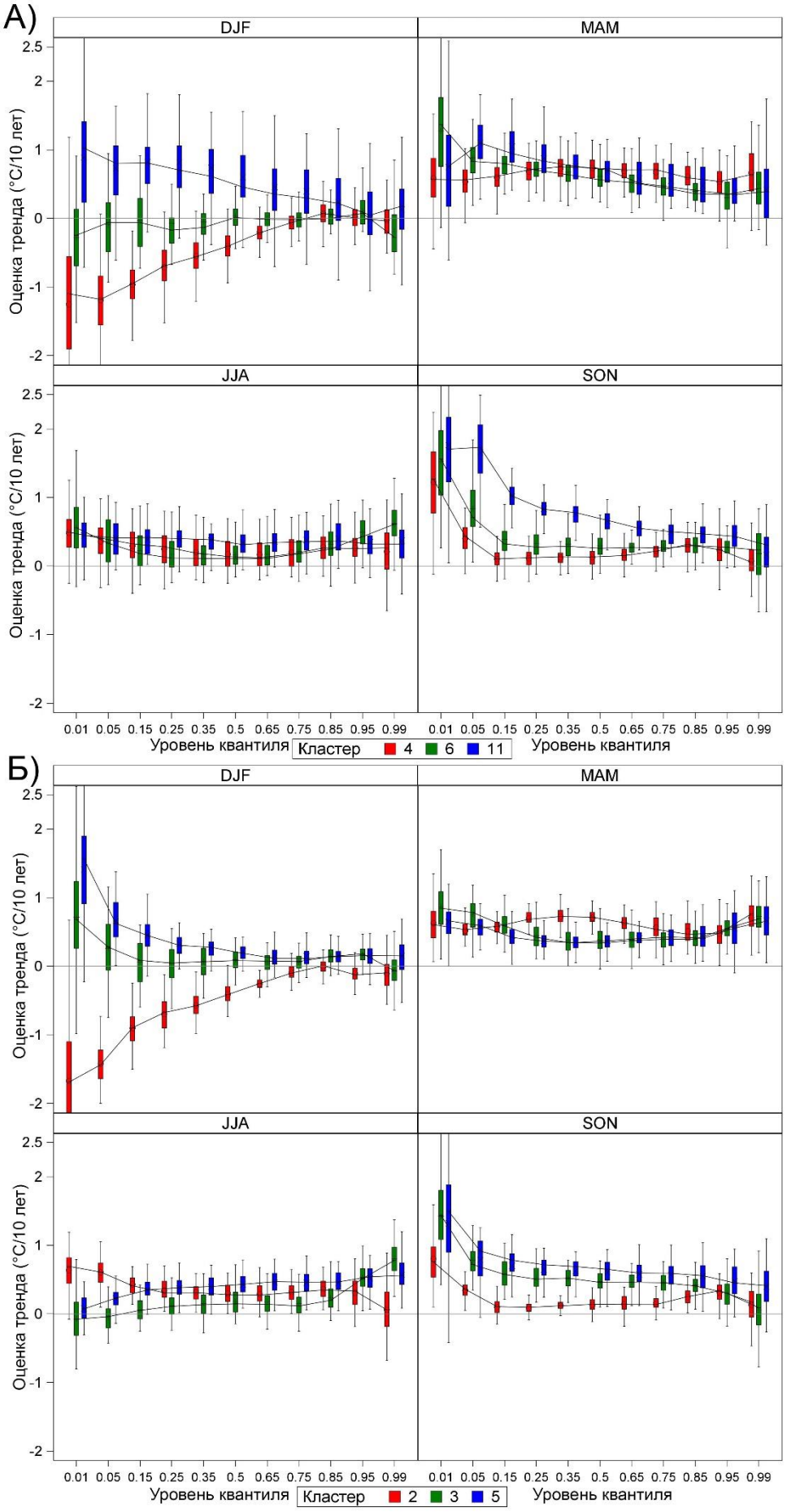


Рисунок 5 – Графики типа «ящик с усами» каждого из четырех сезонов для троек разных кластеров с единым масштабом вертикальной оси.
(А) кластеры 4, 6 и 11 в Западной Сибири и на северо-западе ЕЧР;
(Б) кластеры 2, 3 и 5.
В каждой тройке синим цветом изображен наиболее северный кластер, красным – наиболее южный.

Исключением являются кластеры 4 и 2, расположенные на юге Западной Сибири (они изображены красным цветом на графиках 5.а и 5.б соответственно). Осенью их квантильные оценки трендов соответствуют остальным кластерам, а зимой наблюдаются отрицательные тренды, причем низкие температуры уменьшаются быстрее всего, а высокие температуры практически не меняются, что ведет к увеличению изменчивости зимней температуры.

Наблюдаемый характер уменьшения внутресезонной изменчивости температур низких и высоких широт в холодный период года за счет более быстрого потепления относительно холодных дней соответствует характеру изменения изменчивости температуры, вызванного адвективным переносом нагревающихся относительно холодных масс воздуха с севера на юг вследствие полярного усиления и уменьшения меридионального градиента температуры, предложенного в работах [Screen, 2014; Siew et. al., 2025]. Таким образом полученные для территории Российской Федерации с помощью квантильной регрессии результаты подтверждают положения об адвективной природе уменьшения внутрисезонной изменчивости температуры вследствие полярного усиления и детализируют для России характер этого уменьшения.

Сопоставление медианных оценок трендов во всех 15 кластерах с МНК-оценками трендов приземной температуры, опубликованными в Докладе Росгидромета об особенностях климата на территории России (рисунок 6), показывает их качественное и количественное соответствие, в том числе в области отрицательных зимних трендов температуры на юго-западе Сибири (кластеры 2 и 4) и в области наибольших положительных весенних и осенних трендов на северо-востоке Сибири (кластер 1), но квантильные оценки также выявляют неравномерный характер изменения высоких и низких температур, наблюдаемый на рисунках 4 и 5.

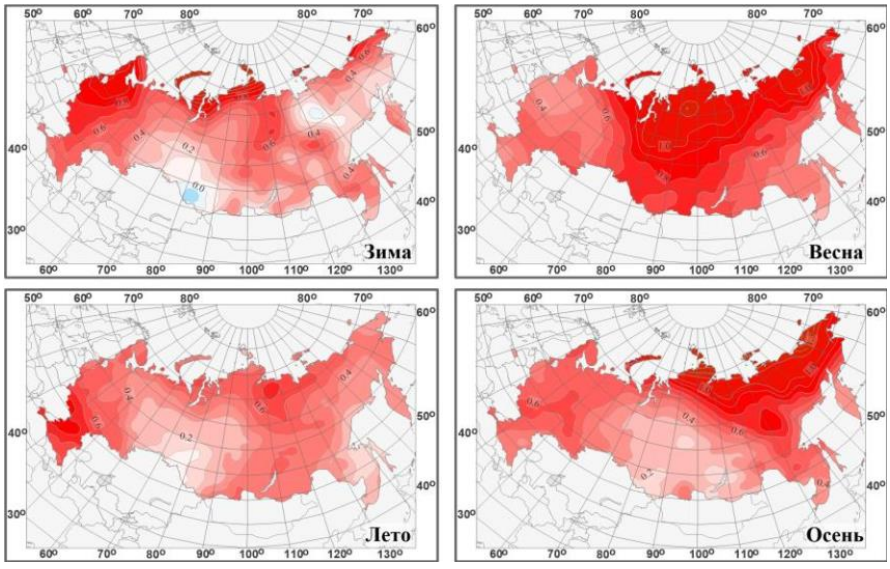


Рисунок 6 – Коэффициент линейного тренда средних сезонных значений температуры приземного воздуха на территории России за период 1976-2021 гг. (°С/10 лет) [Росгидромет, 2022а]

Глава 4 посвящена исследованию температурного и ветрового режимов свободной атмосферы Северного полушария, в том числе с использованием метода квантильной регрессии. В данной главе приводятся полученные на основе данных радиозондирования, собираемых во ВНИИГМИ-МЦД, оценки важных климатических сигналов изменения температуры в свободной атмосфере:

- потепление в тропосфере;

- похолодание в нижней стратосфере, продолжавшееся до XXI века;
- замедление или исчезновение похолодания в нижней стратосфере, наблюдаемое с начала XXI века.

Параллельно с этим проводится сопоставление полученных результатов с аналогичными результатами, полученными на основе других независимых источников данных.

В разделе 4.1 приводится краткое описание методик мониторинга температуры и ветра в свободной атмосфере, реализованных в ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» на основе обработки радиозондовых данных. Разделы по мониторингу температуры и ветра в свободной атмосфере над территорией Российской Федерации публикуются в ежегодном Докладе Росгидромета.

В разделе 4.2 приводятся обобщенные результаты мониторинга температуры и ветра в свободной атмосфере. Отмечается, что одним из важнейших факторов, влияющих на температурный и ветровой режимы в свободной атмосфере умеренных и высоких широт и проявляющихся в результатах мониторинга, являются сезонные изменения стратосферного полярного вихря. В зимний период в стратосфере преобладает западное направление ветра, в летний – восточное. Переход от западной к восточной циркуляции, называемый финальным стратосферным потеплением (ФСП), может происходить двумя способами: постепенно поздней весной благодаря радиационному потеплению или резко ранней весной из-за активности планетарных волн [Hauchecorne et. al., 2022]. Помимо этого, зимой может происходить явление внезапного стратосферного потепления (ВСП), во время которого временно разрушается полярный вихрь, а температура повышается на десятки градусов цельсия. В зависимости от срока наступления ФСП или ВСП, они могут вызывать как большие положительные, так и большие отрицательные аномалии температуры в стратосфере высоких широт, а также влиять на нижележащие слои атмосферы, замедляя или блокируя западный перенос в тропосфере, что приводит к аномально низкой температуре в тропосфере средних широт [Domeisen, Butler, 2020]. И наоборот, усиление стратосферного полярного вихря и отсутствие ВСП, ведет к положительным аномалиям в тропосфере средних широт. Эти эффекты проявляются в результатах мониторинга.

Раздел 4.3 посвящен исследованию долгопериодных тенденций изменения температуры и ветра в свободной атмосфере. В настоящем разделе проводится сопоставительный анализ долгопериодных тенденций изменения температуры в свободной атмосфере по данным как радиозондирования, собираемых во ВНИИГМИ-МЦД (далее они обозначаются как RIHMI), так и по данным других независимых источников, перечисленных в главе 2: данные радиозондирования RATPAC, данные спутникового зондирования UAH и RSS и данные реанализов ERA-Interim, ERA5, JRA-55, NCEP-DOE, NCEP-CFSR. При этом основное внимание уделяется оценке климатических сигналов в свободной атмосфере: потепление в тропосфере; похолодание в нижней стратосфере, продолжавшееся до XXI века; и ослабление похолодания в нижней стратосфере с начала XXI столетия. Сопоставление результатов проводилось по рядам температуры с 1979 года по 2018 год. Сопоставление рядов аномалий температуры в тропосфере и нижней стратосфере проводилось для Земного шара, отдельных полушарий и вариантов широтных зон.

Результаты сравнения рядов аномалий температуры (рисунок 7), тенденций изменения температуры по всем вариантам широтных зон (таблица 3) и анализ парных корреляций между рядами различных источников данных с использованием диаграмм Тейлора, изложенные в тексте диссертации, показывают, что подготовленные и пополняемые на регулярной основе во ВНИИГМИ-МЦД ряды крупномасштабных по территории аномалий температуры воздуха в тропосфере и нижней стратосфере согласуются с сопоставимыми рядами других источников, подготовленными по данным как радиозондовых и спутниковых наблюдений, так и по данным реанализов.

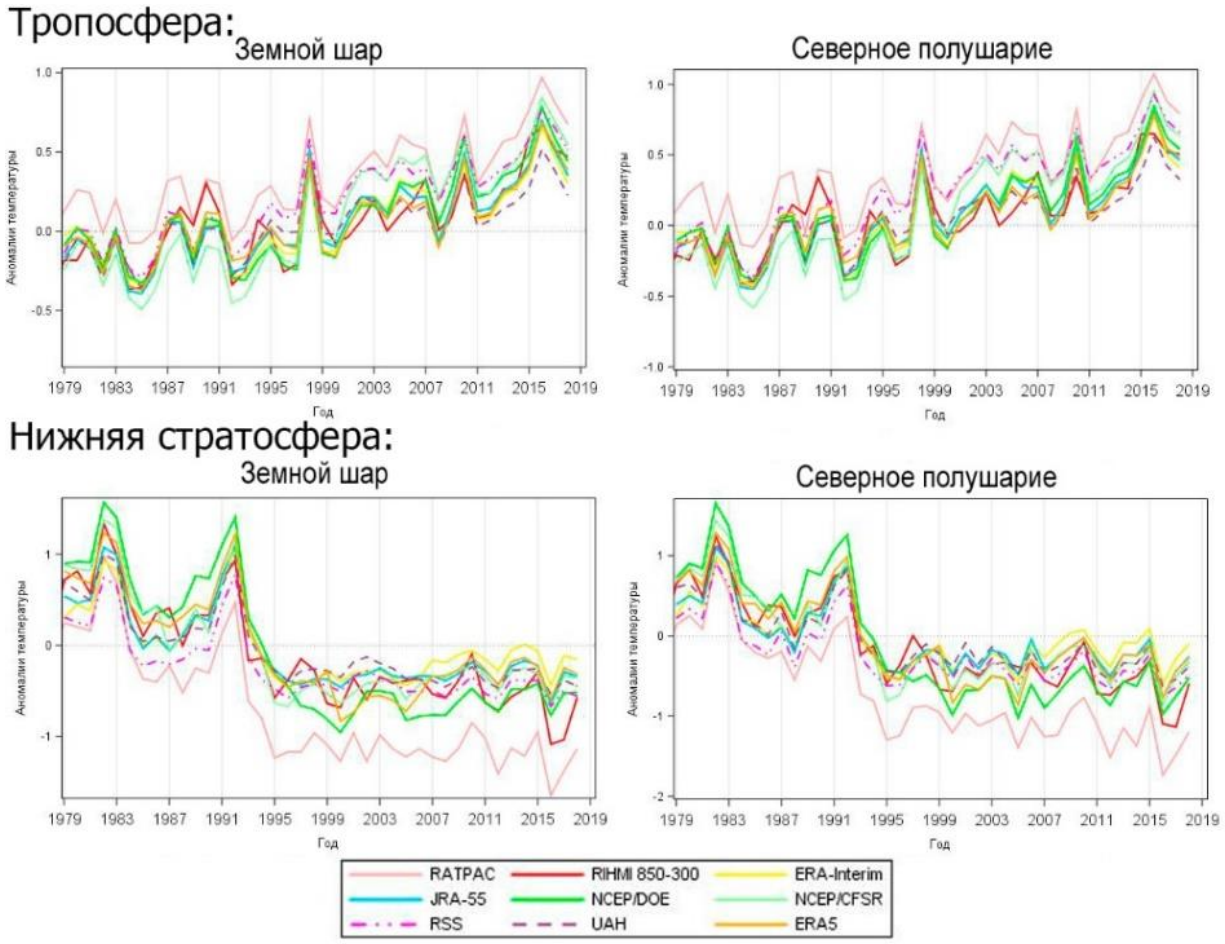


Рисунок 7 – Ряды аномалий температуры в тропосфере и нижней стратосфере Земного шара и Северного полушария по данным разных источников

По данным всех исследованных источников отмечаются сигналы изменения температуры в свободной атмосфере, описанные ранее. В тропосфере по данным всех источников наблюдается потепление, достигающее в Северном полушарии в среднем 0,20 °С/10 лет за период 1979-2018 гг. Также по результатам ежегодного мониторинга температуры по данным ВНИИГМИ-МЦД отмечается ускорение потепления в тропосфере.

В нижней стратосфере наблюдается похолодание, в Северном полушарии достигающее минус 0,40 °С/10 лет по данным радиозондирования за период 1979-2018 гг. Все источники отмечают изменение характера похолодания в нижней стратосфере в XXI веке, отчетливо наблюдаемое на графиках временных рядов (рисунок 7). Оценки трендов температуры Северного

полушария по данным радиозондирования и спутникового зондирования за период 1997-2018 гг. вдвое меньше по абсолютному значению, чем за полный период 1979-2018 гг., а по данным реанализов – статистически незначимы.

Таблица 3 – Оценки трендов рядов аномалий температуры (°С за 10 лет) в тропосфере за период 1979-2018 гг., нижней стратосфере за период 1979-2018 гг. (А), за период 1979-2018 гг. без учета данных двухлетних периодов после извержений вулканов Эль-Чичон и Пинатубо (Б) и за период 1997-2018 гг. Жирным шрифтом отмечены значения значимо неотличные от нуля с вероятностью 0,95. ЗШ – земной шар, СП – Северное полушарие, ЮП – Южное полушарие, Тр – тропики.

Набор данных	ЗШ	СП	ЮП	Тр	ЗШ			СП			ЮП			Тр		
	Тропосфера				Нижняя стратосфера											
					А	Б	В	А	Б	В	А	Б	В	А	Б	В
RATPAC	0,17	0,20	0,12	0,12	-0,45	-0,37	-0,08	-0,46	-0,39	-0,19	-0,45	-0,34	**0,10**	-0,44	-0,32	**-0,13**
RIHMI	0,16	0,17	0,10	0,08	-0,42	-0,35	-0,17	-0,41	-0,36	-0,21	-0,45	-0,34	**0,06**	-0,53	-0,43	-0,28
ERA-Interim	0,14	0,18	0,11	0,12	-0,20	-0,13	0,13	-0,20	-0,13	**0,06**	-0,20	-0,12	0,20	-0,17	-0,08	**0,13**
ERA5	0,15	0,18	0,12	0,13	-0,35	-0,27	0,15	-0,35	-0,28	**0,07**	-0,35	-0,27	0,24	-0,36	-0,26	**0,10**
JRA-55	0,17	0,20	0,14	0,15	-0,28	-0,20	**0,03**	-0,25	-0,18	**-0,04**	-0,30	-0,22	0,10	-0,27	-0,18	**-0,03**
NCEP/DOE	0,19	0,21	0,17	0,15	-0,52	-0,43	0,10	-0,53	-0,44	**0,01**	-0,52	-0,43	0,19	-0,73	-0,61	**0,01**
NCEP/CFSR	0,27	0,30	0,23	0,31	-0,37	-0,29	0,07	-0,36	-0,28	**-0,01**	-0,38	-0,30	0,15	-0,45	-0,34	**-0,01**
RSS	0,20	0,24	0,15	0,15	-0,25	-0,19	-0,07	-0,23	-0,17	-0,11	-0,27	-0,21	**-0,03**	-0,25	-0,17	-0,17
UAH	0,13	0,15	0,10	0,12	-0,29	-0,23	-0,08	-0,29	-0,24	-0,11	-0,29	-0,23	**-0,05**	-0,28	-0,21	-0,15

В целом используемая схема мониторинга температуры в свободной атмосфере Северного полушария по данным радиозондирования, собираемых во ВНИИГМИ-МЦД воспроизводит три основных климатических сигнала:

- усиливающегося потепления в тропосфере,
- значительного похолодания в нижней стратосфере, продолжавшегося до окончания 90-х годов прошлого века,
- значительного ослабления похолодания в нижней стратосфере с начала XXI столетия.

В заключении раздела приводятся оценки долгопериодных изменений ветрового режима над территорией России. Установлены области статистически значимых оценок трендов модуля скорости ветра, при этом распределение областей положительных и отрицательных трендов в целом схоже в тропосфере и нижней стратосфере.

В Разделе 4.4 приводятся и обсуждаются результаты оценки трендов температуры в тропосфере и в нижней стратосфере Северного полушария, детализированных по диапазону возможных уровней квантилей. Расчеты и графическое представление их результатов производились как для отдельных аэрологических станций, так и с обобщениями аэрологических станций по 30-градусным широтным поясам Северного полушария.

Результаты расчетов квантильных трендов температуры по отдельным станциям (представленные в виде вертикально-квантильных разрезов значений трендов), примеры которых приведены на рисунке 8, в целом подтверждают известные тенденции потепления в тропосфере и похолодания в нижней стратосфере, проявления которых, однако, отличаются не только для

различных уровней квантилей, но и существенно варьируются при рассмотрении результатов для разных станций. Определенную роль в возникновении указанных различий могут сыграть не только особенности атмосферной циркуляции над Северным полушарием, но и факторы, связанные с полнотой и качеством данных (пропуски в данных, температурная зависимость высоты потолка полета радиозондов, особенности годового цикла атмосферных процессов, которые не всегда соответствуют формальному характеру разбиения года на фиксированные трехмесячные сезоны, и т.д.).

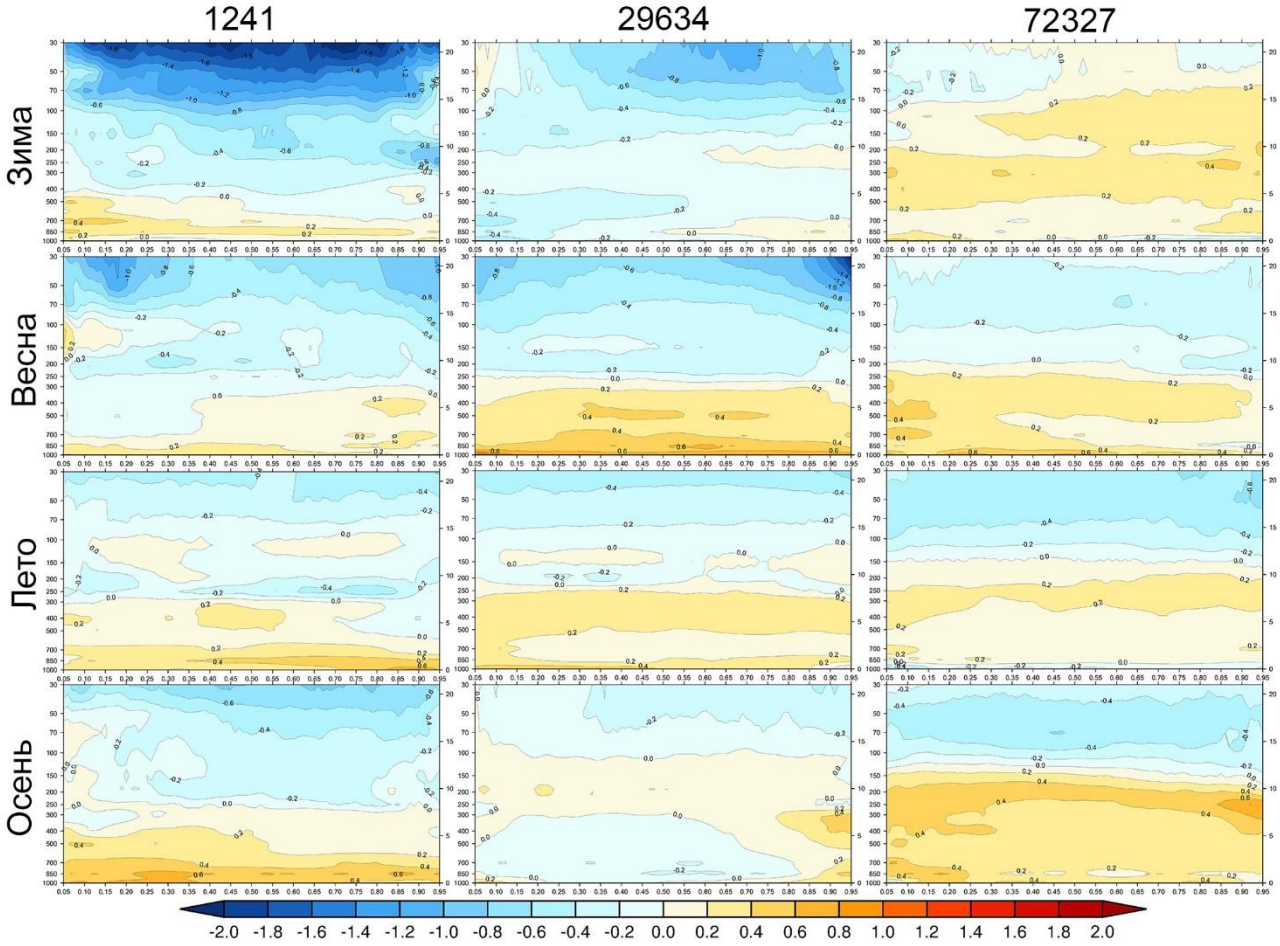


Рисунок 8 – Вертикально-квантильные распределения сезонных трендов на различных станциях. По вертикальной оси отложены изобарические поверхности в гПа, по горизонтальной – уровни квантилей. 1241 – Orland Iii (Норвегия); 29634 – Новосибирск (Россия); 72327 – Nashville (США)

Примечательно, что на станции 29634 (Новосибирск, Россия), расположенной в области отрицательных зимних трендов приземной температуры (юго-запад Сибири в России), зимой в тропосфере также наблюдается похолодание практически на всех уровнях квантилей, причем быстрее всего убывают низкие температуры, как и в случае квантильных оценок трендов приземной температуры.

Для получения общей картины изменения температуры в свободной атмосфере проводилось пространственное обобщение квантильных трендов аномалий температуры по широтным поясам 0-30 с.ш., 30-60 с.ш. и 60-90 с.ш. Для каждого широтного пояса по квантильным

оценкам трендов входящих в него станций были построены графики типа «ящик с усами» для четырех сезонов отдельных изобарических поверхностей. На рисунке 9 представлены полученные графики для осеннего сезона на пяти изобарических поверхностях: 50, 100, 300, 500 и 850 гПа.

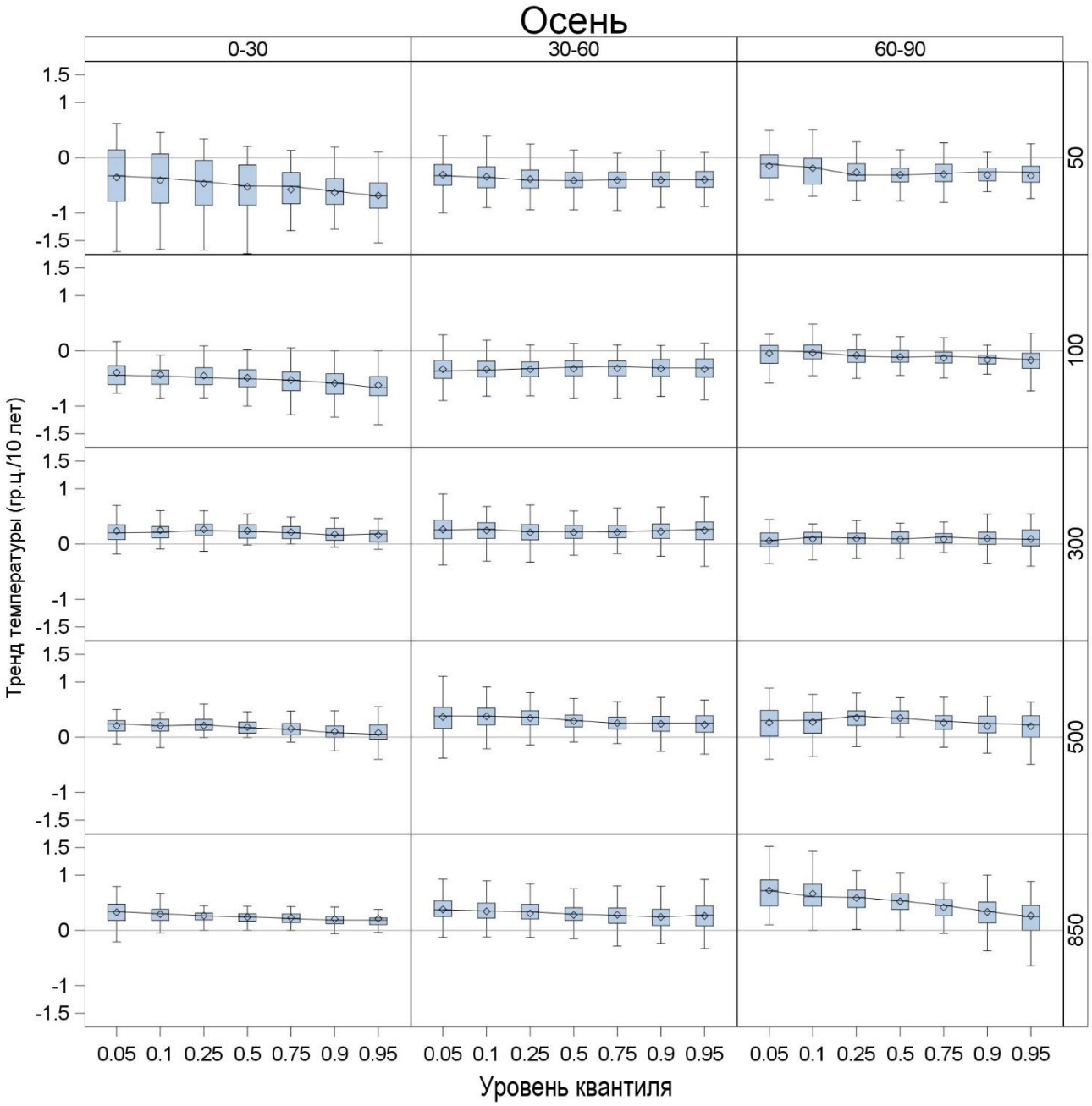


Рисунок 9 – Квантильные оценки трендов, обобщенные по широтным поясам и изобарическим поверхностям за осенний сезон. Столбцы слева-направо: 0-30 с.ш., 30-60 с.ш., 60-90 с.ш. Ряды сверху-вниз: 50, 100, 300, 500 и 850 гПа. Верхние и нижние границы «ящиков» - третья и первая квартили соответственно. Линией соединены медианные значения квантильных оценок трендов отдельных станций

Анализ обобщенных по широтным зонам квантильных оценок трендов показал, что на поверхности 50 гПа в низких широтах во всех сезонах наблюдается уменьшение оценок трендов

при увеличении уровней квантилей, причем при малых уровнях квантилей оценки трендов могут принимать положительные значения. В умеренных широтах оценки трендов держатся на одном уровне во всем диапазоне уровней квантилей, только летом наблюдается небольшое уменьшение оценок трендов при увеличении уровней. В высоких широтах зимой наблюдаются как положительные, так и отрицательные тренды во всем диапазоне уровней квантилей.

Анализ также показывает, что в нижних слоях тропосферы (850, 500 гПа) умеренных и высоких широт характер изменения температуры по диапазону уровней квантилей в холодное время года в целом соответствует особенностям квантильных оценок трендов потепления приземного воздуха. Отчетливее всего это проявляется осенью, когда и в умеренных, и в высоких широтах наблюдается уменьшение оценок трендов с увеличением уровней квантилей, и при этом оценки трендов в высоких широтах больше оценок трендов в умеренных широтах. Зимой и весной такой характер зависимости оценок трендов от уровней квантилей сохраняется в высоких широтах, и менее выражен в умеренных широтах, там оценки трендов держатся на одном уровне. Эта относительная однородность оценок трендов умеренных широт может быть результатом влияния усиления и ослабления стратосферного полярного вихря, описанного в разделе 4.2.

В целом наиболее общей характеристикой изменения температуры как в тропосфере, так и в нижней стратосфере является уменьшение оценок трендов с ростом уровней квантилей. То есть в тропосфере потепление для низких температур происходит быстрее, чем для высоких. А в нижней стратосфере похолодание быстрее происходит для высоких температур. В обоих случаях это ведет к уменьшению изменчивости температур со временем.

В **заключении** приводится обобщение полученных результатов. Основные результаты работы:

1. С использованием квантильной регрессии **выявлена** неоднородность проявления трендов приземной температуры на территории РФ по диапазону уровней квантилей. Более быстрый рост самых низких температур по сравнению со скоростями роста самых высоких температур, который обусловливает уменьшение внутрисезонной изменчивости приземной температуры, **отмечается** для зимнего, осеннего и весеннего сезонов на большей части территории РФ, причем в большей мере – в высоких широтах. В южной части Западной Сибири, где, в отличие от большинства регионов РФ, в зимний сезон отмечается отрицательный тренд температуры, наибольшее убывание температур имеет место для малых уровней квантилей, т.е. для наиболее низких температур, в то время как более высокие температуры практически не меняются.

2. Полученные для территории Российской Федерации с помощью квантильной регрессии результаты оценки трендов приземной температуры для разных частей диапазона уровней квантилей **подтверждают** положения об адвективной природе уменьшения внутрисезонной изменчивости температуры вследствие полярного усиления, высказанные в работе [Screen, 2014] и в ряде других публикаций.

3. С применением методов квантильной регрессии и многомерного кластерного анализа **показана** возможность выделения групп метеорологических станций на территории РФ, для которых схожим образом проявляются детализированные по диапазону уровней квантилей

тренды температуры и осадков. При этом в процессе кластеризации величины, определяющие географическое положение метеостанций, не участвовали. Выделены 13 кластеров метеорологических станций на территории РФ, демонстрирующих схожие «паттерны» трендов приземной температуры, и 15 кластеров станций, демонстрирующих схожие «паттерны» трендов максимальной суточной температуры и суточных сумм осадков.

4. С использованием квантильной регрессии для оценок трендов температуры в тропосфере и нижней стратосфере Северного полушария на основе станционных данных радиозондирования **показан** неравномерный по диапазону уровней квантилей характер потепления в тропосфере и похолодания в нижней стратосфере. Характер сезонных квантильных оценок трендов аномалий температуры в свободной атмосфере различается как с высотой, так и для разных широтных поясов Северного полушария. При этом наиболее общая характеристика процесс-диаграмм – уменьшение оценок трендов при увеличении уровней квантилей, что обусловливает уменьшение изменчивости температур со временем. В тропосфере низкие температуры растут быстрее высоких, а в нижней стратосфере высокие температуры уменьшаются быстрее низких. Характер зависимости оценок трендов от уровней квантилей в нижних слоях тропосферы в целом соответствует наблюдаемым оценкам квантильных трендов приземной температуры.

Список публикаций по теме диссертации:

работы, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях из перечня ВАК:

1. **Лавров А.С.**, Стерин А.М. Детализация климатических трендов температуры и осадков на территории России с использованием квантильной регрессии и кластеризации. // Фундаментальная и прикладная климатология, 2024, Т.10, №2, с. 219-243. ISSN 2410-8758
2. Стерин А.М., **Лавров А.С.** Использование квантильной регрессии для оценки пространственных особенностей характеристик трендов приземной температуры на территории России. // Фундаментальная и прикладная климатология, 2022, Т.8, №2, с.238-257.
3. Стерин А.М., **Лавров А.С.** Тренды температуры в свободной атмосфере: расчеты с использованием метода квантильной регрессии. // Фундаментальная и прикладная климатология, 2021, Т.2, с. 99-114.
4. **Лавров А.С.**, Хохлова А.В. Климатический мониторинг ветра в свободной атмосфере Северного полушария: многолетние характеристики и тенденции изменчивости. // Фундаментальная и прикладная климатология, 2020, Т.2, с. 58-75.
5. **Лавров А.С.**, Стерин А.М. Результаты сопоставления рядов температуры свободной атмосферы по данным радиозондовых наблюдений и спутниковых наблюдений. // Метеорология и гидрология, 2017, №2, с. 30-44
6. Стерин А.М**., Лавров А.С.** Оценки аномалий температуры в тропосфере в 2015-2016 годах. // Фундаментальная и прикладная климатология, 2017, Т.2, с.111-129
7. **Лавров А.С.**, Хохлова А.В., Стерин А.М. Мониторинг климатических параметров температуры и ветра в свободной атмосфере: технологические аспекты. Труды Гидрометцентра России. 2017, вып. 366, с. 97-111

другие работы по теме диссертации, в том числе материалы конференций и публикации в сборниках конференций «IOP Conference Series»:

1. **Лавров А.С.**, Стерин А.М., Хохлова А.В. Методика мониторинга скорости ветра в свободной атмосфере. // Информационный сборник № 47. Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. Росгидромет, 2020, с. 33-40.
2. **Лавров А.С.**, Хохлова А.В., Стерин А.М. Особенности режима ветра в свободной атмосфере над территорией Российской Федерации в 2015 году. Труды ВНИИГМИ-МЦД, 180. с. 47-58

3. Sterin A.M., **Lavrov A.S.** On the long period trend estimates for the upper-air extreme and sub-extreme temperatures by use of quantile regression. WCEDAI-2020. IOP Conference Series: Earth and Environmental Sciences. 2020, Vol. 611, p. 012043
4. **Lavrov A.S.**, Sterin A.M., Khohlova A.V. Diagnostics of the upper-air temperature and wind climate changes based on radiosonde observations and on the fifth-generation reanalysis. CLIMATE-2019. IOP Conference Series: Earth and Environmental Sciences. 2019, EES 606, EESE6061029.
5. **Lavrov A.S.**, Sterin A.M., Khohlova A.V. Upper-air climate monitoring: data sources, technological aspects, and some results. Enviromis-2018. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 211, 012001

6. Sterin A.M. and **Lavrov A.S.** Detailed climate trends assessment and their spatial patterns as a big data problem in climatology. // Международная конференция к 70-летию Геофизического центра РАН и 300-летию РАН «Наука о данных, геоинформатика и системный анализ в изучении Земли». Суздаль, 2024.
7. **Лавров А.С.** Мониторинг метеорологических характеристик в свободной атмосфере. Температурный и ветровой режимы. // Материалы конференции «Мониторинг состояния и загрязнения окружающей среды: приземный климат, загрязняющие и климатически активные вещества». 15-17 ноября 2023. с. 146-150
8. **Лавров А.С.**, Стерин А.М. Детализация климатических трендов температуры и осадков на территории РФ с использованием квантильной регрессии и кластеризации. // Материалы конференции «Мониторинг состояния и загрязнения окружающей среды: приземный климат, загрязняющие и климатически активные вещества». 15-17 ноября 2023. с. 37-41
9. **Лавров А.С.**, Стерин А.М. Исследование климатических трендов приземной температуры и осадков на территории Российской Федерации методом квантильной регрессии. // Тезисы докладов конференции «Изменение климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования. КЛИМАТ-2023». 09-13 октября 2023.
10. **Лавров А.С.**, Стерин А.М. Сравнение результатов кластеризации квантильных трендов приземной температуры на территории Российской Федерации с квази-однородными климатическими регионами России. // Сборник тезисов конференции «Вычислительно-информационные технологии об окружающей среде. CITES 2023». 13-23 июня 2023, с. 78-79
11. Стерин А.М., **Лавров А.С.** Климатические тренды приземной температуры на территории Российской Федерации, оцененные с использованием квантильной регрессии. // Сборник тезисов конференции «Вычислительно-информационные технологии об окружающей среде. CITES 2023». 13-23 июня 2023, с. 75
12. Стерин А.М., **Лавров. А.С.** О детализации климатических трендов температуры в атмосфере Северного полушария. // Сборник тезисов научно-технической конференции «Моделирование параметров атмосферы при применении систем вооружения», г. Королев, 2022.

13. Стерин А.М**., Лавров А.С.** Детализация климатических трендов, оцененных методом квантильной регрессии с использованием данных наблюдений. // Сборник трудов «Международная конференция и школа молодых ученых по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды. ENVIROMIS-2022», Томск, 2022, с. 389-390
14. **Лавров А.С.**, Стерин А.М. Об учете годового хода температуры воздуха при анализе ее климатических трендов методом квантильной регрессии. // Сборник трудов «Международная молодежная школа и конференция по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде. CITES-2021» Томск, 2021, с. 125-128.
15. Sterin A.M., **Lavrov A.S.** On the long period trend estimates for the upper-air extreme and sub-extreme temperatures by use of quantile regression. «Weather and Climatic Extremes: Data, Analysis and Impact» WCEDAI-2020. September 8-10 2020. Tomsk, Russia, p. 376
16. Стерин А.М., **Лавров А.С.** О возможном вкладе аномально теплых лет второго десятилетия XXI века в уточнение нормативной базы для моделирования климата атмосферы северного полушария. Материалы конференции «Моделирование параметров атмосферы при применении систем вооружения», 9-10 июля 2020.
17. **Лавров А.С.**, Стерин А.М., Хохлова А.В. Диагностика изменений температуры и ветра в свободной атмосфере на основе данных радиозондирования и реанализов пятого поколения. / Всероссийская конференция «Изменения климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования», Москва, 26-28 ноября 2019
18. **Лавров А.С.**, Стерин А.М., Хохлова А.В. Мониторинг климатических изменений в свободной атмосфере: источники данных, технологические аспекты, некоторые результаты. Сборник трудов «Международная конференция и школа молодых ученых по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды: ENVIROMIS-2018», Томск, 2018, с. 4-5