

На правах рукописи

Безотеческая Евгения Андреевна

**ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ И ИЗМЕНЧИВОСТЬ
ВЕРХНЕТРОПОСФЕРНЫХ СТРУЙНЫХ ТЕЧЕНИЙ СЕВЕРНОГО
ПОЛУШАРИЯ**

Специальность 1.6.18 —
«Науки об атмосфере и климате»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук.

Научный руководитель: **Чхетиани Отто Гурамович,**
доктор физико-математических наук

Официальные оппоненты: **Гущина Дарья Юрьевна,**
доктор географических наук, профессор РАН, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», профессор

Нерушев Александр Федорович,
доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Научно-производственное объединение «Тайфун», главный научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук

Защита состоится 17 декабря 2025 г. в 11 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 002.096.XX (24.1.130.01) на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук по адресу: г. Москва, Пыжевский пер., д. 3., стр. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФА РАН и на официальном сайте ИФА РАН: <https://ifaran.ru/ru/about/dissertations>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 119017, Москва, Пыжевский пер., 3, стр.1, ученому секретарю диссертационного совета Д 002.096.XX (24.1.130.01) и в электронном виде e-mail: a.chernokulsky@ifaran.ru.

Автореферат разослан _____ г.

Ученый секретарь диссертационного совета
Д 002.096.XX (24.1.130.01),
кандидат физико-математических наук

А.В. Чернокульский

Общая характеристика работы

Актуальность исследования. Термин «атмосферное струйное течение» применяется к узкому, протяженному воздушному потоку большой скорости с максимальными скоростями в его центральной части и сильными вертикальными и горизонтальными сдвигами ветра. Струйные течения присутствуют в различных слоях атмосферы – в нижней тропосфере [Luiz and Fiedler, 2024], в стратосфере [Погосян, 1960; Hartmann, 1983], но наиболее часто под этим термином подразумеваются верхнетропосферные течения, обнаруживающиеся в зоне тропопаузы.

Верхнетропосферные (или высотные) струйные течения (СТ) находятся в структурной связи с высотными фронтальными зонами (ВФЗ) – областями увеличенных горизонтальных градиентов давления и температуры [Бугаев и Джорджио, 1951; Погосян, 1955; Воробьев, 1968; Разоренова, 2016; Разоренова и Шабанов, 2019]. Совместно они формируют обширную бароклинную зону, играющую ключевую роль в развитии атмосферных процессов. В пределах данных зон осуществляются наиболее интенсивные горизонтальные и вертикальные движения воздушных масс [Endlich, 1953; Hubert, 1953; Murray and Daniels, 1953; Cressman, 1981]. Возмущения синоптического масштаба (фронтальные циклоны и подвижные антициклоны) преимущественно формируются в областях СТ, характеризующихся максимальными скоростями ветра, с последующим распространением в направлении ведущего потока зоны, вдоль ядра СТ [Vederman, 1954; Погосян, 1960; Джорджио и Петренко, 1967].

Особая роль СТ проявляется в формировании региональных погодных и климатических аномалий [Röthlisberger et al., 2016]. С режимами СТ, с их неустойчивостью и меандрированием [Обухов и др., 1984; Мохов, 2011; Мохов, 2020; Chen et al., 2022; Woollings et al., 2010; Nakamura and Huang, 2018] связано развитие блокирований (блокингов) в тропосфере средних широт [Rex, 1950; Lupo et al., 2019]. Особенности широтного положения и интенсивности СТ проявляются в изменениях взаимодействия атмосферы и океана, вариациях траекторий внетропических циклонов, региональной изменчивости приповерхностной температуры и осадков [Belmecheri et al. 2017; Galfi and Messori, 2023; Ma et al., 2020; Ren et al., 2008; Rousta et al., 2023; Spensberger and Spengler, 2020; Zhang et al. 2019]. Отмечается связь режимов СТ с ключевыми модами

климатической изменчивости, включая Североатлантическое, Арктическое и Южное колебания, с протяженностью морских льдов и снежного покрова над континентами [Дюкарев и др., 2008; Нерушев и др., 2018; Hall et al., 2014; Strong and Davis, 2008], а также со стратосферными событиями, в частности, с внезапными стратосферными потеплениями [Kidston et al., 2015; Goss et al., 2021].

Располагаясь на высотах, характерных для полетов дальнемагистральных самолетов, СТ являются объектом непрерывного мониторинга для авиационных служб погоды всех стран. Информация о местоположении и интенсивности, а также прогноз эволюции СТ важны с точки зрения безопасности и оптимизации полетов [Шакина и Иванова, 2016]. Наиболее интенсивные участки СТ, характеризующиеся значительными сдвигами ветра, являются основной зоной возникновения «турбулентности в ясном небе» [Clem, 1955; Di Vito et al., 2025], которая может представлять серьезную опасность для воздушных судов.

Режимы СТ, как характерные структурные и динамические особенности общей циркуляции атмосферы, должны изменяться при изменениях климата. В частности, в [Strong and Davis, 2007] отмечена связь скорости ветра в ядре субтропического СТ с интенсивностью меридиональной ячейки Хэдли. Согласно [Francis and Vavrus, 2015] глобальное потепление с уменьшением межширотного температурного градиента из-за проявления Арктического усиления с более сильным потеплением в тропосфере более высоких широт способствует замедлению полярного СТ и большей его извилистости. При этом в исследовании [Meleshko et al., 2016] указывается, что Арктическое усиление значительно повышает температуру приземного воздуха в полярном регионе, но оно недостаточно велико, чтобы вызывать усиление колебаний планетарных волн. При различных температурных тенденциях в слоях тропосферы и стратосферы возможны различные тенденции для режимов СТ [Мохов, 2022; Stendel et al., 2021]. В целом, как отмечено в работах [Hall et al. 2015; Osso et al., 2025], реакция многих аспектов атмосферной циркуляции, включая СТ, на изменение климата остается мало изученной.

Целью настоящей диссертационной работы является исследование особенностей пространственного распределения и изменчивости СТ Северного полушария, в частности, в атлантико-евразийском регионе за период последних десятилетий с использованием полей реанализов,

результатов численного моделирования, данных аэрологических наблюдений и спутниковых снимков.

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие задачи:

1. анализ широтно-долготного и широтно-высотного распределения повторяемости ядер СТ в атлантико-евразийском регионе за период 1980–2023 гг.;

2. получение количественных оценок интегральных характеристик СТ Северного полушария и их изменений в годовом ходе и межгодовой изменчивости за период 1980–2021 гг.: кинетической энергии СТ, доли общей кинетической энергии атмосферы Северного полушария, связанной со СТ, и доли объема атмосферных слоев в области СТ в общем анализируемом слое атмосферы;

3. получение количественных оценок интегральной кинетической энергии внетропических СТ в атлантико-евразийском регионе и их изменений в годовом ходе и межгодовой изменчивости за период 1980–2023 гг.;

4. оценка доли кинетической энергии, соответствующей меридиональной составляющей и ее изменений в годовом ходе и межгодовой изменчивости за период 1980–2023 гг. с целью выявления степени меандрирования внетропических СТ в атлантико-евразийском регионе;

5. анализ среднемесячных широтно-долготных распределений планетарной высотной фронтальной зоны (ПВФЗ) Северного полушария за период 1990–2023 гг. и оценка ее положения относительно климатической нормы, представленной за период 1961–1990 гг.;

6. выявление режимов внетропических СТ в атлантико-евразийском регионе во время развития минорного внезапного стратосферного потепления зимой 2014–2015 гг.;

7. воспроизведение атмосферной циркуляции и получение характеристик СТ в рамках мезомасштабной численной модели WRF-ARW и данных аэрологического зондирования при установлении эпизодов летнего блокирования в 2010 и 2018 гг. над европейской частью России (ЕЧР) и Скандинавским полуостровом соответственно.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Новый метод выделения ядер струйных течений (СТ) в трехмерных полях скорости ветра, учитывающий ориентированность СТ через отношение зональной компоненты скорости к модулю и позволяющий объективно детектировать структурные особенности СТ: ветвление, слияние и меандрирование.

2. Однородные типы распределения повторяемости ядер СТ в атлантико-евразийском регионе для холодного (ноябрь-апрель) и теплого (июнь-сентябрь) периодов с переходными режимами в мае и октябре. Однородность, прежде всего, проявляется в наличии общей географической области и близких числовых значениях максимальной повторяемости субтропических СТ для всех месяцев внутри периодов.

3. Новые количественные и прогностические оценки интегральных характеристик СТ Северного полушария за период 1980–2021 гг. Наиболее значимые тренды (на уровне 95%) отмечены в летний сезон, включая: тренды ослабления кинетической энергии СТ; уменьшение доли общей кинетической энергии атмосферы Северного полушария, связанной со СТ; сокращение доли объема атмосферных слоев в области СТ в общем анализируемом слое атмосферы. В зимний сезон выявлено только значимое уменьшение доли объема СТ.

4. Количественные и прогностические оценки интегральной кинетической энергии внетропических СТ в атлантико-евразийском регионе, указывающие на то, что во все месяцы, за исключением мая (для которого отмечен статистически значимый на уровне 95% рост), не наблюдается достоверных изменений характеристики в последние десятилетия (1980–2023 гг.). Оценки межгодовой изменчивости доли кинетической энергии, соответствующей меридиональной составляющей, также не выявили значимых трендов, что свидетельствует об отсутствии устойчивой тенденции к усилению меандрирования или зональности СТ в регионе на фоне наблюдаемого ослабления меридионального температурного градиента.

5. Результаты анализа отклонений среднемесячных положений планетарной высотной фронтальной зоны (ПВФЗ) относительно климатической нормы (1961–1990 гг.) и тенденции их изменчивости в Северном полушарии за период 1990–2023 гг., указывающие на статистически значимый тренд к усилению меридиональных отклонений

ПВФЗ в летний сезон; в тихоокеано-американском секторе значимые увеличения меридиональных отклонений отмечены также в весенний и осенний сезоны.

Научная новизна. Разработан новый универсальный метод выделения ядер СТ в трехмерных полях скорости ветра, учитывающий пространственную ориентированность СТ через отношение зональной компоненты скорости к ее модулю. Это позволяет с высокой точностью отслеживать ветвление и слияние, а также корректно идентифицировать участки СТ при сильном меандрировании. Универсальность метода заключается в его применимости к СТ на различных уровнях атмосферы. Впервые для атлантико-евразийского региона выделены два климатологических режима повторяемости ядер СТ: холодный (ноябрь-апрель) и теплый (июнь-сентябрь) с переходными режимами в мае и октябре. Критерием выделения послужила пространственная однородность полей наибольшей повторяемости внутри сезонов. Впервые получены количественные и прогностические оценки интегральных характеристик СТ Северного полушария. Для внетропических СТ атлантико-евразийского региона проведена оценка вклада меридиональной составляющей в кинетическую энергию, что позволило сделать вывод об отсутствии устойчивой тенденции к усилению меандрирования или зональности СТ в условиях наблюдаемого изменения климата. В работе впервые проведен анализ структурно связанных элементов общей циркуляции атмосферы – СТ и планетарной высотной фронтальной зоны (ПВФЗ) Северного полушария, – выявивший согласованные изменения их характеристик в современных климатических условиях.

Практическая и научная значимость. Предлагаемый универсальный метод выделения ядер СТ, применимый на любых уровнях атмосферы, позволяет исследовать основные характеристики СТ, включая интенсивность и пространственное положение, даже на сильно искривленных участках. Алгоритм может быть легко воспроизведен на любом из доступных языков программирования, что позволяет автоматизировать обработку больших объемов данных.

В работе представлены результаты анализа изменчивости СТ и ПВФЗ Северного полушария на фоне глобального потепления климата, особенно проявившегося в последние десятилетия. На сегодняшний день отсутствует точное понимание того, как СТ реагируют на глобальные

климатические изменения. Полученные статистически значимые тренды – ослабление интегральной кинетической энергии СТ Северного полушария и усиление меридиональных отклонений ПВФЗ относительно климатической нормы – свидетельствуют о наибольшей чувствительности этих параметров к изменениям в летний сезон.

Достоверность результатов исследования обеспечивается: использованием современных атмосферных реанализов, прошедших всестороннее тестирование; применением статистически обоснованных методов анализа с оценкой значимости полученных показателей; физической согласованностью выводов с существующими теоретическими представлениями и результатами других исследований.

Апробация результатов. Результаты работы докладывались на российских и международных научных конференциях, в их числе:

48-й ежегодный Апатитский семинар «Физика авроральных явлений», Апатиты, Россия, 2025 г. (устный доклад); V Всероссийская конференция с международным участием «Турбулентность, динамика атмосферы и климата», Москва, Россия, 2024 г. (устный доклад); международная конференция «Изменения климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования. Климат-2023», Москва, Россия, 2023 г. (устный доклад); IV Всероссийская конференция с международным участием «Турбулентность, динамика атмосферы и климата», Москва, Россия, 2022 г. (устный доклад, почетная грамота среди молодых ученых за представленный доклад); IV Всероссийская научно-практическая конференция «Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России», Иркутск, Россия, 2021 г. (устный доклад, 1-ое место в конкурсе устных докладов среди молодых ученых); международная онлайн-конференция «Климатические и погодные экстремальные явления: данные, анализ и воздействие», “WCEDAI-2020”, Россия, 2020 г. (устный доклад); The EGU General Assembly 2020 online activities "Sharing Geoscience Online", Вена, Австрия, 2020 г. (устный доклад); Всероссийская конференция «Изменения климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования», Москва, Россия, 2019 г. (постерный доклад); международная конференция по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде “CITES-2019”, Москва, Россия, 2019 г. (краткий устный доклад).

Личный вклад. Все результаты, изложенные в диссертации и вошедшие в работы [1-13] из списка публикаций по теме диссертации, получены лично автором или при его непосредственном участии. При подготовке представленных результатов к публикации совместно с соавторами в работах [3, 5, 9, 10] вклад автора диссертации был определяющим, в работах [1, 4, 6] автору принадлежат разделы, связанные с анализом струйных течений при минорном внезапном стратосферном потеплении, а также с обработкой спутниковых снимков с грядками перистых облаков и анализом характеристик струйных течений.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 13 печатных изданиях, 5 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, и в журналах, входящих в базы данных SCOPUS, Web of Science или Russian Science Citation Index (RSCI); 8 – в тезисах докладов.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность своему научному руководителю, д. ф.-м. н., Чхетиани Отто Гурамовичу за интересную тему, постоянное внимание, ценные советы и всестороннюю поддержку на всех этапах подготовки диссертационной работы. Особую признательность автор выражает академику РАН, д. ф.-м. н., профессору Мохову Игорю Ивановичу†, крупнейшему специалисту в области теории климата, диагностики и моделирования климатических изменений и их последствий, за консультации и совместное сотрудничество в рамках совместной научной статьи, результаты которой представлены в данной работе. Автор искренне благодарит д. ф.-м. н., Курганского Михаила Васильевича за плодотворное сотрудничество в работе над совместной научной статьей и неоценимый опыт, который повлиял на развитие данного исследования. Автор благодарит Вазаеву Н.В. и Диденко К.А. за совместное сотрудничество, поддержку и помощь в процессе написания работы. Автор выражает глубокую признательность коллективу Центра ледовой и гидрометеорологической информации «Север» и сотрудникам лаборатории долгосрочных метеорологических прогнозов, Арктического и Антарктического НИИ за поддержку в написании работы и ценные плодотворные дискуссии. Автор искренне благодарна всем родным и близким за их терпение, поддержку и веру.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем

диссертации составляет 127 страниц, включая 55 рисунка, 9 таблиц. Список литературы содержит 132 наименований.

Содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулирована цель и поставлены задачи диссертационной работы. Представлены положения, выносимые на защиту, обоснована достоверность полученных результатов и их практическая и научная значимость. Приведены сведения о личном вкладе автора и об апробации результатов. Представлен список публикаций по теме диссертационной работы, ее структура и объем.

Глава 1 содержит обзор современных представлений о СТ и их роли в климатической системе. В **разделе 1.1** описана физическая природа и механизм формирования СТ. Указана первичная причина возникновения СТ, связанная с бароклинностью атмосферы в пределах фронтальной зоны. В **разделе 1.2** приводится классификация и основные типы СТ Северного полушария. Описаны общие и отличительные черты двух основных систем СТ – субтропических (ССТ) и полярных СТ. Выделены два физических процесса с которыми связаны образование и поддержание ССТ и полярных СТ. Приводятся сведения о климатологии СТ Северного полушария. **Раздел 1.3** посвящен роли СТ в атмосферных процессах и погодообразовании. СТ определяют траектории внетропических образований, связаны с процессами циклогенеза и антициклогенеза через механизмы вертикальных движений, а также являются ключевыми факторами возникновения крупномасштабных аномалий циркуляции, таких как атмосферные блокинги. СТ оказывают влияние на режимы температуры и осадков у земной поверхности, модулируют океан-атмосферное взаимодействие. **Раздел 1.4** посвящен обзору современных исследований СТ в контексте изменения климата. Реакция СТ на современное изменение климата остается сложной и недостаточно изученной проблемой. Наблюдаемое Арктическое усиление способствует ослаблению меридионального температурного градиента у поверхности, что может вести к ослаблению и увеличению меандрирования СТ. В то же время прогнозируемое потепление на уровне тропопаузы может усиливать высотный градиент и, соответственно, ветер. Доминирующее влияние этих разнонаправленных

факторов, а также их региональные и сезонные особенности требуют дальнейших исследований. В **разделе 1.5** приводятся сведения об имеющихся методах изучения СТ. Современное исследование СТ базируется на комплексном использовании данных атмосферных реанализов, спутниковых измерений и радиозондовых наблюдений. Каждый из методов обладает уникальными достоинствами и ограничениями, и их совместное применение является необходимым условием для получения достоверных результатов и углубленного понимания пространственно-временной изменчивости СТ.

В **Главе 2** приводятся основные термины, относящиеся к структуре СТ. Приводится описание авторской методики извлечения ядра СТ в трехмерных полях ветра, включая ее верификацию с применением различных наборов реанализов и спутниковых изображений. С использованием разработанного метода построены и проанализированы распределения повторяемости ядер СТ для каждого месяца в атлантико-евразийском регионе.

В **разделе 2.1** приведено определение СТ в соответствии с терминологией Всемирной метеорологической организации (ВМО). Рассмотрены ключевые структурные элементы СТ, такие как ось, ядро и подвижные области максимального ветра (ОМВ). Выделены основные характеристики СТ, к которым относятся интенсивность и широтное положение.

К первоначальному и важному этапу исследования СТ относится достоверное определение их характеристик, основными из которых считаются широтное положение и интенсивность. В **разделе 2.2** изложен метод выделения ядра СТ в трехмерном пространстве, содержащем данные о ветре в узлах с регулярной сеткой (рис. 1). Алгоритм поиска максимумов скорости ветра, относящихся к ядру СТ, учитывает участки с отклонением струи от западно-восточного направления через отношение зональной компоненты скорости ветра к ее абсолютному значению, что позволяет более детально анализировать СТ при ветвлении, слиянии на сильно искривленных участках струй.

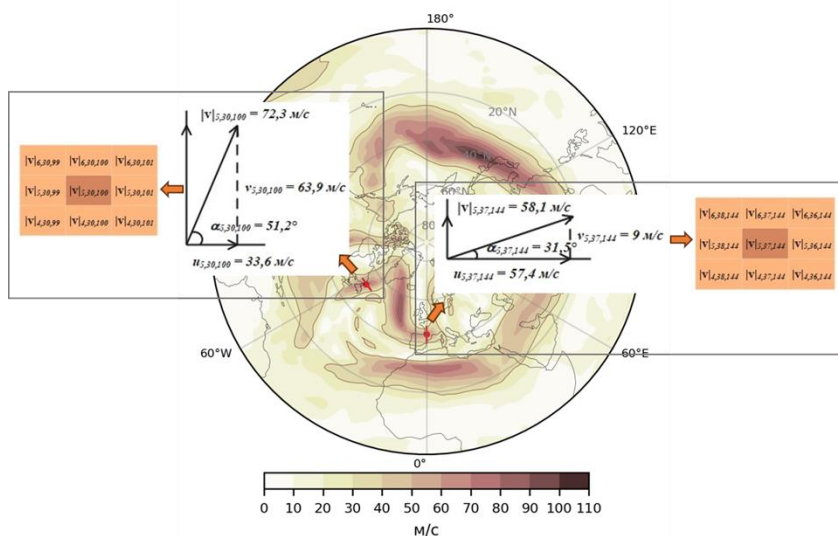


Рисунок 1 – Алгоритм поиска ядер СТ в поле абсолютной скорости ветра на уровне изобарической поверхности 250 гПа в срок 00 UTC 4 декабря 2020 года по данным реанализа JRA-55.

В разделе 2.3 с использованием трех наборов реанализов различного пространственного разрешения и спутниковых изображений с выраженными грядами перистых облаков представлена верификация метода. Известно, что развитие перистой облачности происходит на антициклональной стороне или вблизи оси СТ [Doswell and Schaefer, 1976; Джорджио и Петренко, 1967]. В рамках исследования связи перистой облачности и областей повышенной относительной влажности воздуха в верхней тропосфере с симметричной неустойчивостью, развивающейся на антициклональной стороне СТ, был проанализирован большой ряд спутниковых снимков в сочетании с полями абсолютной скорости ветра данных реанализа на уровнях верхней тропосферы, отражающих пространственное положение СТ [Курганский и Безотеческая, 2023]. Было установлено, что при использовании снимков в видимом диапазоне (данных радиометра VIIRS спутника Suomi NPP) гряды перистых облаков наиболее четко идентифицируются над континентами в тропических широтах как Северного, так и Южного полушарий. На рисунке 2 представлен сравнительный анализ положений ядер СТ по данным реанализов: ERA5

[Hersbach et al., 2020], JRA-55 [Kobayashi et al., 2015] и NCEP/NCAR [Kalnay et al., 1996] в срок 12 UTC 22 января 2019 года, а также спутниковый снимок в видимом диапазоне, полученный радиометром VIIRS спутника Suomi NPP [NASA Worldview].

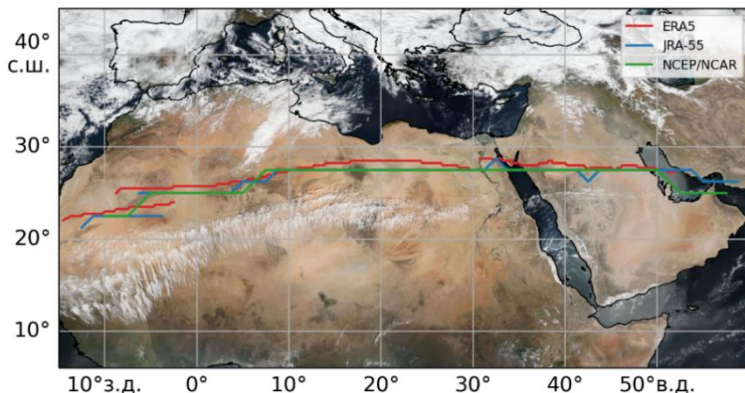


Рисунок 2 – Широтно-долготное положение ядер CCT в полях ветра реанализов ERA5, JRA-55 и NCEP/NCAR в срок 12 UTC 22 января 2019 года.

Результаты показывают, что, несмотря на различия в пространственном разрешении исходных данных, все три реанализа демонстрируют хорошее согласие в воспроизведении широтного положения ядер СТ. Важно отметить, что разработанный алгоритм может быть успешно применен и для анализа последовательных спутниковых снимков, позволяя отслеживать эволюцию СТ во времени. Это может быть особенно ценно для верификации модельных данных.

Таким образом, можно заключить, что каждый из трех рассмотренных реанализов может быть использован для исследования характеристик СТ, однако их выбор должен определяться конкретными задачами. Реанализ ERA5, обладающий наиболее высоким пространственным разрешением ($0.25^\circ \times 0.25^\circ$), оптимален для детального анализа региональных особенностей и более точного воспроизведения структуры СТ. В то же время реанализы JRA-55 ($1.25^\circ \times 1.25^\circ$) и NCEP/NCAR ($2.5^\circ \times 2.5^\circ$) будут предпочтительнее для решения задач, связанных с исследованием многолетней изменчивости и климатологии СТ.

Большинство существующих исследований, например [Koch et al., 2006; Archer and Caldeira, 2008; Kuang et al., 2014; Belmecheri et al., 2017], ограничиваются анализом распределения СТ по сезонам года, преимущественно в зимний период. Однако для более детального понимания динамики СТ представляется важным проанализировать их месячную изменчивость. В **разделе 2.4** с использованием данных реанализа JRA-55 приводится распределение повторяемости ядер СТ в атлантико-евразийском регионе за период 1980–2023 гг. Повторяемость СТ для каждого месяца представлена в виде широтно-долготных и широтно-высотных распределений. Выявлен однородный характер распределения СТ с ноября по апрель (холодный период) и с июня по сентябрь (теплый период), проявляющийся, прежде всего, в устойчивом географическом положении областей максимальной повторяемости ССТ. В мае и октябре демонстрируются переходные режимы распределения между выделенными периодами (рис. 3). Аналогичный анализ, проведенный на основе данных реанализа NCEP/NCAR, показал полностью согласующиеся результаты.

Внетропические СТ, обладая высокой подвижностью, требуют особого подхода к анализу. Наиболее показательным для таких СТ является выявление зон наибольшей повторяемости при однородных синоптических процессах [Погосян, 1960]. В частности, распределения СТ могут быть рассмотрены при различных формах атмосферной циркуляции согласно классификации Вангенгейма-Гирса [Воробьев, 1956; Воробьев, 1960].

Для холодного и теплого периодов года (с декабря 2019 по ноябрь 2022 гг.) приводятся широтно-долготные распределения повторяемости полярных СТ над Северной Атлантикой, Европой и европейской частью России (ЕЧР) при трех основных формах циркуляции: зональной (W), меридиональной (C) и восточной (E) [Вангенгейм, 1940; Гирс, 1974].

Для всех сезонов года характер географического обнаружения СТ при каждой форме циркуляции демонстрирует общие черты: при форме W наблюдаются зоны наибольшей повторяемости, вытянутые в зональном направлении, а при формах C и E – расположенные на периферия высотных гребней и ложбин в соответствии с их локализацией. С учетом распределения максимальной повторяемости ССТ и полярных СТ при различных формах циркуляции в атлантико-евразийском регионе для каждого месяца были выделены регионы, соответствующие наиболее частому обнаружению полярных СТ над Европой и ЕЧР. С октября по май

район может быть ограничен широтными кругами 40 и 60° с.ш. и долготами 50° з.д. и 70° в.д. С июня по сентябрь регион распространения полярных СТ смещается на север и ограничивается широтными кругами 50 и 80° с.ш. и долготами 50° з.д. и 70° в.д. Выделенные регионы были использованы в Главе 2 для анализа интегральных характеристик внетропических СТ.

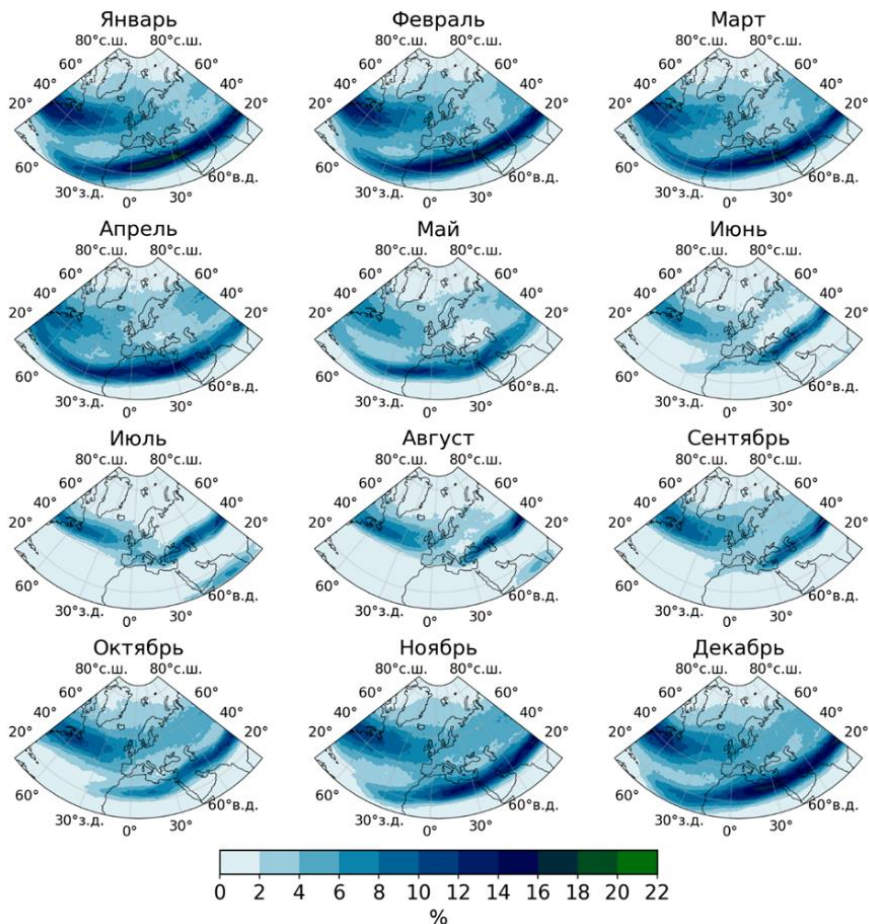


Рисунок 3 – Широтно-долготные распределения повторяемости ядер СТ в атлантико-евразийском регионе за период 1980–2023 гг. по данным реанализа JRA-55.

Глава 3 содержит результаты анализа изменчивости интегральных характеристик СТ Северного полушария и, в частности, атлантико-

евразийского региона на основе данных реанализа. В качестве дополнительного параметра приводятся результаты анализа среднемесячных широтно-долготных распределений планетарной высотной фронтальной зоны (ПВФЗ) Северного полушария и оценки ее изменчивости. Все перечисленные параметры были рассчитаны на основе наборов данных двух реанализов: NCEP/NCAR и JRA-55. Вслед за ранее опубликованными работами [Безотеческая и др., 2023; Дурнева и Чхетиани, 2021], где применялся реанализ NCEP/NCAR, в данной главе для представления результатов также выбран этот набор данных. При этом в каждом разделе проводится сравнение с результатами, полученными с применением JRA-55.

В разделе 3.1 приводятся количественные оценки кинетической энергии СТ Северного полушария (E_K СТ СП) и ее изменения в годовом ходе и межгодовой изменчивости для периода 1980–2021 гг. с минимальными скоростями ветра (V_m) в области струи: $V_m = 20$ м/с, $V_m = 30$ м/с и $V_m = 40$ м/с (рис. 4). Кинетическая энергия рассчитывалась по формуле, близкой в работе [Archer and Caldeira, 2008]:

$$E_K = \sum_{i,j} \sum_{k=L}^{k=H} \frac{m_{i,j,k} v_{i,j,k}^2}{2} = \sum_{i,j} \sum_{k=L}^{k=H} \frac{(p_{k-1} - p_{k+1}) \cos(\varphi_i) \left(\sqrt{u_{i,j,k}^2 + v_{i,j,k}^2} \right)^2}{2}, \quad (1)$$

где p – атмосферное давление, g – ускорение силы тяжести, φ – географическая широта, u и v – зональная и меридиональная компоненты скорости ветра, i и j – номера узлов сетки по широте и долготе; k характеризует высоту атмосферного слоя – L , H – нижняя и верхняя границы всего анализируемого атмосферного слоя. В частности, оценивались значения E_K в слое от 500 до 100 гПа.

Максимальные значения E_K СТ СП получены для зимнего сезона, минимальные – для летнего. При этом максимальная межгодовая изменчивость, характеризуемая среднеквадратическим отклонением (СКО), проявляется в промежуточные сезоны, особенно весной. Оценки линейных трендов E_K СТ СП для разных месяцев выявили наиболее значимые (на уровне 95%) тенденции в летний сезон. Отмечены статистически значимые тенденции уменьшения E_K СТ в июле (при $V_m = 20$ м/с и $V_m = 30$ м/с) и в августе (при $V_m = 20$ м/с). В другие сезоны оценки

трендов получены статистически незначимыми (и разного знака). Согласно данным реанализа JRA-55, статистически значимые тенденции уменьшения E_K СТ также были выявлены только для летнего сезона. В частности, дополнительно к упомянутым месяцам, уменьшение E_K СТ было получено в июне при всех рассматриваемых значений V_m .

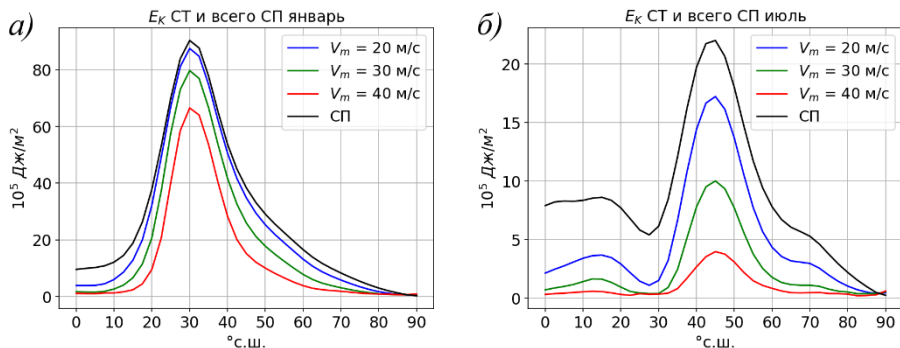


Рисунок 4 – Широтные зависимости кинетической энергии для атмосферы Северного полушария и кинетической энергии СТ при разных V_m на примере января (а) и июля (б) в среднем для периода 1980–2021 гг.

Наряду с анализом трендов для характеристик СТ в атмосфере Северного полушария проведен анализ связи режимов СТ с явлениями Эль-Ниньо, с которыми связаны сильнейшие межгодовые вариации глобальной приповерхностной температуры. Наиболее высокие коэффициенты корреляции среднемесячных значений E_K СТ СП и индексов Эль-Ниньо – Nino 3, Nino 4 и Nino 3.4 (при всех значениях V_m), статистически значимые на уровне 95%, отмечены с января по апрель.

Соответствующие оценки доли общей кинетической энергии атмосферы Северного полушария, связанной со СТ (P_{E_K} СТ СП) представлены в **разделе 3.2**. Среднесезонные значения P_{E_K} СТ при разных значениях V_m максимальны зимой и минимальны летом. Наибольшая межгодовая изменчивость, характеризующаяся СКО, характерна в переходные сезоны. Оценки трендов P_{E_K} СТ СП для разных месяцев за период с 1980 по 2021 гг. демонстрируют наиболее значимые тенденции летом. Получены статистически значимые тенденции уменьшения P_{E_K} СТ при $V_m = 20$ м/с во все летние месяцы и при $V_m = 30$ м/с в июле. В другие сезоны оценки

трендов получены статистически незначимыми (и разного знака), за исключением статистически значимого положительного тренда P_{Ek} СТ в октябре при $V_m = 40$ м/с. Реанализ JRA-55 выявил дополнительные по сравнению с NCEP/NCAR статистически значимые тренды уменьшения P_{Ek} СТ. В летний сезон они были получены для июня (при $V_m = 30$ м/с и $V_m = 40$ м/с), а также для июля при $V_m = 40$ м/с. Кроме того, осенью (в сентябре) был отмечен тренд уменьшения P_{Ek} СТ при $V_m = 20$ м/с.

Приводятся также оценки доли объема атмосферных слоев в области СТ в общем анализируемом слое атмосферы Северного полушария: 500-100 гПа (P_V СТ СП) (раздел 3.3). При всех V_m значения P_V СТ максимальны зимой и минимальны летом. При этом наибольшая межгодовая изменчивость P_V СТ СП проявляется в переходные сезоны. Наиболее значимые тенденции представленной характеристики отмечены в летние и зимние месяцы. В том числе, получены статистически значимые тенденции уменьшения P_V СТ в июле (при $V_m = 30$ м/с) и августе (при $V_m = 20$ м/с и $V_m = 30$ м/с), а также в декабре (при $V_m = 20$ м/с) и январе (при $V_m = 20$ м/с и $V_m = 30$ м/с). В переходные сезоны оценки трендов P_V СТ СП получены статистически незначимыми и разного знака. Согласно реанализу JRA-55, статистически значимые тенденции уменьшения P_V СТ также выявлены только в летний и зимний сезоны. В зимние месяцы тренды совпадают с данными NCEP/NCAR по месяцам и значениям V_m . Летом уменьшение P_V СТ наблюдается в августе при $V_m = 30$ м/с и в июле при $V_m = 40$ м/с.

В разделе 3.4 представлены количественные оценки кинетической энергии и тенденции изменчивости внетропических СТ в атлантико-евразийском регионе. Для каждого месяца с учетом особенностей пространственного распределения СТ (раздел 1.4), при котором исключаются из анализа ССТ и СТ, образовавшиеся после слияния субтропических и полярных систем над восточным побережьем Северной Америки, рассчитана интегральная кинетическая энергия внетропических СТ в атлантико-евразийском регионе (E_K СТ_{А-Е}) для периода 1980–2023 гг. по формуле (1) только для $V_m = 30$ м/с. Максимальное среднеемесячное значение E_K СТ_{А-Е} получено в январе, минимальное – в июле. Наибольшая межгодовая изменчивость, характеризующая СКО, проявляется в феврале, наименьшая – в июле. Оценки линейных трендов для разных месяцев выявили наиболее значимую (на уровне 95%) тенденцию увеличения E_K

СТ_{А-Е} в мае. В остальные месяцы оценки трендов получены статистически незначимыми (и разного знака).

Для количественной оценки степени меандрирования СТ рассчитывалась доля кинетической энергии, соответствующая меридиональной составляющей (P_{Ev} СТ_{А-Е}). Для этого дополнительно к E_K СТ_{А-Е} рассчитывались ее составляющие для u и v по формулам:

$$E_u = \sum_{i,j} \sum_{k=500}^{k=100} \frac{(p_{k-1} - p_{k+1}) \cos(\varphi_i) u_{i,j,k}^2}{2}, \quad (2)$$

$$E_v = \sum_{i,j} \sum_{k=500}^{k=100} \frac{(p_{k-1} - p_{k+1}) \cos(\varphi_i) v_{i,j,k}^2}{2}. \quad (3)$$

В данном случае значения $u_{i,j,k}$ и $v_{i,j,k}$ учитывались для тех узлов, где

$$\sqrt{u_{i,j,k}^2 + v_{i,j,k}^2} \geq 30 \text{ м/с.}$$

Среднемесячные значения P_{Ev} СТ_{А-Е} (за 1980–2023 гг.) варьируются от 32% до 37%, достигая максимума в июне и минимума в июле (рис. 5). Наибольшая межгодовая изменчивость наблюдается в июне, наименьшая – в октябре. Оценки линейных трендов P_{Ev} СТ_{А-Е} за период с 1980 по 2023 гг. получены статистически незначимыми (и разного знака).

В качестве дополнительной оценки извилистости СТ рассчитывалась доля времени (P_t), когда меридиональная составляющая кинетической энергии (E_v) превышала зональную (E_u) в каждом месяце рассматриваемого периода (1980–2023 гг.). Максимальное значение P_t получено для июня, минимальное – для октября (рис. 6). Оценки линейных трендов P_t за период с 1980 по 2023 гг. также не выявили статистически значимых трендов (представленных разными знаками). Анализ параметров показал, что наиболее меандрированные внетропические СТ атлантико-евразийского региона характерны для июня. Этот вывод согласуется с результатами в работе [Дурнева и Чхетиани, 2021] (и данными раздела 2.5), где показано, что ПВФЗ в атлантико-евразийском секторе демонстрирует наиболее неоднородное распределение, характеризующееся наибольшими

меридиональными отклонениями относительно климатического положения в июне, особенно над акваторией Северной Атлантики.

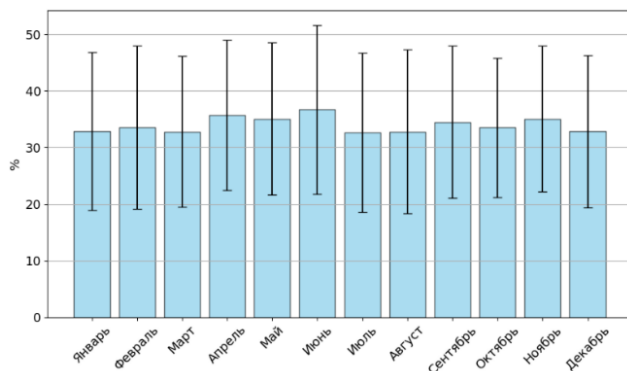


Рисунок 5 – Среднемесячные значения P_{EV} , ST_{A-E} и SKO для периода 1980–2023 гг. по данным реанализа JRA-55.

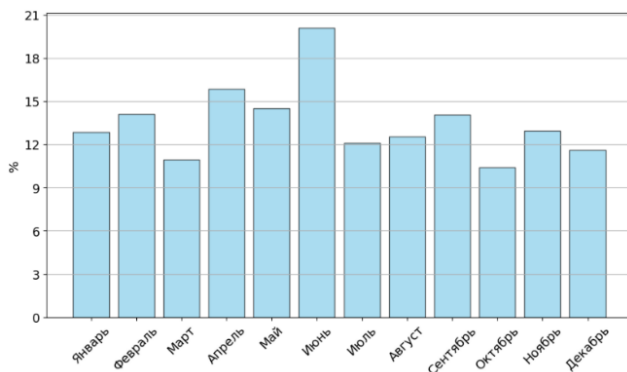


Рисунок 6 – Значения параметра P_t для периода 1980–2023 гг. по данным реанализа JRA-55.

В разделе 3.5 анализируются среднемесячные широтно-долготные положения ПВФЗ Северного полушария за период 1990–2023 гг. Для каждого месяца были рассчитаны отклонения ПВФЗ в градусах широты относительно ее климатического положения, представленного за период 1961–1990 гг. Осевое положение ПВФЗ определялось по характерной изогипсе на уровне изобарической поверхности 500 гПа в соответствии с методом, предложенным Ю.Б. Храбровым [Храбров, 1957]. Несмотря на то,

что данный метод был разработан в середине XX века, он демонстрирует принципиальное сходство с современными подходами к исследованию меандрирования тропосферных планетарных волн, представленными, например, в работах Barnes, 2013; Screen and Simmonds, 2013; Di Capua and Coumou, 2016. На рисунке 7 по данным реанализов NCEP/NCAR и JRA-55 для синоптического срока 00 UTC 7 декабря 2020 г. показано широтно-долготное положение ПВФЗ и ядер СТ Северного полушария, на котором хорошо представлена связь ПВФЗ умеренных широт с полярными СТ.

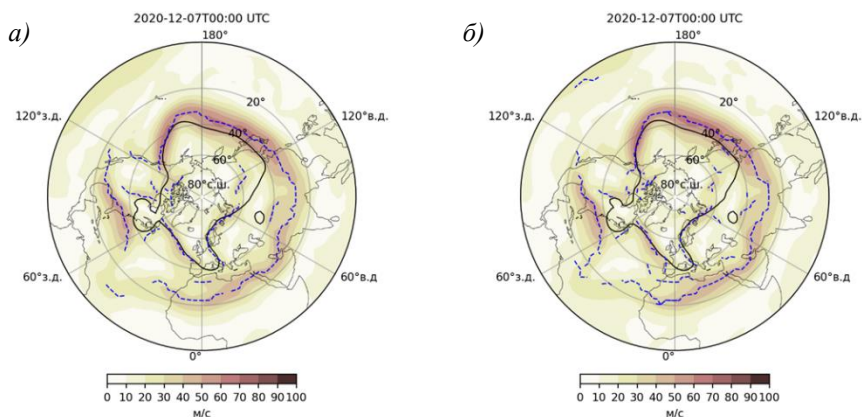


Рисунок 7 – Широтно-долготное положение ядер СТ (синие пунктирные линии) и положение ПВФЗ (черные линии) по значению характерной изогипсы данных реанализа NCEP/NCAR (а) и JRA-55 (б) в срок 00 UTC 7 декабря 2020 г. Заливкой представлена средняя скорость ветра слоя 500-100 гПа.

Неоднородность распределения ПВФЗ относительно климатической нормы наблюдается во все месяцы, однако ее степень варьируется в зависимости от региона Северного полушария (рис. 8). Для выявления областей с наибольшей пространственной неустойчивостью ПВФЗ были рассчитаны средневзвешенные отклонения от климатической нормы на каждой долготе (с шагом 5°) за весь рассматриваемый период. На основе анализа этих данных Северное полушарие было разделено на три сектора, характеризующихся наибольшей изменчивостью ПВФЗ: атлантико-евразийский (55° з.д. - 85° в.д.), тихоокеано-американский (145° в.д. - 55° з.д.) и восточноевразийский (85 – 145° в.д.). Показано, что наиболее

типичными являются небольшие меридиональные колебания ПВФЗ (в пределах 2° широты) относительно нормы. Выявлена асимметрия меридиональных смещений: величины максимальных отклонений ПВФЗ к северу. Анализ среднеквадратических отклонений ПВФЗ относительно нормы над всем Северным полушарием за период с 1990 по 2023 гг. по данным двух реанализов (NCEP/NCAR и JRA-55) выявил статистически значимый (на уровне 95%) тренд к усилению меридиональных отклонений ПВФЗ в летний сезон. В тихоокеанско-американском секторе значимые увеличения меридиональных отклонений отмечены также в весенний и осенний сезоны.

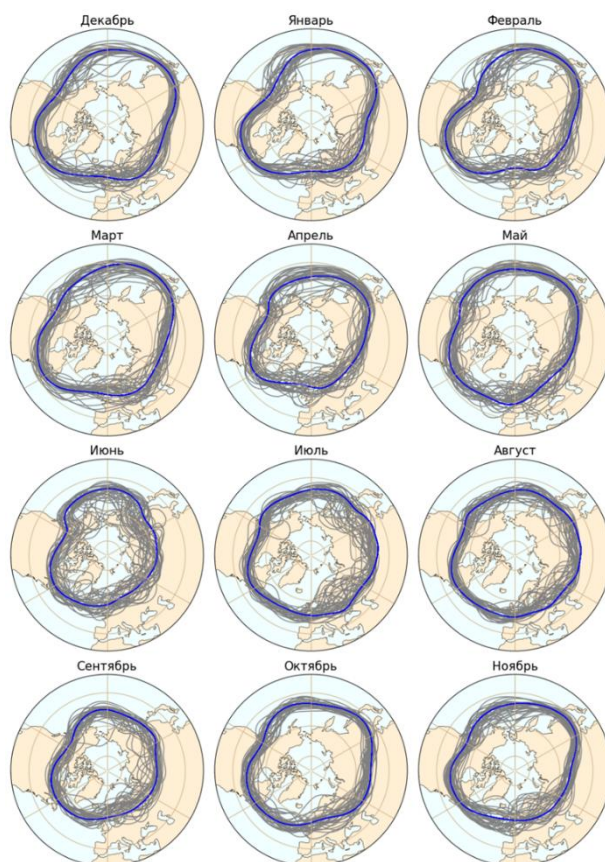


Рисунок 8 – Среднемесячные распределения ПВФЗ за период с 1990 по 2023 г. Синим цветом выделены климатические положения ПВФЗ для периода 1961–1990 гг.

Дополнительно приводится сравнение двух климатических периодов. До недавнего времени климатическая норма, осредненная для периода 1961–1990 гг., была единственной официально используемая норма. В настоящее время утверждена и применяется новая норма, рассчитанная для периода 1991–2020 гг. Аномалии геопотенциальной высоты распределены неоднородно над всем Северным полушарием в каждом месяце. Над большей территорией Северного полушария (в частности, в экваториальных и тропических широтах) отмечается увеличение геопотенциальной высоты в период 1991–2020 гг. При этом в умеренных и высоких широтах выделяются локальные области понижения геопотенциала.

Глава 4 посвящена особенностям пространственного распределения СТ в атлантико-евразийском регионе, наблюдаемым при минорном внезапном стратосферном потеплении, а также при установлении летних блокирующих антициклонов.

Изменчивость пространственного положения и интенсивности СТ обусловлена как внутренними динамическими процессами атмосферы (деятельностью подвижных вихрей синоптического масштаба), так и внешними воздействиями (например, аномалиями температуры поверхности океана). Высокие корреляционные связи отмечаются между индексами Североатлантического колебания (САК), Арктической осцилляции (АО), Восточно-Атлантического колебания (ВАК) и характеристиками СТ в регионе Северной Атлантики [Hall et al., 2015; Ma et al. 2020; Woollings et al., 2010]. В частности, при положительной фазе САК отмечается сравнительное увеличение интенсивности и смещение СТ в направлении полюса. В свою очередь индексы САК, определяющие меридиональные колебания СТ, подвержены влиянию стратосферного полярного вихря, событий Эль-Ниньо и других внешних факторов [Hall et al., 2015; Kidston, et al., 2015; Scaife, 2005].

В разделе 4.1 с использованием данных реанализа JRA-55 приводятся особенности пространственного распределения внетропических СТ в регионе Северной Атлантики при развитии внезапного стратосферного потепления (ВСП) зимой 2014–2015 г. Несмотря на то, что это ВСП классифицировано как минорное, оно оказало значительное влияние на температурный режим, циркуляцию и химический состав средней атмосферы [Didenko et al., 2025; Manney et al., 2015].

Наибольшая повторяемость СТ после ВСП отмечалась в более южных широтах, по сравнению с периодом до регистрируемого ВСП, на большей части региона Северной Атлантики (рис. 9). Было показано, что наибольшие изменения повторяемости СТ связаны со смещением высотной фронтальной зоны в направлении экватора, что в свою очередь вызвано углублением высотных ложбин при вторжении холодного стратосферного воздуха в верхние слои тропосферы.

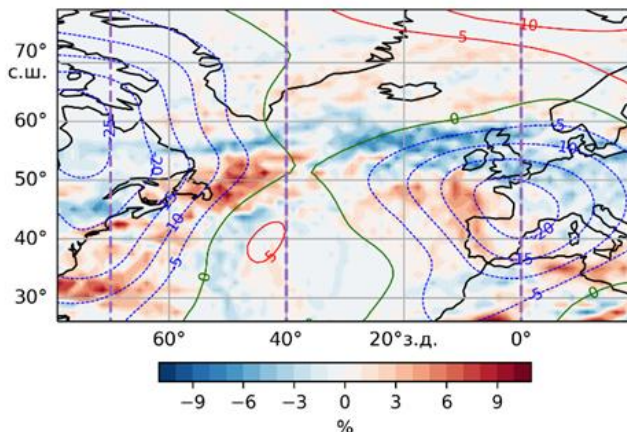


Рисунок 9 – Разности между повторяемостями СТ и полями геопотенциальной высоты поверхности 250 гПа в течение одного месяца до и после ВСП (положительные значения соответствуют росту повторяемости и значений геопотенциала в период после ВСП).

В разделе 4.2 исследованы характеристики летних СТ в периоды формирования блокирующих антициклонов в атлантико-евразийском регионе. Анализ выполнен с использованием данных численной модели WRF-ARW [Skamarock et al., 2008] для двух случаев блокирования – над ЕЧР в июне 2010 г. и Скандинавским п-овом в июле 2018 г. Даты установления и распада, а также продолжительность блокингов были определены по данным реанализа NCEP/NCAR с применением метода, предложенного в [Davini et al., 2012]. Показаны различия в распределении высотных барических образований и в особенностях обрушения планетарных волн, предшествующих установлению блокинга. В июне 2010 г. наблюдалось сильно меандрированное интенсивное СТ над акваторией

Северной Атлантики с процессом обрушения волн над ЕЧР (рис. 10а), тогда как в июле 2018 г. зафиксировано полярное смещение СТ с антициклональным опрокидыванием волн над Скандинавией (рис. 10б).

Сравнение вертикальных профилей скорости ветра и температуры воздуха по модельным и аэрологическим данным продемонстрировала способность модели WRF-ARW наиболее адекватно воспроизводить высоту расположения ядра СТ (рис. 11). Ошибки в воспроизведении скорости ветра могут быть связаны с полями начальных данных, а также с неполным соответствием географических координат аэрологических станции и сеточных узлов модели.

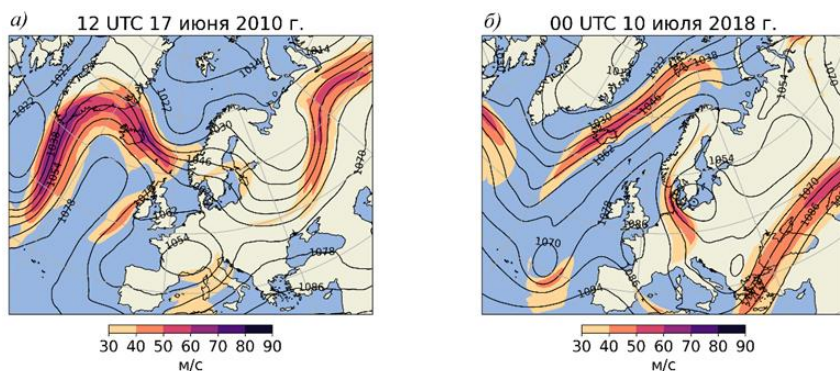


Рисунок 10 – СТ в поле ветра по данным модели WRF-ARW на уровне поверхности 250 гПа: рост волны и интенсивное СТ на периферии высотного гребня (а); развитие высотного гребня и смещение СТ в направлении полюса в период формирования блокинга над Скандинавским п-овом (б).

В **заключении** приведены основные результаты работы:

1. Анализ широтно-долготных и широтно-высотных распределений повторяемости ядер СТ в атлантико-евразийском регионе, выполненный на основе данных реанализа за период 1980–2023 гг., позволил установить однородный характер их распределения с ноября по апрель (холодный период) и с июня по сентябрь (теплый период) с переходными режимами в мае и октябре.

2. Наиболее значимые изменения интегральных характеристик СТ Северного полушария по данным полей реанализа за период 1980–2021

гг. отмечены для летнего сезона, включая: тренды ослабления кинетической энергии СТ; уменьшение доли общей кинетической энергии атмосферы Северного полушария, связанной со СТ; сокращение доли объема атмосферных слоев в области СТ в общем анализируемом слое атмосферы. В зимний сезон выявлено только значимое уменьшение доли объема атмосферных слоев в области СТ.

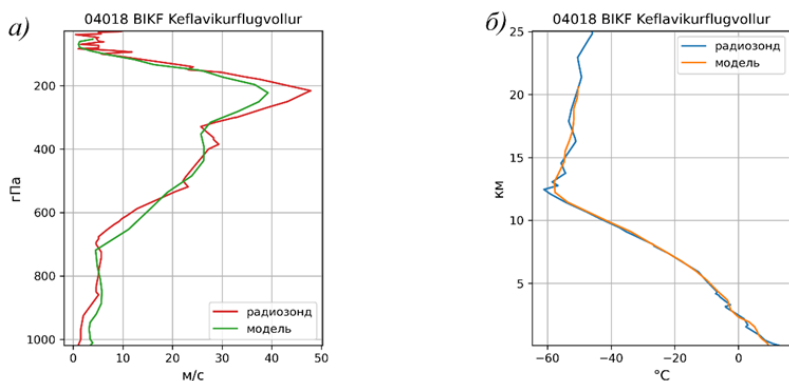


Рисунок 11 – Вертикальные профили: скорость ветра (а) и температура воздуха (б) по модельным и аэрологическим данным на станции в аэропорту Кефлавик (Исландия) в срок 12 UTC 17 июня 2010 г.

3. Применение метода количественной оценки интегральной кинетической энергии внетропических СТ в атлантико-евразийском регионе показало, что в большинстве месяцев (за исключением мая, для которого отмечен статистически значимый на уровне 95% рост) не наблюдается достоверных изменений этого параметра в последние десятилетия (1980–2023 гг.). Анализ межгодовой изменчивости доли кинетической энергии, соответствующей меридиональной составляющей, также не выявил значимых трендов, что свидетельствует об отсутствии устойчивой тенденции к усилению меандрирования или зональности СТ в регионе.

4. На основе данных реанализа получены особенности широтно-долготного распределения среднемесячных положений ПВФЗ Северного полушария за период 1990–2023 гг. и выполнены оценки их отклонений (в градусах широты) относительно климатической нормы, представленной за период 1961–1990 гг. Было показано, что наиболее

типичными являются небольшие меридиональные колебания ПВФЗ (в пределах 2° широты) относительно нормы. Максимальные широтные удаления ПВФЗ характерны для эпизодов атмосферного блокирования, с которыми связаны значительные погодные аномалии. Выявлена асимметрия меридиональных смещений: величины максимальных отклонений ПВФЗ к северу.

5. Анализ среднеквадратических отклонений (σ) отклонений ПВФЗ над всем Северным полушарии за период с 1990 по 2023 гг. относительно климатической нормы (1961–1990 гг.) выявил статистически значимый (на уровне 95%) тренд к усилению меридиональных отклонений ПВФЗ в летний сезон. В тихоокеано-американском секторе значимые увеличения меридиональных отклонений отмечены также в весенний и осенний сезоны.

Публикации по теме диссертации

в журналах из перечня ВАК:

1. Didenko K.A., **Bezotcheskaya E.A.**, Mauricev E.A. Dynamic regime of the middle atmosphere during the development of minor sudden stratospheric warming in the winter of 2014–2015: wave processes and jet streams // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2025. V. 61. No. 5. P. 567–580.
2. **Безотеческая Е.А.** О пространственной локализации ядер атмосферных струйных течений // Доклады академии наук. Науки о Земле. 2025. Т. 522. № 1. С. 140–147.
3. **Безотеческая Е.А.**, Чхетиани О.Г., Мохов И.И. Изменчивость струйных течений в атмосфере Северного полушария в последние десятилетия (1980–2021 гг.) // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2023. Т. 59. № 3. С. 265–274.
4. Курганский М.В., **Безотеческая Е.А.** О связи перистой облачности и полей относительной влажности в верхней тропосфере с симметричной неустойчивостью // Метеорология и гидрология. 2023. № 7. С. 18–29.
5. **Безотеческая (Дурнева) Е.А.**, Чхетиани О.Г. Планетарная высотная фронтальная зона в Атлантико-Европейском секторе в летние сезоны в 1990–2019 гг. // Метеорология и гидрология. 2021. № 6. С. 24–33.

другие публикации по теме диссертации:

6. Didenko K.A., **Bezotecheskaya E.A.**, Maurchev E.A. Wave processes in the middle atmosphere during the minor SSW development in winter 2014–2015 // Тезисы 48-го ежегодного семинара «Физика авроральных явлений». 2025.
7. **Безотеческая Е.А.** Исследование структуры и циркуляции зонального участка летнего струйного течения над акваторией Северной Атлантики и Великобритании // Тезисы V всероссийской конференции с международным участием «Турбулентность, динамика атмосферы и климата, посвященная памяти академика А.М. Обухова». 2024. С. 65.
8. **Безотеческая Е.А.** Распределение струйных течений при основных формах атмосферной циркуляции в Атлантико-Европейском секторе // Тезисы международной конференции «Изменения климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования». 2023. С. 29.
9. **Безотеческая Е.А.**, Чхетиани О.Г., Мохов И.И. Изменчивость струйных течений в атмосфере Северного полушария в последние десятилетия (1980–2021 гг.) // Тезисы IV всероссийской конференции с международным участием «Турбулентность, динамика атмосферы и климата, посвященная памяти академика А.М. Обухова». 2022. С. 55.
10. **Безотеческая (Дурнева) Е.А.**, Чхетиани О.Г. Анализ блокирующих антициклонов над европейской территорией России за период 2018–2020 гг. // Тезисы IV всероссийской научно-практической конференции «Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России». 2021. С. 76–84.
11. **Bezotecheskaya (Durneva) E.** Variability of planetary high-altitude frontal zones in the Northern Hemisphere from 1990 to 2019 in the summer and their location during extreme weather events // WCEDAI-2020 Abstracts. 2020. P. 379.
12. **Безотеческая (Дурнева) Е.А.** Характеристики высотных струйных течений при аномальном поведении погоды в Северном полушарии, на примере июля 2018 года // Тезисы международной конференции по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде “CITES-2019”. 2019. С. 100–103.
13. **Безотеческая (Дурнева) Е.А.** Изменчивость планетарных высотных фронтальных зон Северного полушария в летний период 1991–2019 гг. //

Тезисы всероссийской конференции «Изменения климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования». 2019. С. 45.