

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
НАУКИ ИНСТИТУТ ФИЗИКИ АТМОСФЕРЫ ИМ А.М. ОБУХОВА
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи

Безотеческая Евгения Андреевна

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ И ИЗМЕНЧИВОСТЬ
ВЕРХНЕТРОПОСФЕРНЫХ СТРУЙНЫХ ТЕЧЕНИЙ СЕВЕРНОГО
ПОЛУШАРИЯ

Специальность 1.6.18. — «Науки об атмосфере и климате»

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук
Чхетиани Отто Гурамович

Москва — 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О СТРУЙНЫХ ТЕЧЕНИЯХ И ИХ РОЛИ В КЛИМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ	15
1.1. Физическая природа и механизм формирования струйных течений	15
1.2. Классификация и основные типы струйных течений Северного полушария	17
1.3. Роль струйных течений в атмосферных процессах и погодообразовании.....	20
1.4. Струйные течения в контексте изменения климата: обзор современных исследований и ключевые вопросы.....	22
1.5. Методы изучения струйных течений	23
1.6. Основные выводы к главе 1.....	25
ГЛАВА 2. МЕТОДОЛОГИЯ ВЫДЕЛЕНИЯ ЯДРА СТРУЙНОГО ТЕЧЕНИЯ.....	27
2.1. Основные термины, относящиеся к структуре струйного течения.	27
2.2. Метод выделения ядра струйного течения в трехмерном поле ветра.....	29
2.3. Верификация метода по расположению гряд перистых облаков на спутниковых снимках.....	32
2.4. Распределение повторяемости ядер струйных течений в атлантико-евразийском регионе в период 1980–2023 гг.	38
2.4.1. Широтно-долготное распределение повторяемости	39
2.4.2. Широтно-высотное распределение повторяемости	47
2.5. Основные выводы к главе 2.....	49
ГЛАВА 3. ИЗМЕНЧИВОСТЬ СТРУЙНЫХ ТЕЧЕНИЙ СЕВЕРНОГО ПОЛУШАРИЯ В ПЕРИОД ПОСЛЕДНИХ ДЕСЯТИЛЕТИЙ.....	51
3.1. Кинетическая энергия струйных течений Северного полушария в период 1980–2021 гг.	52
3.1.1. Связь индексов Эль-Ниньо с кинетической энергией струйного течения	56

3.2. Доли общей кинетической энергии атмосферы, связанной со струйными течениями (1980–2021 гг.).....	57
3.3. Доли объема атмосферных слоев в области струйного течения в общем анализируемом слое атмосферы (1980–2021 гг.).....	59
3.4. Кинетическая энергия внетропических струйных течений в атлантико-евразийском регионе в период 1980–2023 гг.	61
3.4.1. Доли кинетической энергии, соответствующие меридиональной составляющей.....	65
3.5. Планетарная высотная фронтальная зона (ПВФЗ) Северного полушария в период 1990–2023 гг.	68
3.5.1. Особенности распределения ПВФЗ в атлантико-евразийском секторе.....	74
3.5.2. Особенности распределения ПВФЗ в тихоокеано-американском секторе.....	80
3.5.3. Особенности распределения ПВФЗ в восточноевразийском секторе.....	84
3.5.4. Сравнение климатических периодов: 1961–1990 и 1991–2020 гг. .	87
3.6. Основные выводы к главе 3.....	89
ГЛАВА 4. ОСОБЕННОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СТРУЙНЫХ ТЕЧЕНИЙ В АТЛАНТИКО-ЕВРАЗИЙСКОМ РЕГИОНЕ	91
4.1. Внетропические струйные течения в регионе Северной Атлантики во время развития минорного ВСП зимой 2014–2015 гг....	91
4.1.1. Струйные течения и процессы на уровне тропопаузы	93
4.1.2. Особенности широтного положения струйных течений до и после ВСП....	94
4.1.3. Средние вертикальные разрезы верхней тропосферы и нижней стратосферы.....	97
4.2. Характеристики летних струйных течений по данным численной модели WRF-ARW при формировании блокирующих антициклонов в 2010 и 2018 гг.....	100
4.2.1. Характеристики полярного струйного течения при формировании блокинга в июне 2010 года	102
4.2.2. Характеристики полярного струйного течения при формировании блокинга в июле 2018 года.....	107
4.3. Основные выводы к главе 4.....	111

ЗАКЛЮЧЕНИЕ	113
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	115

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы 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 [1], в стратосфере [2, 3, 4], 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 [5-9]. 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 [10-13]. 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 [2, 14, 15].

Особая роль СТ проявляется в формировании региональных погодных и климатических аномалий [16]. С режимами СТ, с их неустойчивостью и меандрированием [17-22] связано развитие блокирований (блокингов) в тропосфере средних широт [23, 24]. Особенности широтного положения и интенсивности СТ проявляются в изменениях взаимодействия атмосферы и океана, вариациях траекторий внетропических циклонов, региональной изменчивости приповерхностной температуры и осадков [25-31]. Отмечается связь режимов СТ с ключевыми модами климатической изменчивости, включая Североатлантическое, Арктическое и Южное колебания, с

протяженностью морских льдов и снежного покрова над континентами [32-35], а также со стратосферными событиями, в частности, с внезапными стратосферными потеплениями [36, 37].

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 [38]. Наиболее интенсивные участки СТ, характеризующиеся значительными сдвигами ветра, являются основной зоной возникновения «турбулентности в ясном небе» [39, 40], 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 [41] отмечена связь скорости ветра в ядре субтропического СТ с интенсивностью меридиональной ячейки Хэдли. Согласно [42] 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 [43] 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 [44, 45]. В целом, как представлено в обзорных работах [34, 46], 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 их положений 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 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 ядра 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 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.:

1. Didenko K.A., **Bezotecheskaya E.A.**, Maurchev 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.
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.

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 написании 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.

ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О СТРУЙНЫХ ТЕЧЕНИЯХ И ИХ РОЛИ В КЛИМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

1.1. Физическая природа и механизм формирования струйных течений

В период обширных исследований в области СТ, охватывающий вторую половину двадцатого столетия, было установлено, что СТ являются неотъемлемым элементом общей циркуляции атмосферы и их формирование происходит в сравнительно узких зонах, в которых сосредоточены наибольшие контрасты температур в пределах всей тропосферы [2, 3, 15, 47-52]. Согласно модели атмосферы Северного полушария, предложенной в работе [53], тропосферный воздух может быть разделен на три основные воздушные массы: тропическую (ТВ), воздух умеренных широт (УВ) и полярную (арктическую) (ПВ) (рис. 1.1). На границах конфлюэнции (слияния) этих разнородных воздушных масс формируются главные фронтальные разделы и планетарные высотные фронтальные зоны (ПВФЗ). Наиболее интенсивно эти зоны выражены в областях двусторонней сходимости потоков: теплого воздуха, поступающего с юга по периферии высотного гребня, и холодного воздуха, выносящегося с севера по периферии высотной ложбины, что типично для внетропических широт [47].

Первичной причиной возникновения СТ является бароклинность атмосферы в пределах фронтальной зоны. Согласно уравнению термического ветра [50], увеличение геострофического ветра с высотой (вертикальный сдвиг ветра) прямо пропорционально величине меридионального градиента температуры:

$$\frac{\partial V_g}{\partial z} = \frac{V_g}{T} \cdot \frac{\partial T}{\partial z} - \frac{g}{fT} (\nabla_k T \times k). \quad (1)$$

Здесь V_g – вектор геострофического ветра, T – температура, g – ускорение свободного падения, f – параметр Кориолиса, $\nabla_k T$ – горизонтальный градиент температуры, k – единичный вектор в направлении вертикальной оси z . Таким образом, максимальные скорости ветра наблюдаются в зонах с наибольшими температурными контрастами. Рост скорости с высотой в области ПВФЗ обычно прекращается вблизи уровня тропопаузы, где меридиональный градиент температуры ослабевает и меняет знак на противоположный. Следовательно, ядро СТ формируется вблизи уровня тропопаузы, в зоне максимального вертикального сдвига ветра.

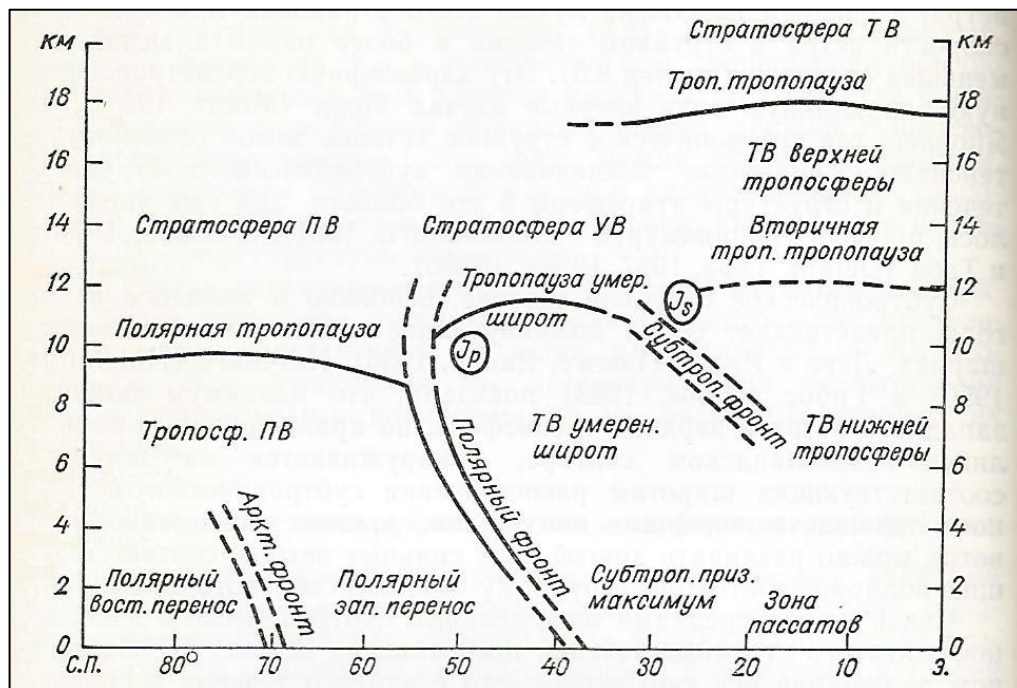


Рис. 1.1. Модель атмосферы Северного полушария типичная для зимнего сезона: основные воздушные массы, тропопаузы, фронты и струйные течения по Э. Пальмену и Ч. Ньютоу [53].

Однако, реальная скорость ветра в ядре СТ часто существенно превышает величину, рассчитываемую по геострофическому балансу и термическому ветру. Это означает, что механизм формирования и поддержания СТ не может быть сведен исключительно к термическому фактору. Ключевую роль играют динамические процессы, различающиеся для двух основных типов СТ.

1.2. Классификация и основные типы струйных течений Северного полушария

Следуя предложенной модели атмосферы Северного полушария (см. рис. 1.1), на вращающейся планете с различным меридиональным нагревом существует две основные системы СТ – субтропическое (ССТ) и полярное (или полярнофронтное) СТ, имеющие некоторые общие черты, но различающиеся по их связи с общей циркуляцией атмосферы. Выделяют два физических процесса с которыми связаны образование и поддержание ССТ и полярных СТ. ССТ служат границей переходной зоны между тропическим и субтропическим климатическими поясами. Их формирование происходит при усилении западного потока на полярной границе циркуляционной ячейки Хэдли, при частичном сохранении абсолютного момента количества движения [54, 55]. Полярные СТ в зоне атмосферных фронтов отделяют холодный тропосферный воздух высоких широт от более теплого субтропического. Их существование обусловлено переносом импульса и тепла, связанными с деятельностью нестационарных вихрей умеренных широт [55, 56]. Стоит отметить, что СТ, формирующиеся в системе арктического фронта, также образуются и поддерживаются по принципу полярных СТ.

К основным отличительным особенностям относятся широта и высота расположения. ССТ зимой в Северном полушарии наиболее часто обнаруживается в окрестности 30° с.ш. в разрыве тропопаузы вблизи изобарической поверхности 200 гПа [2, 3, 57]. Полярное СТ (а также арктическое СТ) отличаются высокой степенью подвижности и обнаруживаются на уровне тропопаузы вблизи поверхностей 250 и 300 гПа [3, 58, 59]. При этом нередко наблюдается слияние двух систем, которое зимой в Северном полушарии наиболее часто отмечается над западной акваторией Тихого океана, а также над южной частью Северной Америки и вдоль ее восточного побережья [60]. В таком случае единое течение представляет собой

более сложную структуру и отражает характеристики как субтропических, так и полярных СТ [56, 61, 62].

Знания о климатологии СТ существенно расширились с появлением атмосферных реанализов. Среднесезонные значения абсолютной скорости ветра верхнего слоя тропосферы, представленные за продолжительные временные периоды, позволили выделить асимметрию пространственного распределения СТ в Северном полушарии [25, 56, 63, 64]. Наибольшая повторяемость СТ зимой демонстрирует спиралевидных характер распределения, плавно переходящий к квазиколецевой структуре летом. Зимой полоса наибольших значений простирается от западного побережья Северной Африки через Центральную Азию до Японии, проходит над Тихим океаном и центральной частью Северной Америки и оканчивается в районе между Исландией и Великобританией. Летом повторяемость СТ представлена локальными максимумами между широтными кругами 40 и 50° с.ш.

В работе [63] в соответствии с основными двумя типами СТ и их различиями в вертикальной структуре представлена климатология «shallow jet» («неглубоких», сосредоточенных в верхней тропосфере СТ) и «deep jet» («глубоких», простирающиеся через всю толщу тропосферы СТ). В действительности такой анализ отражает климатологию ССТ и полярных СТ (см. рис. 1.2 и 1.3). Как видно из рисунков, повторяемость ССТ во все сезоны года превышает таковую для полярных СТ. Это подтверждает их малоподвижность и высокую географическую устойчивость. В отличие от них, полярные СТ демонстрируют максимумы повторяемости над акваториями Атлантического и Тихого океанов, что обусловлено комплексом факторов, включая термический контраст («суша-океан»), орографическое влияние, роль океанических течений (Гольфстрим и Кюросио) и другое [2, 3, 15, 21, 53].

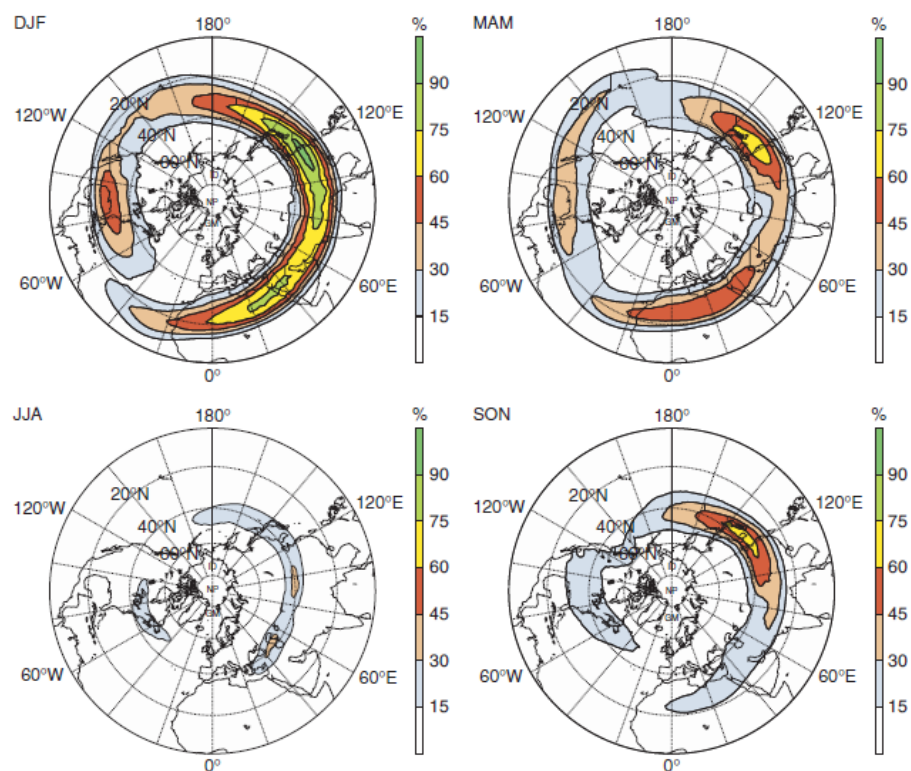


Рис. 1.2. Среднегодовое распределение повторяемости «shallow jet» по сезонам года: зимой (DJF), весной (MAM), летом (JJA) и осенью (SON) [63].

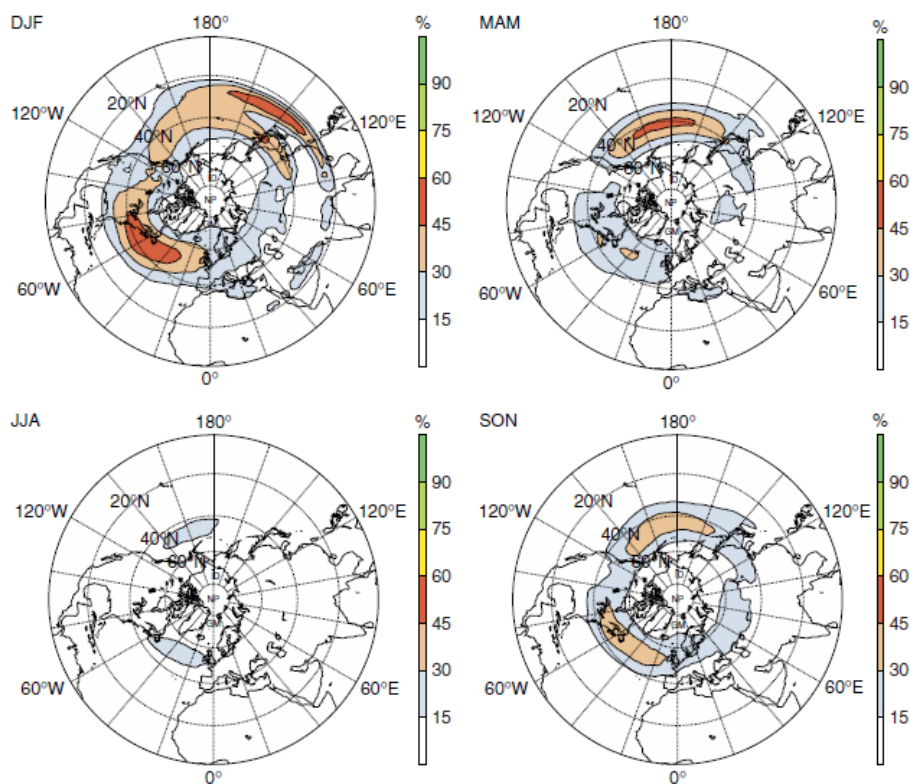


Рис. 1.3. Среднегодовое распределение повторяемости «deep jet» по сезонам года: зимой (DJF), весной (MAM), летом (JJA) и осенью (SON) [63].

1.3. Роль струйных течений в атмосферных процессах и погодообразовании

СТ, являясь неотъемлемым элементом общей циркуляции атмосферы, играют важную роль в формировании погодных условий и климата на Земле [25, 42, 45]. Одним из основных механизмов воздействия СТ является их непосредственная связь с процессами циклогенеза. Как подчеркивается в [15], значительные пространственные масштабы СТ и их высокая кинетическая энергия способны оказывать существенное влияние на перестройку барического поля в нижней и средней тропосфере. Во внетропических широтах проявляются тесные двусторонние связи между структурой и скоростью ветра СТ и эволюцией подвижных приземных барических образований – циклонами и антициклонами [2, 14, 15, 53, 65]. Основным механизмом, обеспечивающим эти связи, являются интенсивные восходящие и нисходящие движения, развивающиеся в областях входа и выхода СТ [10-12].

Важным проявлением динамического воздействия СТ является их роль в формировании крупномасштабных аномалий циркуляции, таких как атмосферные блокинги. Установление блокирующего антициклона (блокинга) является следствием проявления неустойчивости СТ [23]. На примере Атлантико-Европейского сектора, где наблюдается один из максимумов повторяемости блокингов Северного полушария [66, 67], прослеживается четкая взаимосвязь между конфигурацией североатлантической ветви СТ и развитием европейского блокинга. Формирование последнего в большинстве случаев происходит вследствие усиления высотного барического гребня над Атлантикой и антициклонального опрокидывания планетарной волны, что приводит к смещению СТ в полярном направлении и образованию блокинга на его антициклональной стороне [68].

СТ также оказывают прямое влияние на формирование аномалий приземной температуры и режима осадков. Исследования демонстрируют статистически значимую связь между индексами СТ (зональности, скорости ветра, широтного положения) с пространственным распределением аномалий температуры воздуха и осадков. Например, экстремальные осадки в Средиземноморском регионе и Западной Европе наиболее часто наблюдаются в периоды устойчивой зональной и интенсивной североатлантической ветви СТ. Аналогично, положение и смещение ССТ оказывает влияние на выпадение интенсивных осадков в таких регионах, как Иран [29].

Помимо прямого атмосферного воздействия, СТ играют важную роль в модуляции океан-атмосферного взаимодействия. Их положение и интенсивность влияют на ветровые режимы у поверхности, определяя адвекцию тепла из субтропических широт или холода из арктических регионов, что, в свою очередь, воздействует на температуру поверхности океана (ТПО), ледовитость и потоки скрытого и явного тепла [27]. Однако вопрос об обратном влиянии аномалий ТПО на параметры СТ остается дискуссионным, хотя сопровождается различного рода исследованиями. Если в [27] статистически значимых связей в регионе Северной Атлантики не выявлено, то в [31] показано, что аномалии приземной температуры над Евразией и явление Ла-Нинья могут вызывать противофазное смещение полярного СТ и ССТ в районе Восточной Азии. Смещение полярного СТ на северной стороне Тибетского нагорья отмечается в направлении экватора, а ССТ на южном склоне нагорья – в направлении Северного полюса.

Таким образом, СТ выступают интегрирующим звеном, связывающим процессы в различных слоях атмосферы, океане и на подстилающей поверхности, определяя как синоптическую обстановку, так и климатическую изменчивость.

1.4. Струйные течения в контексте изменения климата: обзор современных исследований и ключевые вопросы

В последние десятилетия возросло количество исследований, посвященных анализу изменчивости характеристик СТ и их влиянию на распределение приземных аномалий. Такой рост обусловлен глобальной изменчивостью климата и, как следствие, увеличением числа экстремальных приземных погодных явлений, в проявлении которых СТ играют немаловажную роль. В [64] впервые с использованием полей реанализов были представлены оценки многолетних трендов (за период 1979–2001 гг.) широтного положения, высоты и интенсивности СТ. В данном исследовании СТ Северного полушария рассматривается как единое течение, без разделения на ССТ и полярные СТ. В целом отмечается увеличение высоты и смещение СТ в направлении полюса. Данную особенность авторы статьи рассматривают как проявление глобального потепления. При этом для СТ Северного полушария наблюдается ослабление интенсивности, которое выражается в уменьшении скорости ветра в области струи. Представленные особенности изменчивости СТ отражают средние показатели. Сезонные и локальные тренды могут отличаться от общего распределения [32, 41, 69]. Похожий анализ, отличающийся в основном в методике определения СТ, и увеличением периода исследования (в работе представлены тренды за 1958–2008 гг., а также отдельно для периода, включающего в себя эру спутниковых данных в полях реанализов – 1979–2008 гг.) представлен в [70]. В данной работе также отмечено смещение СТ в направлении полюса.

Энергия СТ обеспечивается меридиональным температурным градиентом. По оценкам IPCC [71], а также выводам, опубликованным в [45], интенсивное потепление Арктики ослабляет этот градиент у поверхности, что, согласно гипотезам, ведет к ослаблению СТ, увеличению меандрирования и росту вероятности блокирующих антициклонов [42, 72]. В то же время,

прогнозируемое потепление на уровне тропопаузы может усиливать высотный градиент и западные ветры.

Разнонаправленные изменения температурных градиентов на разных высотах также влияют на вертикальный сдвиг ветра, потенциально усиливая турбулентность в районах полетов воздушных судов. Остается неясным, какой из этих разноуровневых процессов окажет доминирующее влияние на СТ в условиях меняющегося климата, и как это воздействие будет варьироваться в зависимости от сезона и региона [45].

Результаты, приведенных ранее исследований, предполагали смещение СТ в направлении полюса. Однако последующие наблюдения и данные моделирования не подтверждают эту тенденцию однозначно для внетропических СТ [46]. Несмотря на значительное количество работ, посвященных этим СТ, их реакция на глобальное изменение климата до сих пор остается плохо изученной и не имеет точной количественной оценки [34, 46].

1.5. Методы изучения струйных течений

Распространенное мнение о том, что СТ были открыты американскими военными летчиками в период Второй мировой войны, является ошибочным. Данное событие, однако, послужило мощным стимулом для начала их активного изучения не только в рамках авиационной метеорологии, но также в контексте синоптики, климатологии и других научных направлений. Теоретические предположения о существовании западных ветров на верхней границе циркуляционной ячейки Хэдли появились еще в XVIII веке, а первые инструментальные подтверждения высоких скоростей ветра в верхней тропосфере были получены в начале XX века в ходе наблюдений на горе Цукуба (Япония). Подробный исторический экскурс, посвященный исследованиям СТ, представлен в монографии [73].

Исследование СТ проводится с применением полей реанализов различного пространственного и временного разрешения [25-32], спутниковых данных [33, 74] и радиозондовых измерений [69]. Атмосферные реанализы на сегодняшний день можно отнести к основным инструментам для климатологических исследований СТ. В качестве их ключевых достоинств выделяются: глобальный пространственный охват, длительные и однородные временные ряды, полное трехмерное представление атмосферы. Все эти характеристики позволяют применять автоматизированные алгоритмы для выделения характеристик СТ и рассчитывать их интегральные характеристики. Точность и разрешение полей реанализов напрямую зависят от количества ассимилированных данных наблюдений, что может приводить к систематическим ошибкам в регионах с редкой сетью измерений (например, над океанами в доспутниковую эру).

Спутниковые данные также предоставляют глобальную информацию о состоянии атмосферы. С помощью спутниковых изображений можно получить информацию из труднодоступных регионов – океанов, полярных областей. СТ можно отслеживать по движению облачных систем [15, 76] и проводить прямые измерения некоторых параметров (например, температуры подстилающей поверхности).

Радиозондовые измерения исторически были первым источником данных о вертикальной структуре СТ. Обеспечивают высокую точность и вертикальное разрешение измерений температуры, ветра непосредственно в области СТ, что делает их «эталоном» для верификации данных реанализов и численного моделирования. При этом широко известно крайне неоднородное пространственное распределение и низкая временная дискретность, что не позволяет адекватно отслеживать быструю эволюцию СТ.

Ни один из методов не является универсальным, и именно комплексное использование различных наборов данных позволяет получить наиболее достоверные результаты в области исследования СТ.

1.6. Основные выводы к главе 1

СТ представляют собой неотъемлемый структурный элемент общей циркуляции атмосферы, формирующийся в узких зонах с максимальными в масштабе полушария контрастами температуры. Их возникновение обусловлено прежде всего бароклинностью атмосферы, однако ключевую роль в поддержании СТ играют динамические процессы.

Выделяют две основные системы СТ: субтропически (ССТ) и полярные СТ, различающиеся по физическим механизмам формирования, климатологическому положению и характеристикам. ССТ отличаются большей географической устойчивостью, в то время как полярные СТ характеризуются высокой подвижностью и выраженной пространственной неоднородностью.

СТ играют фундаментальную роль в формировании погоды и климата. Они определяют траектории внетропических образований, связаны с процессами циклогенеза 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.

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.

Современное изучение 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.

ГЛАВА 2. МЕТОДОЛОГИЯ ВЫДЕЛЕНИЯ ЯДРА СТРУЙНОГО ТЕЧЕНИЯ

2.1. Основные термины, относящиеся к структуре струйного течения

В международном метеорологическом словаре Всемирной Метеорологической Организации (ВМО) приводится определение, отражающее в себе основные особенности структуры и характеристики СТ: «узкое, небольшой вертикальной мощности, протяженное воздушное течение большой скорости, квазигоризонтальное, обычно располагающееся вблизи тропопаузы, с максимальными скоростями у его оси и сильными вертикальными и горизонтальными сдвигами ветра» [76]. Согласно этому определению СТ представляются в виде масштабных атмосферных рек, быстро текущих в медленно перемещающемся воздухе на их периферии. Характерная длина СТ – тысячи километров, поперечные размеры – порядка сотни километров, толщина – несколько километров [49].

Наиболее часто СТ изображают в поле ветра одной из выбранной изобарической поверхности, как правило, 200, 250 или 300 гПа. На рисунке 2.1 представлено среднесуточное поле ветра на уровне поверхности 250 гПа по данным модели GFS, а также приземные центры барических образований для 29 января 2025 года [77]. Линия, соединяющая максимальные значения скорости ветра, называется осью СТ. В данном случае ось рассматривается на уровне поверхности 250 гПа и в действительности не всегда является проекцией ядра СТ, которое может обнаруживаться выше или ниже выбранного уровня. Ядром СТ, в свою очередь, называется линия, вдоль которой скорость ветра является максимальной как в вертикальном, так и в горизонтальном направлениях. Интенсивность СТ характеризуется значением скорости ветра в ядре (при рассмотрении определенного уровня атмосферы – на его оси). Центральная часть СТ, обладающая наибольшими скоростями ветра, называется его сердцевиной. Стоит отметить, что интенсивность СТ

существенно зависит от времени года. Зимой максимальные скорости на оси в 1.3–1.5 раз больше, чем летом [38].

GFS 250hPa Jetstream (kt), MSLP (hPa)
1-day Avg | Wed, Jan 29, 2025

ClimateReanalyzer.org
Climate Change Institute | University of Maine

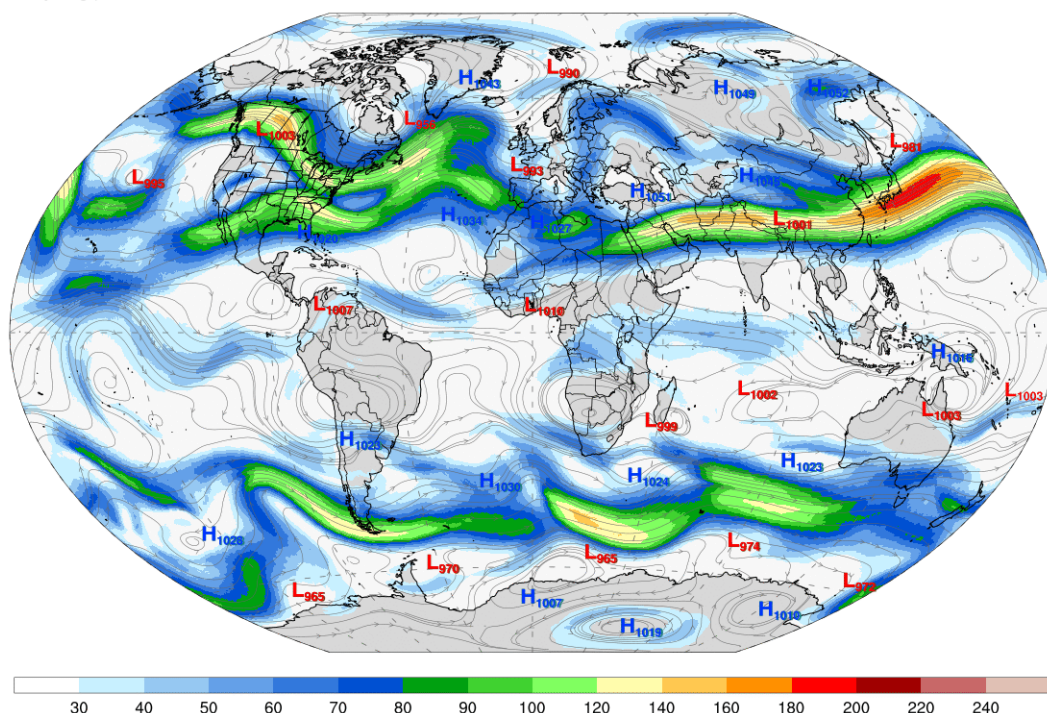


Рис. 2.1. Струйные течения в поле ветра на уровне изобарической поверхности 250 гПа и приземные центры барических образований, осредненные за 29 января 2025 года [77].

Скорость ветра от ядра СТ ослабевает в радиальном направлении и проявляется сильными горизонтальными (до 10 м/с на 100 км) и вертикальными (до 10 м/с на 1 км) сдвигами ветра [49]. При движении по потоку слева от ядра отмечается циклоническая периферия СТ, справа – антициклональная. Как правило, горизонтальный сдвиг ветра на циклонической стороне превышает таковой на антициклональной. СТ принято ограничивать значением скорости, равным 30 м/с, что по сути является условным пределом, и в первую очередь оправдано удобством авиационного обеспечения полетов, проходящих в зонах СТ [15].

Важной структурной особенностью СТ является изменение скоростей ветра вдоль ядра на всем ее протяжении от меньших значений к большим и наоборот, проявляющихся в виде подвижных областей максимального ветра

(ОМВ) и областей более слабых ветров между ними. ОМВ перемещаются вдоль СТ в направлении потока со скоростями меньшими, чем скорость ветра в них; характеризуются высокой изменчивостью и недолгой продолжительностью существования [15, 38].

2.2. Метод выделения ядра струйного течения в трехмерном поле ветра

К первоначальному и важному этапу исследования СТ относится достоверное определение их характеристик, основными из которых считаются широтное положение и интенсивность. На сегодняшний день авторами современных исследований разработан ряд методов, позволяющих представить СТ в трехмерном пространстве по данным полей реанализов и численного моделирования. В [78] предлагается использовать поверхность максимального ветра, построение которой основано на поиске локальных максимумов ветра в тропосферном слое, среди доступных изобарических поверхностей, и объединении узлов наиболее близких к уровню тропопаузы. Выбор такого метода позволяет выявлять участки с увеличением и ослаблением интенсивности на всем протяжении СТ. В [70] ядром СТ считается линия, последовательно соединяющая максимумы скорости ветра, обнаруженные в тропосфере на каждой доступной долготе в массиве используемых данных. Совершенно очевидно, применение такого метода будет вносить неточности при определении координат ядра на сильно искривленных участках, а именно при строго меридиональном направлении СТ. Наиболее близкий к представленному в настоящем разделе метод продемонстрирован в [79]. В отмеченной работе впервые (по заявлению самих авторов) приводится автоматизированный метод выделения линии ядра СТ в трехмерном поле ветра. Представленный метод учитывает информацию о направлении ветра и исходя из этого максимумы скорости выделяются на поверхности, являющейся перпендикулярной по отношению к потоку. Каждый из приведенных выше алгоритмов включает ряд промежуточных вычислений

и требует навыков обработки массивов данных. Для пользователей языка программирования Python разработана и предлагается к использованию в виде открытого кода библиотека *jmetrics*, которая содержит 17 алгоритмов и методов для исследования характеристик СТ [80]. Авторами выделены три группы, объединяющие методы в зависимости от поставленной задачи исследования. Стоит учитывать, что определение высоты СТ в полях реанализов и модельных данных является только приближенным и отображает положение ядра вблизи указанной изобарической поверхности или другого используемого уровня. Тем не менее, представление СТ в поле ветра является наиболее адекватным и простым, исходя из определения, по сравнению с анализом косвенных параметров, таких как градиент геопотенциальной высоты, а также максимумы в полях потенциальной завихренности [70].

В настоящей диссертационной работе предлагается и используется простой и универсальный метод выделения ядра СТ по данным о ветре в узлах с регулярной сеткой, которыми могут являться поля реанализов или модельные данные с любым пространственным разрешением и вертикальной координатой. Алгоритм позволяет выделять трехмерную структуру, сохранять целостность при сильных изгибах и строго меридиональных направлениях СТ, что способствует более детальному определению характеристик, таких как ветвление, слияние, степень меандрирования и интенсивность.

Определение координат ядра СТ состоит из двух основных этапов. Первый этап заключается в установлении ориентированности СТ, а именно в выделении участков с нарушением западно-восточного направления. Для этого, согласно разложению векторов в правосторонней декартовой системе координат (в полях реанализа положительные значения u соответствуют направлению с запада на восток, а положительные значения v – с юга на север), определяется направление для вектора $\mathbf{v}$, где $|\mathbf{v}| = (u^2 + v^2)^{1/2}$. Для каждого узла сетки рассчитывается значение $\alpha_{i,j,k}$, соответствующее углу между вектором скорости $\mathbf{v}_{i,j,k}$ и его зональной проекцией $u_{i,j,k}$. Здесь i, j и k – номера

узлов сетки по широте, долготе и высоте соответственно. С использованием соотношения $\cos \alpha = u/|\mathbf{v}|$ определяется угол, характеризующий отклонение потока от зонального направления. При $0^\circ \leq \alpha_{i,j,k} \leq 45^\circ$ узел сетки на дальнейших этапах рассматривается как зональный участок СТ, а при $45^\circ < \alpha_{i,j,k} \leq 90^\circ$ – как меридиональный.

Второй этап включает в себя нахождение непосредственно координат узлов сетки, соответствующих ядру СТ. Если узел сетки с абсолютной величиной скорости ветра $|\mathbf{v}|_{i,j,k}$ определяется как зональный участок СТ, то далее проверяются значения скорости ветра всех соседних узлов в меридиональном разрезе. Координаты высоты, широты и долготы, соответствующие $|\mathbf{v}|_{i,j,k}$ относятся к ядру СТ, если все соседние значения скорости ветра оказываются меньше выбранной $|\mathbf{v}|_{i,j,k}$. Для $|\mathbf{v}|_{i,j,k}$, относящейся к меридиональному участку СТ, аналогично проверяются все соседние значения только в разрезе по кругу широты. На рисунке 2.2 приводится 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 [81].

Заключительный этап подразумевает последовательное соединение узлов сетки с максимумами $|\mathbf{v}|_{i,j,k}$, обнаруженными в трехмерном поле ветра. На данном этапе основной задачей является выделение линии ядра СТ над шумами, которые могут представлять собой локальные, единичные узлы сетки с максимумами скорости, не относящимися к СТ. Необходимость фильтрации встречается в различных исследованиях и имеет ряд решений, например, выделение сигнального компонента скелетона над шумами в двумерных изображениях [82]. Для исключения наиболее очевидных шумов при выделении ядер СТ следует применять как минимум два условия: пороговое значение для $|\mathbf{v}|_{i,j,k}$ и минимальное количество последовательно соединенных узлов сетки.

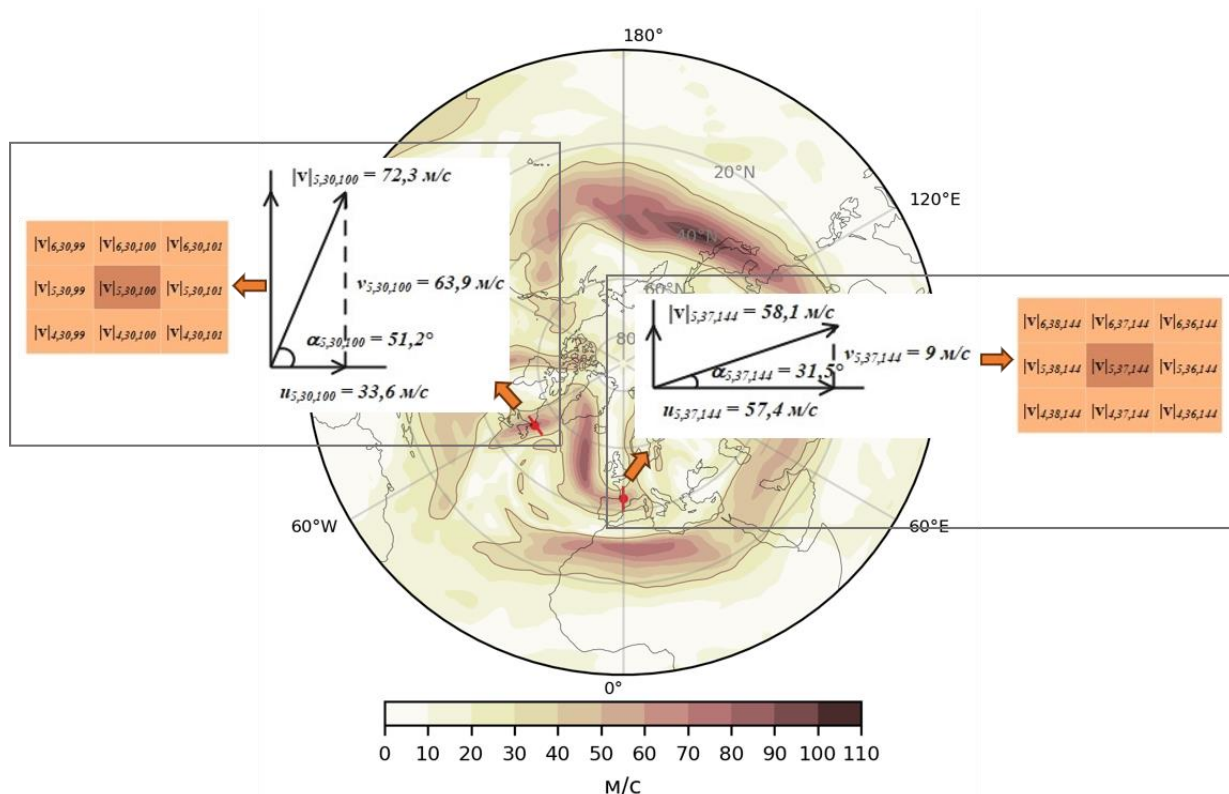


Рис. 2.2. Алгоритм поиска ядер СТ в поле абсолютной скорости ветра на уровне изобарической поверхности 250 гПа в срок 00 UTC 4 декабря 2020 года по данным реанализа JRA-55 [81].

Стоит отметить, что в процессе разработки алгоритма не было выявлено существенных различий в обнаружении ядер СТ при учете отклонения потока от западно-восточного направления на 45° (рассматривался интервал значений $44,5^\circ \leq \alpha_{i,j,k} \leq 45,4^\circ$) и поиска максимумов $|v|_{i,j,k}$ на поверхности, перпендикулярной потоку. В данном случае все координаты хорошо воспроизводятся при разделении на зональный и меридиональный участки СТ.

2.3. Верификация метода по расположению гряд перистых облаков на спутниковых снимках

Известно, что развитие перистой облачности происходит на антициклональной стороне или вблизи оси СТ [75, 15]. 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 [83]. 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 [83]. Этому способствуют: пояс высокого атмосферного давления, при котором, как правило отсутствует плотная фронтальная облачность нижнего и среднего ярусов; и подстилающая поверхность в виде обширных песчаных и каменистых пустынь (например, Сахара в Северном полушарии и комплекс пустынных регионов Австралии).

С использованием метода, представленного в разделе 2.2, в полях ветра трех реанализов различного пространственного разрешения были выделены ядра ССТ над регионом Северной Африки и Аравийского полуострова в зимний период. На рисунке 2.3 показано пространственное положение ядер по данным реанализов ERA5 [84], JRA-55 [81] и NCEP/NCAR [85] в срок 12 UTC 22 января 2019 года, а также спутниковый снимок в видимом диапазоне, полученный радиометром VIIRS спутника Suomi NPP [86]. Срок 12 UTC был выбран как наиболее близкий к моменту пролета спутника над исследуемой территорией.

При выделении ядер СТ в полях ветра для каждого из трех реанализов применялось пороговое значение скорости ветра $|\mathbf{v}|_{i,j,k} = 30$ м/с. При этом последовательное соединение узлов сетки с максимумами $|\mathbf{v}|_{i,j,k}$ различалось между реанализами. Реанализ ERA5 имеет широтно-долготное разрешение $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, и для идентификации ядра СТ как протяженного течения (не менее 1000 км) был применен критерий последовательного соединения не менее 40 узлов. Согласно данным ERA5 (рис. 2.3a), было обнаружено пять отдельных ветвей СТ, расположенных на разных высотах. Наиболее

протяженная ветвь над Северной Африкой наблюдается вблизи изобарической поверхности 225 гПа, а также 250 и 200 гПа.

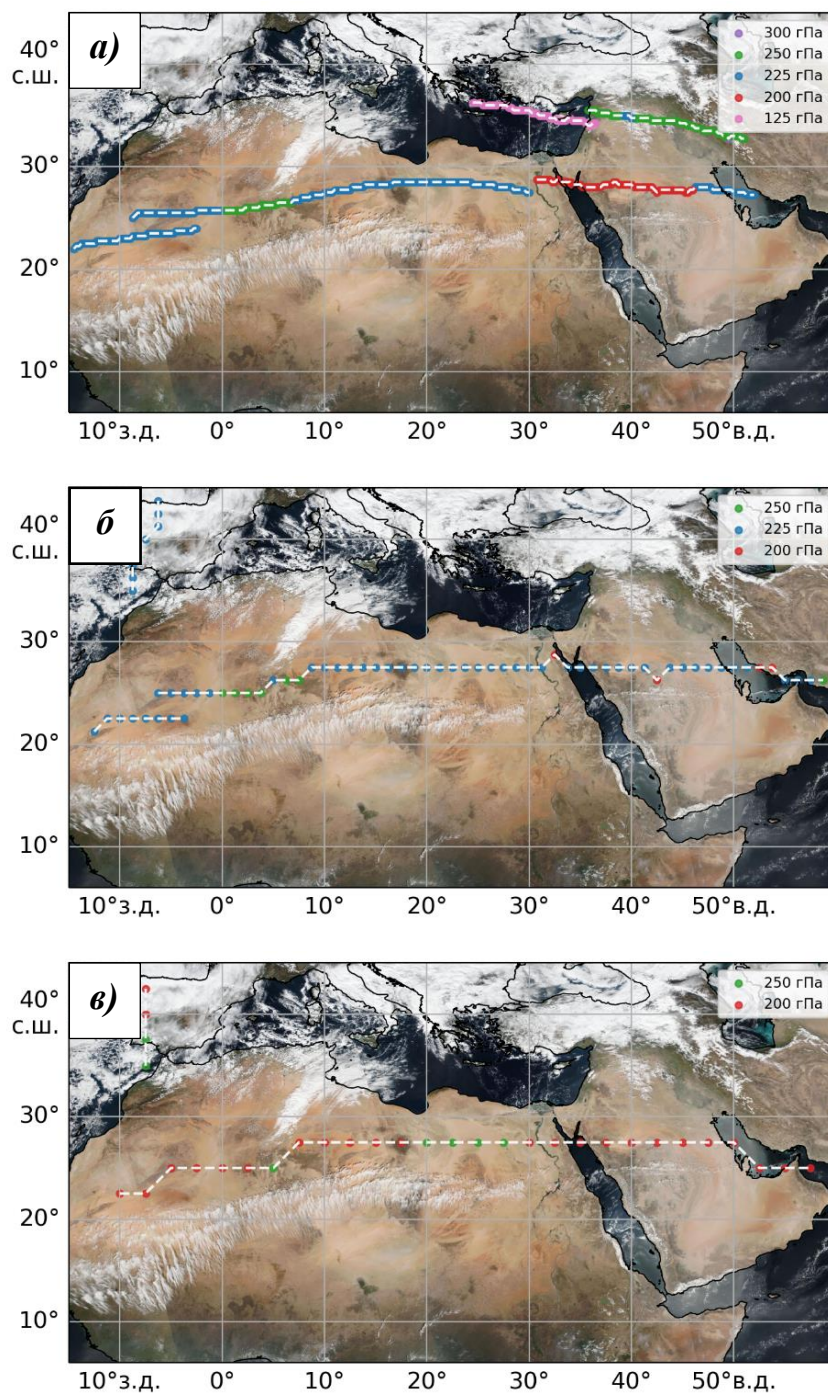


Рис. 2.3. Пространственное положение ядер ССТ над регионом Северной Африки и Аравийского полуострова по данным реанализов: ERA5 (а), JRA-55 (б) и NCEP/NCAR (в) в срок 12 UTC 22 января 2019 года, а также спутниковый снимок в видимом диапазоне радиометра VIIRS спутника Suomi NPP.

Данные реанализа JRA-55 имеют разрешение $1.25^\circ \times 1.25^\circ$, поэтому для выделения ядра СТ было задано условие последовательного соединения не менее 8 узлов. При таком критерии ССТ представлено двумя ветвями, расположенными вблизи поверхности 225 гПа (рис. 2.3б). Реанализ NCEP/NCAR обладает самым грубым разрешением – $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ и для него было установлено условие последовательного соединения не менее 4 узлов. Тем не менее широтное положение ядра ССТ над рассматриваемым регионом хорошо согласуется с результатами двух других реанализов (рис. 2.3в). Высота расположения ядра СТ обнаруживается вблизи поверхности 200 гПа.

Сопоставление расположения ядер СТ в различных реанализах показывает их положение вблизи изобарической поверхности 225 гПа (ERA5 и JRA-55) и 200 гПа (NCEP/NCAR). На рисунке 2.4 представлены поля ветра указанных изобарических поверхностей, где во всех трех случаях сердцевина СТ, ограниченная изотаксой 70 м/с, локализована над Северной Африкой. Наблюдаемые ряды перистых облаков наиболее выражены с антициклональной стороны от указанной сердцевины и простираются до зон со скоростью ветра 30 м/с.

Сравнительный анализ положений ядер СТ, полученных по данным трех реанализов, представлен на рисунке 2.5. 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.

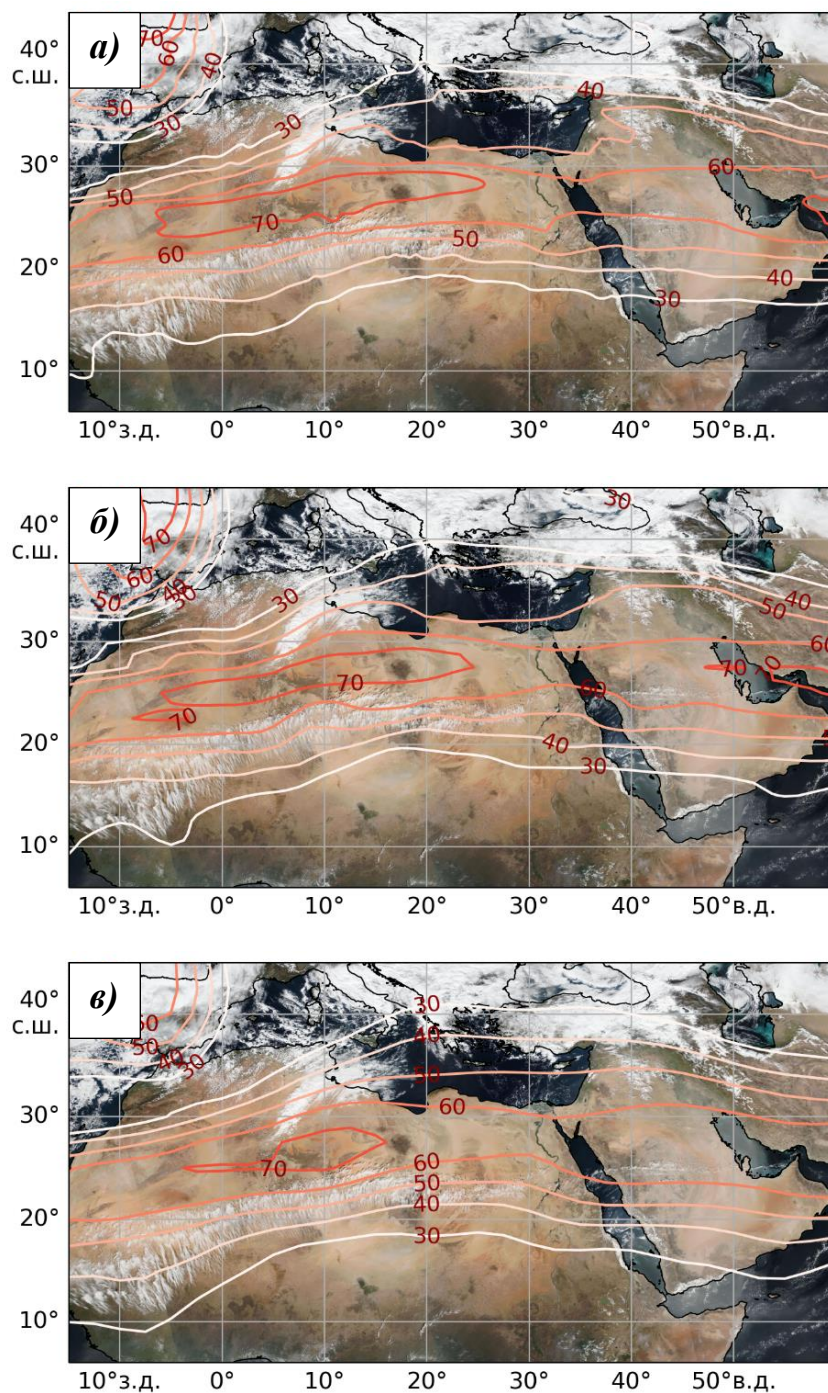


Рис. 2.4. Поля ветра изобарической поверхности 225 гПа данных реанализа ERA5 (а) и JRA-55 (б) и поверхности 200 гПа реанализа NCEP/NCAR (в) в срок 12 UTC 22 января 2019 года, а также спутниковый снимок в видимом диапазоне радиометра VIIRS спутника Suomi NPP.

На рисунке 2.6 представлены результаты применения метода к данным реанализов за срок 12 UTC 23 и 24 января 2019 года. Результаты сравнительного анализа данных трех реанализов выявили незначительные

различия в воспроизведении структуры СТ, которые проявляются в вариациях количества и протяженности отдельных ветвей в области, ограниченной изотаксой 30 м/с. При этом все три реанализа демонстрируют высокую степень согласия в определении широтного положения наиболее интенсивной ветви СТ и обнаружения ее в непосредственной близости к полярной периферии гряд перистых облаков.

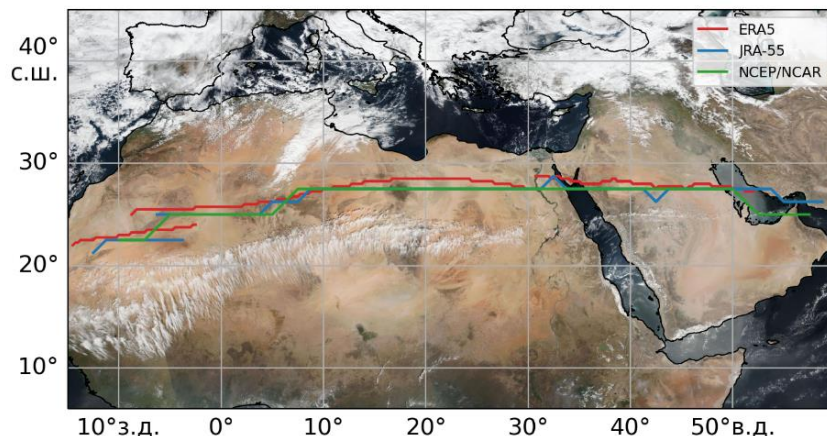


Рис. 2.5. Широтно-долготное положение ядер СТ в полях ветра реанализов ERA5, JRA-55 и NCEP/NCAR в срок 12 UTC 22 января 2019 года.

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, оптимален для детального анализа региональных особенностей и более точного воспроизведения структуры СТ. В то же время реанализы JRA-55 и NCEP/NCAR будут предпочтительнее для решения задач, связанных с исследованием многолетней изменчивости и климатологии СТ.

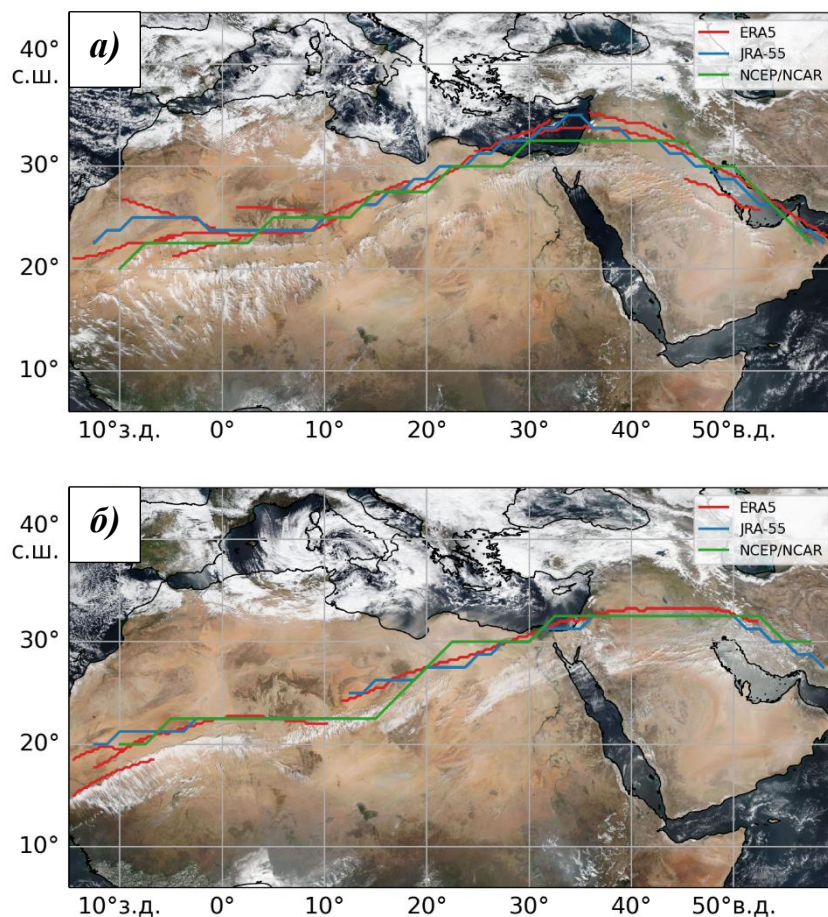


Рис. 2.6. Широтно-долготные положения ядер ССТ в полях ветра реанализов ERA5, JRA-55 и NCEP/NCAR в срок 12 UTC 23 января 2019 года (а) и 24 января 2019 года (б).

2.4. Распределение повторяемости ядер струйных течений в атлантико-евразийском регионе в период 1980–2023 гг.

Большинство существующих исследований (включая все работы, упомянутые в разделе 1.2) ограничиваются анализом распределения СТ по сезонам года, преимущественно в зимний период. Однако для более детального понимания динамики СТ представляется важным проанализировать их месячную изменчивость, что реализовано в данном разделе на примере атлантико-евразийского региона. Этот регион представляет особый интерес, поскольку, как отмечалось ранее, здесь четко выражено широтное разделение между ССТ и полярными СТ. Для анализа

повторяемости ядер СТ использовались данные реанализа JRA-55 с пространственным разрешением $1.25^\circ \times 1.25^\circ$ и временным разрешением 6 часов за период 1980–2023 гг. [81].

2.4.1. Широтно-долготное распределение повторяемости

На рисунке 2.7 представлены широтно-долготные распределения повторяемости ядер СТ для каждого месяца за период 1980–2023 гг. При расчете повторяемости учитывались координаты широты и долготы ядер. Повторяемость СТ (в %) была получена из соотношения количества случаев с присутствием ядра СТ в каждом узле широтно-долготной сетки к общему числу синоптических сроков в соответствующем месяце.

С ноября по апрель, в холодный период года, в атлантико-евразийском регионе наблюдается однородный характер распределения СТ. Однородность проявляется, прежде всего, в наличии общей для всех указанных месяцев географической области с максимальной повторяемостью ССТ. В декабре-марте ССТ обнаруживаются в окрестности 30° с.ш. над территориями Северной Африки и Аравийского п-ова в 18–22 % случаев, тогда как в ноябре и апреле частота их обнаружения в этом регионе не превышает 16 %.

Над восточным побережьем Северной Америки и прилегающей акваторией Северной Атлантики, между 30 и 50° с.ш., выделяется еще одна общая для холодного времени года зона с высокой повторяемостью СТ. Однако значения повторяемости в этом регионе в 1.5–2 раза ниже максимальных показателей, полученных над территориями Северной Африки и Аравийского п-ова, и представлены как ССТ, так и полярными СТ. Известно, что наличие полустационарных ложбин в западном переносе умеренных широт над восточными побережьями Северной Америки и Евразии приводит к сближению ССТ и полярных СТ [53, 65]. В зимние месяцы нередко эти две системы сливаются [60], формируя единое течение, которое сочетает характеристики обоих типов СТ [56]. При этом уже в феврале отмечаются сезонные изменения в распределении зон максимальной повторяемости СТ

над акваторией Северной Атлантики. По мере приближения теплого времени года происходит смещение субтропических антициклонов над океанами в направлении полюса. Это способствует сдвигу на север зон наибольшей повторяемости ССТ над тропической частью Атлантического океана [59] и формированию непрерывного пояса повышенной повторяемости ССТ, протянувшегося от Северной Америки до африканского побережья. Более того, в марте и апреле, в отличие от периода ноябрь-февраль, над западной акваторией Северной Атлантики выделяются две пространственно разобщенные области с наибольшими повторяемостями ССТ и полярных СТ соответственно. Данная особенность, вероятнее всего, обусловлена сезонным смещением зоны повышенного температурного градиента в направлении полюса и формированию обособленной области наибольшей повторяемости (до 10 %) полярных СТ над восточным побережьем Северной Америки в окрестности 40° с.ш.

Над восточной акваторией Северной Атлантики, Европой и Европейской частью России (ЕЧР) преобладают полярные СТ, однако их повторяемость представлена намного меньшими числовыми значениями по сравнению с регионами, указанными выше. Как неоднократно отмечалось, внетропические СТ (полярные и арктические) характеризуются высокой подвижностью. Анализ распределения повторяемости таких СТ на продолжительных временных интервалах часто оказывается недостаточно репрезентативным, поскольку они существенно изменяют свое положение и интенсивность в зависимости от особенностей синоптического процесса [2]. Наиболее показательным является выявление зон наибольшей повторяемости внетропических СТ при однородных синоптических процессах. В частности, распределение СТ может быть рассмотрено при различных формах атмосферной циркуляции согласно классификации Вангенгейма-Гирса [58, 59].

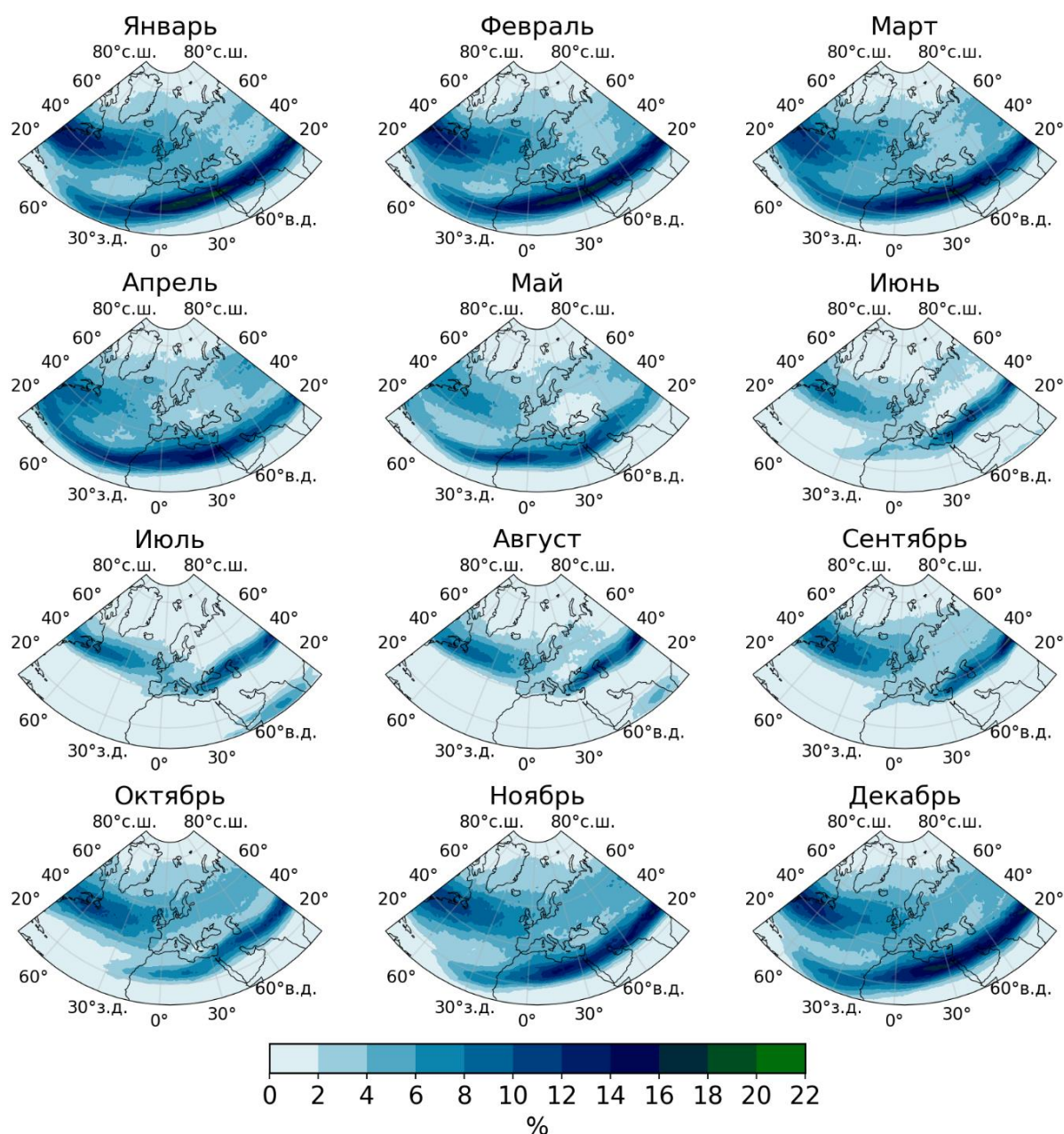


Рис. 2.7. Широтно-долготные распределения повторяемости ядер СТ в атлантико-евразийском регионе за период 1980–2023 гг. по данным реанализа JRA-55 [81].

С июня по сентябрь, в теплое время года, также проявляется однородность в распределении повторяемости СТ в атлантико-евразийском секторе. Максимальная повторяемость ССТ (до 12–17 %) сместилась в направлении полюса вместе с циркуляционной ячейкой Хэдли и наблюдается в окрестности 40° с.ш. только над евразийским континентом. Второй максимум повторяемости (до 10 %) представлен ССТ и полярными СТ над

восточным побережьем Северной Америки в диапазоне 45° – 50° с.ш. Повторяемость полярных СТ над Европой и ЕЧР снова представлена наименьшими значениями и не превышает 6 %.

Распределения повторяемости СТ в мае и октябре демонстрируют черты переходных сезонов – от холодного периода к теплему и наоборот, соответственно. В мае зона максимальной повторяемости ССТ сохраняется над Северной Африкой и Аравийским полуостровом в диапазоне 25° – 30° с.ш., что характерно для холодного времени года. Однако над Евразией, в частности, к югу от Каспийского моря максимум повторяемости смещается в район 35° с.ш., занимая промежуточное положение между холодным и теплым сезонами. Характерные значения наибольшей повторяемости (до 10–12 %) также соответствуют тёплому периоду года. В мае, аналогично марту и апрелю, над всей акваторией Северной Атлантики прослеживаются две обособленные зоны наибольших повторяемостей для ССТ и полярных СТ соответственно. Максимум ССТ (до 6 %) отмечается над западом Северной Атлантики в диапазоне 20° – 25° с.ш. Более обширной областью с максимальными значениями до 9 % представлена повторяемость полярных СТ над восточным побережьем Северной Америки между 40° и 50° с.ш. Над восточной Европой и ЕЧР полярные СТ представлены наименьшей повторяемостью, не превышающей 6 %.

В октябре максимальная повторяемость ССТ (до 14 %) представлена над евразийским континентом в окрестности 35° с.ш., что больше соответствует теплему времени года. Над восточным побережьем Северной Америки и прилегающей акватории Северной Атлантики выделяется единая область наибольшей повторяемости (до 12 %) ССТ и полярных СТ в окрестности 45° с.ш. Над Европой и ЕЧР, как и во все остальные месяцы, полярные СТ представлены наименьшей повторяемостью.

С целью выделения в каждом месяце более детальных регионов с наибольшей повторяемостью полярных СТ над Европой и ЕЧР с последующей оценкой их изменчивости были получены распределения повторяемости СТ

при трёх основных формах атмосферной циркуляции в атлантико-евразийском секторе согласно классификации Г.Я. Вангенгейма [87]. Выделение крупномасштабных атмосферных процессов в три основные группы осуществляется согласно состоянию длинных термобарических волн в толще тропосфере [88]. Для западной (W) формы циркуляции характерны волны малой амплитуды, быстро смещающиеся с запада на восток. В этом случае в тропосфере преобладает зональный поток со слабым межширотным обменом воздушных масс. Процессы меридиональной (С) и восточной (Е) форм, напротив, представляют собой два вида меридионального состояния атмосферы с преобладанием стационарных волн большой амплитуды. При форме С западно-восточный перенос в тропосфере умеренных широт нарушается в результате усиления барического гребня над акваторией Северной Атлантики, а при форме Е – над западной частью Евразии. Данная классификация составляется с учетом географической локализации основных гребней и ложбин на изобарической поверхности 500 гПа.

Для периода с 1 декабря 2019 г. по 30 ноября 2022 г. использовались данные каталога макросиноптических процессов с внутримесячной детализацией по классификации Г.Я. Вангенгейма [89-92]. Поскольку характер географического положения СТ при каждой форме циркуляции во все сезоны года имеет общие черты, результаты приводятся для двух периодов: холодного и теплого, включающими в себя месяцы с ноября по март и с мая по сентябрь соответственно. В таблице 2.1 приведены значения, характеризующие доли (%) дней с каждой формой атмосферной циркуляции, наблюдаемые в холодное и теплое время года за указанный период.

На рисунке 2.8 представлены повторяемости СТ в атлантико-евразийском регионе при трех формах циркуляции: зональной (W), меридиональной (С) и восточной (Е) в холодный период года.

Таблица 2.1. Доля дней (%) с каждой формой атмосферной циркуляции в течение холодного и теплого времени года за период с 1 декабря 2019 г. по 30 ноября 2022 г.

Форма атмосферной циркуляции	Доля дней (%)	
	Холодный период (ноябрь-март)	Теплый период (май-сентябрь)
W	49	18
C	15	33
E	36	49

При форме W полоса наибольшей повторяемости располагается между широтными кругами 40 и 60° с.ш. Максимальные значения достигают 18 % случаев и отмечаются над акваторией Северной Атлантики и Великобританией. Особенность данной формы циркуляции, характеризующаяся западно-восточным переносом барических образований, в средней тропосфере проявляется в виде волн малой амплитуды, что отражается в зональном распределении повторяемости СТ.

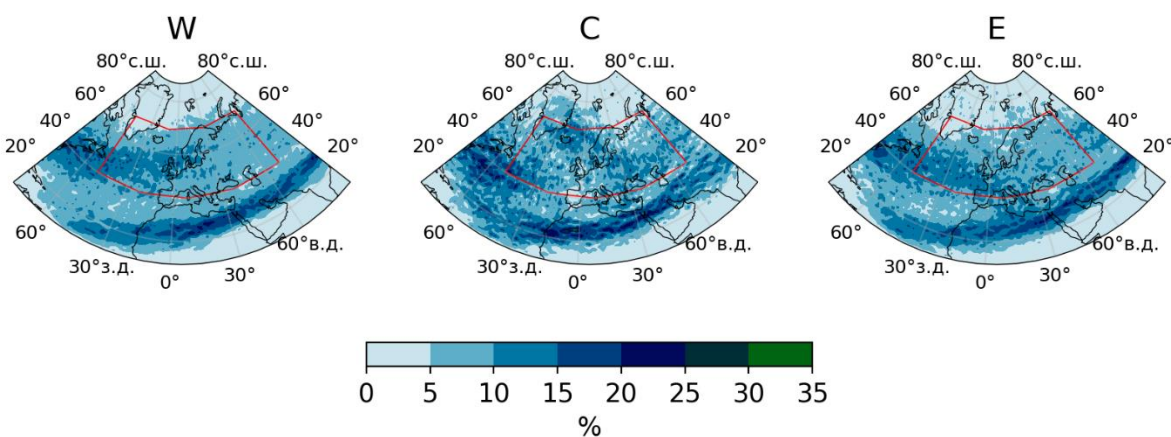


Рис. 2.8. Распределение повторяемости СТ в холодный период года в атлантико-евразийском регионе при трех формах циркуляции: зональной (W), меридиональной (C) и восточной (E).

При форме C распределение повторяемости СТ на первый взгляд выглядит неоднородно, но отражает упорядоченную меридиональную циркуляцию атмосферы во внетропических широтах. Области максимальных

значений, которые составляют 20 % случаев, отмечаются в районе Исландии и Норвежского моря, а также вдоль западной и южной границ ЕЧР. Такое распределение максимумов связано с наличием СТ на перифериях высотных барических гребней над Северной Атлантикой и высотных ложбин над ЕЧР, которые стационарируют над указанной территорией при данной форме циркуляции. Кроме того, термические особенности подстилающей поверхности при форме С – теплый океан и холодный материк в это время года – способствуют формированию более выраженных высотных гребней и ложбин.

Форма Е также представляет собой вид меридиональной циркуляции. Максимальные значения повторяемости, достигающие 19 %, отмечаются над Северной Атлантикой, к югу от Великобритании и над северным побережьем Средиземного моря. В этом регионе СТ огибают высотные барические ложбины с юга, оси которых ориентированы с северо-запада на территорию Центральной Европы. Согласно распределению барических образований при форме Е, далее СТ должны с севера огибать высотные гребни над ЕЧР. В зонах повторяемости над указанной территорией максимальные значения не превышают 14 % и проходят над южным районом ЕЧР. В то же время повторяемость над севером ЕЧР и побережьем Баренцева моря достигает всего 12 %. Такая повторяемость отчасти также формируется под воздействием термических особенностей подстилающей поверхности: холодная материковая часть не способствует, а скорее противодействует образованию высотных гребней тепла, северные оконечности которых могли бы достигать побережья Баренцева моря.

На рисунке 2.9 представлены повторяемости СТ в атлантико-евразийском регионе при трех формах циркуляции: зональной (W), меридиональной (С) и восточной (Е) в теплый период года.

Полярные СТ над восточной акваторией Северной Атлантики, Европой и ЕЧР главным образом сохранили широтные диапазоны распространения, которые были отмечены для каждой формы циркуляции в холодный период

года. При форме W повторяемость СТ представлена локальными максимумами до 21 % от Северной Атлантики до северо-запада ЕЧР. При форме С в теплое время года не обнаруживаются выраженных зон повышенной повторяемости СТ на перифериях высотных гребней по сравнению с распределением в холодное время года. Значениями до 13 % случаев представлена только область в районе Исландии, отражающая по большей степени наличие СТ на северных оконечностях высотных гребней. Над ЕЧР (исключая ССТ над Большим Кавказом) максимальные значения повторяемости не превышают 12 %.

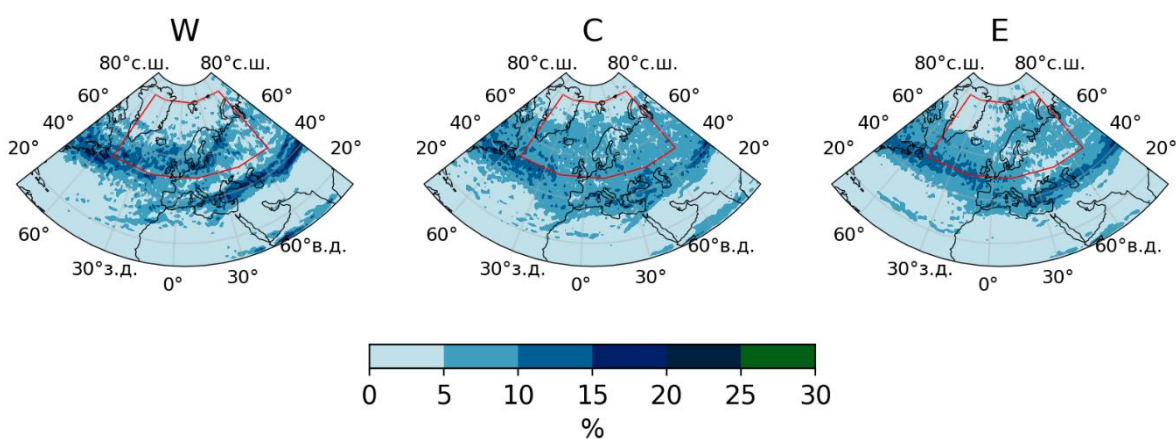


Рис. 2.9. Распределение повторяемости СТ в теплый период года в атлантико-евразийском регионе при трех формах циркуляции: зональной (W), меридиональной (C) и восточной (E) за период с 2019 по 2022 гг.

При форме E распределение повторяемости СТ в целом имеет сходство с распределением в холодное время года при той же форме. Зона повышенной повторяемости (до 15 %) полярных СТ обнаруживается к югу от Великобритании и над северным побережьем Средиземного моря. Летом высотные барические ложбины также ориентированы от исландского минимума на территорию Центральной Европы, в тыловых частях которых с наибольшей повторяемостью обнаруживаются СТ. Восточнее, в районе развития высотных барических гребней, максимальная повторяемость СТ представлена значениями до 10 % над северной частью ЕЧР, акваторией Баренцева моря и севером Скандинавского п-ова. Также выделяется обширная зона наименьшей повторяемости (менее 5 %), расположенная над Восточной

Европой и центральной частью ЕЧР. Над указанным регионом при данной форме циркуляции преобладают центры высотных антициклонов, усилению которых способствует прогрев обширной материковой части в данное время года. Таким образом, зона повышенных значений повторяемости, представленная над всей акваторией Баренцева моря, свидетельствует об обнаружении СТ на перифериях высотных гребней, распространяющихся далеко в полярные широты.

Таким образом с учетом распределения максимальной повторяемости ССТ и полярных СТ 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.

2.4.2. Широтно-высотное распределение повторяемости

На рисунке 2.10 представлены широтно-высотные распределения повторяемости ядер СТ для каждого месяца за период 1980–2023 гг. Расчет повторяемости проводился аналогично расчету широтно-долготных распределений. В данном случае на каждом временном шаге учитывались координаты широты и высоты ядер.

Как можно видеть из графиков подтверждается однородный характер распределения СТ с ноября по апрель (холодный период года). Максимальная повторяемость ССТ (до 85–90 %) получена в виде обособленного максимума вблизи изобарической поверхности 200 гПа в окрестности 30° с.ш. В данный период года внетропические СТ представлены наибольшей повторяемостью (до 80–85 %) вблизи изобарической поверхности 300 гПа в диапазоне широт 40°–60° с.ш.

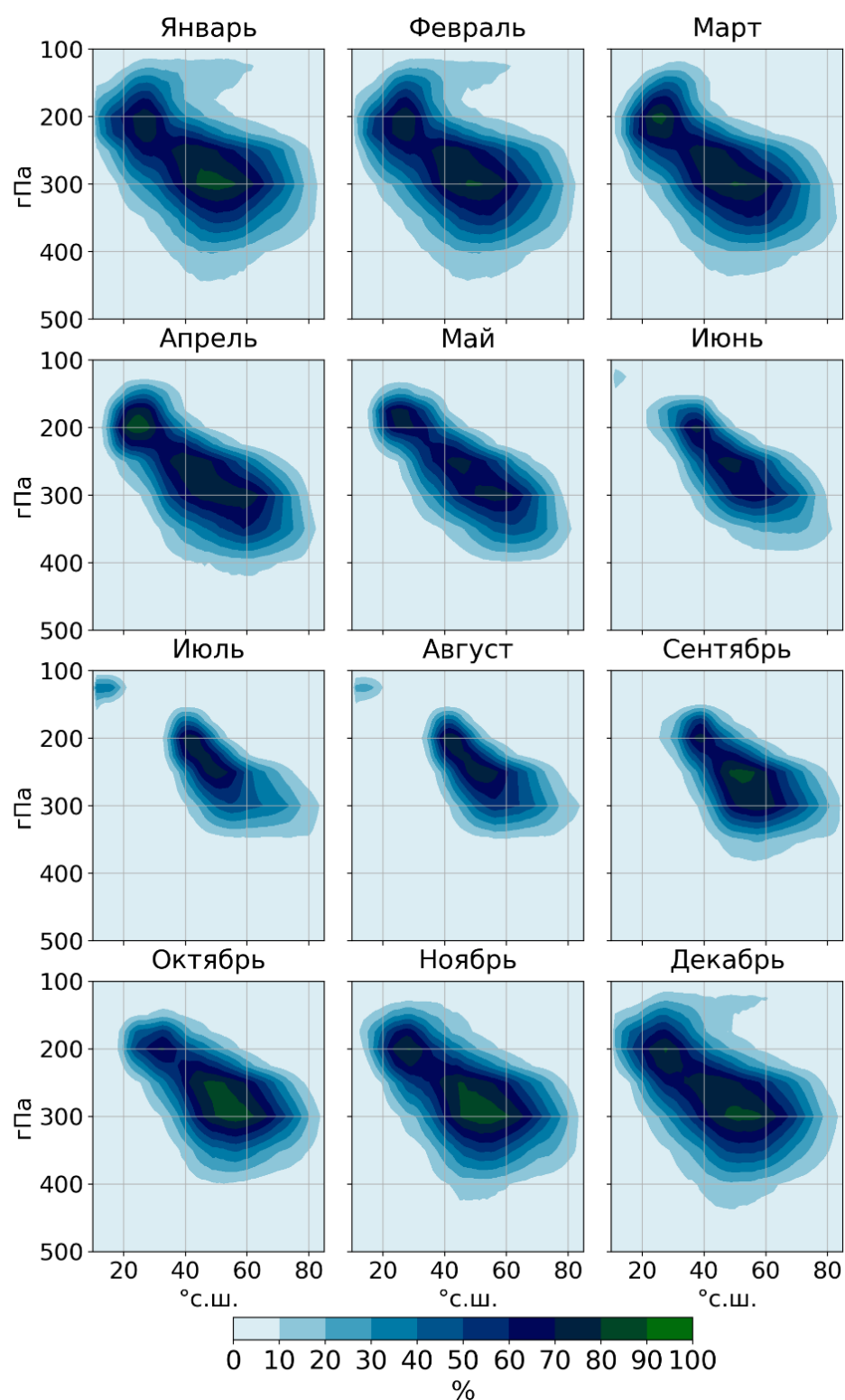


Рис. 2.10. Широтно-высотные распределения повторяемости ядер СТ для каждого месяца за период 1980–2023 гг. по данным реанализа JRA-55 [81].

Смещение ССТ в направлении полюса в теплое время года также отображено на картах широтно-высотных распределений. С июня по сентябрь повторяемость ССТ представлена значениями до 75–80 % на уровне

изобарической поверхности 200 гПа в окрестности 40° с.ш. Полярные СТ максимальной повторяемостью представлены на уровне поверхности 250 гПа в окрестности 50° с.ш. Распределения повторяемости в мае и октябре снова демонстрируют переходный период режимов СТ от холодного времени года к теплоту и обратно.

2.5. Основные выводы к главе 2

В соответствии с определением и необходимостью достоверного определения характеристик СТ, включая их широтное положение и интенсивность, был разработан универсальный метод выделения ядер СТ в трехмерном поле ветра, учитывающий пространственную ориентированность СТ.

С использованием данных трех реанализов различного пространственного разрешения (ERA-5, JRA-55 и NCEP/NCAR) и спутниковых снимков с выраженными грядами перистых облаков была выполнена верификация метода. Все представленные реанализы демонстрируют согласованное определение широтного положения ядер СТ, которые устойчиво обнаруживаются вблизи полярной границы облачных гряд.

Анализ широтно-долготных и широтно-высотных распределений повторяемости ядер СТ в атлантико-евразийском регионе, выполненный на основе данных реанализа JRA-55 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.

Особенности распределения повторяемости СТ при трех основных формах атмосферной циркуляции согласно классификации Г.Я. Вангенгейма за трехлетний период (с декабря 2019 г. по ноябрь 2022 г.) позволил выделить для каждого месяца 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.

ГЛАВА 3. ИЗМЕНЧИВОСТЬ СТРУЙНЫХ ТЕЧЕНИЙ СЕВЕРНОГО ПОЛУШАРИЯ В ПЕРИОД ПОСЛЕДНИХ ДЕСЯТИЛЕТИЙ

В связи с отмеченными особенностями и тенденциями СТ, представленными в разделе 1.4, необходимо наряду с локальными режимами анализировать интегральные характеристики атмосферной динамики, связанные со СТ. В настоящей главе представлены результаты анализа кинетической энергии СТ в атмосфере Северного полушария (E_K СТ СП), ее изменений в годовом ходе и межгодовой изменчивости с использованием данных реанализа для периода 1980–2021 гг. Приводятся соответствующие оценки доли общей кинетической энергии атмосферы Северного полушария, связанной со СТ (P_{E_K} СТ). Оценена также доля объема атмосферных слоев в области СТ в общем анализируемом слое атмосферы 500-100 гПа (P_V СТ).

Приводятся результаты анализа кинетической энергии внетропических СТ атлантико-евразийского региона (E_K СТ_{А-Е}) ее изменений в годовом ходе и межгодовой изменчивости. Для количественной оценки степени меандрирования СТ приводятся оценки доли кинетической энергии, соответствующие меридиональной составляющей (P_{E_V} СТ_{А-Е}).

В качестве дополнительного параметра приводятся результаты анализа широтно-долготного распределения 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 [93, 94], 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.

3.1. Кинетическая энергия струйных течений Северного полушария в период 1980–2021 гг.

Для определения характеристик СТ Северного полушария использовались данные зональной (u) и меридиональной (v) компонент скорости ветра в тропосфере и нижней стратосфере реанализа NCEP/NCAR с широтно-долготным разрешением $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ и с суточным временным шагом для периода 1980–2021 гг. [85]. При этом использовались данные на всех доступных уровнях в атмосфере от 500 до 100 гПа: 500, 400, 300, 250, 200, 150 и 100 гПа. Анализ проводился при различных условиях для минимальных значений V_m скорости ветра в СТ: при $V_m = 20$ м/с, $V_m = 30$ м/с и $V_m = 40$ м/с. Варьирование значений V_m позволяет выделять, наряду с интегральными характеристиками системы СТ в атмосфере Северного полушария в целом, особенности отдельных ветвей СТ в разных широтно-высотных слоях атмосферы. Выбор различных значений V_m позволяет также более детально проанализировать особенности изменений в области СТ, в том числе в области ядра СТ, и сопредельных слоях атмосферы.

Кинетическая энергия рассчитывалась по формуле, близкой в [64]:

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

здесь 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 высот от 500 до 100 гПа.

На рисунке 3.1 представлено пространственное распределение общей E_K в атмосфере Северного полушария в слое 500-100 гПа в зимний и летний сезоны. Максимальные значения E_K соответствуют зонам СТ. Зимой

выделяется область СТ с наибольшими значениями E_K (до 20 кДж/м² и более) в субтропических широтах над западной частью Тихого океана. В области еще одного максимума E_K в атмосфере у восточного побережья Северной Америки среднесезонные значения E_K намного меньше. Летом области СТ с наибольшими значениями E_K смещаются на север. Максимальные значения E_K летом (существенно меньшие, чем зимой) отмечаются над акваторией Тихого океана.

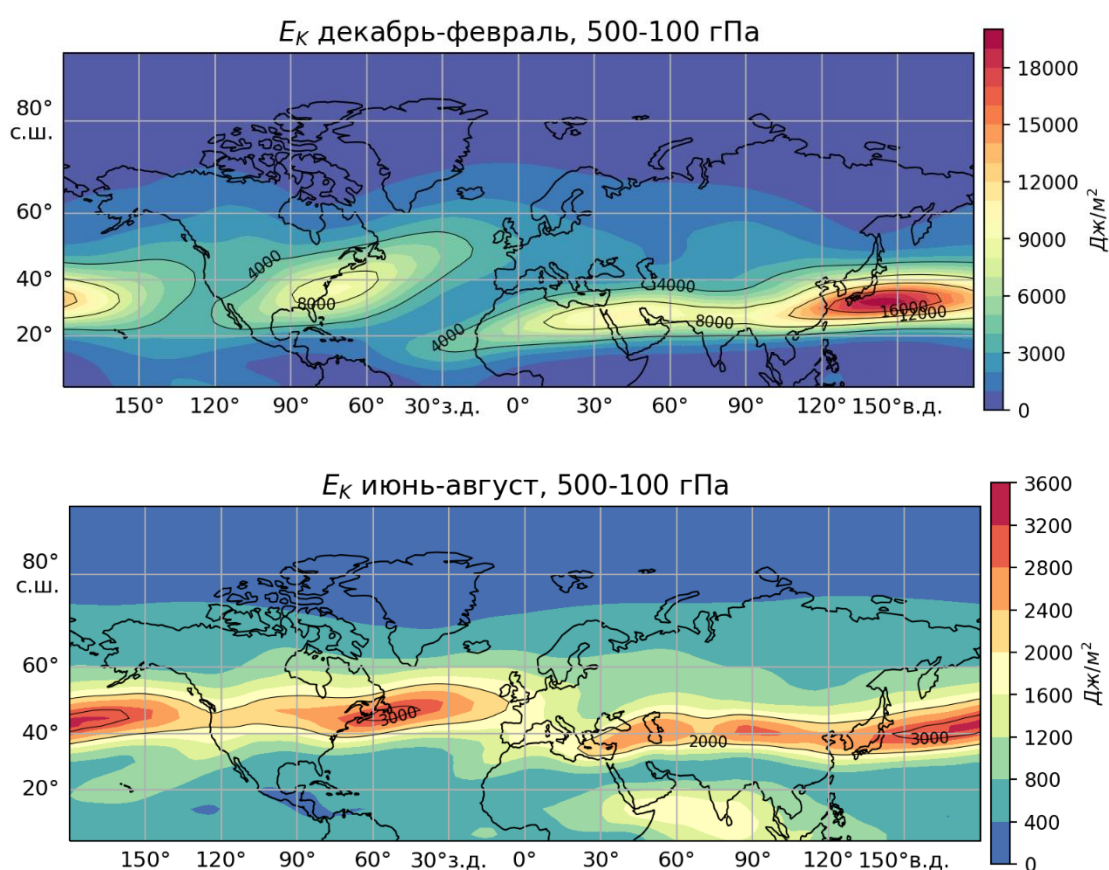


Рис. 3.1. Пространственное распределение общей кинетической энергии в атмосфере Северного полушария в слое 500-100 гПа в зимний и летний сезоны.

В таблице 3.1 приведены средние для периода 1980–2021 гг. значения E_K СТ СП для разных сезонов при различных V_m . Максимальные значения E_K СТ характерны для зимнего сезона, минимальные – для летнего. При этом максимальная межгодовая изменчивость, характеризуемая

среднеквадратическими отклонениями (СКО), проявляется в промежуточные сезоны, особенно весной.

Таблица 3.1. Среднесезонные значения E_K СТ СП при разных V_m для периода 1980–2021 гг. В скобках приведены среднеквадратические отклонения (СКО).

$E_K \times 10^5, \text{Дж/м}^2$	зима	весна	лето	осень
$V_m = 20 \text{ м/с}$	860 (± 59)	546 (± 160)	206 (± 29)	435 (± 134)
$V_m = 30 \text{ м/с}$	665 (± 57)	388 (± 141)	101 (± 22)	290 (± 110)
$V_m = 40 \text{ м/с}$	446 (± 51)	219 (± 105)	36 (± 13)	160 (± 74)

На рисунке 3.2 представлены широтные зависимости E_K для атмосферы Северного полушария и E_K СТ при разных V_m в январе и июле в среднем для периода 1980–2021 гг. Максимальные значения E_K в январе отмечаются вблизи 30° с.ш. с максимальной скоростью в ядре ССТ. В июле максимальные значения E_K , как и ядро ССТ, смещаются в район 45° с.ш. При этом в июле проявляется высокоширотная особенность около 70° с.ш., связанная со вторым максимумом скорости в области полярного СТ, и низкоширотная особенность в области $0\text{--}20^\circ$ с.ш., связанная с экваториальным СТ, которое, как и ССТ, летом смещается в направлении полюса.

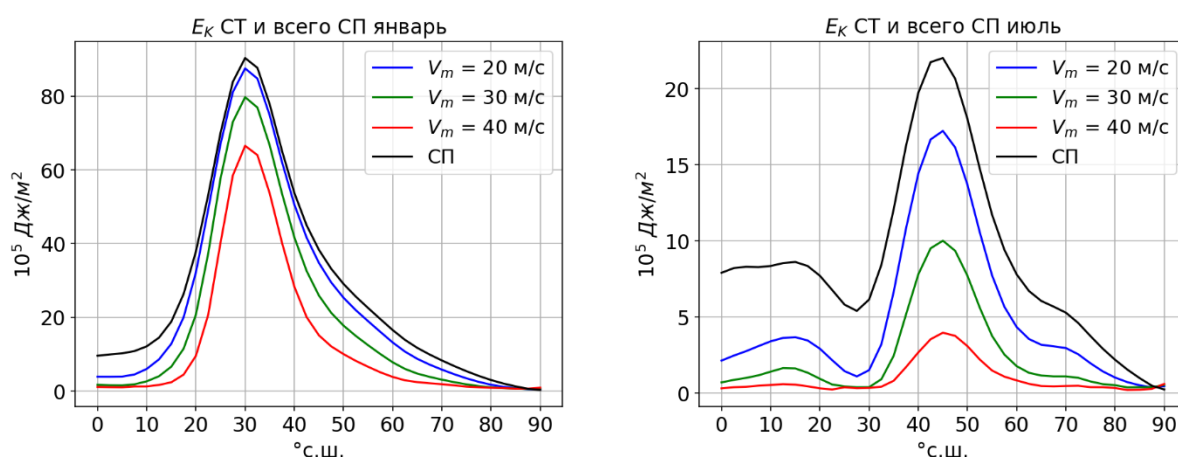


Рис. 3.2. Широтные зависимости кинетической энергии для атмосферы Северного полушария и кинетической энергии СТ при разных V_m в январе и июле в среднем для периода 1980–2021 гг.

В таблице 3.2 представлены оценки трендов E_K СТ СП для разных месяцев. Наиболее значимые тенденции отмечены для летних месяцев. В том числе, 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) – см. рисунок 3.3. В другие сезоны оценки трендов E_K СТ СП 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 .

Таблица 3.2. Оценки трендов E_K СТ СП (Дж/м² / 10 лет) для разных месяцев по данным для периода 1980–2021 гг. Выделены результаты, значимые на уровне 95%. В скобках отмечены СКО.

тренды E_K , Дж/м ² / 10 лет	$V_m = 20$ м/с	$V_m = 30$ м/с	$V_m = 40$ м/с
январь	-0.1 (±5.1)	1.2 (±4.9)	3.5 (±4.7)
февраль	-3.5 (±5.7)	-2.9 (±5.7)	-3.0 (±5.3)
март	-7.2 (±6.0)	-8.8 (±6.0)	-9.1 (±5.5)
апрель	-0.6 (±4.1)	-0.6 (±3.9)	1.0 (±3.3)
май	1.0 (±2.2)	1.8 (±1.9)	2.2 (±1.4)
июнь	-2.9 (±1.6)	-2.3 (±1.4)	-1.2 (±1.0)
июль	-3.3 (±1.3)	-3.1 (±1.1)	-1.2 (±0.6)
август	-3.0 (±1.3)	-1.6 (±1.1)	0.2 (±0.7)
сентябрь	-1.0 (±1.6)	-0.4 (±1.5)	0.5 (±1.3)
октябрь	-0.1 (±2.5)	2.3 (±2.6)	4.0 (±2.3)
ноябрь	-2.5 (±2.6)	-2.0 (±2.7)	-1.3 (±2.8)
декабрь	-0.8 (±3.3)	0.5 (±3.4)	1.4 (±3.4)

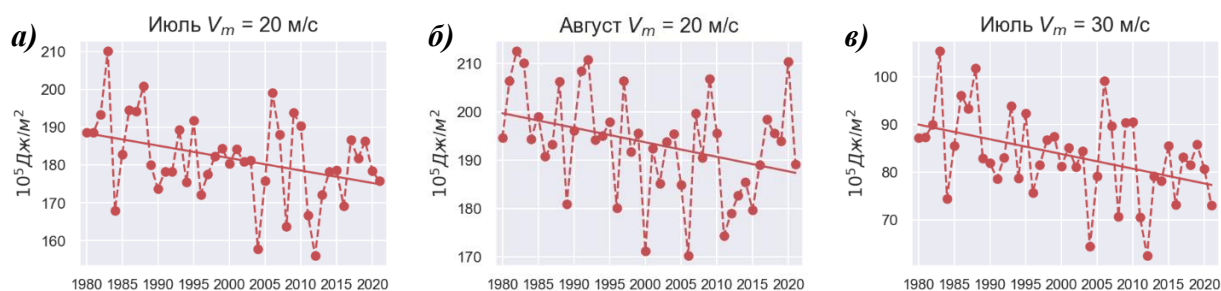


Рис. 3.3. Межгодовые вариации E_K СТ СП (Дж/м²) при $V_m = 20$ м/с в июле (а) и августе (б); при $V_m = 30$ м/с в июле (в) по данным для периода 1980–2021 гг. Прямые характеризуют линейные тренды.

3.1.1. Связь индексов Эль-Ниньо с кинетической энергией струйного течения

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. Явления Эль-Ниньо детектировались с использованием индексов Nino 3, Nino 4 и Nino 3.4, характеризующих аномалии температуры поверхности в экваториальных широтах Тихого океана [95]. На рисунке 3.4 приведены коэффициенты корреляции между среднемесячными значениями E_K СТ СП и индексами Эль-Ниньо при разных значениях V_m .

Наиболее высокие коэффициенты корреляции среднемесячных значений E_K СТ СП и индексов Эль-Ниньо, статистически значимые на уровне 95%, отмечены с января по апрель.

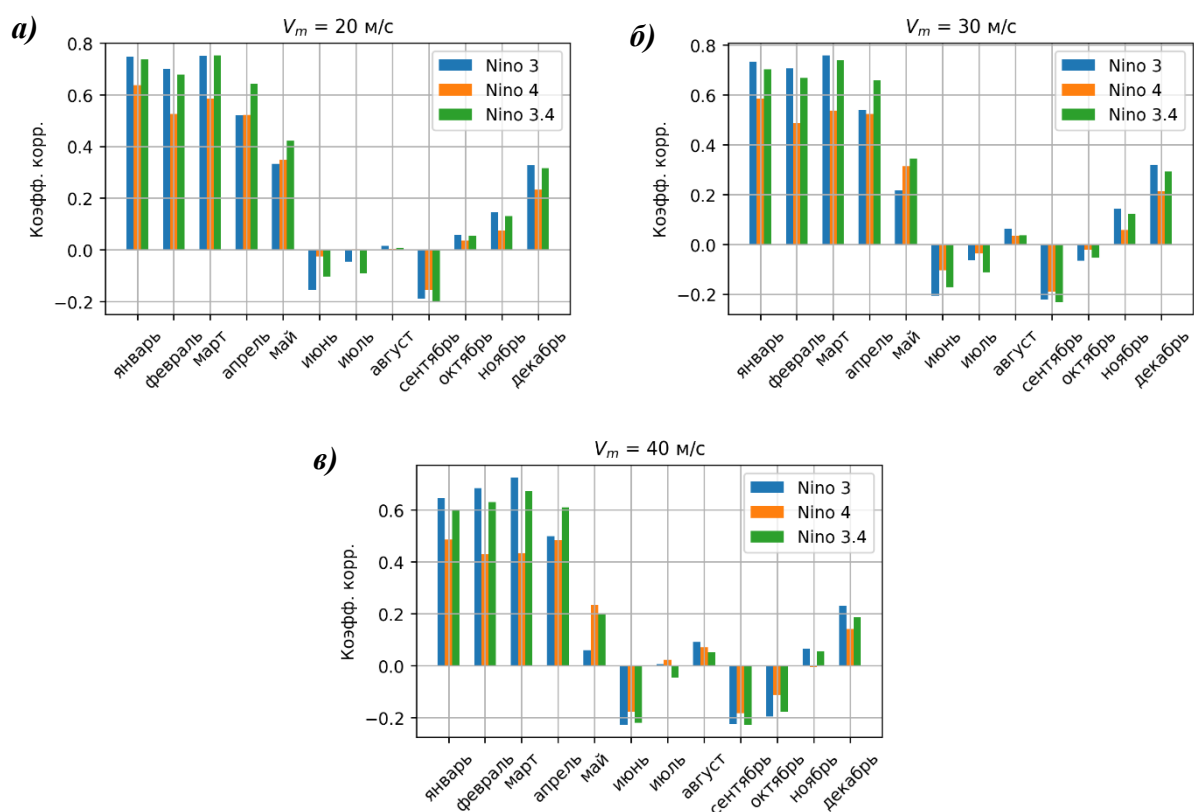


Рис. 3.4. Коэффициенты корреляции между среднемесячными значениями E_k СТ СП и разными индексами Эль-Ниньо при $V_m = 20$ м/с (а), $V_m = 30$ м/с (б) и $V_m = 40$ м/с (в) для периода 1980–2021 гг.

3.2. Доли общей кинетической энергии атмосферы, связанной со струйными течениями (1980–2021 гг.)

В таблице 3.3 приведены среднесезонные значения P_{Ek} СТ СП при разных значениях V_m . При всех V_m значения P_{Ek} СТ максимальны зимой и минимальны летом. При этом наибольшая межгодовая изменчивость P_{Ek} СТ СП, характеризуемая СКО, проявляется в переходные сезоны.

В таблице 3.4 представлены оценки трендов P_{Ek} СТ СП (% / 10 лет) для разных месяцев для периода 1980–2021 гг. Наиболее значимые тенденции отмечены для летних месяцев. В том числе, отмечены статистически значимые тенденции уменьшения P_{Ek} СТ при $V_m = 20$ м/с во все летние месяцы и при $V_m = 30$ м/с в июле – см. также рисунок 3.5. В другие сезоны оценки трендов P_{Ek} СТ СП получены статистически незначимыми (и разного знака), за

исключением статистически значимого положительного тренда P_{Ek} в октябре при $V_m = 40$ м/с (рис. 3.5). 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.

Таблица 3.3. Среднесезонные значения P_{Ek} СТ СП для периода 1980–2021 гг. при разных V_m . В скобках приведены среднеквадратические отклонения (СКО).

P_{Ek} , %	зима	весна	лето	осень
$V_m = 20$ м/с	87 (± 1)	79 (± 5)	59 (± 4)	75 (± 6)
$V_m = 30$ м/с	67 (± 2)	53 (± 8)	29 (± 4)	49 (± 8)
$V_m = 40$ м/с	45 (± 3)	29 (± 8)	10 (± 3)	26 (± 7)

Таблица 3.4 Оценки трендов P_{Ek} СТ СП (% / 10 лет) для разных месяцев по данным для периода 1980–2021 гг. Выделены результаты, значимые на уровне 95%. В скобках отмечены СКО.

тренды P_{Ek} , % / 10 лет	$V_m = 20$ м/с	$V_m = 30$ м/с	$V_m = 40$ м/с
январь	-0.04 (± 0.08)	0.1 (± 0.16)	0.33 (± 0.26)
февраль	-0.02 (± 0.09)	-0.04 (± 0.21)	-0.11 (± 0.3)
март	-0.16 (± 0.13)	-0.51 (± 0.28)	-0.72 (± 0.39)
апрель	0.02 (± 0.15)	-0.01 (± 0.3)	0.18 (± 0.33)
май	0.13 (± 0.13)	0.31 (± 0.22)	0.41 (± 0.22)
июнь	-0.36 (± 0.16)	-0.4 (± 0.24)	-0.23 (± 0.22)
июль	-0.59 (± 0.18)	-0.76 (± 0.23)	-0.3 (± 0.16)
август	-0.55 (± 0.18)	-0.32 (± 0.24)	0.09 (± 0.18)
сентябрь	-0.16 (± 0.14)	-0.06 (± 0.22)	0.12 (± 0.24)
октябрь	0.1 (± 0.13)	0.48 (± 0.26)	0.76 (± 0.32)
ноябрь	-0.02 (± 0.08)	-0.05 (± 0.2)	-0.06 (± 0.29)
декабрь	0.01 (± 0.07)	0.13 (± 0.16)	0.2 (± 0.26)

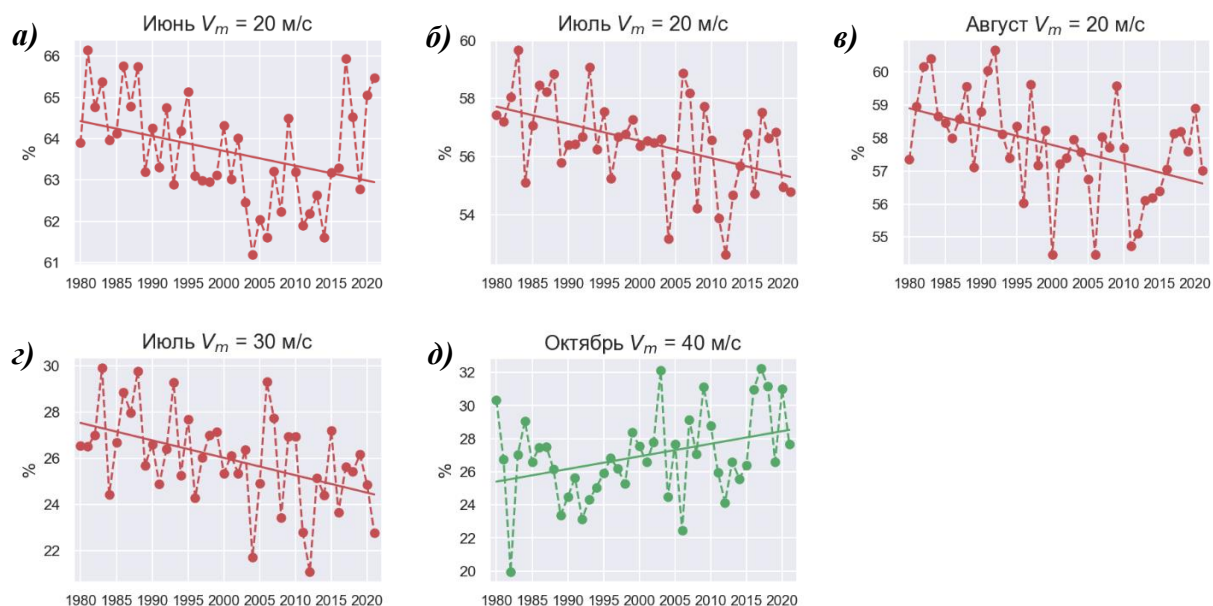


Рис. 3.5. Межгодовые вариации P_{Ek} СТ (%) при $V_m = 20$ м/с в июне (а), июле (б) и августе (в); при $V_m = 30$ м/с в июле (г) и при $V_m = 40$ м/с в октябре (д) по данным для периода 1980–2021 гг. Прямые характеризуют линейные тренды.

3.3. Доли объема атмосферных слоев в области струйного течения в общем анализируемом слое атмосферы (1980–2021 гг.)

В таблице 3.5 приведены среднесезонные значения P_V СТ СП при разных значениях V_m . При всех V_m значения P_V СТ максимальны зимой и минимальны летом. При этом наибольшая межгодовая изменчивость P_V СТ СП, характеризуемая СКО, проявляется в переходные сезоны.

Таблица 3.5. Среднесезонные значения P_V СТ СП для периода 1980–2021 гг. при разных V_m . В скобках приведены среднеквадратические отклонения (СКО).

$P_V, \%$	зима	весна	лето	осень
$V_m = 20$ м/с	40 (± 2)	31 (± 6)	17 (± 1)	27 (± 5)
$V_m = 30$ м/с	20 (± 1)	13 (± 4)	5 (± 1)	11 (± 3)
$V_m = 40$ м/с	9 (± 1)	5 (± 2)	1 (± 0.3)	4 (± 2)

В таблице 3.6 представлены оценки трендов P_V СТ СП для разных месяцев для периода 1980–2021 гг. Наиболее значимые тенденции отмечены для летних и зимних месяцев. В том числе, отмечены 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) (рис. 3.6). 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.

Таблица 3.6. Оценки трендов P_V СТ СП (% / 10 лет) для разных месяцев по данным для периода 1980–2021 гг. Выделены результаты, значимые на уровне 95%. В скобках отмечены СКО.

тренды P_V , % / 10 лет	$V_m = 20$ м/с	$V_m = 30$ м/с	$V_m = 40$ м/с
январь	-0.64 (± 0.24)	-0.26 (± 0.13)	0.01 (± 0.07)
февраль	-0.36 (± 0.28)	-0.07 (± 0.17)	0.01 (± 0.09)
март	-0.02 (± 0.33)	-0.08 (± 0.17)	-0.1 (± 0.09)
апрель	0.20 (± 0.30)	-0.03 (± 0.13)	0.01 (± 0.06)
май	0.00 (± 0.13)	0.03 (± 0.06)	0.05 (± 0.03)
июнь	-0.13 (± 0.10)	-0.08 (± 0.05)	-0.03 (± 0.03)
июль	-0.14 (± 0.08)	-0.11 (± 0.04)	-0.03 (± 0.02)
август	-0.29 (± 0.11)	-0.11 (± 0.05)	-0.001 (± 0.02)
сентябрь	-0.02 (± 0.12)	0.01 (± 0.05)	0.03 (± 0.03)
октябрь	-0.27 (± 0.15)	-0.01 (± 0.07)	0.07 (± 0.05)
ноябрь	-0.11 (± 0.21)	-0.02 (± 0.08)	0.02 (± 0.04)
декабрь	-0.44 (± 0.22)	-0.09 (± 0.11)	0.02 (± 0.05)

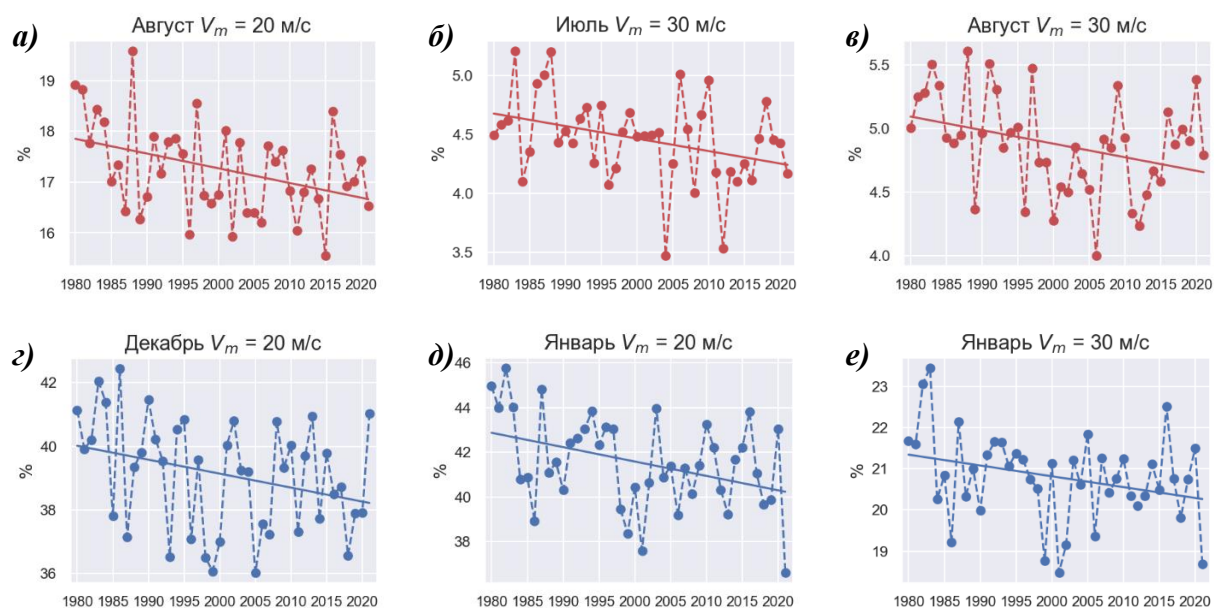


Рис. 3.6. Межгодовые вариации P_V СТ (%) при $V_m = 20$ м/с в августе (а) и при $V_m = 30$ м/с в июле (б) и августе (в); при $V_m = 20$ м/с в декабре (г) и январе (д) и при $V_m = 30$ м/с в январе (е) по данным для периода 1980–2021 гг. Прямые характеризуют линейные тренды.

3.4. Кинетическая энергия внетропических струйных течений в атлантико-евразийском регионе в период 1980–2023 гг.

Современные исследования выявляют значительные изменения в поведении североатлантической ветви полярного СТ под влиянием глобального потепления. В частности, в [96] указывается на усиление зональности течения, а в [97] на увеличение скорости ветра в области выхода СТ (регион восточной акватории Северной Атлантики). Однако несмотря на полученные результаты, комплексная реакция внетропических СТ на климатические изменения остается предметом активных научных дискуссий и требует дальнейшего изучения [46].

Особый научный и практический интерес представляет связь меандрирования СТ с возникновением приземных погодных аномалий [16, 20]. Как показано в [16], существует сильная статистически значимая корреляция между извилистыми участками СТ и различного рода экстремальными

погодными явлениями (сильные осадки и экстремальный ветер, волны холода и тепла) в масштабах отдельных регионов Северного полушария. Подчеркивается важность исследования тенденций изменчивости характеристик СТ, связанных с меандрированием, именно в региональных масштабах.

В данном разделе представлены результаты анализа интегральной кинетической энергии внетропических СТ в атлантико-евразийском регионе (E_K СТ_{А-Е}), а также оценки доли кинетической энергии, соответствующей меридиональной составляющей (P_{Ev} СТ_{А-Е}). Расчет E_K СТ_{А-Е} выполнялся по формуле (1) для географических областей, определенных в разделе 2.4 как зоны с максимальной повторяемостью полярных СТ. А именно, с октября по май район был ограничен широтными кругами 40 и 60° с.ш. и долготами 50° з.д. и 70° в.д. С июня по сентябрь – широтными кругами 50 и 80° с.ш. и долготами 50° з.д. и 70° в.д. Дополнительно к E_K СТ_{А-Е} рассчитывались ее составляющие для u и v по формулам:

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

$$E_v = \sum_{i,j} \sum_{k=500}^{k=100} \frac{(p_{k-1} - p_{k+1}) \cos(\varphi_i) v_{i,j,k}^2}{2g}. \quad (4)$$

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

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

Результаты были получены с использованием двух наборов реанализов – NCEP/NCAR [85] и JRA-55 [81]. Стоит отметить, что значения представленных выше параметров будут отличаться при использовании данных реанализов с различными пространственным разрешением и количеством изобарических уровней. На рисунке 3.7 приведен пример характеристик, полученных для теплого периода года в 2010 году по данным реанализов NCEP/NCAR и JRA-

55. Как можно видеть из графиков, величины E_K , E_u и E_v , рассчитанные по данным NCEP/NCAR, порядка в 2-4 раза меньше, чем те же параметры, полученные по полям JRA-55. Это обусловлено количеством узлов сетки, суммированных на каждом временном шаге. В японском реанализе JRA-55 широтно-долготное разрешение составляет $1.25^\circ \times 1.25^\circ$ и с бóльшим количеством изобарических уровней в слое 500-100 гПа: 500, 450, 400, 350, 300, 250, 225, 200, 175, 150, 125 и 100 гПа [81]. Тем не менее, в рассматриваемый период времени ход величин представлен согласованно в двух реанализах. Результаты всех параметров в данном разделе представлены с использованием реанализа JRA-55.

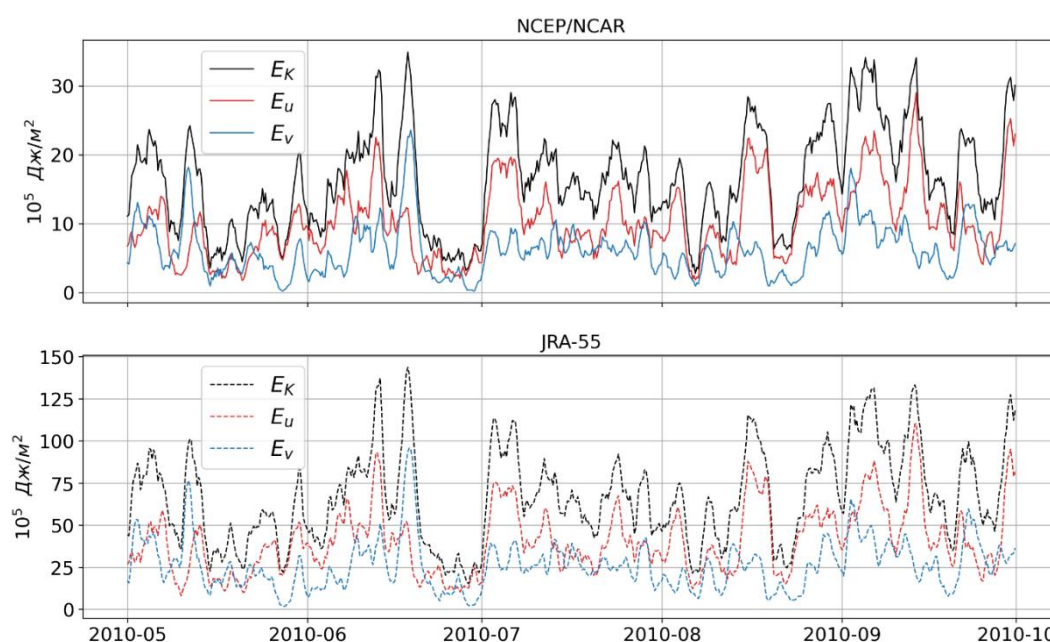


Рис. 3.7. Временной ход E_K CT_{A-E} и ее составляющих E_u и E_v за период с 00 UTC 1 мая по 18 UTC 30 сентября 2010 года по данным реанализа NCEP/NCAR (верхний рисунок) и JRA-55 (нижний рисунок).

На рисунке 3.8 представлены среднемесячные значения E_K CT_{A-E} и среднеквадратические отклонения (СКО) для периода 1980–2023 гг. по данным JRA-55. Максимальное среднемесячное значение E_K CT_{A-E} получено для января, минимальное – для июля. Наибольшая межгодовая изменчивость, представленная СКО, характерна для февраля, наименьшая – для июля.

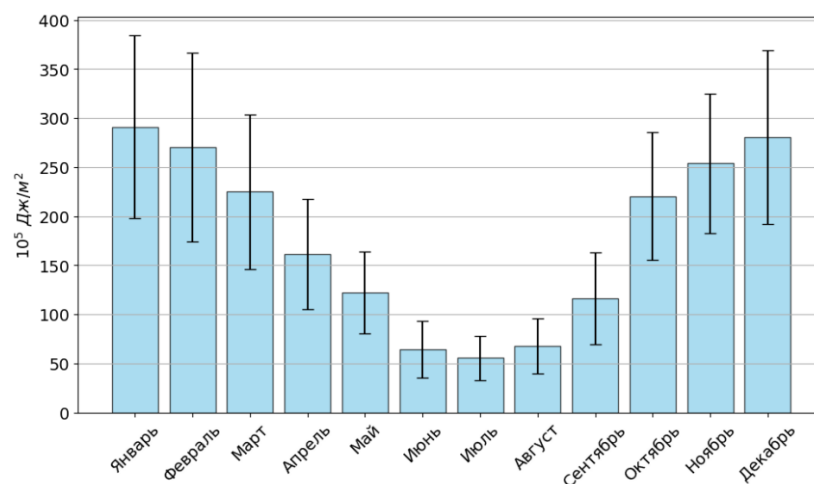


Рис. 3.8. Среднемесячные значения $E_K ST_{A-E}$ (Дж/м^2) и среднеквадратические отклонения (СКО) для периода 1980–2023 гг.

На рисунке 3.9 представлены межгодовые вариации среднемесячных значений $E_K ST_{A-E}$ и тенденции их изменчивости в рассматриваемый период. Статистически значимый тренд (на уровне 95% значимости) увеличения $E_K ST_{A-E}$ отмечен в мае. В остальные месяцы оценки трендов получены статистически незначимыми и разного знака.

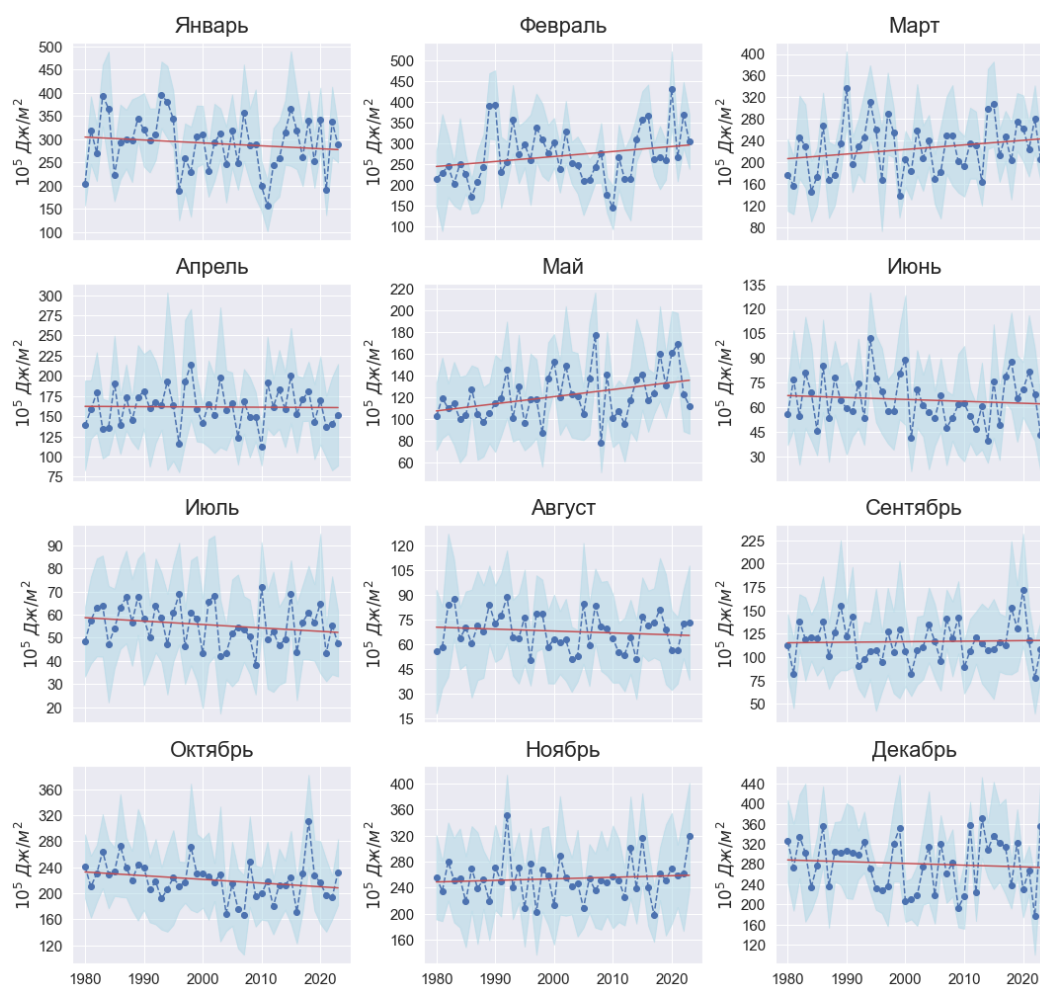


Рис. 3.9. Межгодовые вариации E_K СТ_{А-Е} (Дж/м²) и СКО для периода 1980–2023 гг. Прямые характеризуют линейные тренды.

3.4.1. Доли кинетической энергии, соответствующие меридиональной составляющей

На рисунке 3.10 представлены среднемесячные значения P_{Ev} СТ_{А-Е} и СКО для периода 1980–2023 гг. Во все месяцы среднемесячные значения P_{Ev} СТ_{А-Е} лежат в диапазоне от 32 до 37%, при этом максимальное значение получено для июня, минимальное – для июля. Наибольшая межгодовая изменчивость характерна для июня, минимальная – для октября.

На рисунке 3.11 представлены межгодовые вариации среднемесячных значений P_{Ev} СТ_{А-Е} СТ и тенденции их изменчивости в рассматриваемый период. Ни в один из месяцев указанная характеристика не представлена статистическими значимыми трендами.

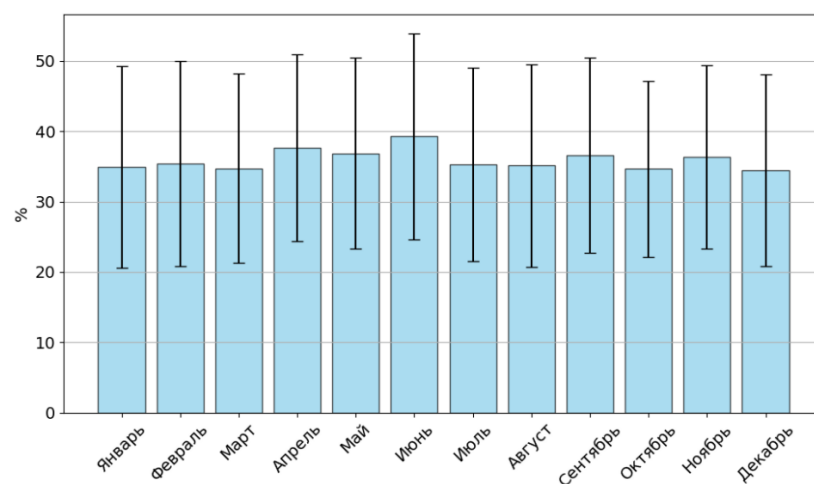


Рис. 3.10. Среднемесячные значения $P_{Ev} ST_{A-E} (\%)$ и СКО для периода 1980–2023 гг.

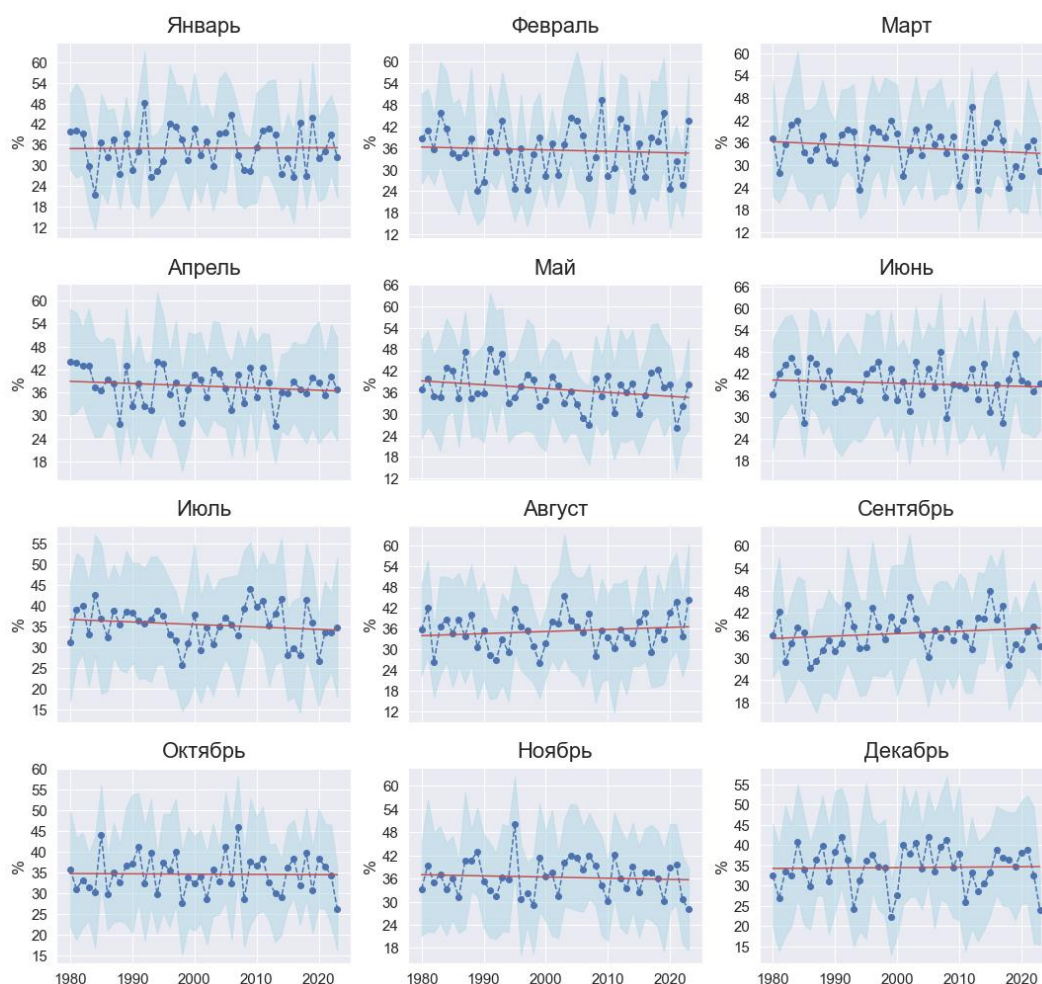


Рис. 3.11. Межгодовые вариации $P_{Ev} ST_{A-E} (\%)$ и СКО характеризуют линейные тренды.

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.). На рисунке 3.12 представлено распределение параметра P_t для всего рассматриваемого периода. Максимальное значения P_t получено для июня, минимальное – для октября.

На рисунке 3.13 представлены межгодовые вариации параметра P_t . Данная характеристика также не представлена статистическими значимыми трендами ни в один из месяцев.

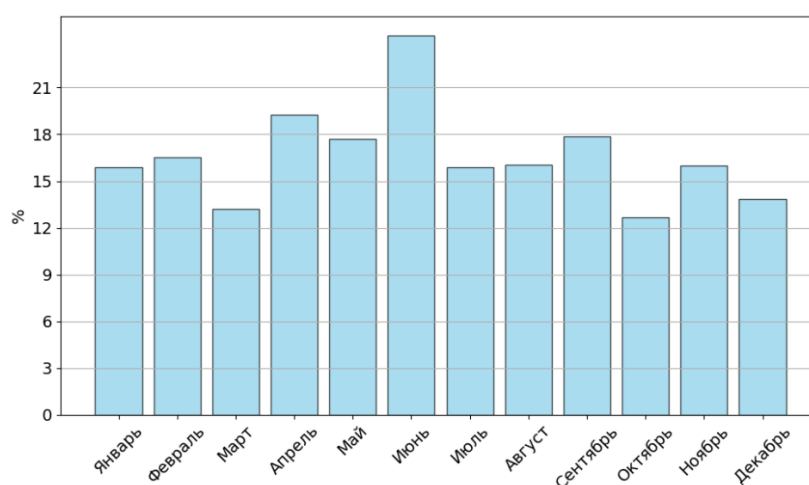


Рис. 3.12. Значения параметра P_t (%) для периода 1980–2023 гг.

Анализ параметров показал, что наиболее меандрированные внетропические СТ атлантико-евразийского региона характерны для июня. Этот вывод согласуется с результатами в работе [94] (и данными раздела 3.5), 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.

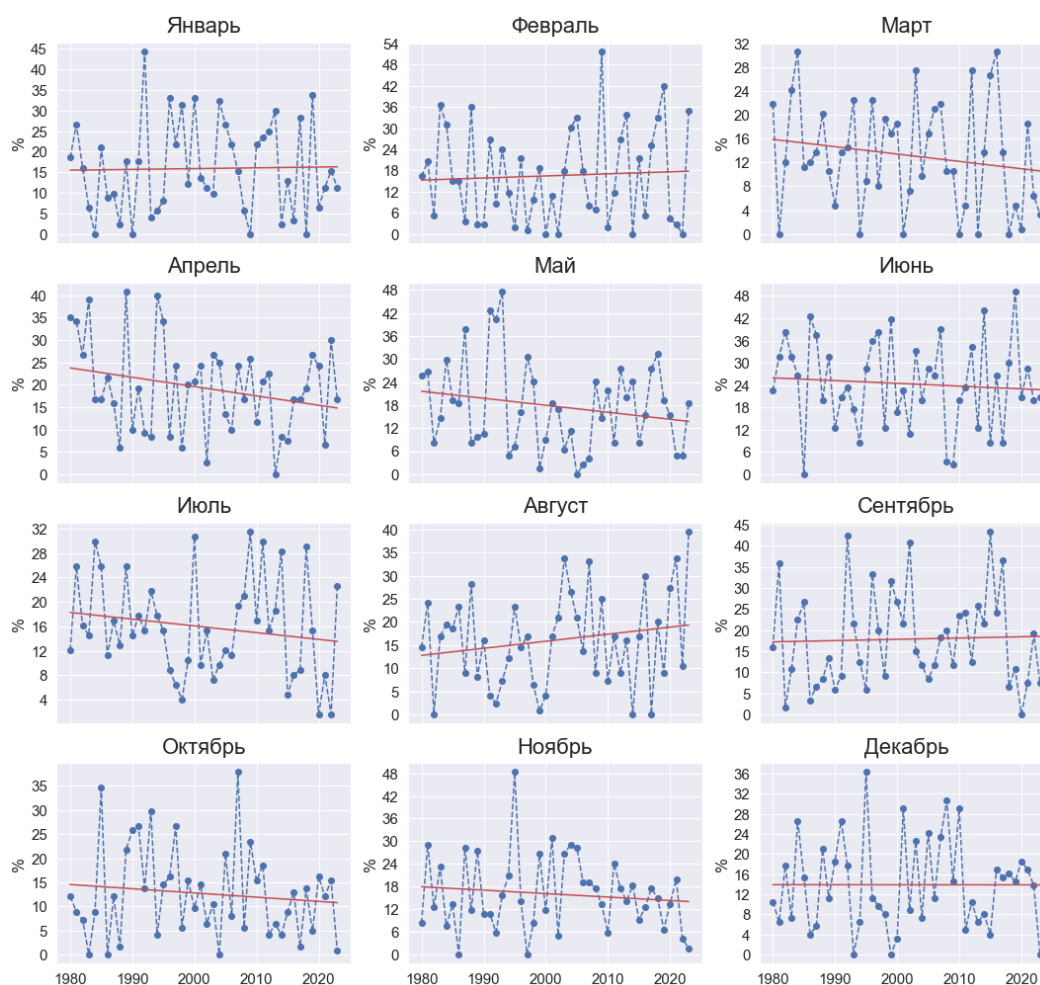


Рис. 3.13. Межгодовые вариации параметра P_t (%) для периода 1980–2023 гг. Прямые характеризуют линейные тренды.

3.5. Планетарная высотная фронтальная зона (ПВФЗ) Северного полушария в период 1990–2023 гг.

Один из методов идентификации ПВФЗ умеренных широт основан на выделении характерной изогипсы на уровне изобарической поверхности 500 гПа. По многолетним картам Ю.Б. Храбровым были определены значения изогипс, отражающие осевое положение ПВФЗ для каждого из шести синоптических сезонов [98]. Несмотря на то, что данный метод был разработан в середине двадцатого века, он широко применяется для расчета основных характеристик ПВФЗ, которыми являются широта, интенсивность, длина, извилистость и площадь [99], а также при составлении среднемесячных

обзоров атмосферной циркуляции Северного полушария, публикуемых на сайте Гидрометцентра России [100].

Следует отметить, что современные исследования меандрирования тропосферных планетарных волн используют подходы, близкие к методу Ю. Б. Храброва. В [101] для оценки амплитуд волн средней тропосферы в районе Северной Америки и Северной Атлантики в период с июля по сентябрь на уровне изобарической поверхности 500 гПа рассматриваются изогипсы со значениями 5650 м, 5700 м и 5750 м. Представленный в [102] индекс меандрирования (M) определяется как сумма максимальных значений индексов (m), рассчитанных для каждой отдельной изогипсы со значениями от 4900 м до 6200 м на уровне поверхности 500 гПа в зависимости от сезона года, а в исследовании [103] термин, обозначающийся как «меридиональная амплитуда», определялся для Северного полушария с использованием изогипс равных 5400 м, 5500 м, 5700 м и 5600 м для зимнего периода, весеннего, летнего и осеннего соответственно.

На рисунке 3.14 представлены результаты анализа положений СТ в слое 500-100 гПа и положений ПВФЗ на уровне 500 гПа для синоптических сроков 12 UTC 8 декабря и 9 июня 2020 г. по данным реанализов NCEP/NCAR [85] и JRA-55 [81]. Положения ядер СТ получены методом из раздела 2.2, а ПВФЗ выделена по характерной изогипсе методом Ю.Б. Храброва. Как видно из рисунка, положение ПВФЗ умеренных широт хорошо согласуется с расположением полярных СТ.

Анализ среднемесячных положений ПВФЗ Северного полушария за период с 1990 по 2023 г. представлен с использованием среднесуточных полей геопотенциальной высоты на уровне изобарической поверхности 500 гПа глобального реанализа NCEP/NCAR с пространственным разрешением $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ [69]. Для каждого месяца приводится оценка отклонений ПВФЗ в градусах широты относительно климатического положения, осредненного за период 1961–1990 гг. В таблице 2.7 приведены значения изогипс на уровне

изобарической поверхности 500 гПа для каждого месяца, отражающие осевое положение ПВФЗ.

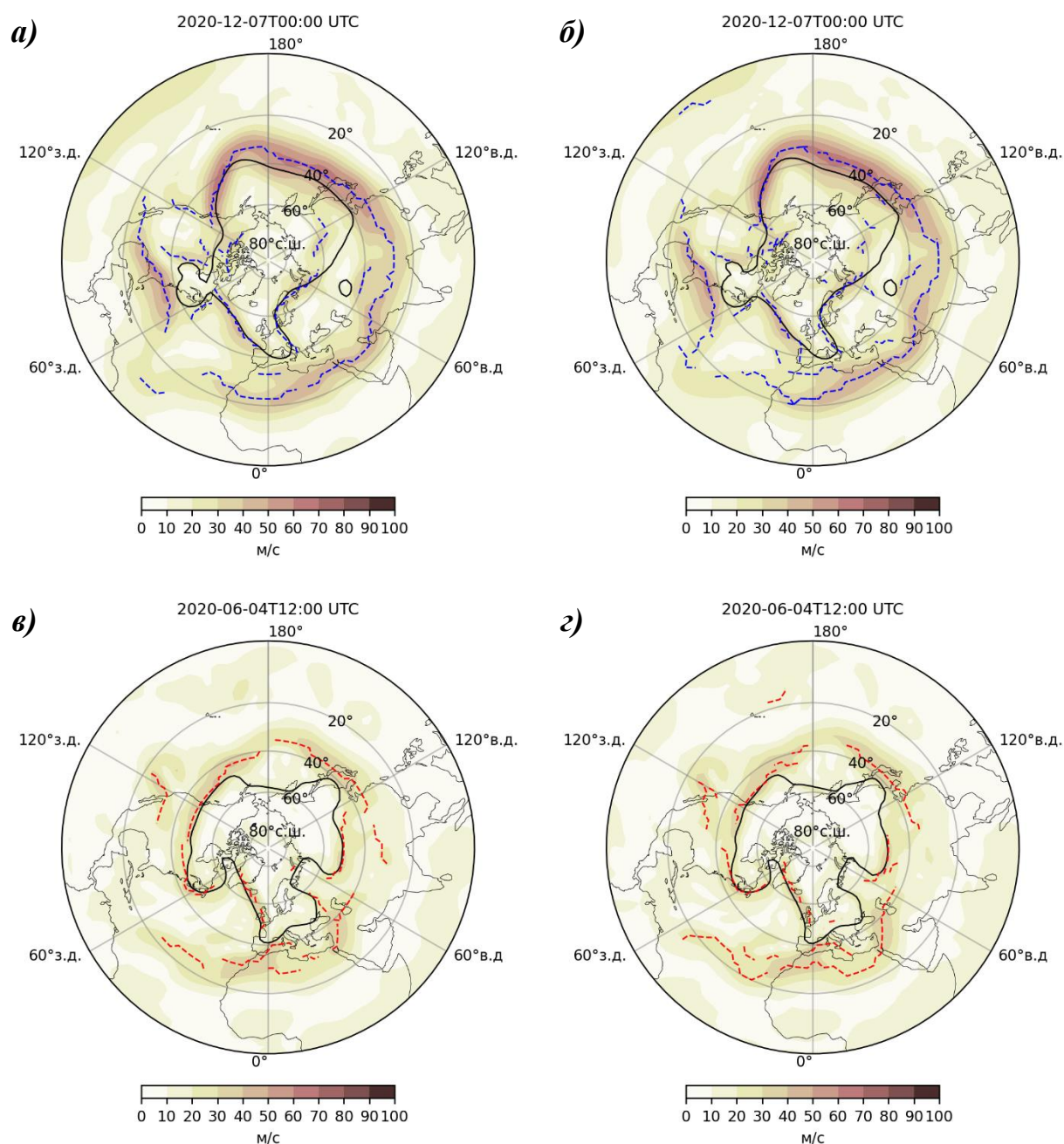


Рис. 3.14. Широтно-долготная локализация ядер СТ (красные и синие пунктирные линии) и положение ПВФЗ (черные линии) по значению характерной изогипсы данных реанализа NCEP/NCAR в срок 00 UTC 7 декабря 2020 г. (а) и в срок 12 UTC 4 июня 2020 г. (в); данных реанализа JRA-55 в срок 00 UTC 7 декабря 2020 г. (б) и в срок 12 UTC 4 июня 2020 г. (з). Заливкой представлена средняя скорость ветра слоя 500-100 гПа.

Таблица 3.7. Значения изогипс (гпдм.) на уровне изобарической поверхности 500 гПа, отражающие осевое положение ПВФЗ в каждом месяце.

Месяц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Изогипса	536		544		560		572		556		544	

На рисунке 3.15 отображены положения ПВФЗ для каждого месяца за период с 1990 по 2023 г., а также климатические положения ПВФЗ, осредненные за период 1961–1990 гг. Неоднородное распределение ПВФЗ по отношению к климатической норме отмечается во все месяцы, но при этом в разной степени встречается над различными регионами Северного полушария. В холодное время года (с октября по март) над крайним востоком Евразии, в частности, над Японскими о-вами ПВФЗ меньше всего отклоняется от своего климатического положения. Такую же особенность можно отметить и над восточной частью Северной Америки. Над западной территорией Евразии положение ПВФЗ отмечается со значительными широтными отклонениями от нормы в течение всего года. Для более детального выделения регионов с неустойчивой в географическом положении ПВФЗ были рассчитаны средневзвешенные значения отклонений от климатической нормы на каждой долготе Северного полушария с интервалом 5° за весь рассматриваемый период. Результат расчетов представлен на рисунке 3.16а, где по оси ординат отложены числовые значения отклонений в градусах широты, по оси абсцисс – долготы, где отрицательные значения указывают на Западное полушарие. В соответствии с распределением значений Северное полушарие было разделено на три сектора для дальнейшего исследования изменчивости ПВФЗ.

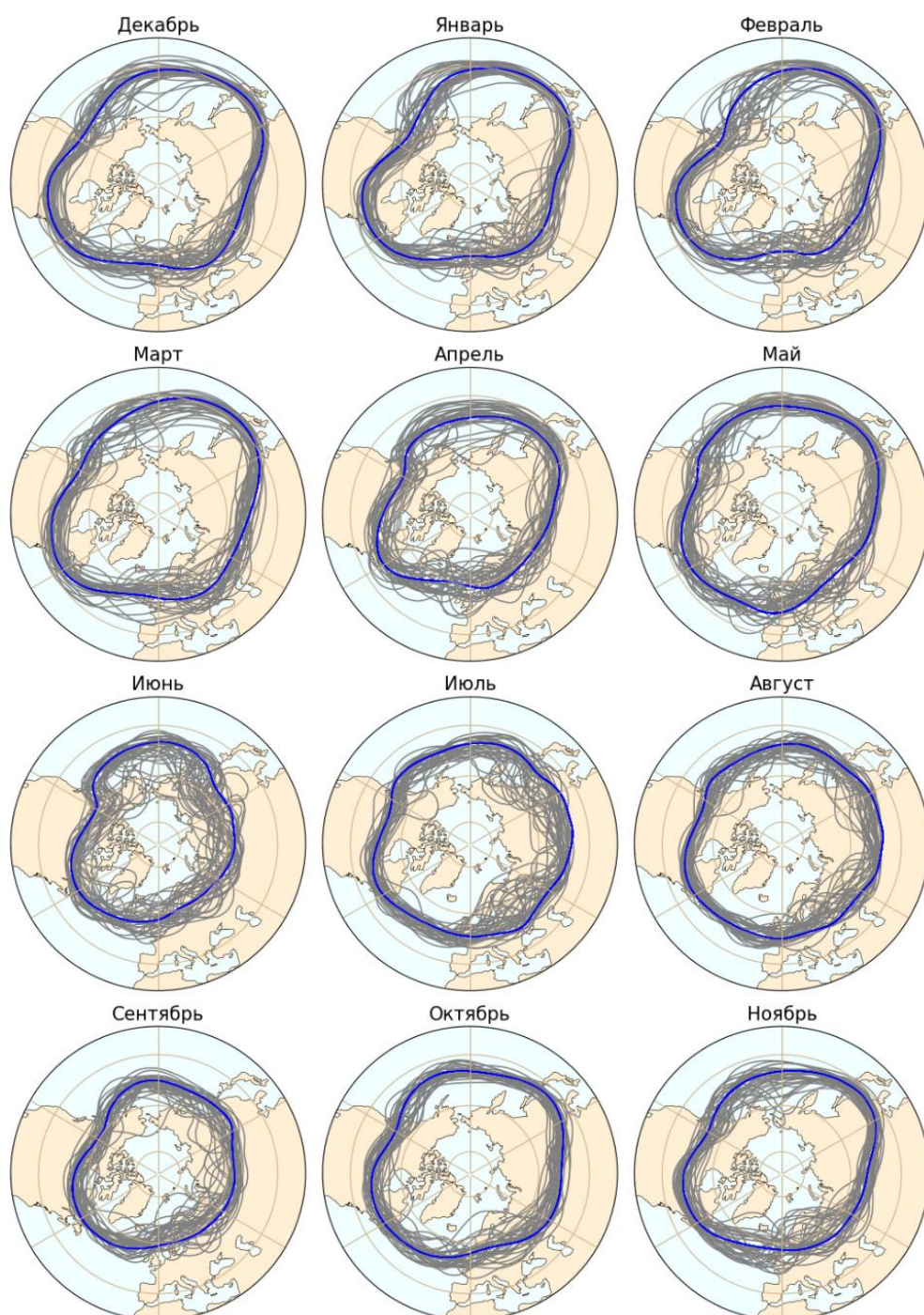


Рис. 3.15. Среднемесячные распределения ПВФЗ за период с 1990 по 2023 г. Синим цветом выделены климатические положения ПВФЗ для периода 1961–1990 гг.

Наибольшие широтные отклонения встречаются в диапазоне 20° з.д. - 60° в.д. Представленные долготы включают в себе восточную акваторию Северной Атлантики, Европу и Европейскую часть России (ЕЧР). Таким образом, первым сектором для исследования географического распределения

ПВФЗ является атлантико-евразийский сектор (А-Е), ограниченный двумя локальными минимумами отклонений, полученными на долготах 55° з.д. и 85° в.д. (рис. 3.16а). Следующий по величине максимум отмечается на долготе 130° з.д., проходящий над западным побережьем Северной Америки. Исходя из этого второй сектор для исследования представляет собой тихоокеано-американский сектор (Т-А), ограниченный локальными минимумами на долготах 145° в.д. и 55° з.д. Третий сектор, с наименьшей территорией, представляет собой восточноевразийский сектор (ВЕ), ограниченный долготами 85° в.д. и 145° в.д., с локальным максимумом на долготе 100° в.д. На рисунке 3.16б схематически представлены выделенные сектора.

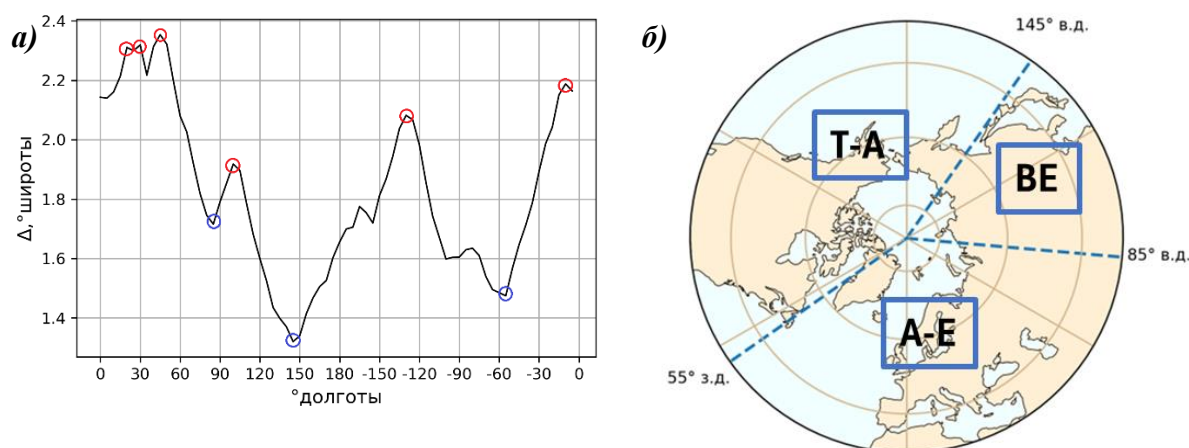


Рис. 3.16. Средневзвешенные значения отклонений ПВФЗ от климатической нормы на каждой долготе Северного полушария с интервалом 5° за весь рассматриваемый период (а); три рассматриваемых сектора Северного полушария (б).

Особенности широтного положения ПВФЗ по отношению к климатической норме рассмотрены в трех выделенных секторах для каждого месяца в период 1990–2023 гг. Межгодовая изменчивость отклонений в рассматриваемый период приводится для четырех времен года.

3.5.1.

3.5.2. Особенности распределения ПВФЗ в атлантико-евразийском секторе

На рисунке 3.17 представлены частоты и графики плотности распределения отклонений ПВФЗ для атлантико-евразийского сектора, где отрицательные значения соответствуют смещению ПВФЗ к югу от нормы, положительные – к северу. Наиболее часто встречаются небольшие отклонения в пределах 2° широты как к северу, так и к югу относительно климатического положения. Однако в отдельные месяцы, например, в феврале, апреле и ноябре, отклонения на 4 и 6° широты встречаются с почти равной частотой. Максимальные широтные удаления ПВФЗ от климатического положения представлены наименьшей частотой. Стоит отметить, что максимальные смещения ПВФЗ в северном направлении отмечаются на бóльшие расстояния во все месяцы, чем в южном. Диапазон максимальных отклонений в северном направлении за все месяцы составляет (14 ; 21°), в южном – (5 ; 12°).

Степень удаленности ПВФЗ от климатического положения определяется характером атмосферных процессов, протекающих на уровне средней и верхней тропосферы. Среднемесячное положение ПВФЗ будет приближено к климатическому, если в течение месяца количество дней с зональными и меридиональными процессами будет близким к норме. Однако при наличии аномальных процессов, которые, в частности, проявляются в нарушении западно-восточного переноса умеренных широт и установлении меридиональных процессов с интенсивными высотными ложбинами и гребнями, среднемесячное поле геопотенциальной высоты и положение ПВФЗ будут существенно отличаться от климатической нормы. В Северном полушарии распределение ПВФЗ можно рассматривать в зависимости от установившейся формы атмосферной циркуляции согласно классификации Вангенгейма-Гирса [7]. В условиях меняющегося климата наибольший

интерес представляют максимальные отклонения ПВФЗ и характер атмосферных процессов, при которых они наблюдаются.

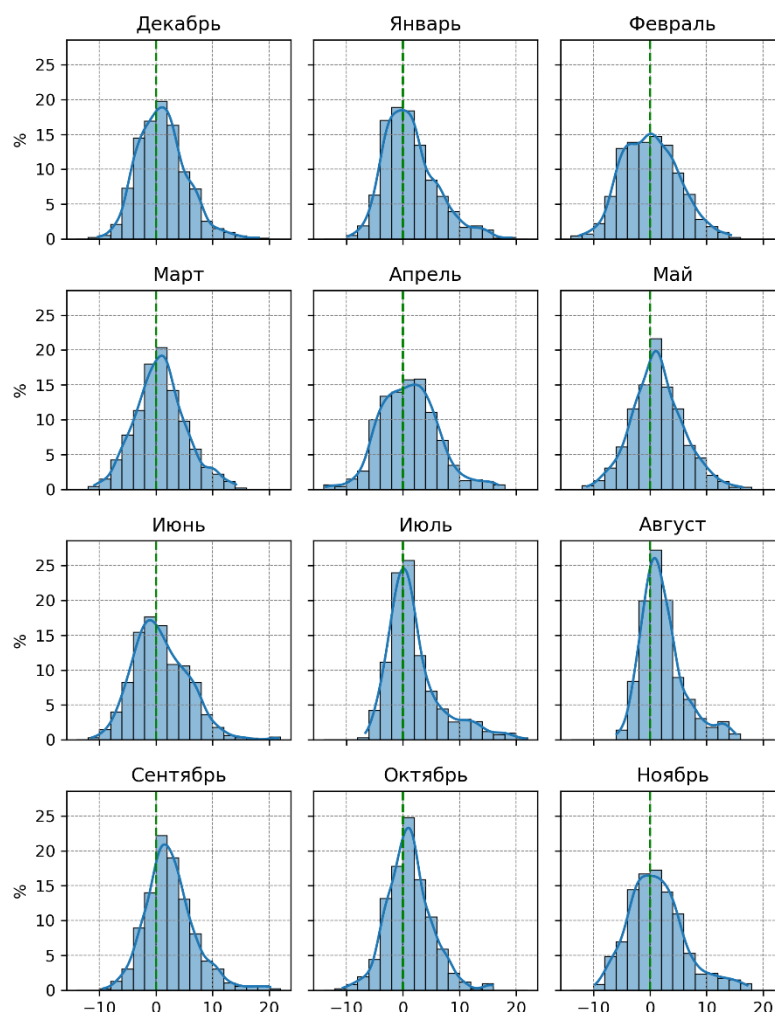


Рис. 3.17. Частоты и графики плотности распределения значений отклонений ПВФЗ для атлантико-евразийского сектора. Отрицательные значения соответствуют смещению ПВФЗ к югу от нормы, положительные – к северу.

Зимой один из примеров максимального отклонения ПВФЗ относительного климатического положения наблюдался в декабре 2010 года. Над всей акваторией Северной Атлантики ПВФЗ находилась севернее климатической нормы и отмечалась на периферии хорошо выраженного высотного гребня. Северная оконечность гребня на среднемесячной карте барической топографии поверхности 500 гПа (АТ500) достигала южной части Гренландии (рис. 3.18а). Максимальное удаление ПВФЗ от нормы составило 18° широты. Высотная ложбина при этом сформировалась над Скандинавским

полуостровом и Северной Европой. Отклонение ПВФЗ к югу от нормы достигало 7° широты. Преобладание меридиональных процессов в атлантико-евразийском секторе в течение месяца привели к ряду приземных аномалий. В Великобритании, к примеру, декабрь 2010 года был отмечен как самый холодный за период более 100 лет [104].

Январь 2016 года также отметился существенным смещением ПВФЗ в северном направлении. Удаление ПВФЗ от климатического положения над территорией Западной Сибири составило 19° широты (рис. 3.18б). Как и в декабре 2010 года максимальное отклонение наблюдалось на северной оконечности высотного гребня. Над Скандинавским п-овом сформировалась высотная ложбина и смещение ПВФЗ к югу от нормы не превышало 6° широты. Устойчивые и продолжительные антициклоны, наблюдавшиеся над Сибирью в течение месяца, способствовали формированию аномальной температуры воздуха в арктических широтах. Под влиянием устойчивых юго-западных ветров на западной периферии блокирующего антициклона положительные аномалии среднемесячной температуры (до $8\text{--}13^\circ\text{C}$) отмечались в районе акватории Карского моря [105].

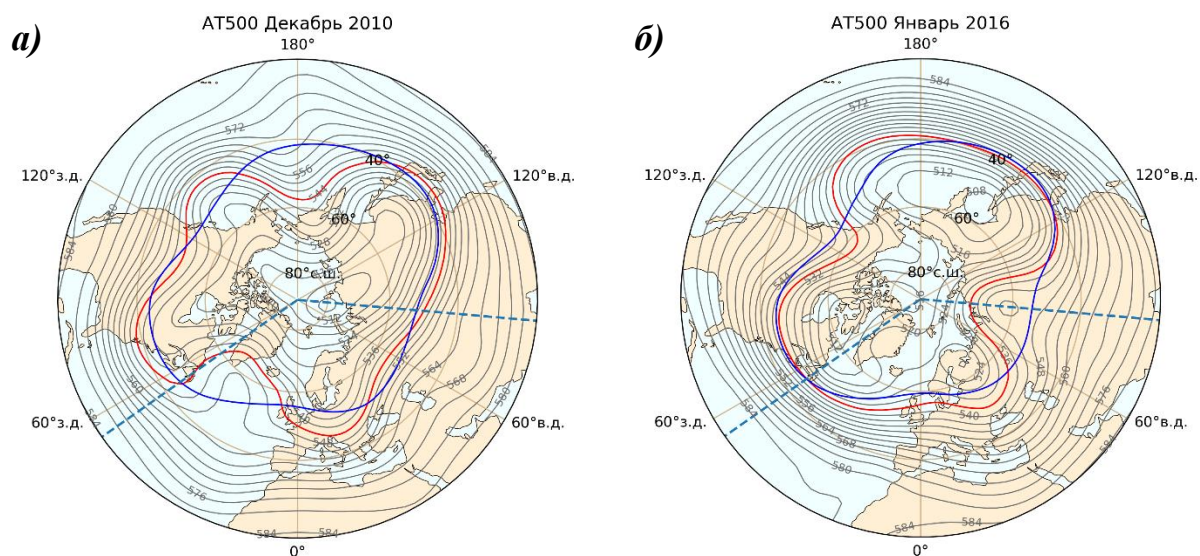


Рис. 3.18. Среднемесячные карты барической топографии поверхности 500 гПа в декабре 2010 г. (а) и январе 2016 г. (б).

Летом при схожих атмосферных процессах ПВФЗ на северной оконечности высотных гребней может удаляться от климатического положения на большие расстояния. В июне 2012 года максимальное отклонение над западной акваторией Северной Атлантики составило 21° широты (рис. 3.19а). Западно-восточный перенос в атлантико-евразийском секторе был блокирован сразу двумя высотными гребнями, ориентированными на Гренландию и Западную Сибирь, вызвав тем самым формирование устойчивых приземных антициклонов в данных районах. В Гренландии это привело к высоким положительным аномалиям приземной температуры воздуха в течение всего летнего периода 2012 года и рекордному таянию материкового льда в июле [106]. В Западной Сибири малоподвижный антициклон, отмеченный рекордными положительными аномалиями температуры воздуха, вызвал самовозгорания в некоторых регионах Томской области в июне и июле [107]. В то же время над восточной акваторией Северной Атлантики, странами Северной Европы и северо-западом ЕЧР ПВФЗ находилась южнее климатического положения на $5\text{--}7^{\circ}$ широты. В данном районе преобладала высотная ложбина и активная циклоническая деятельность в приземном слое.

В июне 2019 года отмечалось второе по величине (для этого месяца) отклонение ПВФЗ на север до 16° широты с распространением высотного гребня на южную часть Гренландии. Преобладание приземного блокирующего антициклона в начале летнего периода усилило второе рекордное таяние после 2012 года [108].

В июле и августе (см. рис. 3.15) ПВФЗ над районом Северной Атлантики имеет относительно однородное расположение с незначительными отклонениями от своего многолетнего положения. В районе континентальной части в большинстве случаев отмечены отклонения от нормы к северу, с максимальными до 18 и 23° широты в 2010 и 2018 годах соответственно. В июле 2010 года высотный барический гребень распространился на всю территорию ЕЧР с формированием обширного приземного антициклона.

Аномальный режим циркуляции в атмосфере летом 2010 года имел катастрофические последствия, как в плане экономического ущерба, в виде экстремальной засухи в России, так и человеческих потерь, увеличения смертности по сравнению с предыдущими годами в этот период [18]. В июле 2018 года ПВФЗ наблюдалась вдоль Скандинавского п-ова и над акваторией Баренцева моря (рис. 3.19б). Высотный барический гребень в течение месяца отмечался над Скандинавией и Уралом с формированием приземного блокирующего антициклона с центром над Скандинавским п-овом и побережьем Баренцева моря. Аномальный режим лета 2018 года имел нехарактерные последствия для стран Северной Европы: рекордные положительные аномалии приземной температуры воздуха в Нидерландах, Бельгии, а в странах Скандинавии засухи и лесные пожары [109].

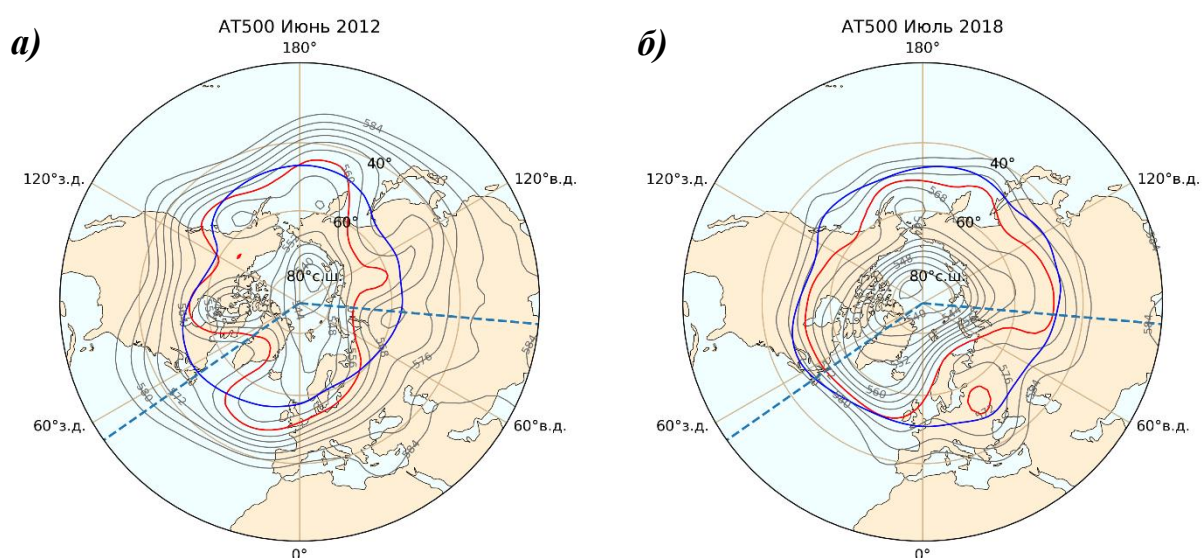


Рис. 3.19. Среднемесячные карты барической топографии поверхности 500 гПа в июне 2012 г. (а) и июле 2018 г. (б).

Для переходных сезонов года стоит выделить сентябрь 2017 года (рис. 3.20). ПВФЗ была смещена на север от климатического положения с максимальным удалением на 20° широты над Скандинавским п-овом и ЕЧР. Высотный гребень над Скандинавией и Баренцевым морем в приземном слое был представлен обширным блокирующим антициклоном, влияние североатлантических циклонов, в связи с этим отмечалось в странах Европы.

Катастрофические последствия после сильнейших дождей, гроз, ураганных ветров наблюдались в ряде европейских стран в течение сентября [110].

На рисунке 3.21 представлены значения среднеквадратических отклонений (σ) смещений ПВФЗ в атлантико-евразийском секторе в период с 1990 по 2023 г. по отношению к климатическому положению 1961–1990 гг. Во все сезоны года на протяжении рассматриваемого периода значения среднеквадратических отклонений находятся главным образом в пределах 3–7°. Летом в период с 1990 по 2009 значения σ отмечались в пределах 2–5° широты, с двумя максимальными значениями, превышающими указанный диапазон, – в 2002 и в 2003 гг. В период с 2010 по 2023 гг. диапазон значений σ увеличился до 4–8° широты. Для данного периода года получен статистически значимый тренд на уровне 95% значимости увеличения меридиональных отклонений ПВФЗ. Важно отметить, что по данным реанализа JRA-55 статистически значимая тенденция увеличения меридиональных отклонений ПВФЗ в указанный период также характерна исключительно для летнего сезона.

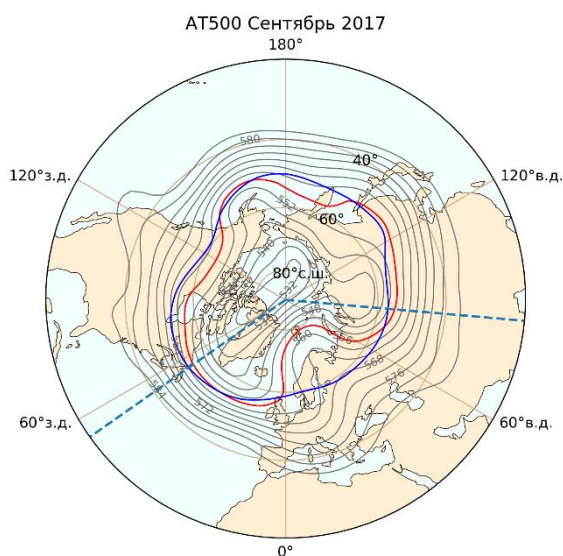


Рис. 3.20. Среднемесячная карта барической топографии поверхности 500 гПа в сентябре 2017 г.

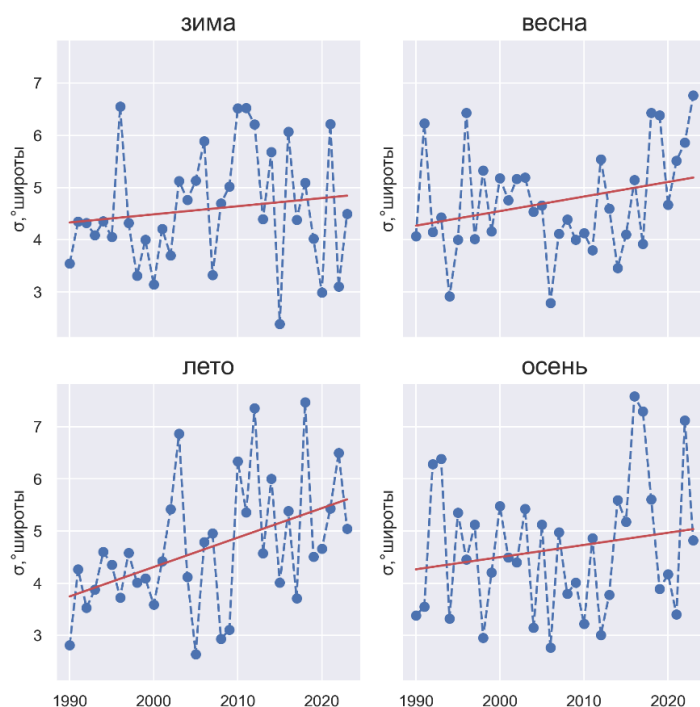


Рис. 3.21. Среднеквадратические отклонения (σ) смещений ПВФЗ в атлантико-евразийском секторе в период с 1990 по 2023 г. по отношению к климатическому положению 1961–1990 гг.

3.5.3. Особенности распределения ПВФЗ в тихоокеано-американском секторе

На рисунке 3.22 представлены частоты и графики плотности распределения широтных отклонений ПВФЗ для тихоокеано-американского сектора. В этом секторе, по сравнению с атлантико-евразийским, отмечается достаточно однородный характер распределения отклонений ПВФЗ в течение года. Наиболее часто встречаются небольшие смещения ПВФЗ в пределах 2° широты как к северу, так и к югу от нормы.

Согласно графику на рисунке 3.16а в тихоокеано-американском секторе наибольшие удаления ПВФЗ от нормы в течение года наблюдаются между 150° и 120° з.д. Данная особенность связана с наличием климатологического гребня [65]. Развитие высотного гребня над западным побережьем Северной

Америки, при котором осевая изогипса, отображающая срединное положение ПВФЗ, в некоторых случаях достигает северного побережья Аляски. При этом над западной акваторией Тихого океана и восточной территорией Северной Америки ПВФЗ расположена вблизи своего климатического положения. Из максимальных отклонений, в качестве примера, на рисунке 3.23 представлены среднемесячные карты АТ500 для февраля 2018 г. и июня 2004 г., для которых удаления ПВФЗ на северной оконечности барического гребня составили 22 (рис. 3.23а) и 25° широты (рис. 3.23б) соответственно.

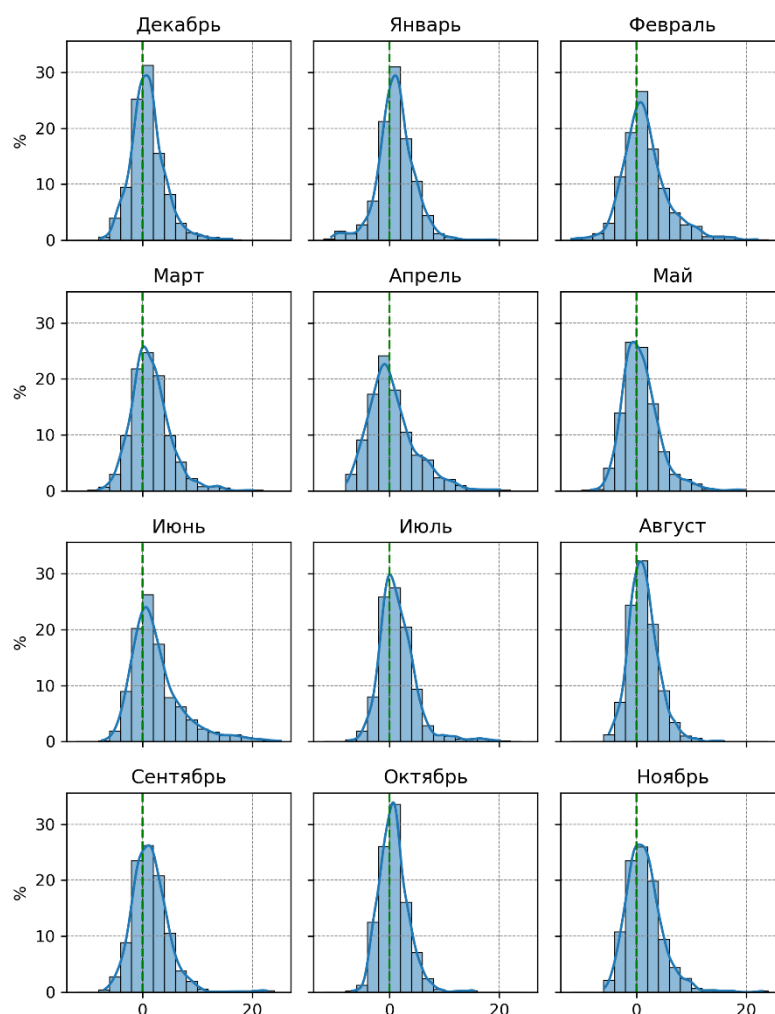


Рис. 3.22. Частоты и графики плотности распределения значений отклонений ПВФЗ для тихоокеано-американского сектора. Отрицательные значения соответствуют смещению ПВФЗ к югу от нормы, положительные – к северу.

Еще один часто наблюдаемый вариант атмосферной циркуляции в указанном секторе проявляется наличием высотного барического гребня над

центральной акваторией Тихого океана, при котором осевая изогипса достигает Чукотского п-ова и Берингова пролива. При этом по обе стороны от высотного гребня присутствуют хорошо выраженные высотные ложбины. Максимальное удаление ПВФЗ от климатического положения отмечается на северной оконечности высотного гребня; на остальной части тихоокеано-американского сектора ПВФЗ близка к климатической норме или имеет небольшие широтные отклонения. На рисунке 3.24 приводятся среднемесячные карты АТ500 для марта 2017 г. и ноябрь 2012 г. В марте отклонение составило 20° широты (рис. 3.24а), а в ноябре – 22° широты (рис. 3.24б).

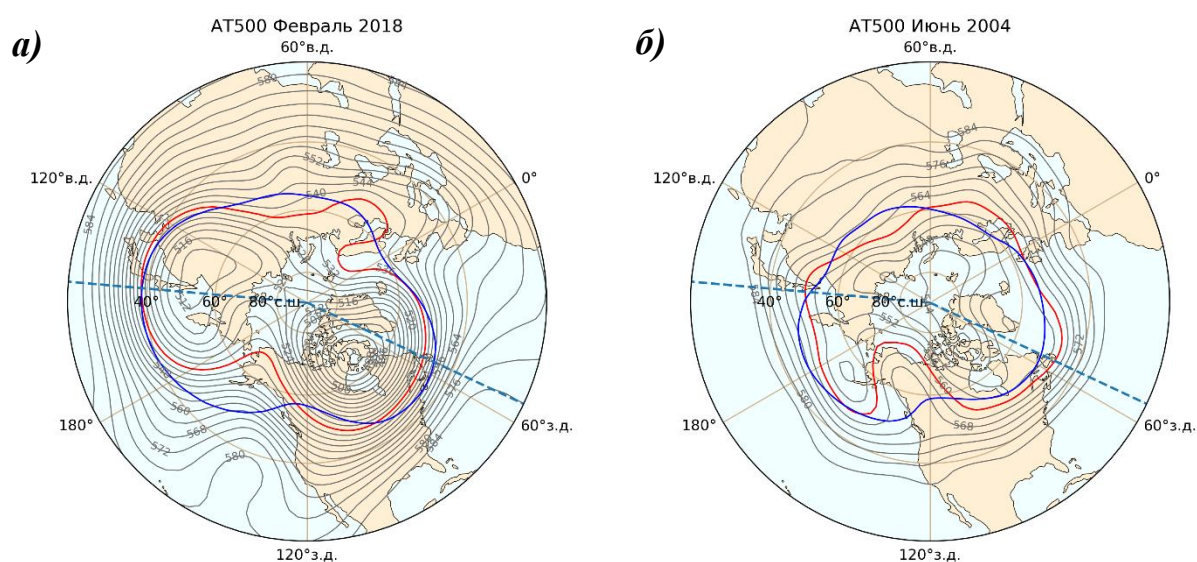


Рис. 3.23. Среднемесячные карты барической топографии поверхности 500 гПа в феврале 2018 г. (а) и июне 2004 г. (б).

В октябре 2021 года отмечался нехарактерный тип атмосферной циркуляции для рассматриваемого сектора. Отклонение ПВФЗ от климатического положения наблюдалось при развитии высотного гребня над восточной частью Северной Америки. Осевая изогипса отмечалась на 15° широты севернее климатического положения и достигала территории Канадского Арктического архипелага (рис. 3.25). При этом во все сезоны года над восточными побережьями Северной Америки и Евразии отмечаются климатологические ложбины различной интенсивности [53, 65].

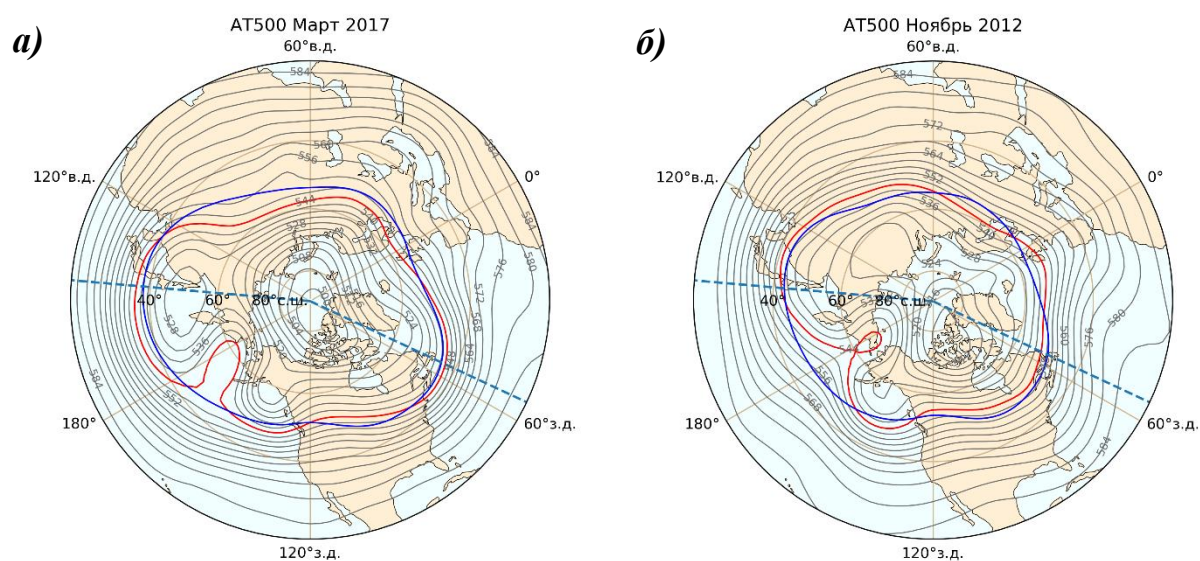


Рис. 3.24. Среднемесячные карты барической топографии поверхности 500 гПа в марте 2017 г. (а) и ноябре 2012 г. (б).

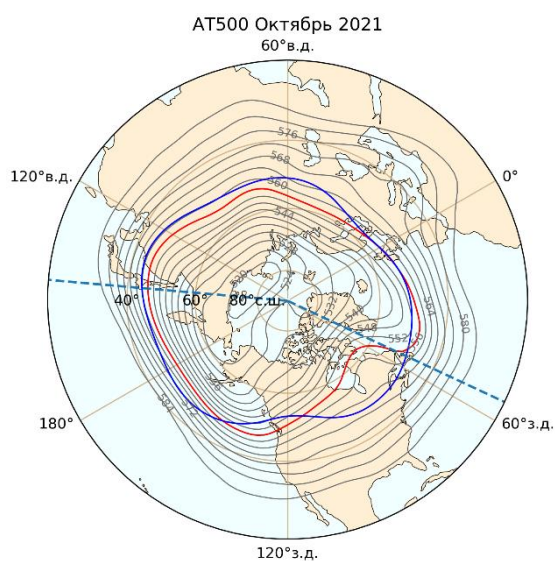


Рис. 3.25. Среднемесячная карта барической топографии поверхности 500 гПа в октябре 2021 г.

На рисунке 3.26 представлены среднеквадратические отклонения смещений ПВФЗ относительно климатического положения в тихоокеано-американском секторе. Значения σ главным образом лежат в диапазоне от 2 до 6° широты во все сезоны года. При этом статистически значимые тренды,

характеризующие увеличение меридиональных отклонений ПВФЗ, выявлены весной, летом и осенью, что согласуется с результатами, полученными по данным JRA-55.

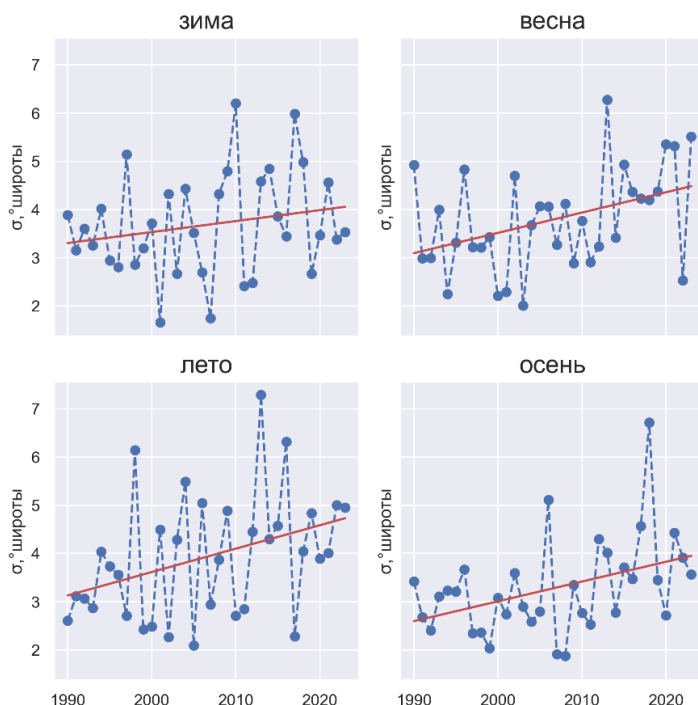


Рис. 3.26. Среднеквадратические отклонения (σ) смещений ПВФЗ в тихоокеано-американском секторе в период с 1990 по 2023 г. по отношению к климатическому положению 1961–1990 гг.

3.5.4. Особенности распределения ПВФЗ в восточноевразийском секторе

Восточноевразийский сектор представлен наименьшей территорией Северного полушария для оценки географического распределения ПВФЗ. На рисунке 3.27 представлены частоты и графики плотности распределения широтных отклонений ПВФЗ. Характер распределения отклонений в течение года представлен не однородно. Как и в двух представленных выше секторах, в восточноевразийском регионе наиболее часто встречаются небольшие отклонения в пределах 2° широты в большинстве месяцев, за исключением летнего периода. В июне и июле практически в равной степени встречаются отклонения к северу от климатической нормы как до 2° , так и до 10° широты.

На среднемесячных картах АТ500 данная особенность не связана с выраженными высотными гребнями, а проявляется в более северном положении осевой изогипсы по отношению к климатической норме 1961–1990 гг. в большинстве из рассматриваемых лет, что связано скорее с изменчивостью температурного режима тропосферы данного региона в теплое время года (рис. 3.28). Тем не менее ситуации с удалением ПВФЗ в северном направлении при развитии высотных гребней сохраняются. Так, например, в январе 2016 года (смещение ПВФЗ отмечалось на 19° севернее климатического положения). Формирование высотного антициклона над центральной территорией Евразии способствовало смещению осевой изогипсы до Таймырского п-ова.

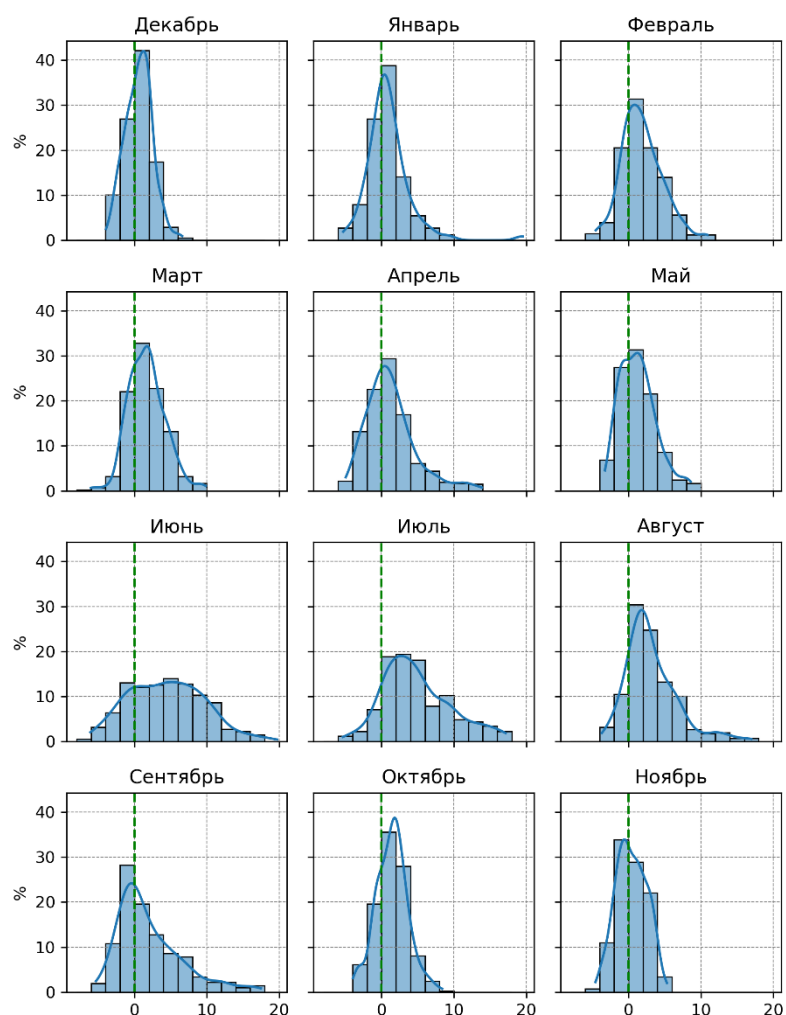


Рис. 3.27. Частоты и графики плотности распределения значений отклонений ПВФЗ для восточноевразийского сектора. Отрицательные значения соответствуют смещению ПВФЗ к югу от нормы, положительные – к северу.

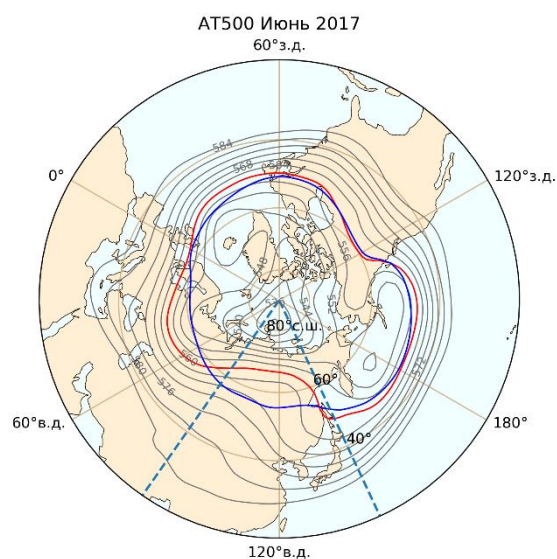


Рис. 3.28. Среднемесячная карта барической топографии поверхности 500 гПа в июне 2017 г.

Среднеквадратические отклонения смещений ПВФЗ от климатического положения представлены на рисунке 3.29. В летний период распределение σ существенно отличается по сравнению с другими сезонами года. Зимой, весной и осенью значения σ лежат главным образом в интервале 1–5° широты, с единичными эпизодами, в которых значения превышают указанный диапазон. При этом летом с 1990 по 2008 год среднеквадратические отклонения преобладают в диапазоне 2–7° широты, с превышающими указанный диапазон только в 1996 и 1998 гг. В период с 2008 по 2023 гг. интервал значений σ составляет 4–9° широты. В данное время года получен статистически значимый тренд, показывающий увеличение меридиональных отклонений ПВФЗ. Согласно данным реанализа JRA-55 статистически значимый тренд увеличения меридиональных отклонений ПВФЗ выявлен исключительно в летний сезон.

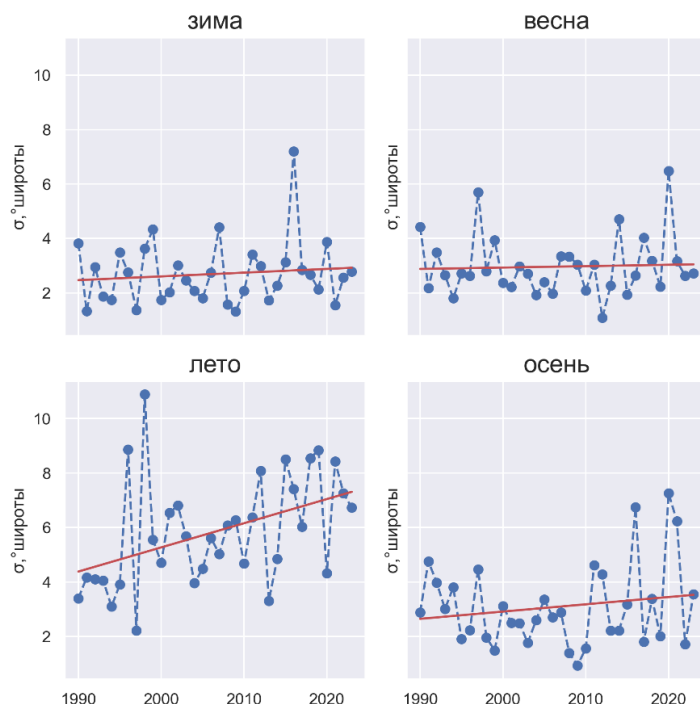


Рис. 3.29. Среднеквадратические отклонения (σ) смещений ПВФЗ в восточноевразийском секторе в период с 1990 по 2023 г. по отношению к климатическому положению 1961–1990 гг.

3.5.5. Сравнение климатических периодов: 1961–1990 и 1991–2020 гг.

Представленное исследование основано на вычислении отклонений ПВФЗ относительно климатического периода 1961–1990 гг. До недавнего времени это была единственная официально используемая климатическая норма. В настоящее время утверждена новая норма, рассчитанная для периода 1991–2020 гг. [111]. На рисунке 3.30 приводится сравнение двух климатических периодов, представленных аномалиями геопотенциальной высоты на уровне изобарической поверхности 500 гПа. Как видно из рисунка аномалии геопотенциальной высоты распределены неоднородно над всем Северным полушарием в каждом месяце. Над большей территорией Северного полушария отмечается увеличение геопотенциальной высоты в период 1990–2020 гг., особенно над экваториальными и тропическими широтами. При этом

в умеренных и высоких широтах выделяются локальные области понижения геопотенциала.

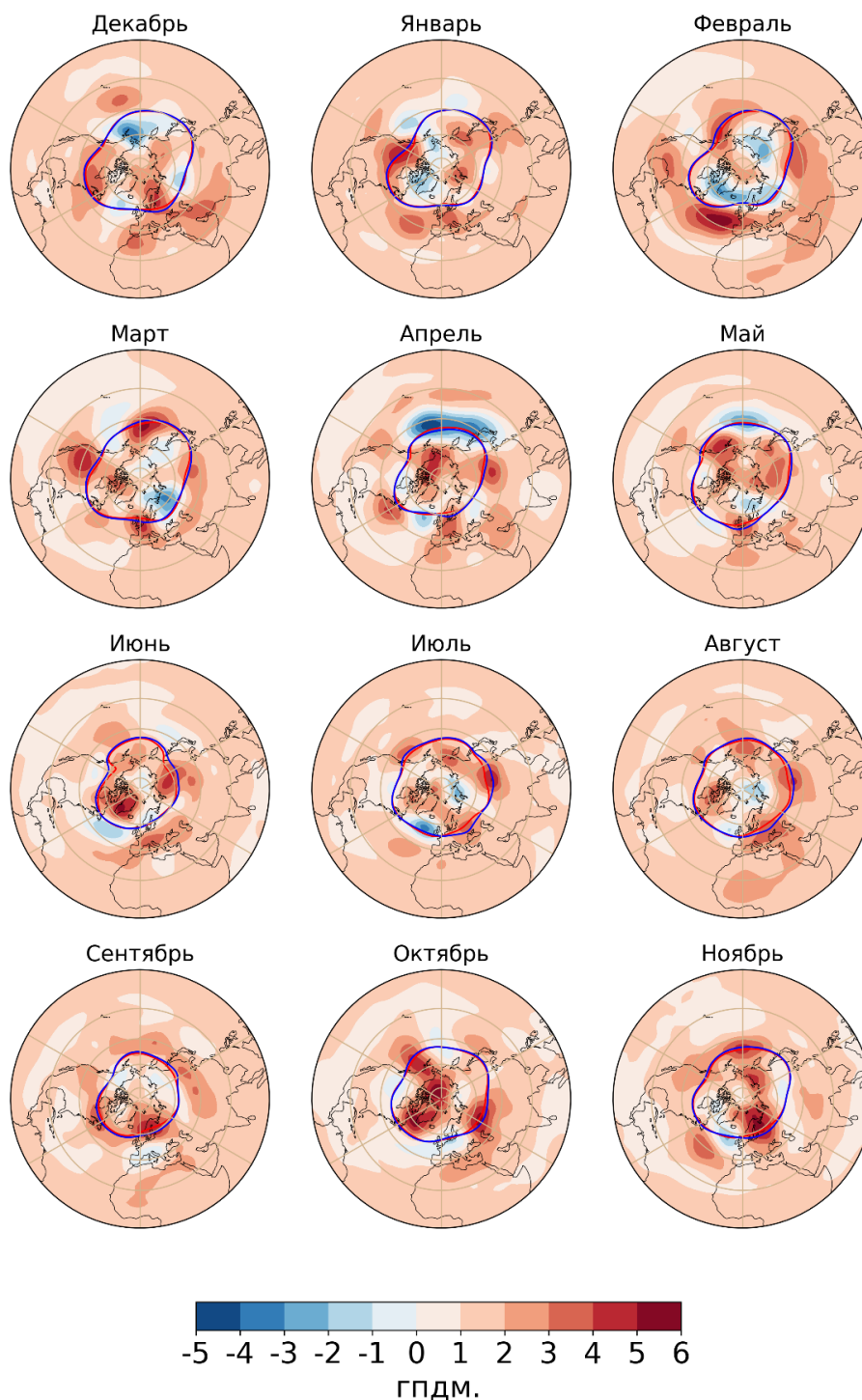


Рис. 3.30. Разница среднемноголетнего поля геопотенциальной высоты поверхности 500 гПа за период 1961–1990 гг. и 1991–2020 гг. (положительные значения соответствуют росту геопотенциала в период 1991–2020 гг.)

3.6. Основные выводы к главе 3

На основе данных реанализа для периода 1980–2021 гг. получены количественные оценки кинетической энергии E_K СТ Северного полушария и ее изменений в годовом ходе и межгодовой изменчивости. Сделаны также соответствующие количественные оценки доли P_{E_K} общей кинетической энергии атмосферы Северного полушария, связанной со СТ, и доли P_V объема атмосферных слоев в области СТ в общем анализируемом слое атмосферы. Наиболее значимые изменения отмечены для летних сезонов, в том числе значимые тренды ослабления характеристик СТ E_K , P_{E_K} и P_V . В зимние сезоны выявлены только значимое уменьшение P_V .

Для периода 1980–2023 гг. получены количественные оценки интегральной кинетической энергии внетропических струйных течений атлантико-евразийского региона (E_K СТ_{А-Е}) и ее изменений в годовом ходе, а также межгодовой изменчивости. Сделаны соответствующие количественные оценки доли кинетической энергии, соответствующие меридиональной составляющей (P_{E_V} СТ_{А-Е}). Наиболее значимое увеличение E_K СТ_{А-Е} отмечено в мае. В остальные месяцы тренды получены статистически незначимыми и разного знака. Наибольший вклад величины меридиональной составляющей в интегральную кинетическую энергию, которая характеризует степень отклонения СТ от строго западно-восточного направления, отмечен в июне. Для июня также получена наибольшее значение доли времени (P_I), когда меридиональная составляющая кинетической энергии (E_V) превышала зональную (E_U) в каждом месяце рассматриваемого периода (1980–2023 гг.). Межгодовая изменчивость двух указанных параметров не отражает статистически значимых трендов.

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. 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 (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.

ГЛАВА 4. ОСОБЕННОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СТРУЙНЫХ ТЕЧЕНИЙ В АТЛАНТИКО- ЕВРАЗИЙСКОМ РЕГИОНЕ

Погода и климат над территориями европейских стран, а также ЕЧР формируются под влиянием североатлантической ветви полярного СТ. Множественные вариации ее географического распределения во все сезоны года проявляются при различных циркуляционных особенностях атмосферы [58, 59, 112]. 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 над Северной Атлантикой [21, 27, 34]. 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 Ла-Нинья и других внешних факторов [34, 36, 113].

4.1. Внетропические струйные течения в регионе Северной Атлантики во время развития минорного ВСП зимой 2014–2015 гг.

Известно, что стратосферный полярный вихрь может оказывать значительное влияние на динамику тропосферы во временных масштабах от нескольких недель до месяцев. В работах [36, 113, 114, 115] показано, что АО и САК, определяющие меридиональные колебания СТ, вызваны именно

стратосферной изменчивостью. В частности, сила вихря определяет широту, на которой располагается СТ над Северной Атлантикой и, таким образом, влияет на траектории штормов, экстремальные погодные явления и погодные условия в целом над Европой и Северной Америкой [116, 117, 21].

Яркий пример межгодовой изменчивости стратосферного полярного вихря, вызванной стационарными планетарными волнами, это внезапные стратосферные потепления (ВСП). Во время ВСП полярный вихрь разрушается в течение нескольких дней, что сопровождается потеплением в высоких широтах и обращением знака меридионального температурного градиента, следовательно, западные ветры становятся очень слабыми и даже восточными [118, 119]. ВСП классифицируют в зависимости от степени развития и длительности на мажорное/большое/главное (“major”) и минорное/малое (“minor”). Для первого типа характерно изменение среднезонального ветра на 60° с.ш. и на высоте 10 гПа с западного на восточный в зимний период (с ноября по март) и дополнительным условием является положительный градиент среднезональной температуры на уровне 10 гПа в широтном поясе от 60 до 90° с.ш. При таком потеплении наблюдается или разделение стратосферного полярного вихря или его смещение из полярных широт [120]. Событие ВСП считается минорным, если изменение направления зонального ветра не регистрируется.

Развитие ВСП в начале января 2015 г. влияло на динамический и химический режим атмосферы [121]. Среднезональный ветер на уровне 30 км не менял своего направления, но обращение наблюдалось в верхней стратосфере. Следовательно, это ВСП классифицировалось как минорное. ВСП зимой 2014–2015 гг. сопровождалось непродолжительным расщеплением стратосферного полярного вихря. В целом зима 2014–2015 гг. характеризовалась положительными значениями индексов АО и САК, отрицательным значением индекса Южного колебания (SOI) или теплой фазой Эль-Ниньо Южного колебания (ЭНЮК) и восточной фазой квазидвухлетнего колебания зонального ветра в экваториальной стратосфере (КДК). Как

показано в работах [34, 36] и в ссылках в них, САК и АО являются доминирующими режимами изменчивости местоположения и силы СТ. В частности, отмечено, что положительные значения индекса САК характеризуют сдвиг тропосферной струи к полюсу. В то же самое время в отдельности эти индексы не описывают всей изменчивости, являясь упрощенным описанием. В действительности изменения в расположении СТ наблюдаются в результате взаимодействия различных факторов.

4.1.1. Струйные течения и процессы на уровне тропопаузы

Анализ широтного положения СТ, а также процессов, происходящих на уровне тропопаузы, производился с использованием полей реанализа JRA-55 с пространственным разрешением $1.25^\circ \times 1.25^\circ$ и временной дискретностью 6 часов [81]. Особенности распределения СТ рассматривались в течение месяца до наступления ВСП (в период с 6 декабря 2014 г. по 6 января 2015 г.) и в течение месяца после ВСП (с 7 января по 7 февраля 2015 г.) в регионе Северной Атлантики, ограниченном координатами 80° з.д. - 20° в.д. и $25-80^\circ$ с.ш. За каждый синоптический срок в поле ветра изобарической поверхности 250 гПа определялись координаты оси СТ со скоростью не менее 50 м/с. В качестве скорости ветра использовалось абсолютное ее значение, рассчитанное по формуле $|\mathbf{v}|_{i,j} = \sqrt{u_{i,j}^2 + v_{i,j}^2}$, где u и v являются зональной и меридиональной компонентами скорости ветра, i и j – номерами узлов сетки по широте и долготе соответственно. Наиболее часто СТ ограничивают изотаксой 30 м/с. В настоящем исследовании выбор минимальной скорости, равной 50 м/с, позволил наиболее четко выделить зоны повторяемости, связанные с протяженными СТ, и избежать «шумов» на картах распределения повторяемости, вызванных не столько зонами СТ, сколько, например, областями сильного ветра на перифериях высотных циклонов. Повторяемость СТ (в %) была получена из соотношения количества случаев с присутствием

оси СТ в каждом узле сетки к общему числу синоптических сроков в рассматриваемом периоде.

Дополнительно в исследовании использовались поля геопотенциальной высоты изобарической поверхности 250 гПа, осредненные за месяц до и после ВСП, а также температура воздуха и компоненты скорости ветра на изобарических уровнях 700, 650, 600, 550, 500, 450, 400, 350, 300, 250, 225, 200, 175, 150, 125 и 100 гПа для расчета потенциальной завихренности и промежуточных вычислений, таких как расчет потенциальной температуры.

Потенциальная завихренность (PV) рассчитывалась по формуле [52]:

$$PV = -g \left(\frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta}{\partial x} + \frac{\partial \theta}{\partial p} (\zeta + f) \right), \quad (5)$$

где u и v являются зональной и меридиональной компонентами скорости ветра, θ – потенциальная температура, p – давление, ζ – относительная завихренность, g – ускорение свободного падения и f – параметр Кориолиса. Значения PV представлены в единицах измерения PVU ($1PVU = 10^{-6} \text{ К} \cdot \text{м}^2 / (\text{кг} \cdot \text{с})$ [122]). Для выявления различий в стратосферно-тропосферном обмене в периоды до и после ВСП на вертикальных разрезах выделялось положение динамической тропопаузы, равное значению $2PVU$ [123].

4.1.2. Особенности широтного положения струйных течений до и после ВСП

На рисунке 4.1 представлено распределение повторяемости СТ на уровне изобарической поверхности 250 гПа, а также среднее поле геопотенциальной высоты этой поверхности за два временных периода: с 6 декабря 2014 г. по 6 января 2015 г. (месяц до регистрируемого ВСП) и с 7 января по 7 февраля 2015 г. (соответственно, месяц после ВСП). Настоящее исследование направлено главным образом на выделение особенностей распределения полярных СТ, структурно связанных с высотными фронтальными зонами внетропических широт [65]. Области высоких значений

повторяемости, полученные над Северной Африкой, относятся к ССТ, и их особенности распределения в периоды до и после ВСП не будут рассмотрены более подробно. Над восточным побережьем Северной Америки, ограниченными широтными кругами 30 и 40° с.ш., могут обнаруживаться как субтропические, так и полярные СТ [63], что способно привести к ошибочной классификации над указанной областью только по широтному признаку. К тому же нередко над Северной Америкой встречается только одно СТ, характеризующееся признаками обоих типов [56], полученное в результате слияния субтропического и полярного СТ. С учетом отмеченных выше особенностей над восточной территорией Северной Америки и прилегающей акватории Северной Атлантики не производилось разделение на субтропические и полярные СТ.

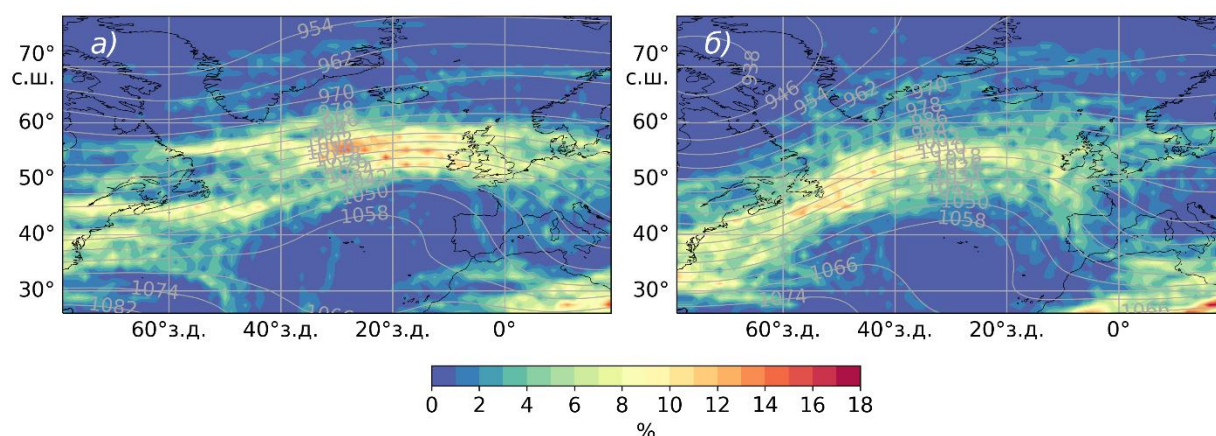


Рис. 4.1. Распределение повторяемости СТ на уровне изобарической поверхности 250 гПа и среднее поле геопотенциальной высоты (дам) этой поверхности за периоды: с 6 декабря 2014 г. по 6 января 2015 г. (а) и с 7 января по 7 февраля 2015 г. (б).

До ВСП наибольшая повторяемость СТ (до 16%) отмечается над акваторией Северной Атлантики (рис. 4.1а). Вдоль восточного побережья Северной Америки, в широтном диапазоне 30–60° с.ш., выделяется как минимум три локальных максимума повторяемости, с максимальными значениями до 11%. Над Европой повторяемость СТ представлена меньшими значениями, не превышающими 9%. После ВСП наибольшая повторяемость

СТ (до 14%) сместилась к восточному побережью Северной Америки (рис. 4.1б). Вдоль всего побережья Северной Америки сформировалась единая область повышенных значений в широтном диапазоне 30–50° с.ш. Над Европой повторяемость СТ снова представлена меньшими значениями и не превышает 8% над Северным морем, а также Пиренейским п-овом и Средиземным морем.

В полях геопотенциальной высоты как до, так и после ВСП, хорошо выражен высотный гребень тепла над акваторией Северной Атлантики. Высотные ложбины отмечаются над Северной Америкой и Европой, причем в период после ВСП на северо-востоке Северной Америки область холода представлена в виде высотного циклона. Различия между двумя рассматриваемыми периодами хорошо отображены на рисунке 4.2, где представлена разница в распределении повторяемости СТ и геопотенциальной высоты.

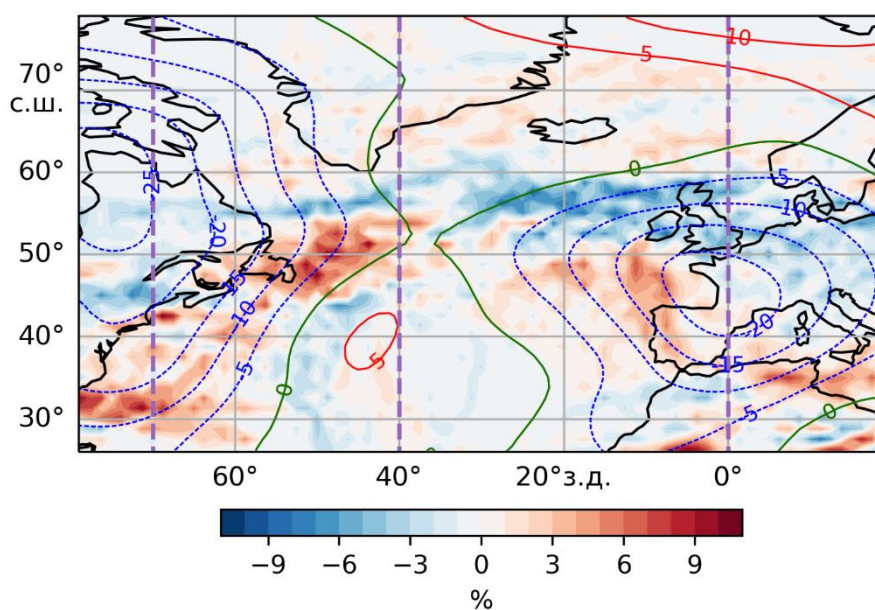


Рис. 4.2. Разности между повторяемостями СТ и полями геопотенциальной высоты до и после ВСП (положительные значения соответствуют росту повторяемости и значений геопотенциала в период после ВСП); фиолетовые пунктирные линии указывают на вертикальные разрезы.

В целом можно отметить, что над всем регионом Северной Атлантики СТ в течение месяца после ВСП чаще встречались южнее, чем до ВСП. Повторяемость СТ на 7–10% увеличилась вдоль восточного побережья Северной Америки в широтном диапазоне 30–35° с.ш. и 45–55° с.ш., при этом к северу от двух этих областей отмечается уменьшение повторяемости на 5–7%. Существенно уменьшилась повторяемость СТ (на 7–10%) в широтном диапазоне 50–60° с.ш. над восточной акваторией Северной Атлантики и Великобританией. При этом южнее, в диапазоне широт 40–50° с.ш. повторяемость СТ увеличилась на 5–7%. Особенности в распределении повторяемости СТ хорошо согласуются с изменениями в поле геопотенциальной высоты на поверхности 250 гПа. Над восточной территорией Северной Америки и над Западной Европой среднемесячные значения геопотенциальной высоты после ВСП оказались ниже на 25 и 20 дам соответственно (рис. 4.2). Углубление высотного циклона над северо-востоком Северной Америки и высотной ложбины над Западной Европой способствовали смещению высотной фронтальной зоны в направлении экватора и тем самым увеличению повторяемости СТ в более южных широтах в период после ВСП.

4.1.3. Средние вертикальные разрезы верхней тропосферы и нижней стратосферы

На рисунке 4.3 представлены среднемесячные вертикальные разрезы абсолютной скорости ветра и полей потенциальной завихренности до и после ВСП на трех долготах – 70° з.д., 40° з.д. и 0°. Долготы 70° з.д. и 0° выбраны исходя из наиболее существенных изменениях в полях геопотенциала и повторяемости СТ, отмеченных при сравнении двух периодов, разделенных ВСП (рис. 4.2). Вертикальный разрез через 40° з.д., выбран исходя из противоположных соображений.

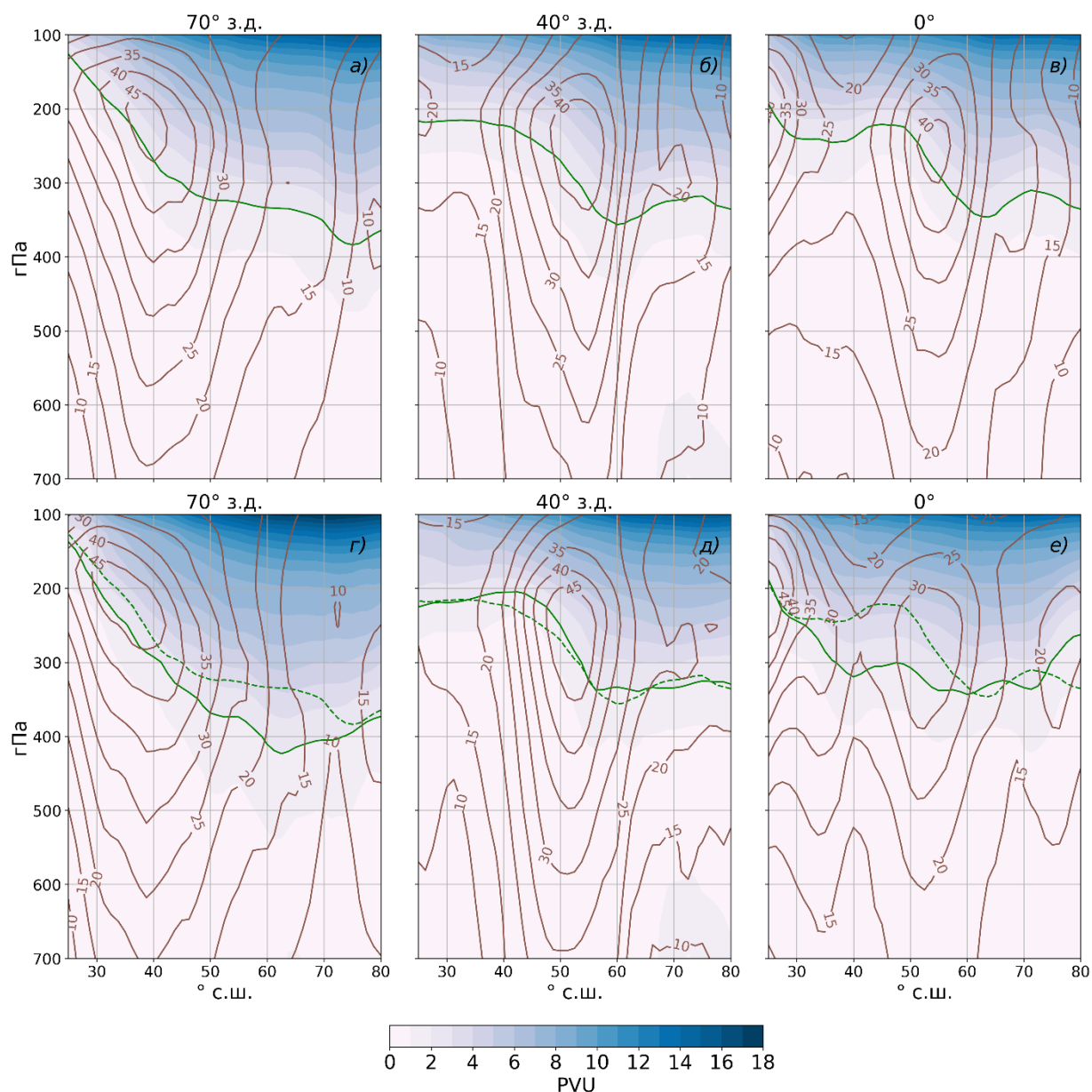


Рис. 4.3. Средние вертикальные разрезы абсолютной скорости ветра и потенциальной завихренности за периоды: с 6 декабря 2014 г. по 6 января 2015 г. (а), (б) и (в) на долготах 70° з.д., 40° з.д. и 0° соответственно и за период с 7 января по 7 февраля 2015 г. (г), (д) и (е) на тех же долготах. Линии зеленого цвета отражают положение динамической тропопаузы равные 2PVU; зеленая пунктирная линия на рис. (г), (д) и (е) перенесена с рис. (а), (б) и (в) соответственно.

На долготе 70° з.д., как до, так и после ВСП (рис. 4.3а, г) наиболее выражен один максимум скорости ветра, ограниченный изотахой 45 м/с и расположенный в пределах широт 30 и 40° с.ш. Среднемесячные и, более того,

среднесезонные вертикальные разрезы атмосферы через СТ являются более показательными для исследования ССТ в силу их меньшей изменчивости в плане географического положения и высоты оси [2]. Как говорилось выше, над восточным побережьем Северной Америки не проводилось разделение на субтропические и полярные СТ, поэтому здесь можно отметить только согласованность между широтными диапазонами с наибольшей повторяемостью СТ, полученной между 30 и 50° с.ш. (см. рис. 4.1) и наибольшей среднемесячной скоростью ветра, полученной в диапазоне тех же широт (рис. 4.3а, г). В отличие от распределения среднемесячной скорости ветра, на долготе 70° з.д. можно отметить различия в поле потенциальной завихренности и положении тропопаузы. В период после ВСП наблюдалось более интенсивное вторжение стратосферного воздуха, что в целом выразилось в более низком положении тропопаузы, а также в образовании «складки» тропопаузы в районе 60° с.ш. Наибольшая разница в высоте тропопаузы отмечается в широтном диапазоне 50–70° с.ш. (рис. 4.3г), что в свою очередь согласуется с областью наибольшего понижения геопотенциальной высоты на указанной долготе (рис. 4.2).

На долготе 40° з.д. скорость ветра также представлена одним максимумом, как до, так и после ВСП (рис. 4.3б, д). Данный максимум расположен в пределах 50 и 60° с.ш., что соответствует высокой повторяемости СТ (рис. 4.1). На указанной долготе можно отметить незначительное увеличение повторяемости СТ в окрестности 50° с.ш. и уменьшение повторяемости в диапазоне 55–60° с.ш. после ВСП (рис. 4.2). При этом геопотенциальная высота изобарической поверхности 250 гПа осталась неизменной или даже незначительно увеличилась на всех представленных широтах. Среднемесячное положение тропопаузы после ВСП также существенно не поменяло свою высоту на всех отображаемых широтах (рис. 4.3д).

Наиболее заметные изменения в вертикальных разрезах представлены на долготе 0° (рис. 4.3в, е). В поле скорости ветра выделяются два максимума –

южнее 30° с.ш. и в диапазоне широт $50\text{--}60^{\circ}$ с.ш. Данное распределение среднемесячной скорости ветра указывает на две хорошо разделимые системы в регионе – субтропического и полярного СТ [56, 63]. Высота тропопаузы существенно опустилась после ВСП в широтном диапазоне $35\text{--}55^{\circ}$ с.ш. Как и на разрезе через 70° з.д., эта область также согласуется с наибольшим понижением геопотенциальной высоты на представленной долготе (рис. 4.2).

Таким образом, показано, что зоны с наибольшей изменчивостью численных значений повторяемости согласуются с областями изменения геопотенциальной высоты изобарической поверхности 250 гПа. В частности, показано, углубление высотных ложбин над Северной Америкой и Европой в период после ВСП способствовало смещению высотной фронтальной зоны в направлении экватора и обнаружению СТ в более южных широтах. Углубление высотных ложбин и понижение геопотенциала в свою очередь связано с вторжением стратосферного холодного воздуха, что хорошо отражено в поле потенциального вихря и положении динамической тропопаузы.

4.2. Характеристики летних струйных течений по данным численной модели WRF-ARW при формировании блокирующих антициклонов в 2010 и 2018 гг.

В настоящем разделе рассмотрены особенности географического положения и интенсивность полярных СТ, которые наблюдались в период образования двух эпизодов летнего блокирования над атлантико-евразийским регионом. Известно, что блокирующие антициклоны (блокинги) – малоподвижные, долгоживущие и высокие барические образования являются причинами аномального проявления погоды, иногда достигающие катастрофических последствий [18, 109]. Причина образования блокингов, в частности, сверхдолгоживущих блокирующих антициклонов, на сегодняшний день не имеет точного объяснения. Основной механизм формирования связывают с динамикой длинных волн типа Россби, их нелинейной

неустойчивостью и опрокидыванием [124]. Меандрирование СТ и планетарных волн считается неотъемлемой составляющей образования и поддержания блокинга [102, 42].

Эпизоду продолжительного блокирующего антициклона, который наблюдался летом 2010 года, посвящено много исследований, в том числе в контексте взаимодействия со СТ [125, 126, 18]. Эпизод блокирования летом 2018 года был продолжительным и имел катастрофические последствия для стран Северной Европы [109].

Выходные параметры атмосферных моделей позволяют получить более детальную пространственную структуру СТ по сравнению с полями реанализа и профилями радиозондирования. К тому же численные модели, в частности, негидростатическая атмосферная модель WRF (Weather Research and Forecasting Model), на каждом временном шаге рассчитывает вертикальную скорость, которая является важным параметром при анализе циркуляции в области СТ.

Воспроизведения двух временных интервалов с атмосферными циркуляциями, предшествующими образованию блокингов, проводились на базе модели WRF-ARW версии 3.9.1.1 [127]. В таблице 4.1 приведены выбранные настройки и параметризации. В качестве начальных и граничных данных использовались поля оперативного глобального тропосферного анализа NCEP FNL с пространственным разрешением $1^\circ \times 1^\circ$ и временным шагом 6 часов [128].

Таблица 4.1. Выбранные настройки и параметризации модели WRF-ARW.

Характеристика модели	Выбранные настройки
Число узлов	299 × 230
Шаг сетки	23,5 км
Число вертикальных уровней	45 (до поверхности 50 гПа)
Планетарный пограничный слой	Quasi-Normal Scale Elimination (QNSE)
Подстилающая поверхность	Noah Land Surface Model
Приземный слой	Monin-Obukhov scheme with Zilitinkevich
Микрофизика облаков	New Thompson scheme
Коротковолновая и длинноволновая радиация	RRTMG scheme
Конвекция	Tiedtke scheme

4.2.1. Характеристики полярного струйного течения при формировании блокинга в июне 2010 года

Для определения даты образования блокирующей ситуации использовались данные среднесуточных полей геопотенциальной высоты на уровне изобарической поверхности 500 гПа реанализа NCEP/NCAR с пространственным разрешением $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ [85]. Район ограничивался широтами $45\text{--}75^\circ$ с.ш. и долготами $0\text{--}70^\circ$ в.д. Блокирование определялось с использованием метода и критериев, предложенных в [129] и основанных на расчете меридионального градиента геопотенциальной высоты [130, 131]:

$$GHGS(\lambda_0, \varphi_0) = \frac{Z_{500}(\lambda_0, \varphi_0) - Z_{500}(\lambda_0, \varphi_S)}{\varphi_0 - \varphi_S}, \quad (6)$$

$$GHGN(\lambda_0, \varphi_0) = \frac{Z_{500}(\lambda_0, \varphi_N) - Z_{500}(\lambda_0, \varphi_0)}{\varphi_N - \varphi_0}. \quad (7)$$

Здесь λ_0 и φ_0 координаты узлов сетки исследуемого района, $\varphi_S = \varphi_0 - 15^\circ$, $\varphi_N = \varphi_0 + 15^\circ$. Для узла сетки (λ_0, φ_0) устанавливалось мгновенное (instantaneous)

блокирование, если одновременно выполнялись два условия: $GHGS(\lambda_0, \varphi_0) > 0$ и $GHGN(\lambda_0, \varphi_0) < -10$ м/гр. широты. Для выделения крупномасштабных эпизодов применялось условие, при котором критерий мгновенного блокирования соблюдался непрерывно в каждом узле сетки как минимум на протяжении 15° по долготе. В конечном итоге узел сетки, удовлетворяющий крупномасштабному критерию, относился к эпизоду блокирования, если сохранялся в центре полигона с размерами 5° широты $\times$ 10° долготы не менее 5 дней.

Известно, что блокинг над ЕЧР летом 2010 года имел признаки «мерцания» – многократные обрушения волн Россби на фоне сохраняющегося антициклонального поля давления [125]. С применением указанного метода и критериев один из антициклонов над ЕЧР сформировался 21 июня и непрерывно просуществовал до 30 июня 2010 года. На рисунке 4.4 представлено среднее поле геопотенциальной высоты и район блокирования в период 21–30 июня 2010 года. На рисунке 4.5 по результатам численного моделирования представлены поля геопотенциальной высоты и абсолютной скорости ветра на уровне поверхности 250 гПа до наступления блокинга в синоптические сроки 12 UTC 17, 18, 19, 20 и 21 июня.

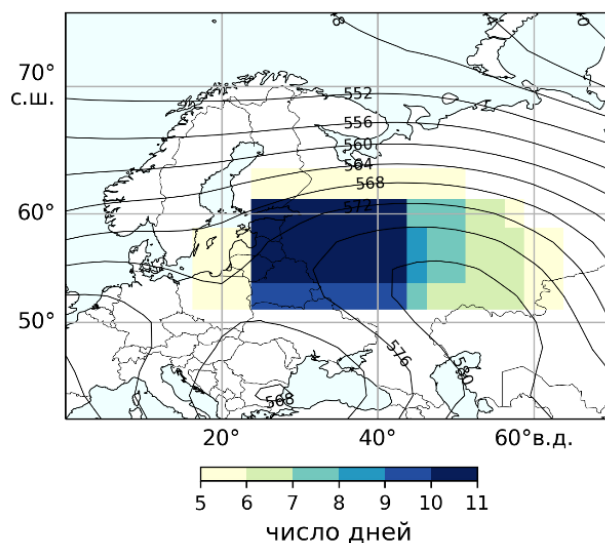


Рис. 4.4. Среднее поле геопотенциальной высоты (дам) изобарической поверхности 500 гПа и район блокирования в период 21–30 июня 2010 г.

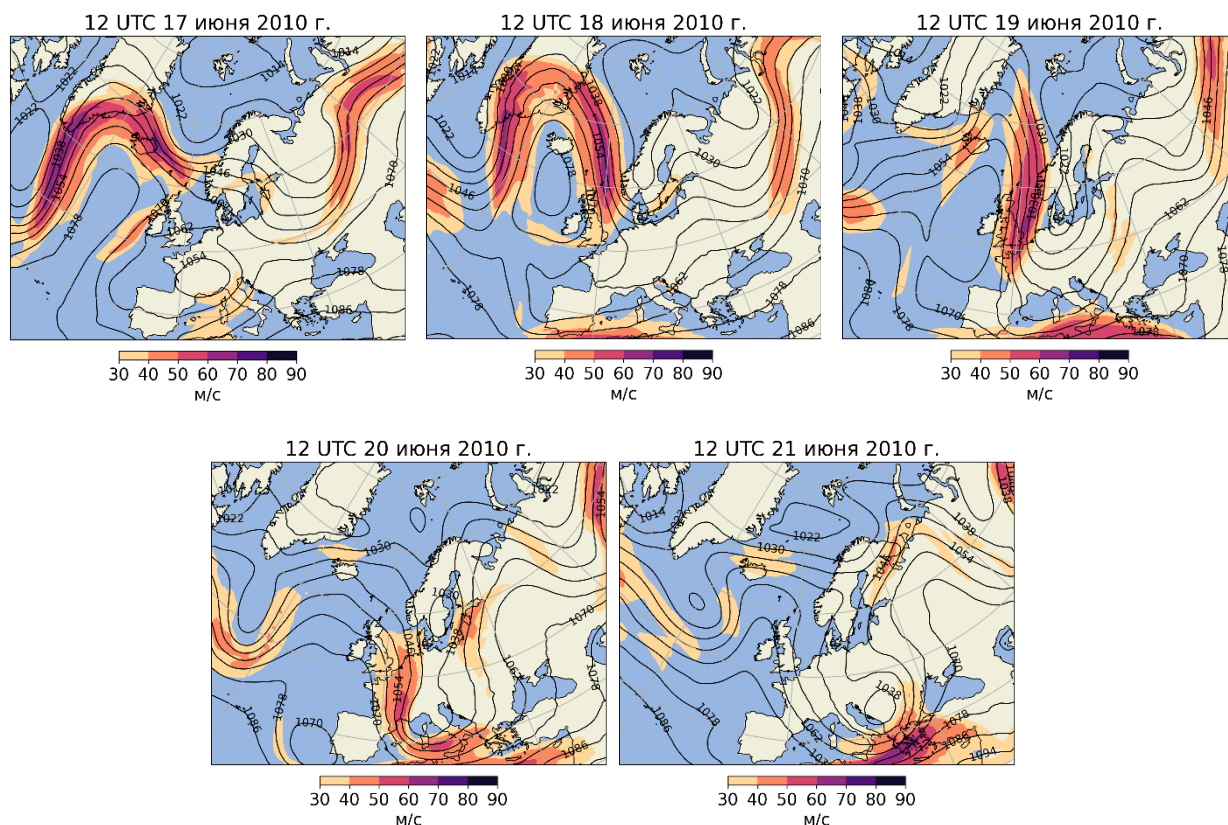


Рис. 4.5. Поля геопотенциальной высоты (дам) и абсолютной скорости ветра (м/с) на уровне поверхности 250 гПа по данным модели WRF-ARW в период до наступления блокинга 21 июня 2010 г.

17 июня начал усиливаться высотный барический гребень над Северной Атлантикой с выраженным СТ в тыловой и на северной перифериях гребня. Максимальная скорость ветра в ядре на меридиональном участке СТ в тыловой части гребня достигала 72 м/с. 18 июня над восточной акваторией Северной Атлантики сформировался высотный антициклон и СТ представляло собой две подвижные области максимального ветра на западной и восточной перифериях антициклона. На рисунке 4.6 приводится вертикальный разрез через область СТ с максимальной скоростью ветра в ядре. Значение скорости ветра достигало 65 м/с на высоте вблизи изобарической поверхности 250 гПа. Наибольшие значения абсолютной завихренности характерны на циклонической периферии СТ, в данном случае над югом Скандинавского полуострова, где отмечалось углубление высотного циклона. Тропопауза

рассматривается в поле потенциальной завихренности и представлена значением 2PVU [123]. На циклонической периферии СТ высота расположения тропопаузы достигала уровня 400 гПа. Также на вертикальном разрезе приводятся значения вертикальных скоростей. В данном случае в области СТ преобладали нисходящие движения, достигающие 8 см/с.

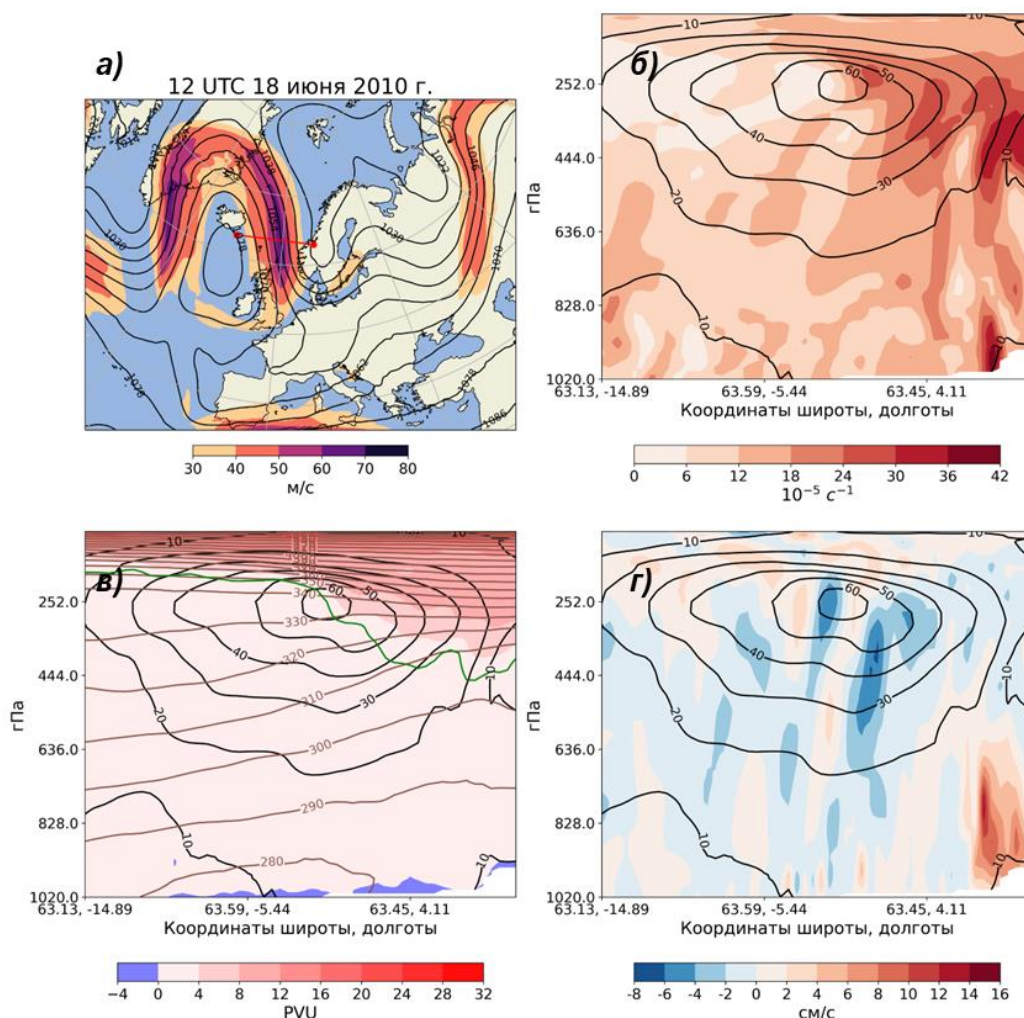


Рис. 4.6. Вертикальный разрез через область СТ с максимальной скоростью ветра в ядре на восточной периферии высотного антициклона в срок 12 UTC 18 июня 2010 г. (а); поле абсолютной завихренности (б); поле потенциальной завихренности (в); вертикальные скорости (г).

19 июня наблюдалось углубление высотного циклона над Скандинавским п-овом и быстрое смещение его в южном направлении через центральную Европу. На рисунке 4.7 представлен вертикальный разрез через область максимального ветра. Основные различия наблюдаются в изменении

поля вертикальных движений. По сравнению с разрезом за 18 июня в данном случае наблюдается чередование нисходящих и восходящих движений в области СТ. 20 и 21 июня СТ ослабевало и над ЕЧР начал усиливаться высотный гребень с юга. Таким образом, образование блокинга происходило по антициклональному типу опрокидывания волны над ЕЧР [67], которому предшествовало интенсивное сильно меандрированное СТ над Северной Атлантикой.

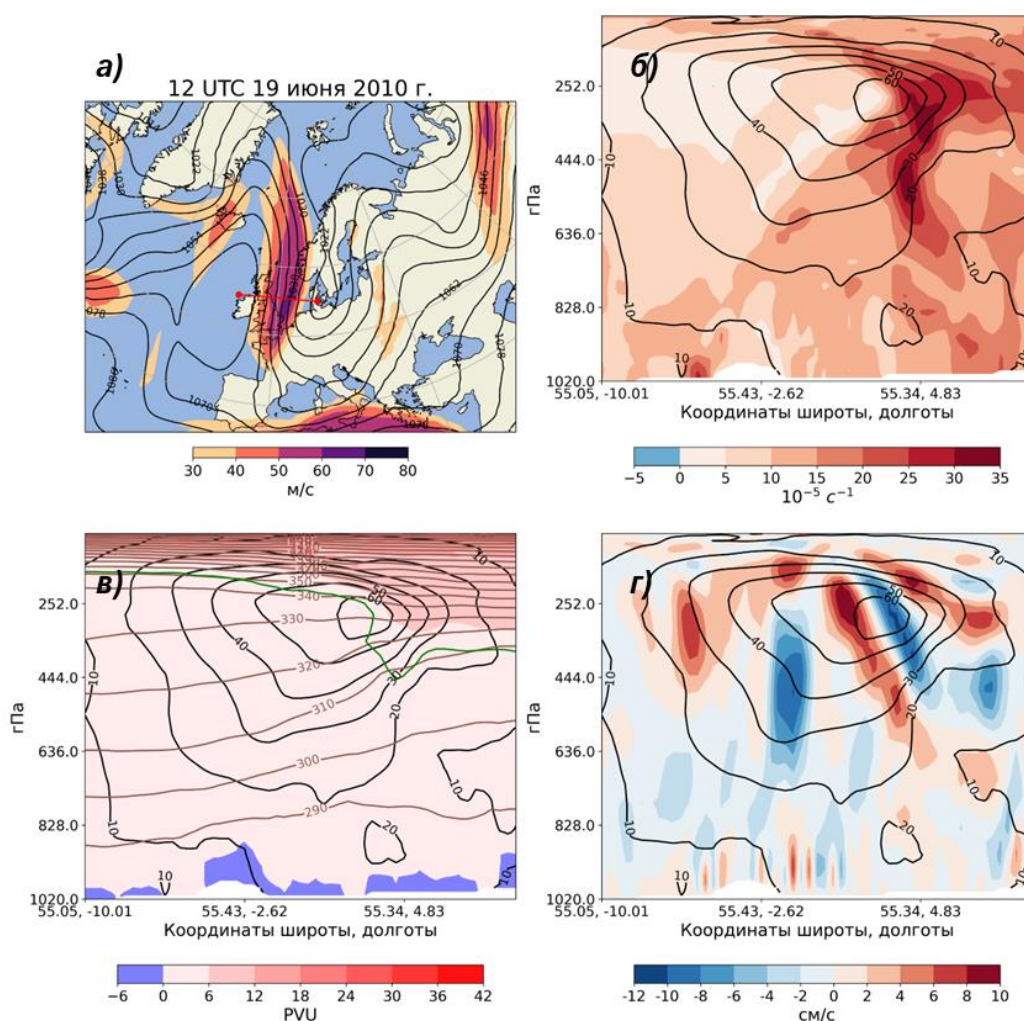


Рис. 4.7. Вертикальный разрез через область СТ с максимальной скоростью ветра в ядре на восточной периферии высотного антициклона в срок 12 UTC 19 июня 2010 г. (а); поле абсолютной завихренности (б); поле потенциальной завихренности (в); вертикальные скорости (г).

В качестве достоверности полученных характеристик СТ с использованием результатов моделирования приводится серия вертикальных

профилей скорости ветра и температуры воздуха в тропосфере с аэрологических станций, доступных на сайте [132]. На рисунке 4.8 представлены вертикальные профили скорости ветра и температуры воздуха по данным модели WRF и аэрологических станций в области обнаружения СТ в срок 12 UTC 17 июня 2010 года.

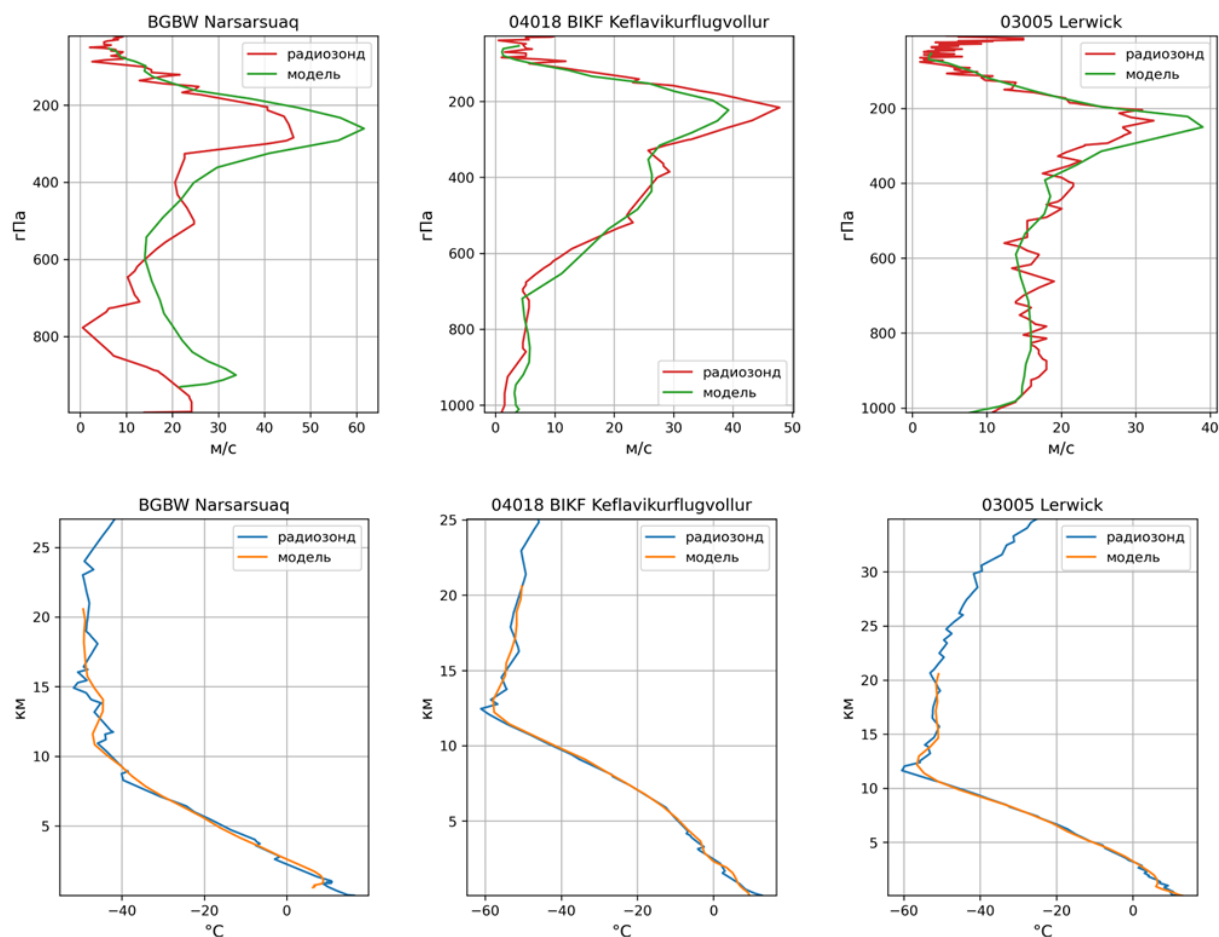


Рис. 4.8. Вертикальные профили скорости ветра (верхний ряд) и температуры воздуха (нижний ряд) для аэрологических станций в регионе обнаружения СТ в срок 12 UTC 17 июня 2010 года.

Как можно видеть на профилях модель хорошо воспроизводит высоту ядра СТ, проявляющуюся максимальной скоростью ветра, а также зоной тропопаузы, где наблюдается возрастание температуры воздуха с высотой. В значениях скорости ветра существуют погрешности (максимальная достигает 15 м/с по данным станции Narsarsuaq), которые могут быть связаны с неточностями воспроизведения положения СТ в полях с начальными

условиями, а также с неполным соответствием географических координат аэрологических станции и сеточных узлов модели.

4.2.2. Характеристики полярного струйного течения при формировании блокинга в июле 2018 года

Для эпизода летнего блокинга в июле 2018 года также были выявлены дата появления первых критериев, удовлетворяющих блокированию более 5 дней, и их продолжительность. На рисунке 4.9 представлен регион и количество дней с присутствием блокирующего антициклона, а также среднее поле геопотенциальной высоты изобарической поверхности 500 гПа в этот период времени. Датой наступления блокинга считается 15 июля 2018 года. На протяжении 18 дней критерии, удовлетворяющие блокированию, наблюдались над Кольским п-овом и северо-западом ЕЧР.

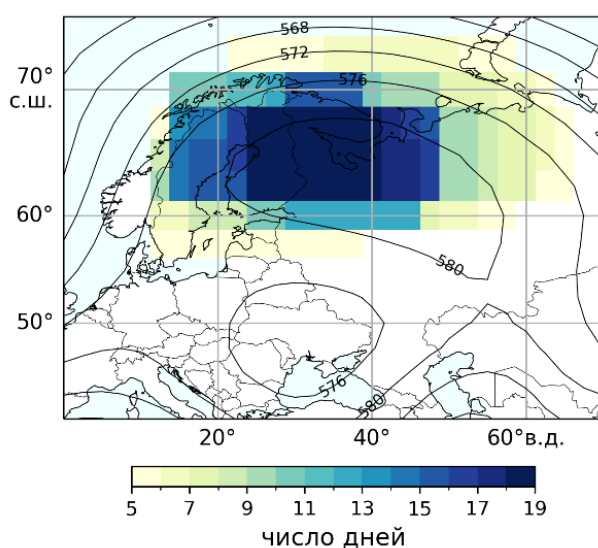


Рис. 4.9. Среднее поле геопотенциальной высоты (дам) изобарической поверхности 500 гПа и район блокирования в период с 15 июля по 1 августа 2018 г.

Особенности географического положения полярного СТ за несколько дней до установления блокинга отображены на рисунке 4.10. СТ в поле абсолютной скорости ветра представлено на уровне изобарической

поверхности 250 гПа в срок 00 UTC 9, 10 и 11 июля 2018 года. Характеристики СТ при развитии атмосферного блокирования в данном случае отличались, от представленных в июне 2010 года. Высотный гребень тепла усиливался над восточной акваторией Северной Атлантики 9 июля, на его периферии отмечалось СТ с максимальной скоростью ветра в ядре до 77 м/с. Вертикальный разрез через эту область представлен на рисунке 4.11. Высота динамической тропопаузы на циклонической периферии СТ представлена в виде «складки» до высоты поверхности 450 гПа. В тропосфере, на антициклональной периферии СТ, вертикальные скорости представлены интенсивными нисходящими и восходящими движениями.

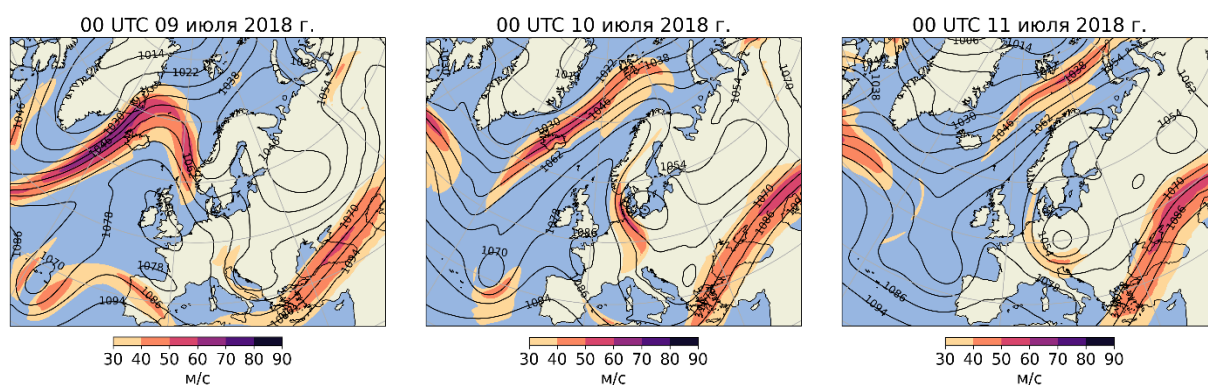


Рис. 4.10. Поля геопотенциальной высоты (гпдм) и абсолютной скорости ветра на уровне поверхности 250 гПа по данным модели WRF-ARW в период до наступления блокинга 15 июля 2018 года.

Высотный циклон сформировался над Скандинавским п-овом и быстро смещался в южном направлении с углублением над Центральной Европой. 10 и 11 июля продолжилось развитие высотного гребня в направлении полюса и распространение СТ на его периферии над акваторией Баренцева моря. В данном случае обрушение волны и образование блокинга произошло над восточной акваторией Северной Атлантики. Над югом ЕЧР в представленные сроки отмечалось зонально ориентированное ССТ.

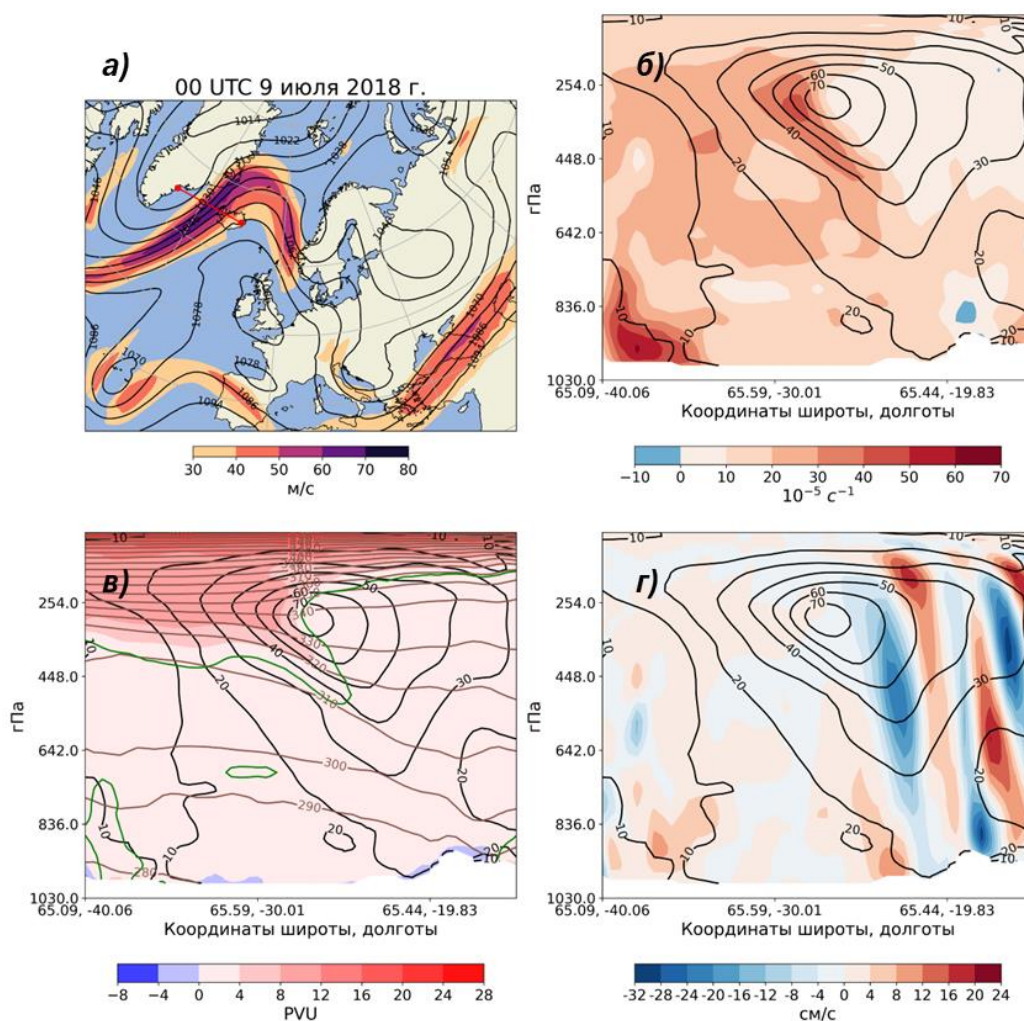


Рис. 4.11. Вертикальный разрез через область СТ с максимальной скоростью ветра в ядре на периферии высотного гребня в срок 00 UTC 9 июля 2018 г. (а); поле абсолютной завихренности (б); поле потенциальной завихренности (в); вертикальные скорости (г).

Вертикальные профили скорости ветра и температуры воздуха по модельным данным и данным аэрологического зондирования приводятся на рисунке 4.12 для станций, находящихся в зоне СТ в срок 00 UTC 9 и 10 июля 2018 года. В данном случае высота и скорость ветра в ядре СТ воспроизведены без существенных отклонений.

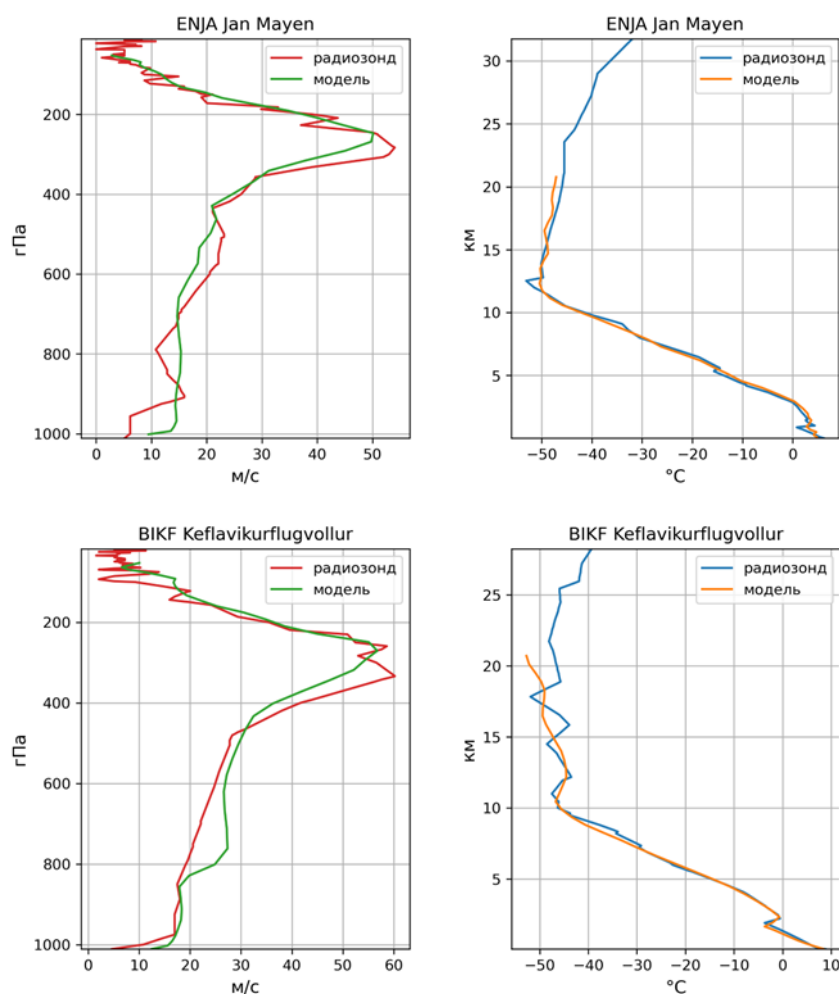


Рис. 4.12. Вертикальные профили скорости ветра (верхний ряд) и температуры воздуха (нижний ряд) для аэрологических станций в регионе обнаружения СТ в срок 00 UTC 9 и 10 июля 2018 года.

4.3. Основные выводы к главе 4

С использованием полей реанализов и результатов численного моделирования показаны особенности пространственного распределения и изменения в режимах североатлантической ветви СТ во время развития минорного ВСП, а также в периоды установления летних блокирующих антициклонов.

Для СТ в регионе Северной Атлантики получены различия в распределении повторяемости в течение месяца до и после ВСП. После ВСП обнаружение СТ возрастает в более южных широтах, по сравнению с

периодом до ВСП. Зоны с наибольшей изменчивостью численных значений повторяемости согласуются с областями изменения геопотенциальной высоты изобарической поверхности 250 гПа. В частности, показано, углубление высотных ложбин над Северной Америкой и Европой в период после ВСП способствовало смещению высотной фронтальной зоны в направлении экватора и обнаружению СТ в более южных широтах. Углубление высотных ложбин и понижение геопотенциала в свою очередь связано с вторжением стратосферного холодного воздуха, что хорошо отражено в поле потенциального вихря и положении динамической тропопаузы.

С использованием результатов численного моделирования негидростатической мезомасштабной модели WRF-ARW приводятся особенности географического положения и интенсивность полярных СТ, которые наблюдались в период образования двух эпизодов летнего блокирования над атлантико-евразийским регионом в июне 2010 и июле 2018 гг. Отмечены различия в распределении высотных барических образований и в характере обрушения планетарных волн, предшествующих установлению блокинга. В июне 2010 года наблюдалось сильно меандрированное, интенсивное СТ над акваторией Северной Атлантики, процесс обрушения волн и формирование блокинга отмечались над ЕЧР. В июле 2018 года СТ над Северной Атлантикой смещалось в направлении полюса и антициклональный тип опрокидывания волны отмечался над Скандинавских п-овом.

Сравнение вертикальных профилей скорости ветра и температуры воздуха, построенных по данным модели и аэрологических наблюдений в области СТ, показало, что модель наиболее адекватно воспроизводит высоту расположения ядра СТ. 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.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы заключаются в следующем:

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.

3. Применение метода количественной оценки интегральной кинетической энергии внетропических СТ в атлантико-евразийском регионе показало, что во все месяцы (за исключением мая, для которого отмечен статистически значимый на уровне 95% рост) не наблюдается достоверных изменений 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) 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Luiz E.W., Fiedler S. Global climatology of low-level-jets: Occurrence, characteristics, and meteorological drivers // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. – 2024. – V. 129. – № 9. – P. e2023JD040262.
2. Погосян Х.П. Струйные течения в атмосфере. – М.: Гидрометеиздат, 1960. – 183 с.
3. Riehl H. Jet streams of the atmosphere. – Colorado State University. Department of Atmospheric Science, 1962. – Tech. Rep. – № 32. – 117 p.
4. Hartmann D.L. Barotropic Instability of the Polar Night Jet Stream // *J. Atmos. Sci.* – 1983. – V. 40. P. 817–835.
5. Бугаев В.А., Джорджио В.А. Планетарная высотная фронтальная зона // *Труды ЦИП*. – 1951. – № 25. – С. 19–27.
6. Погосян Х.П. Планетарные высотные фронтальные зоны в Северном и Южном полушариях. – Л.: Гидрометеиздат, 1955. – 59 с.
7. Воробьев В.И. Высотные фронтальные зоны северного полушария. – Л.: Гидрометеиздат, 1968. – 232 с.
8. Разоренова О.А. Климатология высотных фронтальных зон Северного полушария в зимний период // *Метеорология и гидрология*. – 2016. – № 1. – С. 5–16.
9. Разоренова О.А., Шабанов П.А. Климатология и межгодовые смещения высотных фронтальных зон в средней тропосфере Северного полушария // *Доклады Академии наук*. – 2019. – Т. 487. – № 6. – С. 684–690.
10. Endlich R.M. A study of vertical velocities in the vicinity of jet streams // *J. Atmos. Sci.* – 1953. – V. 10. – P. 407–415.
11. Hubert W. A Case Study of Variations in Structure and Circulation about Westerly Jet Streams over Europe // *Tellus*. – 1953. – V. 5. – P. 359–372.
12. Murray R., Daniels S.M. Transverse flow at entrance and exit to jet streams // *Q.J.R. Meteorol. Soc.* – 1953. – V. 79. – P. 236–241.

13. Cressman G.P. Circulations of the West Pacific Jet Stream // *Mon. Wea. Rev.* – 1981. – V. 109. – P. 2450–2463.
14. Vederman J. The Life Cycles of Jet Streams and Extratropical Cyclones // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* – 1954. – 35. – P. 239–244.
15. Джорджио В.А., Петренко Н.В. Физическая природа струйных течений в атмосфере // *Физика атмосферы и авиационная метеорология. Научные труды.* – Ташкент: ФАН. – 1967. – № 289. – С. 44–97.
16. Röthlisberger M., Pfahl S., Martius O. Regional-scale jet waviness modulates the occurrence of midlatitude weather extremes // *Geophysical Research Letters.* – 2016. – V. 43. – № 10. – P. 989–997.
17. Обухов А.М., Курганский М.В., Татарская М.С. Динамические условия возникновения засух и других крупномасштабных погодных аномалий // *Метеорология и гидрология.* – 1984. – № 10. – С. 5–13.
18. Мохов И.И. Особенности формирования летней жары 2010 г. на Европейской территории России в контексте общих изменений климата и его аномалий // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* – 2011. – Т. 47. – № 6. – С. 709–716.
19. Мохов И.И. Российские климатические исследования в 2015-2018 гг. // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* – 2020. – Т. 56. – № 4. – С. 376–396.
20. Chen G., Nie Y., Zhang Y. Jet Stream Meandering in the Northern Hemisphere Winter: An Advection–Diffusion Perspective // *J. Climate.* – 2022. – V. 35. – P. 2055–2073.
21. Woollings T., Hannachi A., Hoskins B. Variability of the North Atlantic eddy-driven jet stream // *Q. J. R. Meteorol. Soc.* – 2010. – V. 136. – P. 856–868.
22. Nakamura N., Huang Clare S.Y. Atmospheric blocking as a traffic jam in the jet stream // *Science.* – 2018. – V. 361. – P. 42–47.
23. Rex D.F. Blocking action in the middle troposphere and its effect upon regional climate:

- I. An aerological study of blocking action // *Tellus*. – 1950. – V. 2. – P. 196–211.
- II. The climatology of blocking action // *Tellus*. – 1950. – V. 2. – P. 275–301.
24. Lupo A.R., Jensen A.D., Mokhov I.I. et al. Changes in global blocking character during recent decades // *Atmosphere*. – 2019. – V. 10. – № 2. – P. 92.
25. Belmecheri S., Babst F., Hudson A.M. et al. Northern Hemisphere jet stream position indices as diagnostic tools for climate and ecosystem dynamics // *Earth Interact.* – 2017. – V. 21. – № 8. – P. 1–23.
26. Galfi V.M., Messori G. Persistent anomalies of the North Atlantic jet stream and associated surface extremes over Europe // *Environ. Res. Lett.* – 2023. – V. 18. – № 2. – P. 024017.
27. Ma L., Woollings T., Williams R.G., Smith D., Dunstone N. How does the winter jet stream affect surface temperature, heat flux and sea ice in the North Atlantic? // *J. Climate*. – 2020. – V. 33. – № 9. – P. 3711–3730.
28. Ren X., Zhang Y., Xiang Y. Connections between wintertime jet stream variability, oceanic surface heating, and transient eddy activity in the North Pacific // *J. Geophys. Res.* – 2008. – V. 113. 3. D21119.
29. Rousta I., Esmaeili Mahmoudabadi A., Amini, P. et al. Identification of Patterns and Relationships of Jet Stream Position with Flood-Prone Precipitation in Iran during 2006–2019 // *Atmosphere*. – 2023. – V. 14. – № 2. – P. 351.
30. Spensberger C., Spengler T. Feature-Based Jet Variability in the Upper Troposphere // *J. Climate*. – 2020. – V. 33. – P. 6849–6871.
31. Zhang Y., Yan P., Liao Z., Huang D., Zhang Y. The Winter Concurrent Meridional Shift of the East Asian Jet Streams and the Associated Thermal Conditions // *J. Climate*. – 2019. – V. 32. – P. 2075–2088.
32. Дюкарев Е.А., Ипполитов И.И., Кабанов М.В., Логинов С.В. Изменчивость субтропического струйного течения в тропосфере Северного полушария во второй половине 20 в. // *Оптика атмосферы и океана*. – 2008. – Т. 21. – № 10. – С. 869–875.

33. Нерушев А.Ф., Вишератин К.Н., Ивангородский Р.В. Динамика высотных струйных течений по данным спутниковых измерений и их связи с климатическими параметрами и крупномасштабными атмосферными явлениями // Исследование Земли из космоса. – 2018. – № 6. – С. 24–38.
34. Hall R., Erdélyi R., Hanna E., Jones J.M., Scaife A.A. Drivers of North Atlantic polar front jet stream variability // Int. J. Climatol. – 2015. – V. 35. – P. 1697–1720.
35. Strong C., Davis R. Variability in the position and strength of winter jet stream cores related to Northern Hemisphere teleconnections // J. Climate. – 2008. – V. 21. – № 3. – P. 584–592.
36. Kidston J., Scaife A., Hardiman S. et al. Stratospheric influence on tropospheric jet streams, storm tracks and surface weather // Nature Geosci. – 2015. – V. 8. – P. 433–440.
37. Goss M., Lindgren E.A., Sheshadri A., Diffenbaugh N.S. The Atlantic jet response to stratospheric events: A regime perspective // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. – 2021. – V. 126. – P. e2020JD033358.
38. Шакина Н.П., Иванова А.Р. Прогнозирование метеорологических условий для авиации. Научно-методическое пособие. – М.: Триада ЛТД. – 2016. – 312 с.
39. Clem L.H. Clear-Air Turbulence Near the Jet-Stream Maxima // Bull. Amer. Meteor. Soc. – 1955. – V. 36. – P. 53–60.
40. Di Vito V., Zollo A.L., Cerasuolo G., Montesarchio M., Bucchignani E. Clear-Air Turbulence and Aviation Operations: A Literature Review // Sustainability. – 2025. – V. 17. – P. 4065.
41. Strong C., Davis R. Winter jet stream trends over the Northern Hemisphere. // Q. J. R. Meteorol. Soc. – 2007. – № 133. – P. 2109-2115.
42. Francis J.A., Vavrus S.J. Evidence for a wavier jet stream in response to rapid Arctic warming // Environ. Res. Lett. – 2015. – V. 10. – P. 014005.

43. Meleshko V.P., Johannessen O.M., Baidin A.V., Pavlova T.V., Govorkova V.A. Arctic amplification: does it impact the polar jet stream? // *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*. – 2016. – V. 68. – P. 32330.
44. Мохов И.И. Изменения климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования // *Вестник РАН*. – 2022. – Т. 92. – № 1. – С. 3–14.
45. Stendel M., Francis J., White R., Williams P.D., Woollings T. Chapter 15 – The jet stream and climate change. *Climate Change (Third Edition)*. – Elseiver. – 2021. – P. 327–357.
46. Ossó A., Bladé I., Karpechko A. et al. Advancing our understanding of eddy-driven jet stream responses to climate change – a roadmap // *Curr. Clim. Change Rep.* – 2025. – V. 11. – № 2. P. 1–20.
47. Namias J. Clapp P.F. Confluence theory of the high tropospheric jet stream // *J. Atmos. Sci.* – 1949. – V. 6. – № 5. – P. 330–336.
48. Riehl H., Alaka M.A., Jordan C.L., Renard R.J. The jet stream. *Meteorological monograph*. – American Meteorological Society, 1954. – V. 2. – № 7. – 100 p.
49. Джорджио В.А. Струйное течение. Труды Ташкентской геофизической обсерватории. – Л.: Гидрометеиздат, 1956. – С. 3-101.
50. Reiter E. Tropospheric circulation and jet streams. – Colorado State University. Department of Atmospheric Science, 1969. – № 153. – P. 85–203.
51. Dillman C.D. Jet streams: high altitude rivers of air // *J. Geogr.* – 1971. – V. 70. – № 9. – P. 525–540.
52. Bluestein H. Synoptic-dynamic meteorology in midlatitudes: Vol. II observations and theory of weather systems. – New York: Oxford University Press, 1993. 594 p.
53. Пальмен Э., Ньютон Ч. Циркуляционные системы атмосферы: Пер. с англ. – Л.: Гидрометеиздат, 1973. – 615 с.
54. Held I.M., Hou A.Y. Nonlinear Axially Symmetric Circulations in a Nearly Inviscid Atmosphere // *J. Atmos. Sci.* – 1980. – V. 37. – P. 515–533.

55. Lee S., Kim H. The Dynamical Relationship between Subtropical and Eddy-Driven Jets // J. Atmos. Sci. – 2003. – V. 60. – P. 1490–1503.
56. Kuang X., Zhang Y., Huang Y., Huang D. Spatial differences in seasonal variation of the upper-tropospheric jet stream in the Northern Hemisphere and its thermal dynamic mechanism. // Theor. Appl. Climatol. – 2014. – V. 117. – P. 103–112.
57. Krishnamurti T.N. The subtropical jet stream of winter // J. Atmos. Sci. – 1961. – V. 18. – P. 172–191.
58. Воробьев В.И. Макросиноптические условия образования и особенности термобарического поля струйных течений // Труды военного гидрометеорологического факультета Советской Армии. – 1956. – № 19. – С. 1–137.
59. Воробьев В.И. Струйные течения в высоких и умеренных широтах. – Л.: Гидрометеиздат, 1960. – 234 с.
60. Christenson C.E., Martin J.E., Handlos Z.J. A Synoptic Climatology of Northern Hemisphere, Cold Season Polar and Subtropical Jet Superposition Events // J. Climate. – 2017. – V. 30. – P. 7231–7246.
61. Harnik N., Galanti E., Martius O., Adam O. The anomalous merging of the African and North Atlantic jet streams during the Northern Hemisphere winter of 2010 // J. Climate. – 2014. – V. 27. – P. 7319–7334.
62. Lachmy O., Harnik N. The Transition to a Subtropical Jet Regime and Its Maintenance // Atmos. Sci. – 2014. – V. 71. – P. 1389–1409.
63. Koch P., Wernli H., Davies H. An Event-based jet-stream climatology and typology // Int. J. Climatol. – 2006. – V. 26. – P. 283–301.
64. Archer C.L., Caldeira K. Historical trends in the jet streams // Geophys. Res. Lett. – 2008. – V. 35. – P. L08803.
65. Погосян Х.П. Общая циркуляция атмосферы. – Л.: Гидрометеиздат, 1972. – 395 с.

66. Lupo A.R., Smith P.J. Climatological features of blocking anticyclones Northern Hemisphere // *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*. 1996. – V 48. – № 4. – P. 439–456.
67. Tyrlis E., Hoskins B.J. The morphology of Northern Hemisphere blocking // *Journal of the Atmospheric Sciences*. – 2008. – V. 65. – № 5. – P. 1653–1665.
68. Davini P. et al. European blocking and Atlantic jet stream variability in the NCEP/NCAR reanalysis and the CMCC-CMS climate model // *Clim. Dyn.* 2014. – V. 43. – № 1. – P. 71–85.
69. Хохлова А.В., Лавров А.С. Климатические характеристики тропосферных струйных течений Северного полушария по данным радиозондирования // *Фундаментальная и прикладная климатология*. – 2018. – Т. 3. – С. 96–107.
70. Pena-Ortiz C., Gallego D., Ribera P., Ordonez P., Alvarez-Castro M. D. C. Observed trends in the global jet stream characteristics during the second half of the 20th century // *J. Geophys. Res. Atmos.* – 2013. – V. 118. – № 7. – P. 2702–2713.
71. IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / [Masson-Delmotte V., et al. (eds.)]. Cambridge Univ. Press. – 2021.
72. Francis J.A., Vavrus S.J. Evidence linking Arctic amplification to extreme weather in mid-latitudes // *Geophysical Research Letters*. – 2012. – V. 39. – № 6.
73. Woollings T. Jet Stream: A Journey Through Our Changing Climate. – Oxford University Press, 2019. – 230 p.
74. Ивангородский Р.В., Нерушев А.Ф. Характеристики струйных течений верхней тропосферы по данным измерений европейских геостационарных метеорологических спутников // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. – 2014. – Т. 11. – № 1. – С. 45–53.

75. Doswell III C.A., Schaefer J.T. On the relationship of cirrus clouds to the jet stream // Mon. Wea. Rev. – 1976. – V. 104. – P. 105–106.
76. Международный метеорологический словарь. – ВМО, № 182, второе издание. 1992. 784 с.
77. Climate Reanalyzer: Today's Weather Maps. Climate Change Institute. University of Maine. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://climatereanalyzer.org/> (дата обращения 22.02.2025).
78. Strong C., Davis R. The surface of maximum wind as an alternative to the isobaric surface for wind climatology // Geophysical Research Letters. – 2005. – V. 32. – P. L04813.
79. Kern M., Hewson T., Sadlo F. et al. Robust detection and visualization of jet stream core lines in atmospheric flow // IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics. – 2017. – V. 24. – № 1. – P. 893–902.
80. Keel T., Brierley C., Edwards T. jsmetrics v0.2.0: a Python package for metrics and algorithms used to identify or characterise atmospheric jet streams // Geoscientific Model Development. – 2024. – V 17. – P.1229–1247.
81. Kobayashi et al. The JRA-55 Reanalysis: General Specifications and Basic Characteristics // Journal of the Meteorological Society of Japan. – 2015. – V. 93. – P. 5–48.
82. Витязев В.В. Вейвлет-анализ временных рядов: Учебное пособие. – СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та., 2001. – 58 с.
83. 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.
84. Hersbach H., Bell B., Berrisford P., et al. The ERA5 global reanalysis // Q. J. R. Meteorol Soc. – 2020. – V. 146. – P. 1999–2049.
85. Kalnay et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project // Bull. Amer. Meteor. Soc. – 1996. – V. 77. – № 3. – P. 437–472.

86. NASA Worldview. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://worldview.earthdata.nasa.gov/> (дата обращения 10.08.2025).
87. Вангенгейм Г.Я. Долгосрочный прогноз температуры воздуха и вскрытия рек // Труды ГГИ. – 1940. – № 10. – С. 207-236.
88. Гирс А.А. Макроциркуляционный метод долгосрочных метеорологических прогнозов. – Л.: Гидрометеиздат, 1974. – 488 с.
89. Обзор гидрометеорологических процессов в Северной полярной области 2019. Под ред. И.Е. Фролова. – СПб.: ААНИИ, 2020. – 94 с.
90. Обзор гидрометеорологических процессов в Северной полярной области 2020. Под ред. А.С. Макарова. – СПб.: ААНИИ, 2021. – 88 с.
91. Обзор гидрометеорологических процессов в Северной полярной области 2021. Под ред. А.С. Макарова. – СПб.: ААНИИ, 2022. – 94 с.
92. Обзор гидрометеорологических процессов в Северной полярной области 2022. Под ред. А.С. Макарова. – СПб.: ААНИИ, 2023. – 79 с.
93. 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.
94. 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.
95. Climate Indices: Monthly Atmospheric and Ocean Time Series // Physical Sciences Laboratory. NOAA. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://psl.noaa.gov/data/climateindices/list/> (дата обращения 07.11.2024).
96. Noyelle R., Guette V., Viennet A. et al. Decrease of the spatial variability and local dimension of the Euro-Atlantic eddy-driven jet stream with global warming // Clim. Dyn. – 2024. – V. 62. – P. 2285–2299.
97. Tenenbaum J., Williams P.D., Turp D., Buchanan P., Coulson R., Gill P.G. et al. Aircraft observations and reanalysis depictions of trends in the North

- Atlantic winter jet stream wind speeds and turbulence // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. – 2022. – V. 148. – № 747. – P. 2927–2941.
98. Храбров Ю.Б. Основные черты развития синоптических процессов в естественных синоптических периодах // Труды ЦИП. – 1957. – № 63. – С. 43-61.
99. Мониторинг общей циркуляции атмосферы. Северное полушарие: Справочное пособие (под ред. Вильфанда Р. М., Неушкина А. И.). – Обнинск: ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2012. – 123 с.
100. Основные особенности атмосферной циркуляции и погоды в Северном полушарии в январе 2021 года // Гидрометцентр России. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://meteoinfo.ru/categ-articles/92-circulation-review-new> (дата обращения 20.02.2025).
101. Barnes E.A. Revisiting the evidence linking Arctic amplification to extreme weather in midlatitudes // Geophys. Res. Lett. – 2013. – V. 40. – № 17. – P. 4734-4739.
102. Di Capua G., Coumou D. Changes in meandering of the Northern Hemisphere circulation // Environ. Res. Lett. – 2016. – V. 11. – № 9. – P. 094028.
103. Screen J.A., Simmonds I. Exploring links between Arctic amplification and mid-latitude weather // Geophys. Res. Lett. – 2013. – V. 40. – № 5. – P. 959-964.
104. Buchan J., Hirschi J.J., Blaker A.T. et al. North Atlantic SST anomalies and the cold North European weather events of winter 2009/10 and December 2010 // Monthly Weather Review. – 2014. – V. 142. – № 2. – P. 922-932.
105. Обзор гидрометеорологических процессов в Северном Ледовитом океане – 1 квартал 2016 года (под ред. Фролова И. Е.). – СПб, ААНИИ, 2016. – 52 с.
106. Hanna E., Fettweis X., Mernild S.H. et al. Atmospheric and oceanic climate forcing of the exceptional Greenland ice sheet surface melt in summer 2012 // Int. J. Climatol. – 2014. – V. 34. – № 4. – P. 1022-1037.

107. Барашкова Н.К., Кужевская И.В., Поляков Д.В. Экстремальный режим погоды летом 2012 г. на территории Томской области как отражение современных глобальных климатических тенденций // Вестник Томского государственного университета. – 2013. – № 372. – С. 173–179.
108. Tedesco M., Fettweis X. Unprecedented atmospheric conditions (1948–2019) drive the 2019 exceptional melting season over the Greenland ice sheet // The Cryosphere. – 2020. – V. 14. – № 4. – P. 1209-1223.
109. Yiou P., Cattiaux J., Faranda D. et al. Analyses of the Northern European Summer Heatwave of 2018 // Bull. Amer. Meteor. Soc. – 2020. – V. 101. – № 1. – P. S35-S40.
110. Основные погодно-климатические особенности сентября 2017 года // Гидрометцентр России. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://meteoinfo.ru/?option=com_content&view=article&id=14393 (дата обращения 07.11.2024).
111. Приказ Росгидромета "О внедрении актуализированных климатических норм в оперативно-производственную практику подведомственных учреждений Росгидромета" от 18.02.2022 № 64. М.: Росгидромет, 2022.
112. Degirmendžić J., Wibig J. Jet stream patterns over Europe in the period 1950–2001 - Classification and basic statistical properties // Theoretical and Applied Climatology. – 2007. – V. 88. – P. 149–167.
113. Scaife A.A., Knight J.R., Vallis G.K., Folland C.K. A stratospheric influence on the winter NAO and North Atlantic surface climate // Geophys. Res. Lett. – 2005. – V. 32. – P. 1–5.
114. Thompson D.W.J., Baldwin M.P., Solomon S. Stratosphere-troposphere coupling in the Southern Hemisphere // J. Atmos. Sci. – 2005. – V. 62. – P. 708–715.
115. Black R.X. Stratospheric forcing of surface climate in the Arctic oscillation // J. Clim. – 2002. – V. 15. – P. 268–277.
116. Baldwin M.P., Holton J.R. Climatology of the stratospheric polar vortex and planetary wave breaking // J. Atmos. Sci. – 1988. – V. 45. – P. 1123–1142.

117. Thompson D.W.J., Baldwin M.P., Wallace J.M. Stratospheric connection to Northern Hemisphere wintertime weather: Implications for prediction // *J. Climate*. – 2002. – V. 15. – P. 1421–1428.
118. Charlton A.J., Polvani L.M. A new look at stratospheric sudden warmings. Part I: Climatology and modeling benchmarks // *J. Climate*. – 2007. – V. 20. – P. 449–469.
119. Варгин П.Н., Володин Е.М., Карпечко А.Ю., Погорельцев А.И. О стратосферно-тропосферных взаимодействиях // *Вестн. РАН*. – 2015. – Т. 85. – № 1. – С. 39–46.
120. Seviour W.J.M., Gray L.J., Mitchell D.M. Stratospheric polar vortex splits and displacements in the high-top CMIP5 climate models // *J. Geophys. Res. Atmos.* – 2016. – V. 121. – P. 1–14.
121. Didenko K.A., Bezotecheskaya E.A., Maurchev 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.
122. McIntyre M.E. Dynamical meteorology: potential vorticity // *Encyclopedia of Atmospheric Sciences. Second Edition*. – 2014. – V. 2. – P. 375–383.
123. Иванова А.Р. Тропопауза – многообразие определений и современные подходы к идентификации // *Метеорология и гидрология*. – 2013. – № 12. – С. 23–36.
124. Шакина Н.П., Иванова А.Р. Блокирующие антициклоны: современное состояние исследований и прогнозирование // *Метеорология и гидрология*. – 2010. – № 11. – С. 5–18.
125. Иванова А.Р., Шакина Н.П., Скриптунова Е.Н., Богаевская Н.И. Сравнение динамических характеристик блокирующего антициклона лета 2010 года с более ранними эпизодами // *Сборник докладов под ред. Шакиной Н.П. ГУ «Гидрометцентр России»*. – М.: Триада ЛТД. – 2011. – С. 65–71.

126. Шакина Н.П., Иванова А.Р., Бирман Б.А., Скриптунова Е.Н. Блокирование: условия лета 2010 года в контексте современных знаний // Сборник докладов под ред. Шакиной Н.П. ГУ «Гидрометцентр России». – М.: Триада ЛТД. – 2011. – С. 6–21.
127. Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J. et al. A Description of the Advanced Research WRF Version 3 // NCAR Tech. Notes, 2008. – 113 p.
128. NCEP FNL Operational Model Global Tropospheric Analyses, continuing from July 1999. Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research. – Режим доступа: <https://rda.ucar.edu/datasets/d083002/> (дата обращения 10.11.2023).
129. Davini P., Cagnazzo C., Gualdi S., Navarra A. Bidimensional diagnostics, variability and trends of Northern Hemisphere blocking // Journal of Climate. – 2012. – V. 25. – № 19. – P.6496–6509.
130. Tibaldi S., Molteni F. On the operational predictability of blocking // Tellus. – 1990. – № 42A. – P. 343–365.
131. Scherrer S., Croci-Maspoli M., Schwierz C., Appenzeller C. Two-dimensional indices of atmospheric blocking and their statistical relationship with winter climate patterns in the Euro-Atlantic region // International Journal of Climatology. – 2006. – № 26. – P. 233– 249.
132. Soundings data // University of Wyoming. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html> (дата обращения 01.03.2025).