

УТВЕРЖДАЮ

Директор

ФГБУН «Институт вычислительной
математики и математической геофизики
Сибирского отделения
Российской академии наук»
доктор физико-математических наук,
профессор РАН



М.А. Марченко

10 декабря 2025 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

На диссертационную работу Безотеческой Евгении Андреевны
«Пространственное распределение и изменчивость верхнетропосферных струйных
течений северного полушария»,

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по
специальности 1.6.18. — «Науки об атмосфере и климате».

Диссертационная работа Е.А. Безотеческой посвящена решению следующих задач:

1. проведение анализа широтно-долготного и широтно-высотного распределения повторяемости ядер струйных течений (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. проведение анализа 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

Научная новизна

Новизна данной работы состоит в том, что:

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. 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

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость

- В работе представлены результаты анализа изменчивости СТ и ПВФЗ Северного полушария на фоне глобального потепления климата, особенно проявившегося в последние десятилетия.
- 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.

Практическая значимость

- Метод выделения ядра СТ, применимый на любых уровнях атмосферы, позволяет исследовать основные характеристики СТ, включая интенсивность и пространственное положение.
- Алгоритм может быть легко воспроизведен на любом из доступных языков программирования, что позволяет автоматизировать обработку больших объемов данных.

Достоверность результатов исследования обеспечивается: использованием современных данных 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

Диссертация организована следующим образом:

Во Введении дана общая характеристика работы, обозначены цели, обоснована актуальность решаемых задач, научная новизна и практическая значимость, достоверность, апробация результатов диссертации и личный вклад автора.

В первой главе дано современное представление о струйных течениях, физическая природа и механизм формирования струйных течений, классификация и основные типы струйных течений Северного полушария, роль струйных течений в атмосферных процессах и динамике погоды, струйные течения в контексте изменения климата, дан обзор современных исследований и ключевые вопросы, методы изучения струйных течений.

Основные выводы к главе 1:

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.
2. Выделяют две основные системы СТ: субтропически (ССТ) и полярные СТ, различающиеся по физическим механизмам формирования, климатологическому положению и характеристикам.
3. СТ играют фундаментальную роль в формировании погоды и климата. Они определяют траектории внетропических образований, связаны с процессами циклогенеза, а также являются ключевыми факторами возникновения крупномасштабных аномалий циркуляции, таких как атмосферные блокинг. СТ оказывают влияние на режимы температуры и осадков у земной поверхности, модулируют взаимодействие океана и атмосферы.
4. 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.
5. 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.

Во второй главе дано описание методов выделения ядра струйного течения: Метод выделения ядра струйного течения в трехмерном поле ветра; Верификация метода по расположению гряд перистых облаков на спутниковых снимках; Распределение повторяемости ядер струйных течений в атлантико-евразийском регионе.

Основные выводы к главе 2:

1. разработан универсальный метод выделения ядер СТ по данным о ветре в узлах регулярной сетки, которые могут быть данные реанализа и данные моделирования с произвольным разрешением.
2. С использованием данных трех реанализов различного пространственного разрешения и спутниковых снимков с выраженными грядами перистых облаков была выполнена верификация метода
3. 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.

В третьей главе представлены результаты анализа кинетической энергии СТ в атмосфере Северного полушария, 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. Оценена также доля объема атмосферных слоев в области СТ в общем анализируемом слое атмосферы 500-100 гПа. Приводятся результаты анализа кинетической энергии внетропических СТ атлантико-евразийского региона ее изменений в годовом ходе и межгодовой изменчивости. Для количественной оценки степени меандрирования СТ приводятся оценки доли кинетической энергии, соответствующие меридиональной составляющей. В качестве дополнительного параметра приводятся результаты анализа широтно-долготного распределения планетарной высотной фронтальной зоны Северного полушария и оценки ее изменчивости.

Основные выводы к главе 3:

1. проведено исследование изменчивости струйных течений СП за последние десятилетия, представлены результаты анализа кинетической энергии СТ в атмосфере СП и ее изменений в годовом ходе и межгодовой изменчивости с использованием данных реанализа для периода (1980–2021 гг.)
2. приведены соответствующие оценки доли общей кинетической энергии атмосферы СП, связанной со СТ; приводятся результаты анализа кинетической энергии внетропических СТ атлантико-евразийского региона ее изменений в годовом ходе и межгодовой изменчивости, для количественной оценки степени меандрирования СТ
3. получены оценки доли кинетической энергии, соответствующие меридиональной составляющей скорости,
4. получены результаты анализа широтно-долготного распределения планетарной высотной фронтальной зоны Северного полушария и оценки ее изменчивости, проводится сравнение с результатами, полученными с применением JRA-55.

В четвёртой главе представлены результаты исследования особенностей пространственного распределения струйных течений в Атлантико-Евразийском регионе. Отмечается, что 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. 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

Основные выводы к главе 4:

1. С использованием полей реанализов и результатов численного моделирования показаны особенности пространственного распределения и изменения в режимах североатлантической ветви СТ во время развития внезапного стратосферного потепления (ВСП), а также в периоды установления летних блокирующих антициклонов.
2. 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.
3. 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. Углубление высотных ложбин и понижение геопотенциала в свою очередь связано с вторжением стратосферного холодного воздуха, что было отражено в поле потенциального вихря и положении динамической тропопаузы.

В Заключение изложены основные результаты диссертационной работы и возможные направления дальнейшей работы.

Некоторые замечания по тексту – к сожалению в данном исследовании:

1. Не было отмечено (в обзоре первой главы), что область вокруг ядра струйного течения характеризуется резким горизонтальным градиентом потенциальной завихренности (ПВ) с низким ПВ в тропосфере и высоким ПВ в стратосфере, при этом ключевую роль в переносе импульса и тепла играют вихревые потоки Элиассена-Пальма (Э-П). Вихревые потоки сосредоточены в верхней тропосфере и отвечают за конвергенцию вихревого потока импульса, связанного с созданием и поддержанием струйного течения. Это взаимодействие влияет на положение и интенсивность струйного течения.
2. Отсутствуют математические рамки для более строгого описания метода определения ядра струйного течения с использованием данных о ветре, полученных с помощью регулярной сетки (сопряжено со сложностью структуры струйного течения, с проблемами

меандрирования, бифуркации, слияния струйного течения, а также со сложностью последовательного отслеживания линии ядра с течением времени).

Тема диссертации является актуальной и направлена на решение научной проблемы, которая имеет очень важную теоретическую и практическую ценность и новизну.

Основные результаты исследований по теме диссертации неоднократно докладывались на международных и всероссийских совещаниях и конференциях, научных семинарах.

По результатам работы опубликовано 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.

Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации.

Суммируя вышесказанное, можно утверждать, что данная кандидатская диссертация выполнена на высоком современном научном уровне. Диссертационная работа Безотеческой Е.А. соответствует пп. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней» (Постановление Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года №842) и удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.6.18. — «Науки об атмосфере и климате».

Доклад Е. А. Безотеческой по диссертации и отзыв на нее обсуждались на заседании семинара ИВМиМГ СО РАН "Общеинститутский семинар" 05.11.2025.

Отзыв подготовил:

Заместитель директора по научной работе
ИВМиМГ СО РАН

д.ф.-м.н. специальность 05.13.18
«Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ»



А.В. Пененко

Я, Пененко Алексей Владимирович, согласен на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета и их дальнейшую обработку.



Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук (ИВМиМГ СО РАН)

Адрес: 630090, г. Новосибирск, проспект академика Лаврентьева, 6.

Факс: +7 (383) 330 87 83. Тел.: +7 (383) 330 83 53. Эл. Почта: contacts@sscc.ru.

Интернет-сайт: www.sccc.ru

Подпись А.В. Пененко заверяю

Ученый секретарь ИВМиМГ СО РАН, к.ф.-м.н.



Л.В. Вшивкова