

ОТЗЫВ

**официального оппонента на диссертацию на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
Арутюняна Давида Арменовича
на тему: «Динамика квазигеострофического эллипсоидального вихря в
баротропном и бароклинном потоках»
по специальности 1.6.17 Океанология**

Актуальность темы и краткая характеристика работы

Диссертационная работа Арутюняна Давида Арменовича посвящена исследованию динамики эллипсоидальных вихрей в сдвиговых потоках. Проблема вихревой изменчивости океана имеет фундаментальное значение для современной океанологии, поскольку вихри играют ключевую роль в переносе импульса, тепла и вещества, а также в механизмах энергетического обмена между крупно- и мелкомасштабными вихревыми движениями.

Актуальность исследования определяется важностью изучения механизмов взаимодействия мезомасштабных вихрей с фоновыми течениями, от которых зависят перераспределение энергии и формирование крупномасштабной циркуляции океана. Понимание этих процессов необходимо для построения устойчивых климатических моделей. Выполненный в диссертации анализ позволяет раскрыть физическую природу устойчивости и распада вихревых структур в стратифицированных потоках, а также уточнить пределы применимости геострофического приближения.

Несмотря на значительное развитие теоретических и численных подходов, многие вопросы, касающиеся устойчивости и энергетики вихрей в стратифицированных условиях, остаются открытыми. Работа Арутюняна Д.А. вносит весомый вклад в развитие этого направления, предлагая системный анализ поведения эллипсоидальных вихрей в бароклинных и баротропных потоках, их энергии и степени геострофичности. Диссертация отличается высоким уровнем теоретической строгости, ясной структурой и продуманной логикой изложения. Автор сочетает аналитические методы и численные расчёты, что позволило получить ряд новых результатов. Таким образом, работа

вносит существенный вклад в развитие современной вихревой динамики океана.

Содержание диссертации

Во введении приводится история возникновения взрыва исследовательского интереса к океаническим вихрям. Приводится классификация их по масштабам, указывается характер влияния на них вращения Земли и приводятся примеры реально наблюдавшихся вихрей в океане.

В первой главе рассмотрено поведение эллипсоидального вихря во внешнем бароклинном потоке с однородным вертикальным сдвигом скорости. Автор выполнил аналитическое исследование уравнений движения в квазигеострофическом приближении и построил численные решения, позволяющие проследить эволюцию формы и параметров вихря. В результате установлено существование *трёх режимов поведения вихря*:

- режим выживания – вихрь остаётся в локализованном состоянии сколь угодно долго, практически не изменяя размеры ядра;
- режим конечного времени жизни – колебательная фаза спустя некоторое время сменяется режимом вытягивания ядра вихря в горизонтальной плоскости, что приводит к постепенному распаду вихревой структуры;
- режим неограниченного вытягивания – вытягивание вихря начинается с начального момента времени.

Построены карты областей существования указанных режимов в пространстве безразмерных параметров и определены границы устойчивости. Показано, что интенсивность вертикального сдвига скорости течения определяет переход между устойчивыми и неустойчивыми состояниями. Эти результаты позволили впервые систематизировать динамику трёхмерных вихревых структур в бароклиновых потоках.

Во второй главе исследована *энергетика вихрей* и механизмы обмена энергией между вихрем и внешним потоком. Рассчитаны временные измене-

ния кинетической и доступной потенциальной энергий при вытягивании вихря в баротропных и бароклинных течениях. Показано, что при деформации вихря его энергия уменьшается. Этот процесс объясняется как проявление *обратного энергетического каскада*, играющего важную роль в динамике стратифицированных сред. Построены зависимости изменения энергии от геометрических характеристик вихря. Полученные результаты дополняют существующие представления о механизмах перераспределения энергии в мезомасштабных процессах в океане.

В **третьей главе** проведён анализ изменения *числа Россби* в изучаемых движениях при различных режимах деформации. Как известно, оно определяет степень выполнимости геострофического приближения. Автор показал, что в бароклинных потоках вихрь сохраняет геострофическое равновесие на протяжении всей эволюции, тогда как в баротропных потоках при вытягивании наблюдается рост числа Россби и переход к *агеострофическому* состоянию. Этот результат имеет важное значение для оценки пределов применимости квазигеострофических моделей и для понимания физических механизмов разрушения вихрей.

В **заключении** подведены итоги работы и сформулированы основные научные результаты: установление режимов поведения вихрей, выявление закономерностей энергетического обмена и определение условий сохранения геострофичности.

Научная новизна и практическая значимость

1. Впервые классифицированы режимы поведения вихрей в бароклинных потоках с постоянным вертикальным сдвигом и построены карты их устойчивости.
2. Выявлен механизм разрушения вихрей, заключающийся в перекачке энергии от вихря к течению. Дана его интерпретация как обратного энергетического каскада.

3. Указаны различия в поведении числа Россби в баротропных и бароклинических условиях и установлены критерии перехода к агеострофическому режиму.

Практическая значимость работы состоит в возможности применения полученных закономерностей в численных моделях циркуляции океана, а также при интерпретации данных спутниковых наблюдений вихревых структур.

Замечания по диссертации

1) Автор пишет: "Теоретическое исследование вихрей началось с работ Кирхгофа" (стр. 8) и при этом ссылается на классический учебник Г. Ламба. Но в начале главы "Вихревое движение" этой книги сказано: "Мы переходим теперь к изучению вихревого движения. Эта область была впервые исследована Гельмгольцем". Теоремы Гельмгольца, понятие точечного вихря и решение Рэнкина для кругового вихря появились ранее классической работы Кирхгофа об эллиптическом вихре в его лекциях по математической физике (1876).

2) В качестве примера, обобщающего вихрь Кирхгофа (стр. 8), автор приводит исследование С.А. Чаплыгина об эллиптическом вихре в сдвиговом потоке (1948), решение Kida об эллиптическом вихре во внешнем сдвиговом и линейном деформационном поле (1981) и результат Polvani, Flierl о системе N конфокальных стационарных эллиптических вихрей (1986). В этом списке отсутствуют отечественные результаты:

а) Абрашкин А.А., Якубович Е.И. ДАН СССР, 1984. Т. 276. №1. С. 76-78. В статье дано аналитическое описание динамики неоднородно завихренных, нестационарных вихрей произвольной начальной формы в окружающем потенциальном течении. Частным случаем этого класса точных решений является вихрь Кирхгофа.

б) Абрашкин А.А. Изв. АН СССР. Мех. жидк. и газа. 1987. №1. С. 62-68. В статье дано аналитическое описание динамики эллиптического вихря в линейном по координатам потенциальном деформационном поле. Оно сов-

падает с решением Kida, если завихренность внешнего потока (в решении Kida) положить равной нулю. Если считать деформационное внешнее поле в статье б) равным нулю, то оно переходит в решение Кирхгофа.

3) Стр. 22. Формула (10), конечно же, следует из общей теории гравитационного потенциала, изложенной в книге *А.Н. Тихонова и А.А. Самарского "Уравнения математической физики" (1977)*. Но в этой книге она не выводится. Автору стоило бы, на наш взгляд, лучше сослаться, например, на книгу:

Дубошин Г.Н. Небесная механика. Основные задачи и методы. М.: Наука, 1968,

и отдельно отметить вклад Дирихле в ее оригинальный вывод.

4) В механике жидкости имеется ряд красивых результатов о движении жидких эллипсоидов со свободной границей при отсутствии силы тяжести (см., например, книгу Андреев В.К. Устойчивость неустановившихся движений жидкости со свободной границей. Новосибирск: Наука, 1992). В небесной механике изучение динамики гравитирующих эллипсоидов составляет целое направление (см., например, Кондратьев Б.П. Теория потенциала. Новые методы и задачи с решениями. М.: Мир, 2007). Было бы замечательно, если бы автор сопоставил свои геофизические результаты с известными моделями в гидродинамике и небесной механике. В них вихрей (эллипсоидов) с конечным временем жизни не существует (следствие отсутствия сдвигового потока). В этом смысле открытый Д.А. Арутюняном режим выглядит как исключительно яркое достижение.

5) Автор сопоставляет результаты теории с натурными данными для мезомасштабного антициклонического вихря в Лофотенской котловине и делает вывод: "Расхождения между теоретическими результатами и натурными измерениями несущественны". Здесь стоило бы указать, что свои решения автор получил для случая постоянной частоты Брента-Вяйсяля и однородного сдвига внешнего течения, и близость значений свидетельствует, что для данного вихря отличия стратификации от экспоненциальной, а профиля по-

тока от линейного не столь существенны. Иными словами, построенная модель имеет рамки применимости.

6) По тексту диссертации отметим ряд неудачных выражений - высокопродуктивные акватории (стр. 4); баротропно-бароклиная неустойчивость (стр. 5); продуктивность океана (стр. 7); энергетика вихрей деградирует (стр. 12); идеальная невязкая жидкость (стр. 18), изменение формы жидкой частицы (стр. 19), конструкция эллипсоидального вихря (стр. 20). А также опечатки: стр. 4 – частота Вайсяля-Брента (надо наоборот); стр. 23 – формула (12): интегрирование по ds вместо dm .

Заключение

Диссертация представляет собой законченное научное исследование, выполненное на высоком уровне теоретического и вычислительного анализа. Работа отличается научной новизной, достоверностью и практической значимостью полученных результатов и вносит существенный вклад в развитие теории вихревых движений в океане. Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.6.17 Океанология (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова. Диссертационное исследование оформлено согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Таким образом, соискатель Арутюнян Давид Арменович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.6.17 Океанология.

Официальный оппонент:

Доктор физико-математических наук,
профессор кафедры математики
факультета информатики, математики и компьютерных наук
Национального исследовательского университета
“Высшая школа экономики” (НИУ ВШЭ) Нижний Новгород
Абрашкин Анатолий Александрович

h D

v

21.11.2025

Контактные данные:

тел.: +7 (920)-294-63-61, e-mail: aabrashkin@hse.ru
Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация:
01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

Адрес места работы:

603155, г. Нижний Новгород, ул. Родионова, д. 136,
НИУ ВШЭ, факультет информатики, математики и компьютерных наук,
Кафедра математики
Тел.: (831)4320042; e-mail: egromov@hse.ru

Подпись сотрудника НИУ ВШЭ А.А. Абрашкина
удостоверяю:
Начальник отдела кадров

[Signature]

Н.А. Ермолина

21.11.2025

