

На правах рукописи



Суетин Борис Павлович

ГИДРОДИНАМИКА УЕДИНЁННЫХ МЕЗОМАСШТАБНЫХ
ЭЛЛИПСОИДАЛЬНЫХ ВИХРЕЙ В БАРОТРОПНЫХ ПОТОКАХ

Специальность 1.6.17 – Океанология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, профессор

Жмур Владимир Владимирович

Официальные оппоненты: **Курганский Михаил Васильевич,**

доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук

Троицкая Юлия Игоревна,

доктор физико-математических наук, заведующий Лабораторией нелинейных волновых процессов в геофизической гидродинамике Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Морской гидрофизический институт РАН»

Защита состоится «__» _____ 2023 г. в __ ч. __ мин. на заседании диссертационного совета 24.1.090.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук по адресу: Нахимовский пр., д. 36, г. Москва, 117997.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <https://disser.ocean.ru> Института океанологии ми. П.П. Ширшова Российской академии наук.

Автореферат разослан «__» _____ 2023 г.

Учёный секретарь диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук

Соловьев Дмитрий
Александрович

Общая характеристика работы

Актуальность темы и её разработанность. Вихри наряду с потоками (течениями) являются основными элементами динамики Мирового океана. Это один из главных механизмов горизонтального перемешивания. Вихри оказывают влияние на локальную погоду, осуществляют перенос водных масс (тепла, соли и других веществ) на значительные расстояния. При этом в ряде случаев такой механизм переноса водных масс является единственным. Океанические вихри в отличие от вихрей атмосферы являются существенно трёхмерными, поэтому для их корректного описания необходимо развивать теорию, учитывающую конечность вертикального размера. При этом уединённый мезомасштабный вихрь океана, находящийся во внешнем потоке весьма распространённое явление. В результате чего рассмотрение режимов его поведения, в частности режима неограниченно вытягивания приобретает большое значение. Ибо вытягивание мезомасштабного вихря в субмезомасштабную вихревую нить является механизмом, оказывающим существенное влияние на распределение энергии в океане на разных масштабах.

После экспериментального подтверждения факта существования океанических вихрей возникла необходимость их теоретического описания. Первой, неотъемлемой предпосылкой теоретического (аналитического) рассмотрения вихрей в потоках является наличие пригодной для этого математической модели. К началу XX века такая модель уже была – это плоский вихрь Кирхгоффа. Именно на примере вихря Кирхгоффа С.А. Чаплыгин в 1948 изучал деформацию вихря потоком с постоянным сдвигом. Но океанические вихри существенно трёхмерны и двумерное приближение далеко не всегда хорошо их описывает. Исследование плоского вихря в неоднородном потоке, линейным по координатам осуществил японец С. Кида в 1981. Он показал, что в этом случае граница вихря имеет три режима поведения: неограниченное вытягивание, нутационное колебание и вращение. Кроме физических результатов им был получен и важный методический результат, а именно, была указана система координат в которой удобно рассматривать задачу.

Для количественного, а не только качественного описания океанических вихрей требовалась теория, которая бы учитывала ограниченность вихрей в вертикальном направлении, стратификацию и вращение. Такая теория была создана В.В. Жмуром и его учениками. Дальнейшему развитию данной теории, в части изучения условий при которых реализуются различные режимы поведения вихрей и посвящена эта работа.

Цели и задачи диссертации:

1. Дальнейшее развитие теории мезомасштабной изменчивости океана и применения её к реальным условиям атмосферы и океана.
2. Развитие теории эллипсоидальных вихрей, в части определения условий при которых реализуются различные режимы поведения мезомасштабных вихрей океана.
3. Исследование временных характеристик различных режимов поведения мезомасштабных вихрей.

Научная новизна работы заключается в том, что:

1. Поставлена и решена задача о различных типах поведения эллипсоидальных вихрей в баротропных течениях.
2. Впервые представлена карта областей поведения эллипсоидальных вихрей в удобных безразмерных координатах.
3. Оценены характерные времена эволюции вихрей на всех режимах поведения.
4. Создана модель Большого Красного Пятна Юпитера, позволившая связать воедино все физические характеристики вихря и потока, в котором он находится.

Научная и практическая значимость. В работе было осуществлено исчерпывающее исследование режимов поведения уединённых эллипсоидальных мезомасштабных вихрей. Что позволило продвинуть теорию эллипсоидальных вихрей. В частности, были получены достаточные условия неограниченного вытягивания мезомасштабных вихрей. На основе чего удалось указать районы Мирового океана, где следует ожидать вытягивание вихрей в вихревые нити. Это

позволило лучше понять способы перераспределения энергии в океане по различным масштабам и показать роль вытягивающихся вихрей в динамике океана.

Методология и методы исследования. Данная работа строится в первую очередь на строгой математической формализации задачи и классических, аналитических методах исследования. Численные методы привлекаются скорее, как технические средства, нежели, как средства анализа результатов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Впервые построена карта областей поведения эллипсоидальных вихрей для произвольного значения параметра вертикальной сплюснутости ядра (обобщена на трёхмерный случай работа С. Кида), и на её основе дана оценка доли вытягивающихся, мезомасштабных вихрей Мирового океана.
2. Показано, что характерное, безразмерное время для всех режимов поведения мезомасштабных вихрей океана одинаково по порядку величины: $1 < et < 10$, а размерное время в зависимости от коэффициента деформации e варьируется от нескольких дней до месяца.
3. Построена бароклиническая модель Большого Красного Пятна Юпитера, на основе которой рассчитан вертикальный размер вихря, хорошо согласующийся с результатами наблюдений.
4. Предложено объяснение явления возникновения мезомасштабного вихря из филамента, и показано, что в таком процессе вихрь в области состояния максимальной локализации проводит большую часть времени всего своего существования.

Степень достоверности с одной стороны, обусловлена применяемой методологией исследования, с другой стороны, её достоверность подтверждается согласованием теоретических и экспериментальных данных, представленных в Главе 3.

Основные результаты работы проходили **апробацию** на следующих научных конференциях и семинарах:

1. Заседание Учёного совета Физического направления Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН (Москва 2022, Москва 2023).

2. Международная конференция «XX научная школа «Нелинейные волны» (Нижний Новгород 2022)
3. Семинар Лаборатории морских течений под руководством чл.-корр. РАН В.В. Жмура (Москва 2023).

Личный вклад автора. Все результаты диссертации получены лично соискателем при научном руководстве доктора физико-математических наук, члена-корреспондента РАН, профессора Жмура В.В.

Личный вклад соискателя в работах с соавторами заключается в следующем: [1-3, 5] – определены условия при которых реализуются различные режимы поведения мезомасштабных вихрей океана, что фактически является теоретическим базисом данных работ; [4] – выведено ключевое соотношение, связывающее между собой параметры Большого Красного Пятна Юпитера и течения, в котором оно находится.

Публикации соискателя по теме диссертации. По теме диссертации опубликовано 6 работ. Из них: 4 статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК; 2 тезиса докладов на международных конференциях.

Объём и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения и двух приложений. Полный объём диссертации составляет 199 страниц с 212 рисунками и 17 таблицами. Список литературы содержит 64 наименования.

Основное содержание работы

Во **Введении** в соответствии с ГОСТ Р 7.0.11-2011 содержит: актуальность темы исследования, степень её разработанности, цели и задачи работы, научную новизну, теоретическую и практическую значимость работы, методологию и методы исследования, положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробацию результатов.

Первая глава содержит главный результат работы – решение задачи об определении условий при которых реализуются различные режимы поведения

мезомасштабных вихрей. А также, важное с методической стороны, аналогичное исследование плоского вихря Кирхгоффа.

Параграф 1, с одной стороны посвящён обсуждению и пояснению поставленной задачи, с другой стороны в нём содержится процедура её математической формализации.

При постановке задачи освещаются основные моменты теории эллипсоидальных вихрей, в частности необходимые условия применимости теории: справедливость приближения f -плоскости, наличие геострофического баланса сил ($Ro = \frac{U}{fL} \ll 1$), линейность внешнего баротропного потока по горизонтальными координатам. Кроме этого на основе закона сохранения потенциальной завихренности выводится система уравнений (1).

$$\begin{cases} \dot{\varepsilon} = 2e\varepsilon\cos 2\theta \\ \dot{\theta} = \omega(\varepsilon) + \gamma - e \frac{\varepsilon^2 + 1}{\varepsilon^2 - 1} \sin 2\theta \end{cases} \quad (1)$$

Которая описывает связь параметров вихря с параметрами течения. В системе (1) ε – относительное удлинение вихря по горизонтали (отношение горизонтальных полуосей эллипсоида), $\dot{\varepsilon}$ – скорость удлинения вихря [$\frac{1}{c}$], θ – угол поворота вихря вокруг вертикальной оси [рад], $\dot{\theta}$ – угловая скорость [$\frac{\text{рад}}{c}$], e – коэффициент деформации [$\frac{1}{c}$], γ – угловая скорость вращения жидких частиц [$\frac{1}{c}$], $\omega(\varepsilon)$ – угловая скорость вращения вихря в отсутствии внешнего течения.

Исследуя её первый интеграл (2), где S – константа интегрирования

$$\sin 2\theta = S \frac{\varepsilon}{\varepsilon^2 - 1} + \frac{\gamma \varepsilon - 1}{e \varepsilon + 1} + \frac{\varepsilon}{\varepsilon^2 - 1} \int_1^{\varepsilon} \frac{\mu^2 - 1}{\mu^2} \frac{\omega(\mu)}{e} d\mu. \quad (2)$$

Даётся объяснение, как связаны режимы поведения вихрей и интегральные кривые семейства (2). На Рисунке 1 представлена картина интегральных кривых для некоторого частного случая значения параметров.

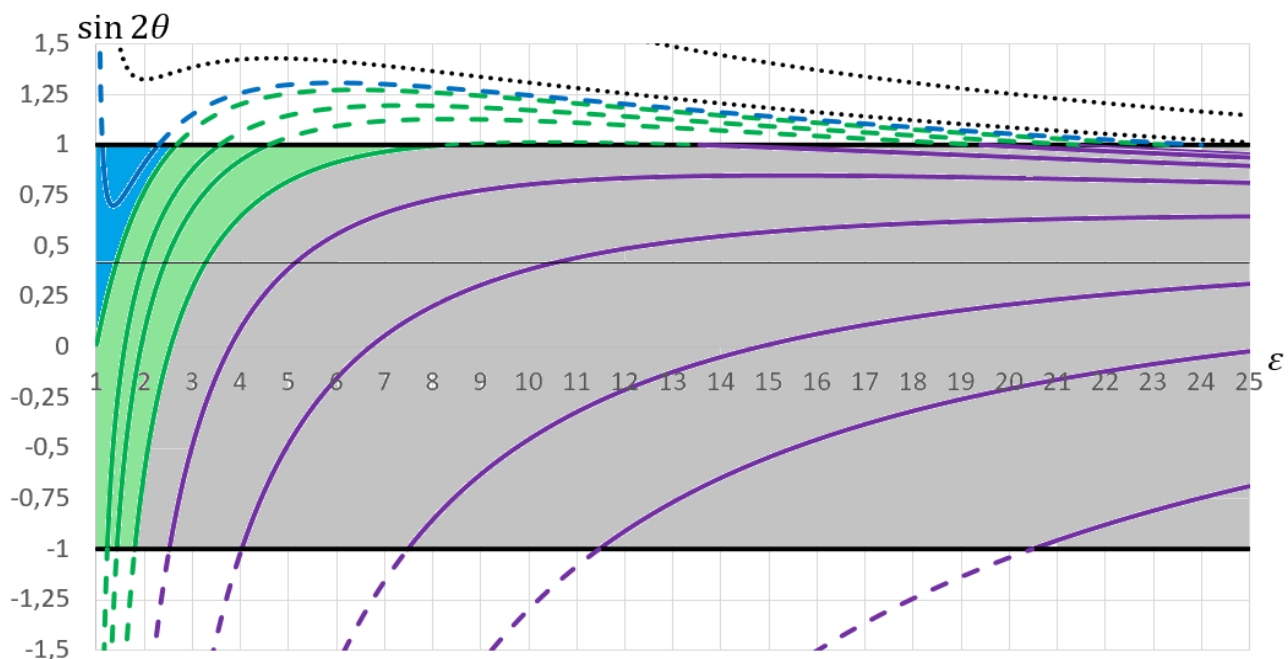


Рисунок 1 – Картина интегральных кривых семейства (2)

Кривые сиреневого цвета соответствуют режиму неограниченного вытягивания вихрей, кривые зелёного цвета соответствуют режиму вращения, а кривые синего цвета соответствуют режиму колебания.

Анализируя картины аналогичные Рисунку 2 для различных частных случаев и исследуя уравнение (2) удалось перейти от качественной формулировки задачи: **«В рамках теории эллипсоидальных вихрей определить условия при которых реализуются различные режимы (неограниченное вытягивание, колебание, вращение) поведения мезомасштабных вихрей»** к математической: **«Построить биекцию между множеством точек плоскости параметров задачи и множеством картин интегральных кривых, задаваемых уравнением (2). После чего, выделить на этой плоскости подмножества, каждое из которых соответствует своему классу эквивалентности картин»**. Для чего были введены классы эквивалентности кривых и классы эквивалентности картин интегральных кривых.

Следующие два параграфа посвящены исключительно решению поставленной задачи. В §2 и §3 рассматривается случай плоского вихря Кирхгофа и случай эллипсоидального вихря соответственно. В результате удалось получить

карту областей поведения эллипсоидальных вихрей. На Рисунке 2 она представлена для частного случая.

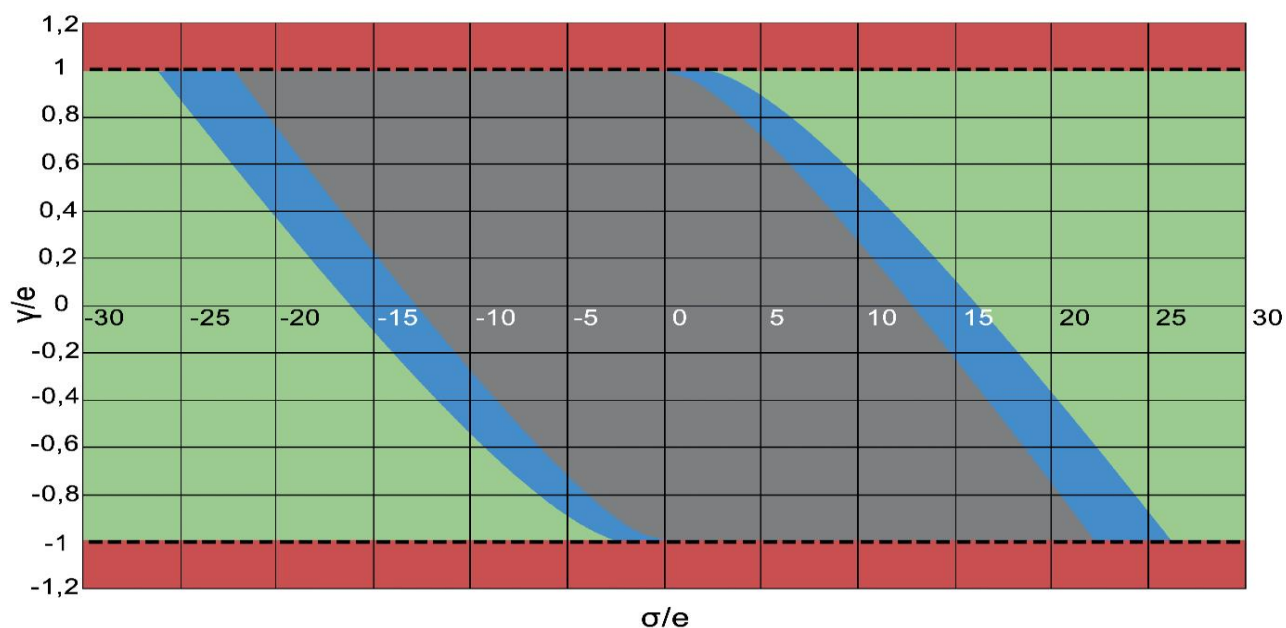


Рисунок 2 – Карта областей поведения эллипсоидальных вихрей для $K = 1$

Параметр вертикальной сплюснутости $K = \frac{Nc}{f\sqrt{ab}}$. Где, f – параметр Кориолиса, N – частота Вайсяля-Брента, a, b, c – полуоси эллипсоида большая горизонтальная, малая горизонтальная и вертикальная соответственно, σ – потенциальная завихренность вихря $[\frac{1}{c}]$.

Карта областей поведения эллипсоидальных вихрей делит всю плоскость параметров $(\frac{\sigma}{e}, \frac{\gamma}{e})$ на четыре подмножества, в каждом из которых наблюдаться разные режимы поведения:

- В красной зоне могут быть реализованы два режима поведения вихрей: режим вращения и режим колебания.
- В серой зоне может быть реализован только режим неограниченного вытягивания вихрей.
- В зелёной зоне может быть реализован любой из режимов поведения вихрей: вращение, колебание, неограниченное вытягивание.
- В синей зоне могут быть реализованы два режима поведения вихрей: режим колебания и режим неограниченного вытягивания.

Параграф 4 без преувеличения является главным во всей диссертации. Он написан так, чтобы его можно было рассматривать, как самостоятельную работу. В начале параграфа ещё раз приводятся четыре результата, полученные в двух предыдущих параграфах. После чего проводится их подробное описание, развёрнутый анализ и последующий синтез. Из всего обилия результатов хочется особо отметить следующие.

Впервые продемонстрирована карта областей режимов поведения мезомасштабных вихрей (Рисунок 2), что фактически является обобщением работ С.А. Чаплыгина и С. Кида.

Показана автомодельность границ серой и синей, синей и зелёной областей режимов поведения мезомасштабных вихрей относительно параметра K . Обозначим через Γ_1 кривую соответствующую границе серой и синей зоны на Рисунке 2 в правой полуплоскости. Индекс «1» указывает на то, что в этом случае $K = 1$. В §4 показано, что границу $\Gamma(K)$ серой и синей зоны для случая произвольного K можно получить по формуле (3)

$$\Gamma(K) = \Phi(K) \cdot \Gamma_1. \quad (3)$$

Простым сжатием Γ_1 относительно оси ординат. Функция $\Phi(K)$, определяющая этот коэффициент сжатия представлена на Рисунке 3.

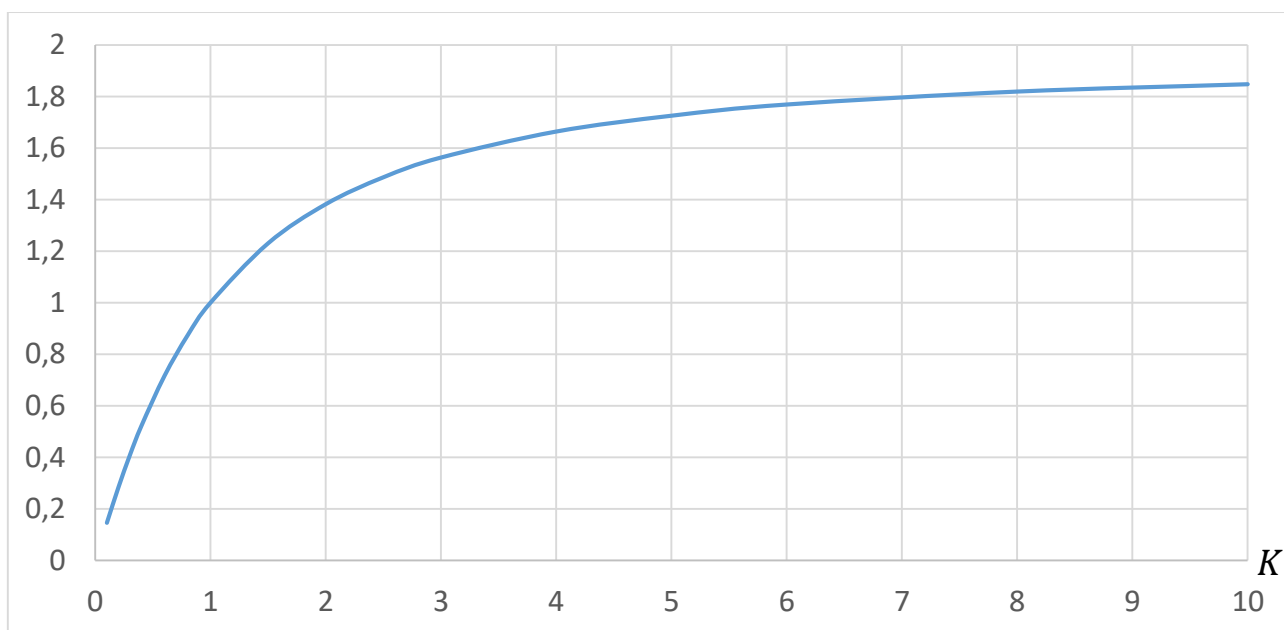


Рисунок 3 – График функции $\Phi(K)$

Значения $\Phi(K) < 1$ означают фактические растяжение (сжатие в 0,5 раза есть растяжение в 2 раза). Аналогичный результат показан и для границы синей и зелёной зоны, при этом коэффициент растяжения также определится по функции $\Phi(K)$.

Полученная карта областей поведения эллипсоидальных вихрей и выявленное свойство автомодельности её границ по отношению к параметру K позволили сделать оценку доли вытягивающихся мезомасштабных вихрей океана, которая показала что $\sim 40\%$ вихрей неминуемо вытягиваются. Об этом подробно написано в работе [1].

Вторая глава освещает некоторые вопросы, связанные с изучением временных характеристик различных режимов поведения мезомасштабных вихрей.

В системе (1) обе переменные (θ и ε) являются функцией времени, значит эта система позволяет изучать вопросы связанные со временем. Проанализировав эту систему удалось вывести уравнение времени эволюции вихрей (4), которое связывает между собой время эволюции вихря τ и параметры, как самого вихря, так и течения, в котором он находится.

$$\varepsilon\tau = \pm \frac{1}{2} \int_{\varepsilon_{\text{начальное}}}^{\varepsilon_{\text{конечное}}} \left(\varepsilon \sqrt{1 - \left(\frac{\sigma}{e} \left(S \frac{\varepsilon}{\varepsilon^2 - 1} + \frac{\gamma \varepsilon - 1}{\sigma \varepsilon + 1} + \frac{\varepsilon}{\varepsilon^2 - 1} \int_1^{\varepsilon} \frac{\tilde{\mu}^2 - 1}{\tilde{\mu}^2} \frac{K}{2} \int_0^{\infty} \frac{\mu d\mu}{\sqrt{(\mu^2 + (\tilde{\mu} + \frac{1}{\tilde{\mu}})\mu + 1)^3 (K^2 + \mu)}} d\tilde{\mu} \right) \right)^2} \right)^{-1} d\varepsilon \quad (4)$$

Где, $\varepsilon_{\text{начальное}}$ – относительное удлинение вихря в начальный момент, $\varepsilon_{\text{конечное}}$ – относительное удлинение вихря в конечный момент. **Параграф 5** посвящён выводу этого уравнения.

В **параграфе 6** уравнение (4) используется для решение некоторых простых, отдельных задач. Исследование частных случаев, а не систематическое изучение уравнения объясняется тем, что оно является достаточно сложным для проведения (в данной работе) исследования, аналогичного исследованию, проведённому в Главе 1. Рассмотрение частных задач показало, что:

Во-первых, для вихрей с максимальной степенью локализации $\varepsilon_{loc} > 2,2$ время вытягивания в n раз не зависит от ε_{loc} и при заданных условиях является только функцией n .

Во-вторых, получены следующие достаточные оценки безразмерного времени для тонких ($K < 0,5$) вытягивающихся вихрей и вихревых нитей:

- В процессе вытягивания вихрь существует как вихрь ($\varepsilon < 5$) не дольше чем $et < 2$.
- В процессе вытягивания вихревая нить не существует дольше чем $et < 3$.
- Для любой вытягивающейся вихревой структуры время существования $et < 5$.

В-третьих, показано, что любая вытягивающееся вихревая структура большую часть времени жизни находится в области своей максимальной локализации. Для достаточно круглых вихрей ($\varepsilon_{loc} < 2$) можно считать, что 33% всего времени существования они существуют, как вихри ($\varepsilon < 5$).

Но главное, что позволило сделать уравнение (4). Это рассчитать характерные времена всех режимов поведения вихрей, **параграф 7** посвящён этому расчёту. Характерное время режима неограниченного вытягивания $T_{\text{выт.}}$ – это время за которое вихрь исчезнет. Характерное время режима вращения $T_{\text{вращ.}}$ – это время за которое вихрь делает полный оборот. Характерное время режима вращения $T_{\text{кол.}}$ – это время периода колебаний.

Можно считать, что за исключением вихрей, совершающих малые колебания, продолжительность всех характерных процессов, связанных с изменением формы мезомасштабных вихрей океана лежит в диапазоне $1 < et < 10$. А характерные времена режимов, в зависимости от значений параметра e следующие: $T_{\text{вращ.}}$ от 6 до 37 суток, $T_{\text{кол.}}$ от 5 до 30 суток, $T_{\text{выт.}}$ от 2 до 16 суток.

Параграф 8 содержит анализ и обобщение предыдущих результатов главы. В нём удаётся получить важный результат, что вытягивающиеся вихри большую часть времени находятся в области, своей максимальной локализации.

Третья глава, посвящена применению, развиваемой теории к объектам реального мира.

В параграфе 9 осуществляется построение бароклининой модели Большого Красного Пятна Юпитера (БКПЮ). В результате чего получено уравнение (5), связывающее между собой параметры вихря и течения, в котором оно находится.

$$(\varepsilon^2 - 1) \frac{K}{2} \int_0^{\infty} \frac{\mu d\mu}{\sqrt{\left(\mu^2 + \left(\tilde{\mu} + \frac{1}{\tilde{\mu}}\right)\mu + 1\right)^3 (K^2 + \mu)}} - \frac{\Gamma}{\sigma} = 0 \quad (5)$$

Где Γ – величина горизонтального сдвига внешнего поля скорости.

Все, входящие в выражение (5) параметры течения и БКПЮ известны из различных миссий к Юпитеру. Поэтому, выражение (5) рассматривалось, как уравнение для определения одного из параметров. Параметр, полученный в результате решения уравнения (5), является уже не результатом эксперимента, а результатом теории. По степени совпадения, полученного результата с данными экспериментов можно судить о справедливости применения теории эллипсоидальных вихрей к БКПЮ. Данная процедура была проделана для вертикального размера [4] и потенциальной завихренности БКПЮ [6].

При расчёте вертикального размера полагалось, что $\Gamma = const$, а значения σ и ε брались из трёх различных миссий: Voyager (1979), Galileo (1996), Cassini (2000). В результате была получена оценка вертикального размера БКПЮ, которая составила 595 ± 191 км. Эта оценка достаточно хорошо согласуется с результатами миссии Juno, в которой были получены цифры 300 км и 500 км. Результаты представлены на Рисунке 4 в плоскости параметров $(\varepsilon, \frac{\sigma}{\rho})$.

Две кривые, соответствующие 1350 км и 135 км это верхняя и нижняя чёрные пунктирные линии. Эти две кривые по порядку величины определяют результат экспериментального измерения вертикального размера БКПЮ. Ещё две изолинии вертикального размера, соответствующие 750 км и 400 км обозначены оранжевым цветом, верхняя и нижняя соответственно. Пространство между этими кривыми соответствует доверительному интервалу, полученному теоретически.

Пересечение красных прямых определяет точку, соответствующую миссии Cassini, пересечение зелёных кривых определяет точку, соответствующую миссии Voyager, а перекресте синих прямых определяет точку, соответствующую миссии Galileo.

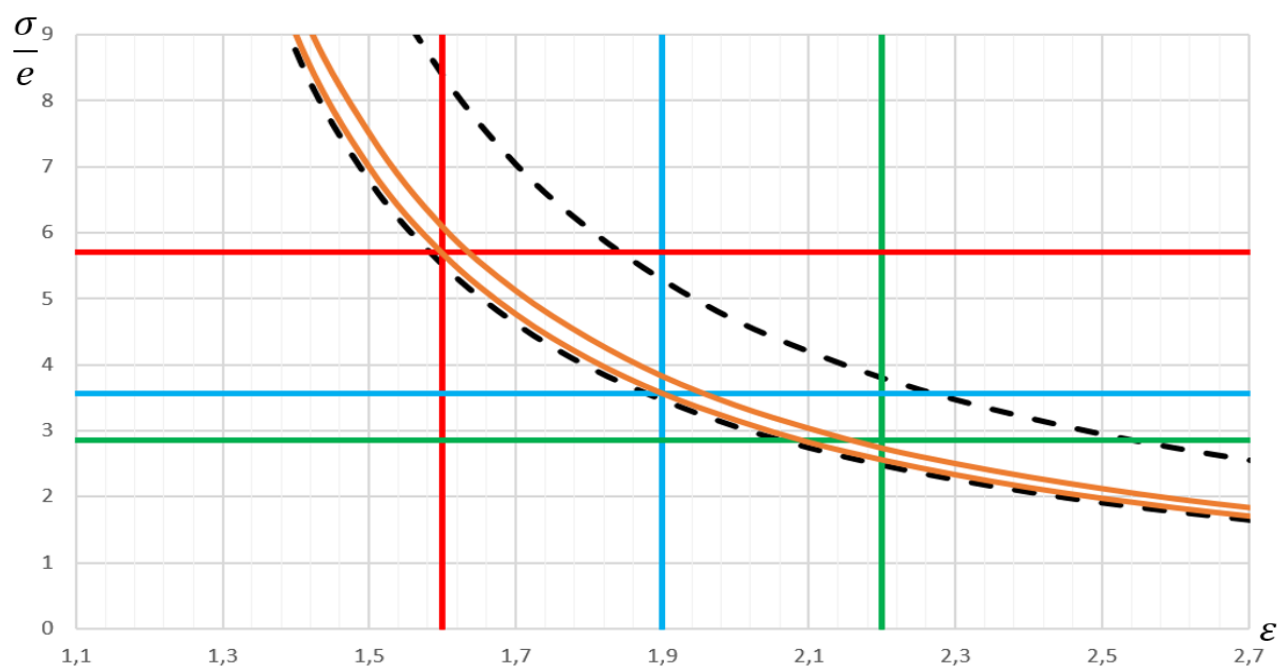


Рисунок 4 – Изолинии вертикального размера БКПЮ

По итогам проделанной в этом параграфе работы и полученных результатов можно утверждать о допустимости применения теории эллипсоидальных вихрей к БКПЮ.

Заключительный **параграф 10** посвящён объяснению такого явления, как рождение вихря из вихревой нити (филамента).

Такое явление удалось пронаблюдать по данным реанализа за январь 1994 года в Лофотенской котловине. На Рисунке 5 представлено поле завихренности в Лофотенской котловине. На нём зелёным прямоугольником выделена интересующая нас область.

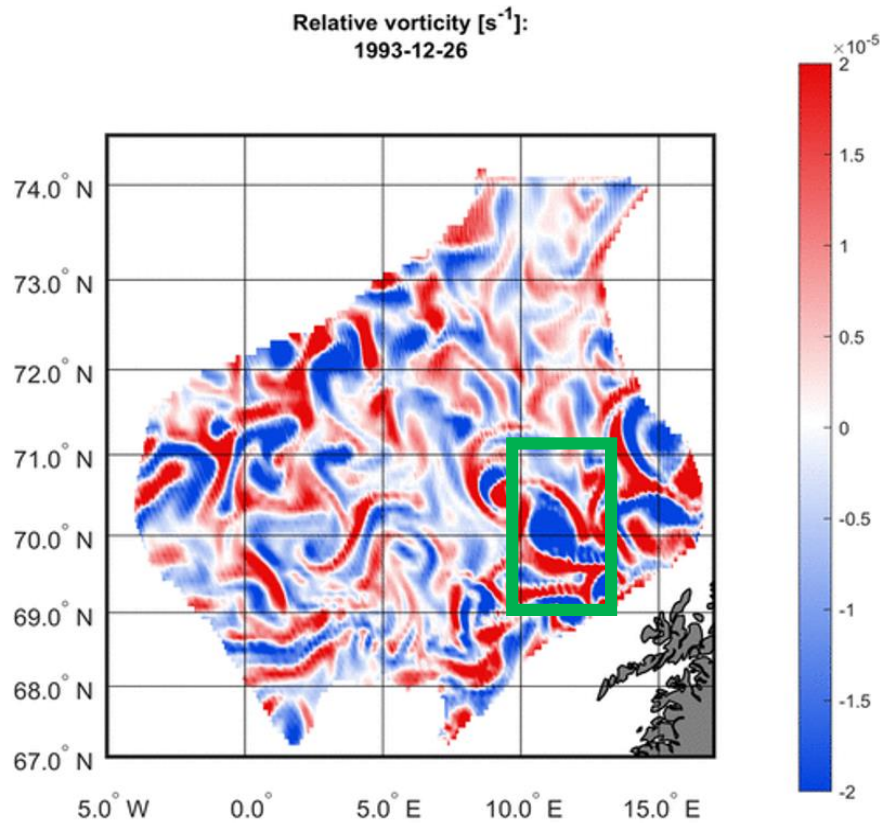


Рисунок 5 – Поле завихренности в Лофотенской котловине

Рисунок 6 содержит подневную раскадровку этой области на протяжении шести дней.

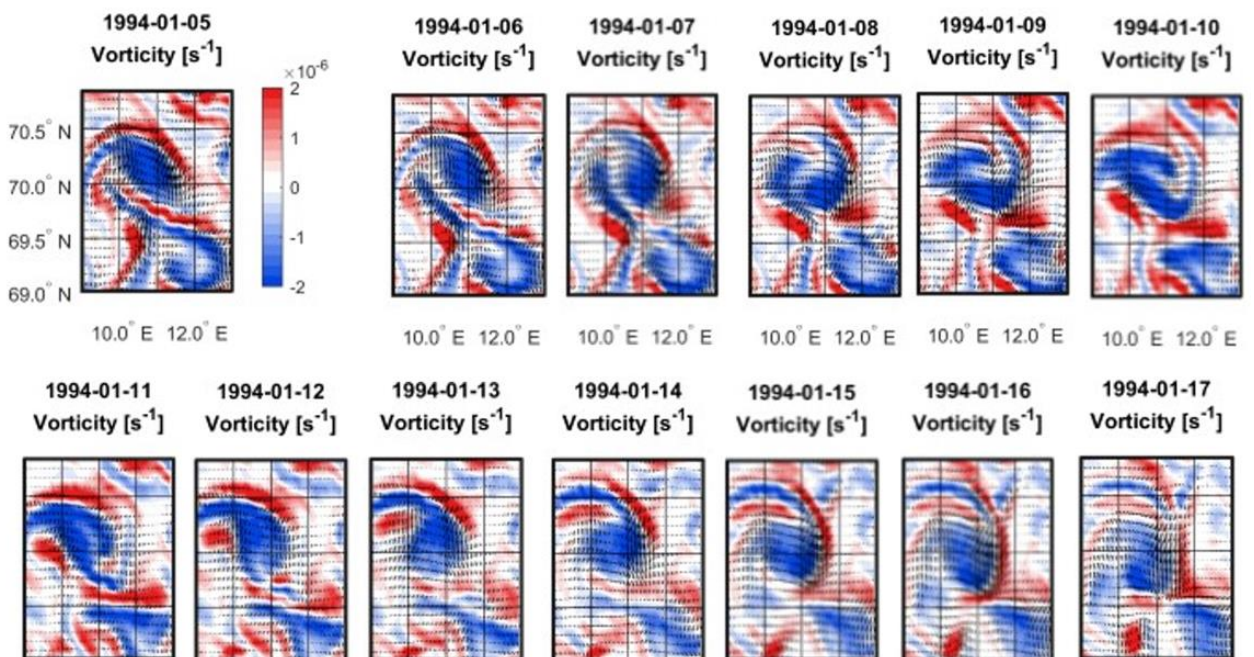


Рисунок 6 – Подневная раскадровка, выделенной на Рисунке 5 области

1994-01-05 в рассматриваемом квадрате находятся два антициклонических образования – это достаточно сильно локализованный вихрь в верхней части и вихревая нить, пересекающая всю нижнюю половину кадра по диагонали, сильно загибающаяся в нижней правой части. На следующий день 1994-01-06 вихревая нить распадается на две части, и в центре кадра возникает филамент. Далее, 1994-01-07 возникшее вихревое образование начинает локализовываться, 1994-01-08 сжатие продолжается! И наконец, 1994-01-09 рассматриваемый вихрь сливается с соседним антициклоном.

Используя теорию эллипсоидальных вихрей удалось объяснить данное явление, интерпретировав его, как движение по интегральной кривой семейства (2) в сторону уменьшения относительного удлинения. Если обратиться к Рисунку 1 то это означает, что вихрь оставаясь на одной интегральной кривой начал двигаться в левую сторону (в сторону уменьшения относительного удлинения ε).

Кроме этого показано, что вихрь, рождённый из филамента более 40% времени своего существования проведёт в области своей максимальной локализации.

В Заключение приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

Во-первых, впервые построена карта областей поведения эллипсоидальных вихрей для произвольного значения параметра K , что является обобщением работы Кида, и на её основе дана оценка доли вытягивающихся мезомасштабных вихрей Мирового океана, которая составила $\sim 40\%$.

Во-вторых, произведена оценка и расчёт характерных времён для каждого из режимов поведения вихрей, которые показали, что характерное безразмерное время для всех режимов одинаково по порядку величины: $1 < te < 10$, а размерное время (для мезомасштабных вихрей океана) в зависимости от параметра e варьируется от нескольких дней до месяца.

В-третьих, объяснено явление возникновения мезомасштабного вихря из филамента, и показано, что в таком процессе вихрь в области состояния

максимальной локализации проводит более 40% времени всего своего существования.

В-четвёртых, построена бароклинная модель Большого Красного Пятна Юпитера, и показано хорошее совпадение её предсказаний, в частности вертикального размера БКПО с результатами различных миссий к Юпитеру.

Публикации по теме диссертации

Статьи, опубликованные в изданиях из перечня ВАК

1. *Жмур В.В., Белоненко Т.В., Новосёлова Е.В., Суетин Б.П.* Условия трансформации мезомасштабного вихря в субмезомасштабную вихревую нить при вытягивании его неоднородным баротропным потоком // *Океанология*. – 2023. – Т.63. – № 2, – С. 200–210.
2. *Жмур В.В., Белоненко Т.В., Новосёлова Е.В., Суетин Б.П.* Приложение к реальному океану теории трансформации мезомасштабного вихря в субмезомасштабную вихревую нить при вытягивании его неоднородным баротропным течением// *Океанология*. – 2023. – Т.63. – № 2. – С. 211–223.
3. *Жмур В.В., Белоненко Т.В., Новосёлова Е.В., Суетин Б.П.* Прямой и обратный каскад энергии при вытягивании вихрей в океане // *Доклады Российской академии наук. Науки о Земле*. – 2023. – Т. 63. – № 2. – С. 270–274.
4. *Суетин Б.П., Жмур В.В., Чхетиани О.Г.* Бароклиническая модель Большого Красного Пятна Юпитера // *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*. – 2023 – № 3 – С. 286–298.

По теме диссертации опубликовано 2 тезиса докладов на международной конференции:

5. *Жмур В.В., Белоненко Т.В., Новосёлова Е.В., Суетин Б.П., Д.А. Арутюнян.* Вытягивание мезомасштабных вихрей океана в субмезомасштабные вихревые нити как способ передачи энергии по каскаду размеров. Проявление свойств отрицательной вязкости при вытягивании вихрей // *Сборник тезисов докладов двадцатой научной школы «Нелинейные волны - 2022»*. 2022. С. 260.
6. *Суетин Б.П.* К вопросу о потенциальной завихренности Большого Красного Пятна Юпитера // *Сборник тезисов докладов двадцатой научной школы «Нелинейные волны - 2022»*. 2022. С. 14.