

Российская Академия Наук  
Институт Океанологии им. П.П. Ширшова

---

На правах рукописи  
УДК 551.465

Леонов Юрий Павлович

Влияние топографии на вихри Агульясского течения

на пр  
(11.06 в. океанология)  
ий вихрь

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва, 1995



Работа выполнена в  
Институте океанологии им. П.П. Ширшова РАН

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук,  
профессор

В.М. Каменкович

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук

В.Н. Зырянов

доктор физико-математических наук

Г.И. Шапиро

Ведущая организация:

Государственный океанографический институт

Защита состоится "21" ноября 1995 года в 14 ча-  
сов на заседании Специализированного совета К.002.86.02 в Институте  
Океанологии им. П.П. Ширшова РАН по адресу: 117851, Москва, ул.  
Красикова, 23.

С диссертацией можно ознакомиться в Института Оке-  
анологии им. П.П. Ширшова РАН.

Автореферат разослан "19" ноября 1995г.

Ученый секретарь

Диссертационного совета  
кандидат географических наук

С.Г. Панфилова

## Общая характеристика работы

### Актуальность проблемы

Вихри Агульясского течения являются уникальным гидродина-  
мическим образованием. Обладая интенсивностью, сравнимой с  
вихрями других западных пограничных течений, Агульясские  
вихри имеют существенно большие горизонтальные масштабы,  
необычную вертикальную структуру и очень большое время жизни.  
Все это обуславливает большой интерес, проявляемый в на-  
стоящее время к этим вихрям.

Новейшие исследования, основанные на данных CTD, ADCP,  
дрифтерах и спутниковых измерениях дают богатый материал  
для изучения вихрей Агульясского течения. Согласно этим ис-  
следованиям, каждый из них переносит из Индийского океана в  
Южную Атлантику количество воды, эквивалентное среднегодо-  
вому расходу 0.5-3 Св. В связи с этим весьма вероятно, что вихри  
Агульясского течения имеют реальное влияние на циркуляцию  
в Южной Атлантике. По современным представлениям пример-  
но шесть антициклонических Агульясских вихрей за год входят  
в субтропический круговорот в Южной Атлантике. Некоторые  
из них наблюдались гораздо западнее Срединно-Атлантического  
хребта, существуя, таким образом, от двух до трех лет, проходя  
за это время 2000-3000 километров и пересекая высокий Кито-  
вый хребет.

Наиболее интересным и сложным в динамике вихрей Агу-  
льясского течения является вопрос о влиянии подводного хреб-  
та большой высоты на проходящий над ним вихрь. Несмотря на  
свою важность, проблема влияния сильных хребтов на движу-  
щийся мезомасштабный вихрь слабо отражена в литературе.

В настоящей работе на основе результатов численного мо-  
делирования динамики вихрей сделана попытка исследования  
влияния узкого и крутого хребта большой амплитуды на прохо-  
ждение вихрей с различной вертикальной структурой. Главным  
практическим вопросом является влияние Агульясских вихрей





- на субтропический круговорот в Южной Атлантике. Для этого необходимо знать критерий, по которому можно судить о способности вихря пересечь Китовый хребет и то, в какой степени вихри изменяются этим хребтом. Кроме того, важным является вопрос о том, как влияют подобные топографические образования на транспортные свойства вихря.

### Цель работы

Цель работы состоит в построении модели динамики вихрей Агульясского течения и исследовании действия хребта большой высоты на проходящий над ним вихрь. Мы моделируем уже существующий вихрь и попытаемся ответить на следующие вопросы.

- Что определяет продолжительность жизни вихря?
- В каком направлении будет распространяться вихрь и с какой скоростью?
- Будет ли существенно меняться горизонтальная и вертикальная структура вихря в процессе распространения и какие механизмы ответственны за это?
- Как меняются характеристики вихрей при пересечении хребта, и какие из этих изменений могут быть наблюдаемы в натуральных экспериментах?
- Почему только часть вихрей, оторвавшихся от Агульясского возвратного течения вовлекаются в Южно-Атлантический субтропический круговорот?

### Научная новизна

В настоящей работе для изучения распространения и эволюции вихрей определенной природы построена примитивная модель

в рамках приближения двуслойной жидкости со свободной поверхностью и эффективная дискретная модель для проведения численных экспериментов.

Путем анализа результатов численных экспериментов показано, что эволюция вертикальной структуры вихря сильно зависит от его горизонтального масштаба. Вихри Агульясского течения не эволюционируют к компенсированному состоянию (в котором вихрь существует только в верхнем слое), сохраняя существенные скорости у дна на больших временах эволюции (порядка 4-6 месяцев). Этот факт находится в хорошем соответствии с данными натуральных наблюдений, показавшими наличие у Агульясских вихрей существенных скоростей у дна через несколько месяцев после их порождения Агульясским течением.

В работе показано, что вихри с параметрами, характерными для вихрей Агульясского течения могут пересекать крутой хребет большой высоты (сравнимой с толщиной нижнего слоя) при некоторых ограничениях на первоначальный вертикальный сдвиг скорости. Натурные наблюдения подтверждают существование вихрей с ненулевыми скоростями у дна, успешно пересекших Китовый хребет.

Сравнивая результаты расчетов эволюции модельных вихрей над плоским дном, над меридиональным хребтом большой высоты и данные натуральных наблюдений показано, что все вихри пересекающие хребет (и даже те, которые хребтом разрушаются) обнаруживают одинаковую эволюцию своей вертикальной структуры к компенсированному состоянию независимо от величины начального вертикального сдвига скорости.

Вихрь подвергается воздействию хребта, даже если первоначально находится в компенсированном состоянии. При этом хребет начинает действовать на вихрь за некоторое время до того, как последний начинает пересекать его. Расстояние, на котором вихрь начинает ощущать влияние хребта зависит от его вертикальной структуры.

Хребет подавляет или существенно ослабляет возмущение да-



вления в нижнем слое. При пересечении хребта исчезают или существенно уменьшаются возникшие в результате эффектов дисперсии вторичные вихревые образования. Вихрь, проходящий над крутым хребтом характеризуется значительно меньшей генерацией возмущений с масштабами волн Россби, чем в случае эволюции вихря в океане постоянной глубины.

Вихрь способен переносить пассивные примеси на значительные расстояния. Численные эксперименты показывают, что ядро вихря переносит трассеры практически без потерь. Важно отметить, что хребет способен улучшать транспортные свойства вихря по крайней мере в пределах его ядра, что хорошо согласуется с остальными проявлениями взаимодействия вихря с хребтом и данными натурных экспериментов.

### Практическая ценность

Основываясь на полученных результатах, можно сделать вывод, что вихри Агульясского течения могут играть значительную роль в формировании динамики и биологических свойств Южно-Атлантического субтропического круговорота, перенося из Индийского океана аномалии температуры, соли и биологически активных веществ.

Примитивная модель в рамках приближения двуслойной жидкости со свободной поверхностью может эффективно использоваться для моделирования эволюции Агульясских вихрей на реальном рельефе дна, давая реалистичные значения основных характеристик вихрей и предсказывая основные черты их поведения.

### Апробация работы

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на семинарах Лаборатории геофизической гидродинамики Института Океанологии им. П.П. Ширшова РАН. По результатам ра-

боты были сделаны доклады на XX Генеральной Ассамблее EGS (Grenoble, 1994) и в Lamont-Doherty Earth Observatory of Columbia University, USA (совместно с В.М. Каменковичем). Основные результаты работы опубликованы в статье в *Journal of Physical Oceanography*.

## Структура и содержание работы

Диссертационная работа состоит из шести глав, включая введение и заключение. Работа содержит 86 страниц, 36 рисунков, 2 таблицы и список литературы из 35 названий.

В первой главе (введении) обсуждается актуальность проблемы и современное состояние вопроса. Сформулированы цели и задачи исследования. Приведено краткое содержание работы и дано сравнение полученных результатов с имеющимися в литературе сведениями по этой и близкой тематике.

### Глава 2. Динамическая модель.

Содержание Главы 2 составляют формулировка и обоснование используемой в работе динамической модели.

К настоящему времени для описания структуры и эволюции океанских вихрей применяется много различных моделей динамики океана. В Главе 2 приводится краткий обзор существующих моделей. Далее обосновывается выбор примененного в работе способа описания вихрей Агульясского течения и формулируется динамическая модель.

Для описания эволюции Агульясских вихрей используется модель примитивных уравнений в приближении двуслойной жидкости. Приближения Буссинеска и твердой крышки не делаются. Эту модель в консервативном виде можно записать в следующем



виде:

$$\frac{\partial U_1}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{U_1^2}{h_1} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{U_1 V_1}{h_1} \right) - f V_1 = -g h_1 \frac{\partial \xi}{\partial x}$$

$$\frac{\partial V_1}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{U_1 V_1}{h_1} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{V_1^2}{h_1} \right) + f U_1 = -g h_1 \frac{\partial \xi}{\partial y}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\xi - \eta) + \frac{\partial U_1}{\partial x} + \frac{\partial V_1}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial U_2}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{U_2^2}{h_2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{U_2 V_2}{h_2} \right) - f V_2 = -g h_2 \frac{\partial}{\partial x} ((1 - \epsilon)\xi + \epsilon\eta)$$

$$\frac{\partial V_2}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{U_2 V_2}{h_2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{V_2^2}{h_2} \right) + f U_2 = -g h_2 \frac{\partial}{\partial y} ((1 - \epsilon)\xi + \epsilon\eta)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial U_2}{\partial x} + \frac{\partial V_2}{\partial y} = 0$$

$$h_1 = H_1 + \xi - \eta, \quad h_2 = H_2 + \eta - D;$$

$$\epsilon = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2}$$

Здесь  $H_1, H_2$  — константы, определяющие толщины слоев в невозмущенном состоянии,  $D = D(x, y)$  — функция, описывающая рельеф дна;  $h_i, i = 1, 2$  — полные толщины слоев.  $(u_i, v_i)$  — скорости,  $\rho_i$  — плотности слоев,  $f$  — параметр Кориолиса ( $f = f_0 + \beta y$ , где  $f_0$  и  $\beta$  константы).  $\xi$  и  $\eta$  есть отклонения свободной поверхности и поверхности раздела соответственно. Модель записана в терминах полных потоков:

$$U_k = u_k h_k, \quad V_k = v_k h_k, \quad k = 1, 2.$$

В начальный момент времени мы моделируем горизонтальную структуру вихря и вертикальный профиль скоростей и возмущений поверхностей раздела, задавая Гауссову (колоколовидную) форму для  $\xi$  и  $\eta$  и вычисляя компоненты скорости из геострофических соотношений. При этом в качестве характерного

горизонтального масштаба вихря  $L$  берется радиус максимальной тангенциальной скорости.

Далее в Главе введено описание, позволяющее естественным образом характеризовать вертикальную структуру вихря как в терминах отклонений  $\xi$  и  $\eta$ , так и в терминах сдвига скорости. Для этого введена безразмерная функция сдвига  $\epsilon = \epsilon(x, y, t)$ :

$$\epsilon(x, y, t) = \frac{\eta(x, y, t)}{\eta^*(x, y, t)}, \quad \text{где } \eta^*(x, y, t) = - \left( \frac{1 - \epsilon}{\epsilon} \right) \xi(x, y, t) \quad (0.1)$$

В работе показано что в начальный момент времени эта функция эффективно описывает вертикальный сдвиг скорости. Обсуждается применимость этого описания при  $t > 0$ . Показано, что функция  $\epsilon(x, y, t)$  может быть применена для описания эволюции вертикальной структуры вихря во времени.

### Глава 3. Численная модель.

При исследовании поставленной в Главе 2 математической задачи численными методами необходимо решить несколько принципиальных проблем, обсуждению которых посвящена Глава 3. Здесь же исследуются примененные в настоящей работе способы их решения.

1. Выбор модельной области и постановка граничных условий.

Первоначальная математическая модель построена для изучения процессов в открытом океане, и поэтому она содержит постановку граничных условий на бесконечности. Дискретная модель всегда рассматривается в ограниченной области пространства. Таким образом возникает проблема постановки граничных условий, в наименьшей степени влияющих на изучаемые процессы. Постановка граничных условий и изучение их влияния на динамику моделируемых



явлений являются частью построения дискретной модели и составляют содержание части Главы 3.

## 2. Построение численной схемы.

Использование примитивных уравнений в качестве динамической модели и наличие рельефа дна большой амплитуды означает присутствие в задаче широкого спектра колебаний. Хотя нас интересуют только процессы с пространственными и временными масштабами не менее, чем масштабы волн Россби, в модели существуют как инерционные, так и гравитационные колебания. Одна из основных опасностей для нашей задачи заключается в том, что присущие любой дискретной модели возмущения масштаба шага сетки попадают в диапазон масштабов, физически возможных в нашей модели. Это накладывает очень серьезные ограничения на методы, пригодные для численного исследования задачи. В настоящее время в вычислительной океанологии используется большое количество разнообразных численных схем. Однако попытка построить численную модель, хорошо работающую в условиях нашей задачи наталкивается на серьезные трудности.

Для решения этой проблемы построена численная схема, которая, во-первых, устойчива к возмущениям сеточного масштаба не только при движении над ровным дном, но и при моделировании особенностей рельефа со значительной амплитудой и небольшим пространственным масштабом. Во-вторых, такая схема дает реалистичные фазовые скорости распространения описываемых динамической системой волн на этих же масштабах. В Главе 3 дано описание используемой численной схемы и обсуждение ее основных свойств.

## 3. Эффекты бокового трения.

Исходная динамическая задача записана в Главе 2 без учета членов, описывающих боковое трение. Такой подход

вполне оправдан с точки зрения рассматриваемых физических процессов, однако остается открытым вопрос о вычислительной устойчивости применяемых алгоритмов. Как известно, наличие или отсутствие вязкой диссипации энергии на сеточных масштабах может сильно влиять на характеристики получаемого решения. Из-за тесной связи с используемой численной моделью обсуждение этого важного вопроса вынесено в Главу 3. Описаны серии специальных экспериментов для исследования этой проблемы. Проверки показали, что используемая численная схема достаточно устойчива и необходимости специально вводить боковое трение в модель нет.

В этой же Главе даны необходимые детали вычислений и некоторые результаты проверки модели. В Таблице 2 представлен обзор проведенных экспериментов.

## Глава 4. Эволюция вертикальной структуры вихря (океан постоянной глубины).

Первым необходимым шагом в исследовании динамики вихрей Агульясского течения является изучение их поведения при движении над плоским дном. Во-первых, это позволит понять сходство и различие этих вихрей с такими хорошо изученными образованиями, как, например, ринги Гольфстрима. Во-вторых, без изучения движения над плоским дном нельзя правильно построить схему исследования взаимодействия вихрей с рельефом дна. В связи с этим в работе этой задаче уделено значительное внимание. Изучение проблемы, анализ и обсуждение полученных результатов составляют содержание Главы 4.

В первой части Главы обсуждаются существующие теоретические оценки и результаты натуральных исследований эволюции вертикальной и пространственной структуры вихрей при движении над плоским дном. Показано, что в отличие от других хорошо



изученных вихревых образований, для вихрей Агульясского течения оказывается теоретически возможным сохранять начальную когерентность вертикальной структуры вихря на больших временах эволюции.

Вторая часть Главы 4 посвящена анализу численных экспериментов по моделированию эволюции вихрей при движении над плоским дном. Исследуется зависимость вертикальной структуры вихря от его характерного горизонтального масштаба (или безразмерного числа Бюргера  $S = (L_R/L)^2$ ) и степени нелинейности. Показано, что вихри с  $S \geq 0.4$  быстро эволюционируют к компенсированному ( $\epsilon \sim 1$ ) состоянию независимо от интенсивности вихря. Этот результат находится в соответствии с известными результатами по моделированию эволюции рингов Гольфстрима. В то же время вихри с параметрами, характерными для вихрей Агульясского течения ( $S \sim 0.15$ ) обнаруживают совершенно иной режим поведения. На значительных временах эволюции они сохраняют первоначальный вертикальный сдвиг скорости. Этот эффект также проявляется независимо от интенсивности вихря. Между этими режимами существует переходная область, граница которой смещается с увеличением интенсивности в область с меньшими пространственными масштабами вихря.

Полученные результаты находят дальнейшее подтверждение при исследовании пространственной структуры вихрей в верхнем и нижнем слоях через определенное время после начала движения. Вихрь наблюдается в верхнем слое во всех режимах. Однако, распределение давления в нижнем слое для случая  $S \geq 0.4$  соответствует в основном движениям, характерным для излучаемых волн Россби. Выделить структуру, соответствующую вихрю в верхнем слое при этом невозможно. В режиме, характерном для Агульясских вихрей картина совершенно иная; на фоне возмущений с характеристиками излучаемых волн Россби существует четкая вихревая структура. Вихрь сохраняет свою первоначальную вертикальную структуру.

По результатам исследований, обсуждаемых в Главе 4, можно сделать следующие основные выводы.

1. Проведенные эксперименты показывают, что эволюция вертикальной структуры вихря сильно зависит от его горизонтального масштаба. Хорошо известные ринги Гольфстрима и другие подобные образования достаточно быстро эволюционируют к "компенсированному" состоянию, теряя когерентность с движениями в глубоких слоях океана.

2. Анализируя известные к настоящему времени результаты и проведенные в работе эксперименты по изучению эволюции больших нелинейных вихрей в океане постоянной глубины, можно сделать вывод о том, что вихрям Агульясского течения удается сохранять первоначальную когерентность своей вертикальной структуры на больших временах эволюции. Определяющую роль при этом играют большие по сравнению с радиусом деформации Россби размеры вихря. Нелинейность усиливает эту тенденцию.

Эффекты, рассмотренные здесь, также важны в связи с материалом, представленным в Главе 5. Если бы большие вихри быстро теряли свою первоначальную когерентность в глубоких слоях океана, было бы трудно привести достаточные основания для того, чтобы в рамках нашего приближения исследовать влияние донной топографии на Агульясские вихри с различными начальными вертикальными структурами.

## Глава 5. Влияние рельефа дна на эволюцию вихрей.

Главной целью работы и предметом Главы 5 является анализ влияния достаточно узкого подводного меридионального хребта большой высоты на проходящие над ним вихри различной вертикальной структуры. Влияние хребта такого типа на вихрь является сложным нелинейным процессом, содержащим несколько разных механизмов. В предыдущей Главе показано, что в нашей модели вихри с горизонтальными масштабами порядка



100–120 км и степенью нелинейности  $Q \sim 3.0$  сохраняют значительные движения в нижнем слое в процессе своей эволюции на достаточно больших временах ( $> 3$  месяцев). Именно такими свойствами обладают вихри Агульясского течения по данным натурных наблюдений. Подобное совпадение свойств Агульясских вихрей и следствий нашей динамической модели дает основание надеяться, что в рамках предложенного подхода можно корректно поставить и решить задачу взаимодействия вихрей с рельефом конечной амплитуды.

При  $t = 0$  мы задаем в Южном полушарии антициклонический вихрь с параметрами, характерными для вихрей Агульясского течения: вихрь имеет гауссову форму с характерным горизонтальным масштабом  $L = 110$  км, начальным отклонением свободной поверхности  $\xi_0 = 77$  см и расположен на расстоянии 220 км к востоку от восточной границы хребта (420 км от оси хребта). Таким образом, интенсивность движений в верхнем слое и горизонтальный масштаб вихря фиксированы. Хребет моделируется симметричным треугольным профилем рельефа дна, не зависящим от координаты  $Y$ . Максимальная высота хребта составляет 3 км, полуширина — 200 км (наклон дна 15 м/км), что примерно соответствует характеристикам Китового хребта.

Варьируя вертикальную структуру такого вихря, можно исследовать условия, при которых вихрь пересекает хребет или останавливается и разрушается им. В Главе 5 проанализированы результаты расчетов при изменении параметра сдвига  $e_0 \equiv e(t = 0)$  от 1.0 до 0.3, охватывающем практически весь диапазон наблюдаемых в реальных Агульясских вихрях вертикальных сдвигов скорости и отклонений изопикнических поверхностей.

Для того, чтобы четко выделить эффекты, связанные с действием хребта на проходящий над ним вихрь, для каждого эксперимента с хребтом проведены контрольные эксперименты, в которых хребет отсутствовал, а все остальные параметры оставались теми же самыми. Анализ влияния хребта строится на сравнении этих пар экспериментов.

Антициклонический вихрь в южном полушарии будет двигаться на запад и через некоторое время натолкнется на хребет. Что случится после этого? При описании процесса воздействия хребта на проходящий над ним вихрь, в работе сделана попытка ответить на следующие вопросы:

- как и почему изменяются траектории вихрей, проходящих над хребтом;
- какова эволюция вертикальной и пространственной структуры таких вихрей;
- насколько хорошо выполняются геострофические соотношения в окрестности ядра вихря;
- известно, что вихри Агульясского течения переносят захваченную в ядре воду и пассивные примеси на большие расстояния; как изменятся транспортные свойства вихрей при пересечении крутого хребта значительной высоты;

Первый параграф Главы посвящен анализу влияния хребта на траектории проходящих над ним вихрей.

Существует много примеров наблюдений Агульясских вихрей, которые пересекают Китовый хребет. В первую очередь это данные спутниковых измерений. Путем их анализа показано, что вихри замедляют свое движение во время пересечения хребта.

Если сравнить данные наших экспериментов с хребтом и контрольных экспериментов без хребта, можно, во-первых, сделать вывод, что вихри с существенным начальным сдвигом скорости ( $e(0) \geq 0.4$ ) пересекают хребет, в то время как вихри с преобладающей баротропной компонентой (случай  $e(0) = 0.3$ ) останавливаются хребтом и постепенно разрушаются им. Во-вторых, хорошо заметно найденное в натуральных экспериментах замедление перемещения центра вихря по широте при пересечении Китового хребта. Показано, что с уменьшением  $e$  это замедление становится все более существенным, пока при  $e \sim 0.3$  не приводит



к почти полной остановке вихря на склоне хребта. Кроме движения на запад, антициклонические вихри в южном полушарии движутся на север. При этом хребет уменьшает и эту компоненту движения вихря. Важный результат состоит в том, что средние скорости перемещения вихрей, пересекающих хребет крайне слабо зависят от начального вертикального профиля. В то же время, в отсутствие хребта такая зависимость, очевидно, существует и наблюдается в экспериментах: чем меньше  $e(0)$ , тем быстрее будет двигаться вихрь и тем больше его меридиональное смещение. В работе показано, что поведение вихрей пересекающих хребет начинает отличаться от поведения таких же вихрей над плоским дном тем раньше, чем меньше начальный вертикальный сдвиг скорости. Таким образом, можно сказать, что вихри с большей баротропной компонентой начинают "чувствовать" влияние хребта раньше.

Согласно проведенным исследованиям, вихри со значительной баротропной компонентой не пересекают хребет (случай  $e(0) = 0.3$ ). В этом случае характер поведения вихря полностью меняется. Перед началом движения через хребет такой вихрь практически замирает. Похожее поведение наблюдалось во время 202 рейса *RRS Discovery* (Clement and Gordon, 1994). В нашей модели такой вихрь практически разрушается перед тем, как достичь оси хребта.

**Второй параграф** посвящен исследованию эволюции вертикальной и пространственной структуры вихря. Для анализа выбраны наиболее характерные случаи с  $e(0) = 0.9, 0.5$  и  $0.3$ .

Для вихря с начальным состоянием, близким к "компенсированному" ( $e(0) = 0.9$ ) показано, что в отличие от случая океана постоянной глубины вихрь в присутствии хребта эволюционирует к компенсированному состоянию ( $e(t)$  стремится к единице). Хребет также подавляет дисперсионные эффекты в верхнем и в нижнем слоях. Эти выводы находят поддержку при исследовании пространственной структуры. Даже когда вихрь полностью пересекает хребет ( $\sim 250$  дней), он сохраняет когерентность своей вер-

тикальной структуры. В частности, координаты экстремумов  $\xi$ ,  $\eta$  и возмущения давления в нижнем слое практически совпадают. Для соответствующего случая с плоским дном вихрь теряет когерентность значительно раньше, примерно через  $t = 146$  дней.

Вихрь с  $e(0) = 0.5$  (начальное состояние далеко от компенсированного) пересекает хребет. В работе показано, что для вихрей с такой начальной вертикальной структурой  $e \rightarrow 1$  в процессе эволюции вихря во времени, причем это стремление выражено значительно сильнее, чем в случае  $e(0) = 0.9$ . Особенно отчетливо эта тенденция видна в сравнении с результатами контрольного эксперимента с плоским дном.

В случае  $e(0) = 0.3$  (первоначальное состояние близко к баротропному, сдвиг скорости мал) вихрь не может пересечь хребет. Заметим, что дисперсия достаточно сильная, однако параметр  $e(t)$  после полугодового непрерывного роста устанавливается на уровне 0.8. Такой вихрь демонстрирует эволюцию к компенсированному состоянию, однако практически разрушается хребтом к моменту времени  $t = 250$  дней, когда центр его находится примерно на оси хребта. К этому моменту

Анализируя поведение вихрей в проведенных экспериментах, можно заметить, что модельные вихри во всем диапазоне наших исследований ( $e(0) = 0.3-1.0$ ) обнаруживают существенное сходство в поведении при столкновении с хребтом. Встречая хребет, вихри одинаковым образом меняют свою вертикальную структуру, стремясь к состоянию с  $e \sim 1$ . Такое общее стремление к компенсированному состоянию отсутствует при движении над плоским дном. Анализируя данные численных экспериментов, показано, что стабилизация наступает вскоре после того, как центр вихря пересекает границу хребта. Этот факт согласуется с результатом, полученным при изучении траекторий вихрей.

Над хребтом всегда расположена зона с очень малыми возмущениями давления в нижнем слое. Таким образом, хребет как бы отфильтровывает баротропную компоненту в проходящем над ним вихре, поджимая его в верхний слой. При этом все пересека-



ющие хребет вихри становятся близкими по своей вертикальной и пространственной структуре. Возможно, что эволюция вихрей к компенсированному состоянию при движении над хребтом объясняет независимость скоростей перемещения вихрей от первоначального вертикального сдвига. В работе также показано, что начало изменения поведения зависит от первоначальной вертикальной структуры вихря.

Третий параграф посвящен анализу геострофичности движения. Показано, что во всех проведенных экспериментах число Кибеля-Россби ( $U/f_0L$ ) мало. Ни в одном эксперименте оно не превосходит 0.18. Отсюда следует, что геострофичность движений должна достаточно хорошо сохраняться. В начальный момент времени движения заданы геострофичными. Важно отметить, что справедливость геострофических соотношений не предполагает справедливости традиционного квазигеострофического приближения. Квазигеострофическое приближение требует не только выполнения геострофических соотношений, но и сохранения так называемой квазигеострофической потенциальной завихренности (линеаризованной версии обычной потенциальной завихренности). Для вихрей, рассмотренных в настоящей работе квазигеострофическое приближение несправедливо, так как во-первых, изменение толщин слоев в наших задачах порядка самих толщин. Во-вторых, присутствует крутой хребет значительной амплитуды.

Четвертый параграф посвящен исследованию транспортных свойств вихрей. Данные натурных наблюдений показывают, что вихри Агульясского течения переносят захваченную воду Индийского океана и соответствующие пассивные примеси на экстремально большие расстояния, сравнимые с шириной Южной Атлантики. Представляется важным сравнить наблюдаемые свойства Агульясских вихрей с результатами исследования аналогичных свойств вихрей в нашей модели.

Для изучения этой проблемы проведены серии численных

экспериментов по изучению эволюции распределения пассивных трассеров в поле скоростей движущегося вихря. В работе представлены результаты как экспериментов с хребтом, так и контрольных экспериментов с плоским дном. Показано, что вихрь способен переносить пассивные примеси на значительные расстояния. Более того, ядро вихря переносит трассеры практически без потерь при движении как над плоским дном, так и над хребтом. На основании сравнения распределений трассеров в экспериментах с хребтом и плоским дном показано, что хребет способен улучшать транспортные свойства вихря по крайней мере в пределах его ядра, что хорошо согласуется с остальными проявлениями воздействия хребта на движущийся вихрь.

Анализ траекторий трассеров показывает еще один интересный результат — трассеры в пределах ядра вихря как бы поджимаются к его центру при прохождении над хребтом, что свидетельствует как об ослаблении дисперсии в этот момент, так и об уменьшении характерного масштаба вихря. Однако, исследование этого механизма воздействия хребта на вихрь требует очень больших затрат, что вынуждает вынести этот вопрос за пределы обсуждения в настоящей работе.

Наши эксперименты с пассивными трассерами показывают, что вихри со значительным вертикальным сдвигом скорости переносят пассивные примеси на большие расстояния, и, следовательно, могут играть значительную роль в формировании динамики и биологических свойств Южно-Атлантического субтропического круговорота, перенося из Индийского океана аномалии температуры, соли и биологически активных веществ. Пересечение достаточно крутого хребта только улучшает транспортные свойства.

### Заключение.

В заключении формулируются основные результаты и выводы диссертации.



1. Для изучения распространения и эволюции вихрей Агульясского течения построена математическая модель, использующая примитивные уравнения в рамках приближения двуслойной жидкости со свободной поверхностью. Предложен компактный способ описания вертикальной структуры вихря, позволяющий исследовать критерии прохождения вихря через хребет большой высоты.

2. На основании предложенной модели представлены серии численных экспериментов. Основной целью экспериментов является исследование динамики вихрей Агульясского течения и влияния на нее некоторых крупных форм рельефа дна.

3. В работе показано, что эволюция вертикальной структуры вихря сильно зависит от его горизонтального масштаба. Вследствие этого, в отличие от хорошо изученных рингов Гольфстрима и других вихрей подобного класса, вихри Агульясского течения не эволюционируют к компенсированному состоянию (в котором вихрь существует только в верхнем слое), сохраняя существенные скорости у дна на больших временах эволюции (порядка 4-6 месяцев). Этот факт находится в хорошем соответствии с данными натурных наблюдений, показавшими наличие у Агульясских вихрей существенных скоростей у дна через несколько месяцев после их порождения Агульясским течением.

4. Основываясь на типичных значениях возвышения свободной поверхности и горизонтального масштаба Агульясских вихрей, показано, что вихри со значительным вертикальным сдвигом скорости могут пересекать Китовый хребет. Вихри со значительной баротропной компонентой задерживаются хребтом и разрушаются.

5. Сравнивая результаты расчетов эволюции модельных вихрей над плоским дном, над меридиональным хребтом большой высоты и данные натурных наблюдений можно сделать несколько выводов.

1) Вихри с параметрами, характерными для вихрей Агульясского течения могут пересекать крутой хребет большой вы-

соты (сравнимой с толщиной нижнего слоя) при некоторых ограничениях на первоначальный вертикальный сдвиг скорости. Натурные наблюдения подтверждают существование вихрей с ненулевыми скоростями у дна, успешно пересекавших Китовый хребет.

2) Все вихри пересекающие хребет (и даже те, которые хребтом разрушаются) обнаруживают одинаковую эволюцию своей вертикальной структуры к компенсированному состоянию с независимой от величины начального вертикального сдвига скорости.

3) Вихрь подвергается воздействию хребта, даже если первоначально находится в компенсированном состоянии. При этом хребет начинает действовать на вихрь за некоторое время до того, как последний начинает пересекать его. Расстояние, на котором вихрь начинает ощущать влияние хребта зависит от его вертикальной структуры.

4) Хребет подавляет или существенно ослабляет возмущение давления в нижнем слое. При пересечении хребта исчезают или существенно уменьшаются возникшие в результате эффектов дисперсии вторичные вихревые образования. Вихрь, проходящий над крутым хребтом характеризуется значительно меньшей генерацией возмущений с масштабами волн Россби, чем в случае эволюции вихря в океане постоянной глубины.

5) Вихрь способен переносить пассивные примеси на значительные расстояния. Численные эксперименты показывают, что ядро вихря переносит трассеры практически без потерь. Важно отметить, что хребет способен улучшать транспортные свойства вихря по крайней мере в пределах его ядра, что хорошо согласуется с остальными проявлениями взаимодействия вихря с хребтом. Наблюдения также показывают, что Агульясские вихри переносит захваченную



воду Индийского океана на значительные расстояния, пересекая при этом Китовый хребет. В экспериментах по изучению переноса пассивных примесей наблюдается эффект поджатия ядра вихря при пересечении хребта. Однако на настоящем этапе исследований нельзя оценить возможную силу этого эффекта.

6. Основываясь на этих выводах, можно сказать, что вихри Агульясского течения могут играть значительную роль в формировании динамики и биологических свойств Южно-Атлантического субтропического круговорота, перенося из Индийского океана аномалии температуры, соли и биологически активных веществ. Прimitивная модель в рамках приближения двуслойной жидкости со свободной поверхностью может эффективно использоваться для моделирования эволюции Агульясских вихрей на реальном рельефе дна, давая реалистичные значения основных характеристик вихрей и предсказывая основные черты их поведения.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Kamenkovich, V. M., A. Gordon, D. Byrne, D. Nechaev, and Yu. Leonov, 1994. On the influence of bottom topography on the Agulhas eddy. *Annales Geophysicae. European Geophysical Society Part II. Oceans, Atmosphere, Hydrology & Nonlinear Geophysics. Supplement II to Volume 12. EGS, Katlenburg-Lindau, FRG, P. C504.*
2. Kamenkovich, V. M., Yu. Leonov, D. Nechaev, 1995. The propagation of the Agulhas eddies. *Annales Geophysicae. European Geophysical Society Part II. Oceans, Atmosphere, Hydrology & Nonlinear Geophysics. Supplement II to Volume 13. EGS, Katlenburg-Lindau, FRG, P. C228.*
3. Kamenkovich, V. M., Yu. Leonov, D. Nechaev, D. Byrne, A. Gordon, 1995. On the influence of bottom topography on the Agulhas eddy. *J. Phys. Oceanogr.*, 0, in printing.