

Московский государственный университет

им. М. В. Ломоносова

Географический факультет

На правах рукописи

УДК 551.46.553(261)

БЕСЕДИН Дмитрий Евгеньевич

**ОЦЕНКА ДРЕЙФОВОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ  
В АТЛАНТИЧЕСКОМ ОКЕАНЕ**

Специальность 25.00.28 – Океанология

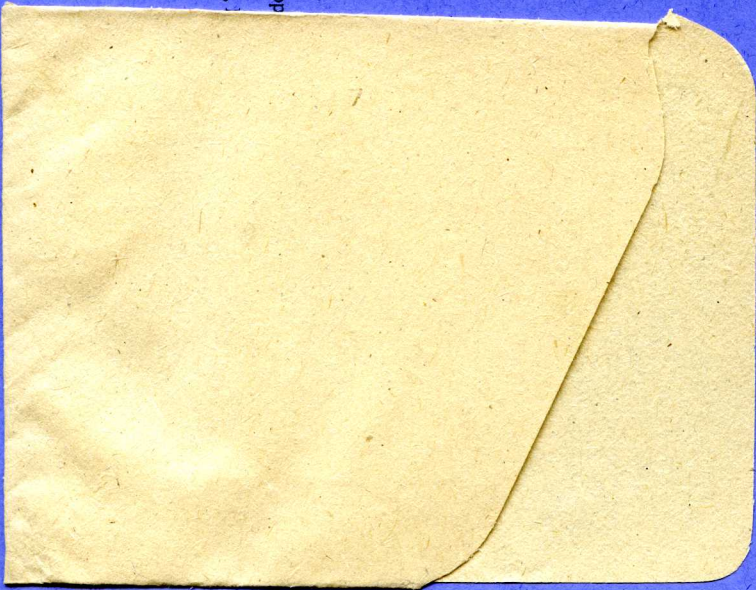
**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата географических наук

ФОР

119992,



Москва – 2006

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность проблемы

Дрейфовые течения являются одной из составляющих океанской циркуляции. Их роль в водо- и теплообмене отдельных районов океана (прежде всего низких широт) может быть существенной и должна учитываться при моделировании и прогнозах. Особенностью дрейфовых течений является то, что они располагаются на поверхности океана, в слое, контактирующим с атмосферой и отличающимся интенсивным вертикальным перемешиванием. Этот слой наиболее подвержен антропогенному загрязнению, и распространение загрязняющих веществ в нем во многом определяется дрейфовыми течениями. Понимание того, как формируются физические, химические и биологические характеристики перемешанного слоя также требует знания о горизонтальной циркуляции вод. В этой связи целесообразно произвести сравнение двух основных компонентов течений в верхнем слое – дрейфового и геострофического.

Океанологи, изучающие динамику океана, традиционно испытывали дефицит данных по течениям. Долгое время наблюдения за океанской циркуляцией велись точечно или на небольших участках с помощью несовершенных средств, таких как механические вертушки и др. Новая эпоха в прямых измерениях океанских течений началась с широкого применения акустических доплеровских профилографов скорости (Acoustic Doppler Current Profiler – ADCP). Судовая модификация ADCP позволяет выполнять непрерывные измерения скорости течений в верхнем слое океана со сравнительно высоким временным и пространственным разрешением.

Внедрение ADCP в океанологическую практику произошло на рубеже 1980-90-х гг. С тех пор было накоплено большое количество данных по океанским

Диссертация выполнена на кафедре океанологии географического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова

### Научный руководитель:

доктор географических наук,  
профессор С.А.Добролюбов

### Официальные оппоненты:

доктор географических наук  
**Б.Н. Филюшкин**

кандидат географических наук  
**В.С. Тужылкин**

### Ведущая организация:

Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации  
Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды

Защита состоится 30 марта 2006 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета Д501.001.68 при Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова по адресу: 119992, Москва, ГСП-2, Ленинские горы, МГУ, географический факультет, ауд. 1801

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке географического факультета МГУ на 21 этаже.

Автореферат разослан 28 февраля 2006 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета,

кандидат географических наук



С.Ф. Алексеева

течениям, и возникла проблема их интерпретации. Одной из возможностей использования этих данных является изучение дрейфовой циркуляции. На эту возможность указывается в задачах международной океанологической программы WOCE (World Ocean Circulation Experiment).

Начиная с классической работы Экмана [Ekman, 1902], появилось много теоретических разработок, посвященных дрейфовым течениям. Вместе с тем, в ходе наблюдений было обнаружено, что циркуляция в верхнем слое может принимать формы спирали или симметричных вихрей (вихрей Ленгмюра). С разнообразием типов дрейфовых течений связан вопрос о суммарном дрейфовом переносе. Известное соотношение, задающее этот поток перпендикулярно направлению ветра [Мамаев, 2001], не учитывает всей сложности взаимодействия на границе океан-атмосфера. Неясна и роль лентморовских вихрей в переносе воды.

Оценка дрейфовой циркуляции по прямым наблюдениям скорости течений на океанологических разрезах может прояснить вопрос о направлении и величине дрейфового переноса и послужить критерием достоверности для моделей.

**Цель работы** – сравнение суммарных геострофических течений (SAT), полученных из прямых измерений скорости АДСР и дрейфовых течений, рассчитанных по моделям циркуляции из поля ветра, выявление роли дрейфовых и геострофических течений в верхнем слое Атлантического океана.

#### **Для достижения этой цели планировалось следующие задачи:**

- Определение глубины распространения дрейфового течения по гидрологическим параметрам;
- Внедрение нового метода построения спирали дрейфового течения;

- Расчет SAT по данным измерений АДСР и дрейфовых течений по данным о поле ветра;
- Сравнение структуры и расходов SAT и дрейфовых течений на океанологических разрезах;
- Расчет геострофических течений при использовании отчетной поверхности с известными значениями скорости;
- Сравнение геострофических и дрейфовых расходов воды через разрезы в перемешанном слое.

#### **На защиту выносятся**

- Полученные автором величины интегральных переносов SAT и дрейфовых течений через океанологические разрезы в Атлантике. Сравнение их с дрейфовыми переносами по средним климатическим данным;
- Особенности вертикальной структуры SAT;
- Оценка геострофического и дрейфового компонентов циркуляции в перемешанном слое в разных районах океана;
- Новый метод расчета дрейфовых течений, его описание и примеры использования.

#### **Научная новизна работы**

В настоящей работе изучение дрейфовой циркуляции производилось не только на основе модельных расчетов по полю ветра, но и с привлечением прямых наблюдений скорости течений. Существует небольшое число подобных исследований. Настоящая работа выделяется из них тем, что в ней впервые проведено комплексное изучение дрейфовой циркуляции в Атлантическом океане на основе данных большого числа океанологических разрезов. Расчет дрейфовых течений производился с использованием выражения полного дрейфового потока и

интегрированием скорости в пределах перемешанного слоя, что тоже является нововведением.

Сравнение геострофических и дрейфовых течений в верхнем слое океана представляет научный и практический интерес, однако выполнялось оно довольно редко. В настоящем исследовании такое сравнение выполнено по данным океанологических разрезов, причем геострофические течения вычислялись от отчетной поверхности с известными значениями скорости (т.е. была использована возможность получения абсолютной, а не относительной геострофической составляющей).

Новый метод расчета дрейфовых течений, предлагаемый в работе, отличается простой в использовании и позволяет задавать произвольное распределение вязкости по глубине.

#### Научная и практическая значимость

Результаты работы позволили сделать выводы о некоторых закономерностях поведения дрейфовых течений. Это должно помочь исследователям в выборе оптимальной модели для расчета дрейфовой циркуляции. Выполненные оценки дрейфового переноса через разрезы в Атлантическом океане являются дополнением к ряду подобных исследований и полезны для изучения процессов океанского массо- и теплообмена. Сравнение дрейфовых и геострофических течений в верхнем слое важно для выявления роли дрейфовой циркуляции в разных районах Атлантического океана. Оценки глубины перемешанного слоя представляют интерес при моделировании процессов обмена между океаном и атмосферой и решении других океанологических задач.

Автор принимал участие в пяти научных рейсах Института океанологии РАН и одним из первых использовал данные о скоростях течений АДСР, полученные российскими океанологическими судами. В ходе исследования была изучена и успешно апробирована принятая в качестве международного стандарта методика обработки измерений АДСР [Fiting, 1991]. Полученная автором технология анализа данных судовых профилографов скорости уникальна для российской океанологии и находит применение в исследованиях, проводимых ИО РАН.

#### Апробация работы

Результаты работы были представлены на двух конференциях «General Assembly of the European Geosciences Union» (Nice, France, 2004; Vienna, Austria 2005), всероссийской конференции «Фундаментальные исследования взаимодействия суши, океана и атмосферы» (Москва, 2002), всероссийской конференции «Ломоносов-2005» (Москва, 2005), конференции «Горизонты географии» (Москва, 2005), а также школе-конференции молодых ученых с участием стран СНГ «Рациональное природопользование» (Москва, 2005). По теме диссертации опубликована одна работа и ряд тезисов, еще две работы в настоящее время находятся в печати.

Общий объем работы составляет **249** страниц, в том числе **99** рисунков, 7 таблиц. Список использованной литературы содержит 134 наименования.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения.

**Во введении** обоснована актуальность работы, излагаются ее цель и задачи, показана научная новизна и практическое значение исследования. Дан общий взгляд на проблему дрейфовой циркуляции и измерения морских течений.

**В первой главе** приводятся основные положения моделей дрейфовых течений Экмана и Мадсена [Madsen, 1977]. Модель Экмана, лежащая в основе современных представлений о дрейфовой циркуляции, рассматривается подробно. Модель Мадсена была выбрана как пример модели, учитывающей наблюдения, по которым угол отклонения поверхностного течения от ветра меньше экмановского.

Также в первой главе приводится описание нового метода расчета дрейфовых течений – геометрического конечно-разностного построения спирали дрейфового течения при произвольно меняющейся вязкости, разработанного автором совместно с В.Л. Лебедевым. Суть метода состоит в следующем. Структура эпюры установившегося дрейфового течения подчиняется условию равенства нулю равнодействующей сил, управляющих движением, для каждого горизонтального слоя воды. Равнодействие состоит в том, что трение, действующее на слой сверху и возникающее из-за геометрической разности скоростей с вышележащим слоем, равно по величине и противоположно по направлению геометрической сумме двух других сил – вектора трения с нижележащим слоем и силы Кориолиса. На основе этого равнодействия сил была составлена в алгебраическом виде программа численного построения эпюры скорости, позволяющая вводить произвольные значения коэффициента вязкости и варьировать граничные условия.

Остальная часть материала первой главы включает: краткий обзор, посвященный циркуляции Лентинора, которая относится к особому типу движения вод, по сей день не нашедшему точного теоретического объяснения; описание динамического метода расчета течений, служащего для расчета геострофической составляющей скорости; географическую характеристику района исследований (климатического поля ветра и соответствующего ему полного дрейфового переноса), а также характеристику течений верхнего слоя. В конце главы приводится обзор методов расчета касательного напряжения ветра и коэффициента вертикальной турбулентной вязкости  $K$  на поверхности океана.

**Вторая глава** включает в себя описание технологии измерений скорости океанских течений, обзор работ по теме исследования, раздел, посвященный расчету глубины распространения дрейфового течения, характеристику исходных данных.

Акустические доплеровские измерители скорости АДСР в настоящее время являются наиболее распространенным типом измерителей скорости морских течений. В работе использовались измерения, выполненные судовой модификацией прибора. Она представляет собой четырехлучевой передатчик и приемник коротких акустических сигналов, установленный под днищем судна, и электронный блок обработки данных, размещенный на борту. АДСР восстанавливает профиль скорости течения на основе сдвига частоты отраженного акустического сигнала. Для получения абсолютных векторов скорости течений измерения АДСР интегрируются с показаниями GPS и судового гироскопаса (спутникового курса).

АДСР позволяет получать непрерывные записи скорости. Вертикальные границы работы прибора составляют от 16-30 до 150-700 м. Качество и

протяженность измерений связаны с техническими характеристиками прибора. Отсутствие данных в приповерхностном слое является, пожалуй, главной проблемой измерений судовым АДСР. Она решается двумя способами: линейной экстраполяцией или так называемым «методом плиты», когда значения скорости в верхнем слое принимаются постоянными, равными значению на верхнем горизонте измерений.

Настоящее исследование методически основано на работе Черескин и Роемича [Chereskin, Roemich, 1991]. Именно в ней впервые было произведено сравнение САТ, полученных из прямых наблюдений скорости АДСР, и дрейфовых течений, рассчитанных по полю ветра. Авторы указанной работы называли измеренную на разных горизонтах скорость абсолютной ( $V_{abs}$ ) и определяли ее как сумму: геострофической составляющей ( $V_g$ ) от отсчетной поверхности  $H_{ref}$ , поправкой к ней на измеренную скорость на той же поверхности ( $V_{ref}$ ) и остаточного (суммарного) агеострофического течения ( $V_a$ ):

$$V_a(z) = V_{abs}(z) - V_{ref} - V_g(z). \quad (1)$$

Выражение (1) позволяет получить компонент скорости, перпендикулярный разрезу. Профиль  $V_a$  служит основой для расчета суммарного агеострофического объема переноса  $M_a$ , который находится интегрированием агеострофической скорости в слое распространения дрейфового течения и по разрезу:

$$\bar{M}_a = \int_{X_2/H_a}^{X_1/0} \bar{V}_a dz dx, \quad (2)$$

где  $H_a$  - глубина проникновения дрейфового течения,  $X_1$  и  $X_2$  - горизонтальные границы разреза. Дрейфовый перенос в точке (полный перенос) находился Черескин и Роемичем по соотношению

$$\bar{S}_a = \bar{\tau} / \rho f, \quad (3)$$

где  $\bar{\tau}$  - касательное напряжение ветра,  $\rho$  - плотность воды,  $f$  - параметр Кориолиса. Перенос, задаваемый (3), перпендикулярен ветру.

Существует несколько работ, использующих методику Черескин и Роемича [Wiffels et al., 1993; Saunders, King, 1995; Martin, Gougeon, 2000]. В них, как и в оригинальной статье Черескин и Роемича, найденный интегральный  $M_a$  хорошо соответствовал интегральному дрейфовому, рассчитанному по (3). Это свидетельствует о приемлемости методики и о том, что ошибки измерений и вычислений не затуманивают дрейфовый компонент, определяемый из измерений АДСР. Лучшее совпадение было обнаружено в работах, выполненных на основе измерений в районах пассатной циркуляции.

При расчете агеострофического переноса необходимо как можно точнее определить нижний предел интегрирования агеострофической составляющей скорости. Этот предел должен соответствовать  $H_d$ . С высокой степенью достоверности таковой можно считать толщину перемешанного слоя  $H_{mix}$ , приблизительно соответствующую вершине сезонного термоклина. Известно, что вязкость обратно пропорциональна стратифицированности среды, поэтому по достижении слоя скачка дрейфовое течение должно быстро затухать. Трудно сказать, насколько сильным препятствием дрейфовому сигналу является стратификация, возможно, он способен проникать достаточно глубоко в пикноклин. Многое зависит от конкретных условий: градиента плотности,

толщины пикноклина, вертикального сдвига скорости, развития двойной диффузии, гравитационных волн и других. Учет всех факторов привел бы к созданию очень сложной модели [Large et al., 1995], что выходит за рамки настоящей работы, в которой принималась гипотеза о «захвате» дрейфового течения перемешанным слоем. В пользу данной гипотезы свидетельствует то, что ограничение дрейфовой циркуляции слоем  $N_{mix}$  наблюдается в ходе натурных экспериментов [Assaf et al., 1970] и принимается во многих моделях течений [Davis et al., 1981; Price et al., 1986; Large et al., 1995].

Эквивалентность величин  $N_d$  и  $N_{mix}$ , принимаемая в настоящей работе, связана также с тем, что изменчивость толщины перемешанного слоя в масштабах порядка одних суток в значительной степени вызвана действием ветра.

Расчет  $N_{mix}$  по гидрологическим параметрам обычно производится установлением критической абсолютной разницы между значением выбранного параметра  $\Pi$  на поверхности и в основании перемешанного слоя:

$$|\Pi(N_{mix}) - \Pi(0)| = (\Delta\Pi)_c, \quad (4)$$

либо заданием критического значения градиента параметра, которое должно указывать на начало слоя скачка:

$$\frac{\Delta\Pi}{\Delta z} = \left( \frac{\partial\Pi}{\partial z} \right)_c, \quad (5)$$

где  $\Delta\Pi$  – это разница величин в слое  $\Delta z$ . В качестве параметров чаще всего используют температуру и плотность воды.

Для расчетов в работе использовано три типа данных: прямые измерения скорости течений судовым ADCP, измерения температуры и солёности зондом STD, измерения скорости ветра над морской поверхностью при условии, что все

измерения выполнены одновременно. Основным источником данных служили материалы экспедиций, выполненных в рамках программы WOCE в 1991-98 гг.

Единообразные измерения скорости течений, ветра и гидрологических параметров возможны на океанологических разрезах, выполненных судами, на которых установлены акустические профилографы и метеостанции. Альтернативным источником данных скорости ветра являются наблюдения из космоса, которые производятся спутниками, оснащенными микроволновыми скаттерометрами. В работе использовались измерения спутников SSMI-6 (Special Sensor Microwave/Imager) периодичностью 12 часов и ERS-1, ERS-2 (European Remote Sensing satellite system), имеющие временное разрешение 1 неделя. Разрезы, обеспеченные данными судовых метеостанций и спутников SSMI, составили основную группу. Хорошее разрешение данных по ветру на этих разрезах позволяет выполнить модельные расчеты профилей скорости дрейфовых течений, период установления которых составляет несколько часов. Данные спутников ERS-1/2 имеют значительно худшее временное разрешение и поэтому пригодны лишь для средней оценки полного дрейфового переноса без учета структуры течений.

STD-измерения в архиве гидрографических разрезов WOCE представляют собой вертикальные профили температуры и солёности с дискретностью 1-2 м.

Измерения скорости ADCP, относящиеся к программе WOCE, имеют вид осредненных за час горизонтальных компонент (северной и восточной) абсолютной скорости в слое, ограниченном вертикальными пределами работы прибора. Пространственное вертикальное разрешение профилей скорости в большинстве случаев составляет 10 м. Измерения скорости, выполненные

российскими судами, обрабатывались автором по методике, рекомендованной в рамках программы WOCE [Fring, 1991], программным пакетом CODAS-3.

Число океанологических разрезов в Атлантическом океане, использованных в настоящей работе, составило 33. Данная цифра учитывает то, что некоторые разрезы были разделены на части по географическому признаку.

В третьей главе подробно описана методика настоящего исследования.

Она включала несколько стадий. На первой стадии все исходные данные приводились к единому виду структур языка программирования Matlab, что облегчало их дальнейшую обработку. По данным скорости рассчитывались профили течений в точках, соответствующих серединам отрезков между станциями. При этом использовалось два исходных профиля, ближайших к заданной точке. Средний профиль скорости восстанавливался линейной интерполяцией. В качестве аргумента интерполяционной функции выступало расстояние от исходного профиля до заданной точки. Преимущество линейной интерполяции значений скорости над другими методами, в первую очередь крайгингом, было показано на примере расчетов по методике работы [4].

На втором этапе исследования выполнялось восстановление значений скорости течений в верхнем слое, где измерения ADCP отсутствуют. Для этого использовались два метода, описанные выше: линейная экстраполяция по двум верхним измерениям и «метод плиты».

Третья стадия исследования включала расчет глубины проникновения дрейфового течения  $H_d$ , которая считалась эквивалентной  $H_{mix}$ . Вначале была произведена попытка рассчитать  $H_d$  по одному универсальному критерию, однако  $H_d$ , найденная подобным образом, в большинстве случаев оказывалась сильно завышенной или заниженной. Таким образом, возможность получения

универсального критерия для расчета глубины  $H_d$  на всех разрезах была исключена. Возникла необходимость поиска различных критериев оценки  $H_d$  для каждого разреза. Это делалось путем варьирования рассчитанной по разным критериям  $H_d$  и сравнения полученных рядов глубины с рядами глубины течения  $D$ . Корреляция этих величин служила показателем качества в определении  $H_d$ .

В результате итерационных расчетов для большинства разрезов удалось определить величины  $H_d$ , демонстрирующие высокую корреляцию с глубиной течения  $D$ . Среднее значение коэффициента корреляции между  $H_d$  и  $D$  составило около 0.6. Однако сопоставление  $H_d$ , полученной на втором этапе, с графиками распределения плотности и температуры воды в верхнем слое на использованных разрезах показало, что величины  $H_d$  иногда оказываются заниженными. В результате был сделан вывод, что лучшим методом определения глубины  $H_d$  на океанологических разрезах является экспертная оценка, предполагающая изучение каждого профиля плотности (температуры) воды на разрезе. Слой скачка в этом случае определяется визуально по перегибу профиля.

На четвертой стадии исследования производился расчет агеострофических течений по методике Черескин и Роемича. При этом варьировались разные отчетные поверхности  $H_{ref}$ . Они задавались либо в виде фиксированного горизонта от 100 м до нижней границы измерений ADCP, либо в виде горизонтов расположенных относительно глубины перемешанного слоя:  $H_{mix}$ ,  $H_{mix} + 10$  м и т.д. Задание широкого диапазона отчетных поверхностей, преследовало цель найти лучший вариант поверхности, расположенной, с одной стороны, ниже глубины проникновения дрейфового течения, а, с другой стороны, достаточно



высоко, чтобы минимизировать ошибки измерений ADCP, растущие и накапливающиеся с глубиной. В результате наиболее подходящей оказалась  $H_{ref} = H_{mix} + 10$  м.

На пятом этапе исследования производился расчет дрейфовых течений по полю ветра. При этом данные, полученные судовыми метеостанциями, усреднялись за период, соответствующий  $\frac{1}{4}$  маятниковых суток и предшествующий моменту прохождения судном середины расстояния между станциями. Из данных спутникового скаттерометра SSM/I выбирались измерения, предшествующие моменту прохождения судном середины расстояния между станциями. С учетом того, что данные SSM/I имеют 12-часовую периодичность, для расчетов использовались значения ветра, полученные в среднем за 6 часов до измерения скорости течений. Данные спутников ERS-1/2 приводились к трехмерному массиву с осями "широта", "долгота", "время". Далее с помощью функции трехмерной интерполяции, доступной в пакете Matlab, находились компоненты скорости ветра в требуемых точках.

Применялись четыре способа расчета полного дрейфового потока  $S_d$ :

- 1) по выражению (3);
- 2) интегрированием в перемешанном слое скорости дрейфового течения, найденной из модели Экмана;
- 3) интегрированием в перемешанном слое скорости дрейфового течения, найденной из модели Малсена;
- 4) интегрированием в перемешанном слое скорости дрейфового течения, найденной по численному алгоритму, предложенному автором.

На шестой стадии исследования рассчитывались средние профили скорости агеострофических и дрейфовых течений на разрезах. При этом в качестве

вертикальной координаты использовались доли  $H_{mix}$ . Такой способ изучения структуры течений также был предложен Черескин и Роемичем [Chereskin, Roemmich, 1991].

Сельмая стадия включала расчет интегральных переносов через разрезы. На восьмой стадии рассчитывались геострофические течения. Для этого использовался динамический метод с условием задания скорости на отчетной поверхности, которая располагалась на горизонте 200м. Далее производилось сравнение дрейфовых и геострофических переносов в перемешанном слое. Последняя стадия включала сравнение величин интегральных переносов САТ и дрейфовых переносов, рассчитанных по ветру *in situ* и климатической базы [Helleman, Rosenstein, 1982].

**Четвертая глава** посвящена обсуждению результатов работы. В первом

разделе рассматриваются результаты апробирования предложенной в работе модели дрейфовой циркуляции (численного алгоритма). При задании постоянного по глубине  $K$  и угла отклонения скорости течения от направления вектора трения  $\gamma = 45^\circ$  расчеты по численному алгоритму дали очень схожие результаты с расчетами по модели Экмана. Разница между глубинами трения, найденными из двух моделей, составила 0.3 м. Оптимальное расхождение между двумя эпорами было отмечено только в самых нижних слоях, где эпюра скорости, найденная по численному алгоритму, постепенно замедляла вращение, а в районе глубины трения останавливалась. Данный эффект связан с низкими значениями касательного напряжения по сравнению с силой Кориолиса. Он также может приводить к такому феномену как изменение направления разворота эпюры. В ходе расчетов удалось обнаружить это явление, но не интерпретировать его. В качестве гипотезы указанный феномен рассматривался автором как одна из возможных

причин генерации вихрей Лентмора, в которых отклонение скорости изменяет с глубиной знак.

С помощью созданной компьютерной программы были проведены численные эксперименты, в которых сделаны попытки учесть и стратификацию, и вертикальный сдвиг скорости, и расстояние от поверхности, и воздействие ветрового волнения. По мнению автора, проще всего это сделать, введя формулы Грандгя-Росси [Мамаев, 2001] и Доброклонского [Доброклонский, 1947] в числитель формулы Андерсона-Манка [Мулк, Andersen, 1948]:

$$K(z) = \frac{\left( \frac{\kappa^2 \pi h_g^2}{18 T} e^{-\frac{4z}{\lambda}} + \kappa^2 (z + z_0) \right)}{(1 + 10Ri)^{1/2}}, \quad (6)$$

где  $\kappa$  – постоянная Кармана,  $h_g$  – высота,  $\lambda$  – длина,  $T$  – период волны,  $\nu$  – скорость трения в воде,  $z_0$  – параметр шероховатости,  $Ri$  – число Ричардсона.

В ходе расчетов была выявлена чувствительность численного алгоритма, главным образом, к двум факторам: углу между векторами трения и скорости течения  $\gamma$  и вертикальному распределению коэффициента  $K$ . При небольших  $\gamma$  дрейфовое течение вытягивалось в сторону действия ветра, медленно разворачивалось и быстро слабело. При больших  $K$  течение почти не уменьшалось с глубиной и, что характерно, сильно замедляло вращение. Малые значения  $K$ , как было наглядно продемонстрировано в расчетах с пикноклином, служат серьезным препятствием для распространения дрейфового течения вглубь: оно резко теряет скорость и стремительно разворачивается.

Во втором разделе четвертой главы приводятся результаты расчетов  $N_{mix}$  в Атлантическом океане. Сравнение графиков  $N_{mix}$  и глубины трения  $D$ ,

расчитанной по соотношению Экмана без множителя  $\pi$ , показало высокую корреляцию этих величин на большей части разрезов. В некоторых случаях, отмеченных в основном в Северной Атлантике,  $N_{mix}$  и  $D$  практически совпадали.

Для экваториальной зоны была выявлена закономерность, заключающаяся в увеличении  $N_{mix}$  с востока на запад. В области высоких широт, главным образом в Южной Атлантике,  $N_{mix}$  иногда значительно превышал  $D$ , что указывает на развитие неветровых процессов перемешивания. Зависимость  $N_{mix}$  от широты проявлялась в увеличении последней при приближении к экватору.

Для сравнения суммарных агеострофических и дрейфовых течений, а также изучения их вертикальной структуры в настоящей работе использовалась методика, апробированная в работах [Chereskin, Roemmich, 1991; Wülfels et al., 1993; Sandtets, King, 1995; Marin, Gouillon, 2000] и описанная выше. Одной из ее составляющих является построение средних по разрезу профилей скорости течений. В качестве вертикальной координаты при этом используется нормированная по  $N_{ref}$  безразмерная глубина. Помимо кривых средней скорости, информативными являются графики интегральных переносов через разрезы.

Два типа профилей изучались на предмет расхождения суммарных агеострофических переносов, рассчитанных от двух отсчетных поверхностей  $N_{ref}$  и при использовании двух способов восстановления значений скорости в верхнем слое. В качестве отсчетных поверхностей были выбраны  $N_{mix} + 10$  м и нижний горизонт измерений АДСР. Разница между соответствующими разным  $N_{ref}$  кривыми показывает, насколько развиты агеострофические течения ниже перемешанного слоя. В результате анализа профилей было получено, что

наиболее существенные различия агеострофических течений, найденных от разных  $N_{ref}$ , характерны для районов пограничных течений низких широт – Гвианского, Бразильского и других.

Использование разных методов восстановления скорости в верхнем слое – «метода плитъ» и линейной экстраполяции – привело к появлению двух типов кривых на графиках средней скорости САТ. Это профиль с изломом, скорость на котором, если смотреть снизу вверх, сначала возрастает, а далее сохраняется постоянной, и линейный профиль, отражающий линейное убывание скорости с глубиной. На графиках интегрального переноса структурные отличия суммарных агеострофических течений отражались не всегда. Оптимые расхождения кривых, соответствующих разным методам восстановления значений скорости, наблюдались на трети разрезов.

Сравнение САТ с дрейфовыми течениями позволило получить ряд интересных результатов. На графиках средней скорости соответствие САТ и дрейфовых течений оказалось неудовлетворительным. Это означает, что структура агеострофических течений в перемешанном слое не может быть точно реконструирована использованными моделями дрейфовой циркуляции. Лучшее соответствие профилей дрейфовых и суммарных агеострофических течений было достигнуто при использовании численного алгоритма для расчета дрейфовой циркуляции. Это свидетельствует о том, что предложенный в настоящей работе метод способен к реалистичному моделированию дрейфовой циркуляции, однако для более правильных расчетов необходимо точное задание распределения вязкости и других входных параметров.

Из четырех типов дрейфовых переносов, которые рассчитывались в работе, лучшую сходимость с суммарным агеострофическим продемонстрировал полный

дрейфовый перенос. Она была достигнута на 20 разрезах в разных районах океана, в первую очередь в пассатной зоне.

Перенос, рассчитанный двойным интегрированием скорости дрейфовых течений, соответствовал агеострофическому хуже. В список, на которых было достигнуто данное соответствие, можно включить 13 разрезов, для 5 из которых было характерно преимущество дрейфового переноса, найденного интегрированием скорости, над переносом по соотношению (3). Эти разрезы отличались нестабильным полем ветра, и отмеченное для них соответствие суммарного агеострофического и дрейфового переносов объясняется тем, что дрейфовые течения на этих разрезах носят неустойчивый характер.

Таким образом, согласно проведенным в работе исследованиям, дрейфовое течение разворачивается в перемешанном слое перпендикулярно ветру. Его вертикальная структура при этом существенно отличается от структуры экзор Экмана и Мадгена. При сильной изменчивости поля ветра течение не успевают развернуться на  $90^\circ$  от направления ветра.

Сравнение дрейфовых и геострофических расхождений, показало, что для некоторых районов Атлантического океана роль дрейфовых течений в циркуляции верхнего слоя может быть очень велика. Дивергенция равных по величине дрейфовых и геострофических переносов была обнаружена на разрезах пассатной зоны, у западного побережья Африки, в некоторых районах Южной и Северной Атлантики.

Сравнение интегральных переносов, полученных в настоящей работе с переносами, рассчитанными по климатическим данным, показало, что использование осредненных данных скорости ветра может приводить к

ощутимым ошибкам при оценке дрейфовой циркуляции. В первую очередь это относится к районам океана, характеризующимся изменчивыми ветрами.

**В заключении** обобщены основные выводы настоящей работы:

- 1) Был предложен и апробирован новый метод расчета дрейфового течения, учитывающий равновесие сил трения и Кориолиса в приповерхностном слое.
- 2) По данным гидрологических съемок была определена глубина распространения дрейфового течения на разрезах в Атлантическом океане.
- 3) На основе методики, предложенной в зарубежных работах и развитой в настоящей диссертации, удалось определить суммарные агеострофические течения на основе прямых наблюдений скорости. Было показано, что они лучшим образом соответствуют течениям, рассчитанным по выражению полного дрейфового переноса.
- 4) Были выявлены структурные особенности суммарных агеострофических течений, обнаружены существенные отличия вертикальных профилей скорости САТ от дрейфовых течений.
- 5) Сравнение дрейфовых и геострофических течений показало, что в отдельных районах Атлантического океана роль дрейфовой циркуляции в перемещанном слое может быть велика.
- 6) Были найдены величины дрейфового и суммарного агеострофического переносов через океанологические разрезы в Атлантике. Произведено сравнение полученных результатов с результатами расчетов по климатической базе данных.

**Список опубликованных работ по теме диссертации:**

1. Беседин Д.Е. Изучение дрейфовой динамики на разрезе 19-го рейса НИС "Академик Сергей Вавилов" в Южной Атлантике: Тез. докл. Школы-конференция молодых ученых с участием стран СНГ «Рациональное природопользование». – М.: МГУ, 2005. – 456 с.
2. Беседин Д.Е., Изучение циркуляции на разрезе в Южной Атлантике: Сб. статей «Фундаментальные исследования океанов и морей»: – М.: Наука, 2006. – в печати.
3. Беседин Д.Е., Шаповалов С.М., Дрейфовый перенос через 60° с.ш. в Северной Атлантике: Сб. статей «Фундаментальные исследования океанов и морей». – М.: Наука, 2006. – в печати.
4. Демидов А.Н., Беседин Д.Е. Об интерполяции океанологических характеристик // Вестник Моск. ун-та. Сер. географ. – 2003. – №6. – С. 22-27.
5. Демидов А.Н., Беседин Д.Е. Перенос водных масс по данным разрезов на 60° с.ш.: Мат. науч. конф. «Ломоносов-2005». – [http://www.geogr.msu.ru/GeoSite/docs/Demidov\\_Besedin.pdf](http://www.geogr.msu.ru/GeoSite/docs/Demidov_Besedin.pdf)
6. Добролюбов С.А., Демидов А.Н., Беседин Д.Е. Современные океанографические исследования в Атлантическом секторе Южного океана: Мат. науч. конф. «Горизонты географии». – М.: МГУ, 2005. – С. 252-258.
7. Шаповалов С.М., Беседин Д.Е. О Геострофической и агеострофической составляющих скорости течений верхнего слоя Атлантики: Тез. докл. Всерос. науч. конф. «Фундаментальные исследования взаимодействия суши, океана и атмосферы». – М.: МГУ, 2002. – 286 с.
8. Beseidin D.E. Water circulation in the upper layer of the South Atlantic ocean // European Geosciences Union 1st General Assembly: International conference thesis. April 2004 – Nice, France – № EGU04-A-01047.
9. Beseidin D.E. Research of aгеostrophic transport in the Atlantic Ocean using data of past Russian cruises // European Geosciences Union General Assembly 2005: International conference thesis. April 2005 – Vienna, Austria – № EGU05-A-00381.

