

АКАДЕМИЯ НАУК УССР
МОРСКОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи
УДК 551.465

НАВРОЦКИЙ ВАДИМ ВАСИЛЬЕВИЧ

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВНУТРЕННИХ ВОЛН И ТОНКОЙ
СТРУКТУРЫ В ОКЕАНЕ

01.04.12 - геофизика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

ВЛАДИВОСТОК
1988

Работа выполнена в Тихоокеанском океанологическом институте
Дальневосточного отделения АН СССР

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор В.В.Ефимов,
доктор физико-математических наук Ю.А.Иванов,
доктор физико-математических наук К.В.Коняев

Ведущее предприятие - Институт океанологии им. П.П.Ширшова АН
СССР

Защита состоится "20" апреля 1989 г.
в 10 час. на заседании специализированного совета Д.016.01.01
Морского гидрофизического института Академии наук УССР

а, 28

библиотеке Морского гидро-

на 1989 г.

А.М.Суворов

I. Общая характеристика работы.

Актуальность проблемы. Одним из наиболее общих свойств океанов и морей является большая вертикальная неоднородность поля плотности, обусловленная, главным образом, вертикальными градиентами температуры и солености. За исключением отдельных специфических районов потенциальная плотность воды увеличивается с глубиной, т.е. в направлении градиента гравитационного поля. Для такой среды основным присущим ей видом движений в большом диапазоне волновых чисел и частот (до 5-6 десятичных порядков) являются внутренние гравитационные волны (ВВ). Важность этого процесса определяется несколькими обстоятельствами: 1) ВВ содержат большую долю кинетической энергии океана (того же порядка, что течения и вихри), приводят к быстрым вертикальным перемещениям частиц жидкости (до 100 м за периоды порядка часов) и охватывают практически всю толщу океана. 2) ВВ переносят кинетическую энергию на всю глубину океана по вертикали и на многие сотни километров по горизонтали, т.е. создают в океане некоторый энергетический континуум независимо от локализации зон генерации. 3) Создавая большие перемещения изопикнических поверхностей, ВВ влияют на все гидрофизические, гидрохимические и гидробиологические процессы в океане: распространение акустических и оптических сигналов, концентрации взвесей и различных примесей, фотосинтез, вертикальные перемещения фито и зоопланктона, концентрацию nekтона и т.п. Поэтому экспериментальные и теоретические исследования внутренних волн не утрачивают своей актуальности уже более 30 лет.

Основным параметром, определяющим характеристики ВВ, является вертикальный градиент плотности или выражаемая через него частота Вэйслия-Брента $N = (g/\rho \cdot dp/dz)^{1/2}$, поэтому с точки зрения ВВ чрезвычайно важным становится явление тонкой вертикальной структуры (ТС)-значительных колебаний градиентов плотности и других характеристик



на небольших вертикальных расстояниях порядка десятков и до единиц метров. Тонкая вертикальная структура представляет также большой самостоятельный интерес, поскольку слои с большими и малыми градиентами плотности - непрямые элементы ТС - воздействуют на все указанные выше процессы и, в особенности, на вертикальные переносы различных свойств и субстанций в океане. Взаимосвязь внутренних волн и тонкой структуры является объектом многочисленных исследований в последние 15 лет как с точки зрения влияния ТС на характеристики ВВ, так и с точки зрения образования ТС при воздействии ВВ на среднюю крупномасштабную структуру. Именно эти аспекты проблемы ВВ и ТС были первоначальной целью наших экспериментальных исследований, но в процессе работы оказалось, что решение проблемы взаимодействия ВВ и ТС неразрывно связано с глобальной проблемой вертикальных переносов энергии, импульса, тепла, примесей, т.е. вертикального перемешивания в океане. Таким образом, актуальность работы определяется как объектами исследования, так и теми аспектами их взаимодействия, которые изучались.

Цель и задачи исследования. Основной целью настоящей работы является изучение статистических характеристик внутренних волн и тонкой структуры, закономерностей их взаимодействия, а также формирования тонкой вертикальной структуры и вертикальных переносов массы в процессе взаимодействия внутренних волн с крупномасштабной средней структурой поля плотности.

Основное содержание составляет статистический анализ наблюдений, выполненных в различных океанах и различными методами. В процессе интерпретации экспериментальных данных были предложены на основе физического анализа новые подходы к объяснению ряда обнаруженных закономерностей, подкрепленные численными расчетами и оценками с использованием соответствующих гидродинамических моделей.

В соответствии с поставленной целью решались следующие осно-

вные задачи: 1) Физический и методический анализ понятий процесса и структуры, течений, волн, турбулентности, средней, тонкой и микроструктуры, взаимосвязей между типами процессов и структур и вытекающих отсюда ограничений. 2) Анализ различных статистических характеристик колебаний температуры и скорости течений в океане в масштабах ВВ, в особенности вертикальной структуры этих характеристик, и их интерпретация с точки зрения взаимодействия ВВ со средней структурой поля плотности. 3) Спектральный анализ в области частот и волновых чисел, а также анализ распределений вероятностей спектральных оценок для ВВ. 4) Анализ взаимодействия колебаний на различных глубинах с помощью двумерных статистических характеристик, количественная оценка горизонтальных и вертикальных потоков импульса, энергии, тепла. 5) Взаимосвязь статистических характеристик ВВ и ТС. 6) Характеристики ТС и ВВ в зоне шельфа, где велика активность коротких ВВ, пространственная и временная эволюция вертикальной структуры температуры в этой зоне. 7) Изучение вертикальной структуры скорости течения при наличии ВВ. 8) Численное моделирование дисперсионных характеристик свободных линейных ВВ при наличии ТС. 9) Численное моделирование взаимодействия ВВ и ТС с использованием предложенной феноменологической модели. 10) Физический анализ процессов вертикального переноса и формирования ТС в стратифицированной жидкости, обусловленных воздействием внутренних волн.

Методы исследования. Для решения поставленных задач необходимо было использование различных методов. Работы в море состояли из четырех основных видов измерений: 1) Пространственные разрезы с помощью буксируемых систем датчиков (точечных либо распределенных). 2) Пространственные разрезы, состоящие из зондирований полей температуры, солености, скорости на станциях разреза. 3) Непрерывные наблюдения температуры, солености, течений на фиксированных горизонтах (либо в слоях) на буйковых станциях либо с закрепленных

судов. 4) Длительные серии зондирований температуры, солености, скорости течений с закоренных либо дрейфующих судов.

Наиболее трудоемким оказалось использование и развитие статистических методов обработки и анализа случайных процессов в океане. Непрерывность и большой спектральный диапазон, нестационарность и отсутствие априорных сведений о видах вероятностных распределений, нелинейность процессов - все это создает большие трудности применения известных статистических методов и требует их модификации и развития. При интерпретации результатов наблюдений и моделировании изучаемых процессов использовались численные методы решения дифференциальных уравнений на ЭВМ и аналитические методы.

Значительные трудности исследования были связаны с техническим обеспечением экспериментальных работ, и эти трудности преодолевались в большой степени благодаря усилиям сотрудников Атлантического отделения ИО АН СССР (лаборатория В.Т.Паки) и Тихоокеанского океанологического института ДВО АН СССР (лаборатория акустических методов исследования океана В.П.Шевцова).

Научная новизна работы. В основу диссертации положены работы, выполненные автором в 1970-1986г.г. В процессе исследований были разработаны и реализованы в виде программ новые алгоритмы расчета ряда статистических характеристик по дискретным реализациям непрерывных случайных процессов, созданы блоки взаимосвязанных программ для автоматизированной обработки множества скалярных и векторных рядов с расчетом всех статистических характеристик до третьих двухточечных моментов включительно, разработаны методы представления, анализа и интерпретации статистических характеристик.

Анализа всего комплекса статистических характеристик колебаний температуры и скорости течений в верхнем 300-метровом слое океана выполнен впервые в работах автора - рассматривались одновременно средние значения, дисперсия, асимметрия, эксцесс, энтропия распределений, критерии стационарности, одномерные распределения вероят-

ностей, структурные, корреляционные и спектральные функции, двумерные и условные распределения вероятностей, взаимные корреляции, модуль и фаза взаимных спектров, когерентность и передаточные функции. Впервые проведен детальный анализ вертикальной структуры указанных статистических характеристик в их взаимосвязи с внутренними волнами, а также наблюдения и объяснение воздействия наклонно распространяющихся ВВ на вертикальную структуру течений в океане. Новым является анализ распределений вероятностей для спектральных оценок ВВ в океане.

Экспериментально обнаружены взаимосвязь максимумов в спектрах ВВ и ТС, миграция элементов тонкой структуры на глубину при прохождении пакетов ВВ, быстрая перестройка вертикальной структуры термоклина, изменение теплосаписа стратифицированных слоев и дисперсионных свойств ВВ в шельфовой зоне моря.

В концептуальном плане предложен новый подход к объяснению механизма образования тонкой структуры и больших вертикальных потоков плавучести. Рассмотренные ранее в работах других авторов механизмы - адвекция в зонах слоистых течений, двойная диффузия, нелинейность и разрушение ВВ - являются специфичными и не дают возможности объяснить повсеместность и значительную степень универсальности явления ТС и больших вертикальных потоков свойств. Наиболее эффективным механизмом перемешивания и формирования ТС традиционно считается турбулентность: в зонах существования турбулентности перемешивание приводит к однородности, в зонах отсутствия турбулентности сохраняются градиенты свойств - чередование турбулентных и нетурбулентных зон создает тонкую структуру. Роль внутренних волн сводится к тому, что 1) в некоторых областях сдвиговой либо амплитудной неустойчивости ВВ разрушаются, создаются зоны турбулентности со всеми указанными выше последствиями; 2) слабые нелинейности при прохождении ВВ приводят к тонкоструктурным деформациям средних полей.

Нами проанализированы различные аспекты взаимодействия ВВ и турбулентности и рассмотрена роль стокового переноса во внутренних волнах как основного конвективного механизма формирования ТС и увеличения вертикального перемешивания в стратифицированном океане. В результате роль внутренних волн оказалась довольно многообразной, но основные механизмы воздействия устойчивых ВВ на вертикальную структуру гидрофизических полей можно свести к следующим:

- 1) Средние деформации за счет нелинейности волн конечной амплитуды.
- 2) Модуляция фоновой мелкомасштабной турбулентности вертикальной структурой ВВ.
- 3) Взаимодействие квазигоризонтальной турбулентности с полем параметров, создаваемым внутренними волнами.
- 4) Взаимодействие ВВ и больших средних горизонтальных градиентов поля плотности.
- 5) Параметрическое взаимодействие разномасштабных ВВ - стоковых перенос в коротких и высокочастотных ВВ накладывается на градиенты, создаваемые длинными и низкочастотными волнами.

Научная и практическая ценность работы. Внутренние волны и турбулентность являются универсальными процессами, а тонкая структура - универсальным явлением для стратифицированных потоков жидкостей и газов. Поэтому исследование закономерностей их взаимодействия, изменения структуры среды при прохождении волн и соответствующей параметрической перестройки волнового поля представляет большой научный интерес.

Практическая ценность работы определяется тем, что основные ее результаты ведут к возможности прогностических расчетов вертикальных структур гидрофизических характеристик в океане, с которыми связаны геострофические течения, крупномасштабные гидрометеорологические процессы и соответствующие им дрейфовые течения, гидробиологические характеристики (расположение и качество продуктивных зон), особенности распространения акустических сигналов в океане. Последнее очень важно для надводной и подводной навигации, подводного бурения и других видов деятельности человека в океане. Не ме-

нее важной является возможность расчета локальных динамических характеристик, потоков энергии и тепла, диффузии различных примесей, в том числе веществ, загрязняющих океан. Скорости гидрохимических, биохимических и геохимических процессов, нейтрализующих загрязнение, могут меняться на несколько порядков в зависимости от динамических процессов, поэтому локальное их прогнозирование приобретает большое значение.

Апробация работы и публикации. Результаты, изложенные в работе, докладывались на Всесоюзном симпозиуме по стратифицированным течениям в Новосибирске (1970 г.), на II и IV Всесоюзных симпозиумах по автоматизации научных исследований морей и океанов в Севастополе (1969 г. и 1972 г.), на XV Генеральной Ассамблее Международного Геофизического и Геодезического Союза в Москве (1971 г.), на I и IV Всесоюзных конференциях по исследованию и освоению ресурсов Мирового океана во Владивостоке (1976 г. и 1983 г.), на XIV Тихоокеанском научном конгрессе в Хабаровске (1979 г.), на общегородских семинарах, проводившихся в Москве под руководством академика А.Н.Колмогорова (1972 г.) и академика Л.М.Бреховских (1978 г.), на всесоюзном семинаре-симпозиуме "Тонкая структура и синоптическая изменчивость океанов и морей" в Таллине (1980 г.), на II и III съездах советских океанологов (Ялта, 1982 г., Ленинград, 1987 г.), на I Тихоокеанском симпозиуме по морским наукам в Находке (1986 г.), на общепитетских семинарах Института океанологии АН СССР в Москве (1972 г.), на семинарах отделов и лабораторий этого института, на семинарах отдела турбулентности МГИ АН УССР, на общепитетских семинарах Тихоокеанского океанологического института ДВО АН СССР.

По теме диссертации опубликовано 42 работы, из них 15 в соавторстве.

Структура и объем работы. Первая глава является вводно-методической, в ней дается общий физический анализ изучаемых процессов.

их место в общей картине гидрофизики океана, даются определения основных используемых в работе понятий. Затем следуют две главы, посвященные анализу экспериментальных данных, полученных в Атлантическом океане. Детальный анализ статистических характеристик колебаний температуры и скорости течений затрагивает различные аспекты гидрофизики океана и, в особенности, влияние характеристик средней и тонкой структуры на внутренние волны. Четвертая глава содержит результаты наблюдений в шельфовой зоне, в дальневосточных морях и в Тихом океане. Здесь центр тяжести смещается на анализ статистических характеристик тонкой структуры и их взаимосвязи с внутренними волнами. В пятой главе, посвященной гидродинамической интерпретации наблюдений, изложены результаты численного моделирования с использованием гидродинамических уравнений, а также основные физические идеи и оценки роли предложенных механизмов для объяснения наблюдаемых явлений.

Диссертация состоит из введения, пяти глав основного текста и заключения. Объем работы 285 стр. машинописного текста, 68 рис. и 8 таблиц. Список литературы содержит 210 наименований.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Колебания температуры и скорости течений в верхнем 300-метровом слое устойчиво стратифицированного океана в диапазоне масштабов десятки метров - километры и периодов от 5 мин до 10-20 ч определяются, главным образом, внутренними гравитационными волнами, основные характеристики которых для большей части указанного диапазона хорошо описываются в линейном приближении. Нелинейные эффекты существенны для верхнего и нижнего участков рассмотренного диапазона ($\lambda \leq 100-300$ м и $\lambda > 2-3$ км) и обусловлены как конечными амплитудами ВВ, так и квазигоризонтальной турбулентностью. Оценки эффективных коэффициентов для вертикальных потоков импульса и тепла в указанном диапазоне приводят к значениям до $10-50 \text{ см}^2/\text{с}$.

2. В зонах генерации и распространения внутренних волн прои-

сходит быстрая перестройка вертикальной структуры поля плотности с образованием тонкой структуры, утолщением термоклина, увеличением теплозапаса стратифицированных слоев.

3. Тонкая вертикальная структура приводит к усилению межмодового (многомодового) взаимодействия внутренних волн, т.е. к потоку энергии из низших мод в высшие. Взаимодействие концентрируется на устойчивых прослойках тонкой структуры, и его конечным результатом должно быть увеличение тенденции к разрушению ВВ и образованию турбулентных пятен, а тем самым к дроблению тонкой структуры вплоть до микроструктуры.

4. Внутренние гравитационные волны воздействуют на вертикальный перенос и приводят к образованию тонкой вертикальной структуры с помощью пяти механизмов: 1) Деформация средних полей нелинейными волнами конечной амплитуды. 2) Модуляция фоновой мелкомасштабной турбулентности вертикальной структурой ВВ. 3) Взаимодействие квазигоризонтальной турбулентности с полем плотности, создаваемым внутренними волнами. 4) Взаимодействие внутренних волн со средними градиентами плотности, особенно в зонах с большими горизонтальными градиентами, т.е. конвективный перенос за счет стока дрейфа во внутренних волнах. 5) Параметрическое взаимодействие разномасштабных ВВ, при котором средние поля скорости высокочастотных и коротких волн (стоксов перенос) накладываются на поле плотности, создаваемое длинными и низкочастотными волнами. Последние три механизма являются наиболее универсальными и могут приводить к вертикальным переносам с эффективными коэффициентами до $1-10 \text{ см}^2/\text{с}$ в океане и до $10-100 \text{ см}^2/\text{с}$ в шельфовой зоне.

II. Содержание работы.

Во введении сформулированы цель и основные задачи исследования, обсуждаются различные подходы к объяснению механизма формирования тонкой вертикальной структуры, актуальность и практическая значимость проблемы, новизна результатов автора, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

Глава I. Гидрофизические явления в океане, связанные с внутренними волнами и турбулентностью.

§1.1 содержит общеметодический анализ понятий структуры среды и процесса на структуре, различий между волнами, турбулентностью и течениями. Для практического разделения этих процессов вводится критерий $D = F/\epsilon$, равный отношению скорости потока энергии F в пространстве к скорости диссипации этой энергии ϵ . Величина D , имеющая смысл масштаба пространственного распространения фиксированной порции энергии рассматриваемым видом движений, для трехмерной турбулентности в океане на несколько порядков меньше, чем для волн и течений. Физические различия определяются тем, что течения - механизм переноса энергии вместе с массой, волны - механизм переноса энергии через среду при малом среднем переносе массы (скорость переноса массы намного меньше скорости переноса кинетической энергии), турбулентность - механизм локальной диссипации механической энергии и выравнивания термодинамических свойств среды (т.е. максимального увеличения энтропии). Учет только молекулярных процессов при расчете ϵ приводит к нереально большим значениям D для течений и волн, откуда следует, что в реальном океане одновременно с течением и волнами должны существовать вместе или по отдельности а) мелкомасштабная турбулентность, б) работа против архимедовых сил (т.е. перенос массы в гравитационном поле).

В §1.2 производится группировка явлений и процессов в зависимости от пространственных масштабов, позволяющая понять место и

роль исследуемой проблемы в общей картине гидрофизики океана. Диапазон пространственных масштабов $1-10^8$ см разделен на четыре интервала: крупные масштабы (1000-10 км), средние (10 км - 100 м), малые (100-1 м) и микромаштабы (1 м - 1 см). Относительная роль различных процессов - течений, вихрей, волн Россби, гравитационных, акустических и капиллярных волн, турбулентности двумерной и трехмерной - меняется при переходе из одного диапазона масштабов в другой. При этом существует четкая тенденция увеличения случайности, трехмерности, завихренности при переходе от больших масштабов к меньшим, что значительно облегчает методы описания процессов в отдельных интервалах.

С точки зрения методической пространственной, временной и амплитудной структурам процессов соответствуют модельные функции - пространственные корреляции (или спектры по волновому числу), временные корреляции (или спектры по частоте), распределения вероятностей (или характеристические функции). Для получения с нужной точностью модельных функций с помощью измерений, т.е. для адекватного описания процессов, основные характеристики приборов - пространственное разрешение, инерционность, чувствительность - и связи между ними должны определенным образом соответствовать указанным характеристикам и связям между ними в реальных процессах.

В §1.3 дано физическое описание и определение внутренних волн и методов получения информации о них. С точки зрения кинематической ВВ проявляются в быстрых и больших вертикальных смещениях изолиний гидрофизических параметров, их квазипериодической пространственной и временной структуре, в появлении зон повышенных и пониженных градиентов, чередующихся квазипериодически в пространстве и во времени. Динамические эффекты ВВ проявляются в их воздействии на поле плотности и различные тела в море, перемещении пассивных примесей, взаимодействии с полем крупномасштабных течений и с мелкомасштабной турбулентностью.

Измерение скоростей частиц во внутренних волнах технически очень сложно, поэтому при наблюдениях ВВ следят за изменением какого-либо скалярного параметра, колебания которого с достаточной точностью отражают динамику ВВ. Наиболее широко используемым параметром является температура, но в некоторых случаях (большие потоки тепла, тонкая структура и т.п.) это может приводить к большим погрешностям, для устранения которых создаются специальные измерительные системы.

В §1.4 дано определение и физическое описание турбулентности в океане. Наиболее яркое ее проявление - интенсивное локальное перемешивание всех свойств: импульса, тепла, соли, газов, взвесей и других активных и пассивных примесей. По горизонтальным направлениям, где масштабы движений ограничены только размерами бассейна и эффектом вращения Земли, эффективные коэффициенты обмена могут быть в миллионы раз больше молекулярных. По вертикали, где масштабы ограничены глубиной бассейна и архимедовыми силами, эффективные коэффициенты могут быть на два-четыре порядка больше молекулярных. Распределение свойств внутри турбулентной зоны резко отличается от распределения в нетурбулентных областях потока, что создает возможности наблюдения явления и его следствий с помощью многих различных способов.

Главной трудностью при измерении турбулентности в море является выбор системы отсчета и необходимость сочетания детализации процесса по пространственно-временным координатам с большой прочностью конструкции прибора. Обсуждаются критерии, которые позволяют судить о качестве и выбирать наиболее удобный способ измерений.

В §1.5 обсуждается и дается определение понятия тонкой структуры. В соответствии с изложенной в §1.1 концепцией, что различные виды структуры определяются как локальные инварианты определенных процессов, понятие тонкой вертикальной структуры рассматривается в связи с процессом внутренних волн. Тонкая структура является той

частью пространственных неоднородностей среды, на которую практически не реагируют крупномасштабные процессы (течения, синоптические вихри и т.п.), но от которой существенно зависят ВВ. Весь спектр возможных внутренних гравитационных волн будет учтен, если мы выполним фильтрацию на инерционной частоте - это и будет верхняя граница частот для выделения ТС в общем случае. Но поскольку возможные периоды ВВ лежат в большом диапазоне, то очевидно, что могут существовать элементы структуры, влияющие на короткие и высокочастотные волны, но исчезающие при осреднении по периодам низкочастотных волн. Пересечение областей временных масштабов ТС и ВВ приводит к тому, что характеристики и ВВ и ТС могут быть определены только с ограниченной точностью, вытекающей из полученного в работе соотношения неопределенности между интервалом осреднения T_{fs} для выделения ТС и максимальной частотой Вайселя N_m :

$$T_{fs} \cdot N_m \geq 2\pi. \quad (1)$$

Практически тонкая структура как часть изменчивости пространственных распределений плотности и других параметров с масштабами намного меньше глубины океана может быть выделена с помощью двухсторонней фильтрации: а) на больших периодах (неделя и больше), соответствующих крупномасштабным процессам, - для отделения от крупной структуры (*gross structure*); б) на малых периодах в интервале $2\pi f^{-1} - 2\pi N^{-1}$ - для отделения от микроструктуры.

Глава 2. Одномерные статистические характеристики колебаний температуры и скорости течений в океане в масштабах внутренних волн.

В §2.1 производится анализ структурных функций и проверки на стационарность изучаемых процессов. Главное внимание уделяется изменению статистических характеристик по вертикали. Построены разрезы пространственных и временных структурных функций, произведены оценки скорости распространения возмущений различных масштабов. Сопоставляются структурные функции колебаний температуры и скорости течения. Показано, что в масштабах порядка сотен метров может быть

существенной роль горизонтальной турбулентности.

Большие вертикальные градиенты структурных функций сосредоточены в слоях с максимальными градиентами плотности. Обнаружены случаи, когда энергия температурных колебаний, отражающих, главным образом, вертикальные смещения, увеличивается одновременно с уменьшением горизонтальной скорости течения и ее вертикального градиента. Это явление интерпретируется как возможность генерации внутренних волн за счет вертикального сдвига средней скорости. Большая перемежаемость ВВ с длинами до 5-10 км и периодами до 5-10 ч обнаружена в результате проверок на стационарность по средним значениям и по дисперсиям.

В §2.2 производится анализ одномерных распределений вероятностей колебаний скорости течений и температуры. В настоящее время доминирует представление о нормальном законе распределения вероятностей для ВВ в океане. Детальный анализ показывает, что однозначного и простого ответа на вопрос не существует. Большинство распределений имеет заметную асимметрию, причем знак асимметрии часто меняется с глубиной, что можно связать с теорией нелинейных волн Маггаарда. Боковые максимумы плотностей вероятностей при значениях аргумента вблизи ± 6 четко указывают на волновую квазигармоническую структуру рассматриваемых колебаний. Преобладают два типа процессов: 1) сумма синусоидального и нормального процессов (трехвершинные распределения); 2) периодически нестационарные - произведения периодической функции на случайную нестационарную.

Отфильтровывание компонент с масштабами больше 2,5-3 км приводит к однородности распределений по вертикали, что говорит о тенденции к статистическому подобию процессов на разных глубинах в наиболее насыщенном интервале масштабов ВВ. Колебания скорости течения можно описывать распределениями Гаусса или Рэйлея в верхнем слое, но глубже верхнего термоклина это имеет смысл только для неоднородностей с временными масштабами меньше 10 ч

В §2.3 производится спектральный анализ наблюдений в трех удаленных друг от друга районах Атлантического океана. Пространственные колебания температуры в масштабах 5 км - 100 м имеют устойчивые спектры вида $k^{-3} - k^{-4}$ с увеличением крутизны вблизи масштабов 200-150 м. Временные колебания температуры имеют спектры вида $\omega^{-2} - \omega^{-3}$ и характерный излом с увеличением крутизны вблизи частоты Вязяля. Сравнение характерных точек пространственных и временных спектров показывает, что неоднородности с масштабами 200-150 м и периодами вблизи частоты Вязяля переносятся практически со средней скоростью течения.

Спектры скорости очень близки к спектрам температуры при малых средних скоростях течений и сильно различаются при больших средних скоростях - при этом резко уменьшается наклон спектров скорости за счет увеличения энергии высокочастотных компонент. Эти компоненты, распространяющиеся со средней скоростью течения и имеющие масштабы 100-500 м, очевидно, отражают вклад квазигоризонтальной турбулентности.

Большая степень универсальности спектров колебаний температуры, обусловленных, главным образом, внутренними волнами, может иметь несколько объяснений, из которых принципиально важными и различными являются насыщенность всех мод на каждой глубине по критерию равенства фазовой и средней скоростей и внутренняя динамика, т.е. нелинейные взаимодействия в поле ВВ.

Вертикальная структура спектров температуры и скорости характеризуется интенсивными замкнутыми максимумами в слоях с максимальными градиентами средней температуры и скорости. Для скорости картина всегда сложнее, чем для температуры, причем в верхних слоях велика роль вращения вектора, с увеличением глубины она резко уменьшается. В районах с хорошо выраженными колебаниями вертикального градиента плотности (ТГ) спектры ВВ всегда имеют хорошо выраженные максимумы как при малых голюновых числах и частотах, так и

при больших.

В §2.4 рассматриваются распределения спектральных оценок для внутренних волн в океане. Дискретность рассчитываемых спектров приводит за счет флуктуации частоты в полосе $\Delta\omega$ к искажению спектральных оценок, увеличивающемуся с увеличением крутизны спектра. Результатом является асимметрия распределений спектральных оценок. Вторая, повидимому, основная причина асимметрии распределений - большая перемежаемость поля ВВ. Анализ эмпирических спектров пространственных колебаний температуры позволил обнаружить довольно резкое изменение распределений спектральных оценок, переход от близких к нормальному при $\lambda > 150-200$ м, к экспоненциальным с положительной асимметрией при $\lambda < 150$ м. Масштаб $\lambda = 150$ м соответствовал в нашем случае толщине слоя верхнего термоклина с максимальными градиентами.

Положительный эксцесс и непосредственный анализ распределений вероятностей приводят к выводу, что фактические доверительные интервалы для спектральных оценок почти везде меньше, чем обычно принимаемые в предположении нормальности. Соответственно занижены доверительные вероятности.

Получена эмпирическая формула, аппроксимирующая средний спектр ВВ на рассматриваемом полигоне:

$$S^0(k) = \begin{cases} 45 \exp\{-0.536 [\ln \frac{k}{k_0}]^2\}, & k/k_0 \leq 30, \\ 100 (k/k_0)^{-2}, & 30 < k/k_0 \leq 64, \quad k_0 = 2.5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1}. \end{cases} \quad (2)$$

Глава 3. Двухмерные статистические характеристики колебаний температуры и скорости в масштабах внутренних волн.

В §3.1 производится взаимный корреляционный анализ. Взаимные корреляции колебаний температуры или скорости на различных горизонтах отфильтровывают локальные эффекты тонкой структуры и турбулентности и потому являются удобной характеристикой для описания ВВ. Взаимные корреляции между временными колебаниями различ-

ных компонент скорости или температуры и скорости в одних и тех же точках при нулевом аргументе дают значения интегральных потоков импульса и тепла.

По сдвигам максимумов взаимных корреляций пространственных колебаний температуры на различных глубинах получены оценки вертикальных скоростей распространения возмущений 1,5-3,0 см/с. Изучение вертикальной структуры корреляций температуры на различных горизонтах и разложение на ортогональные составляющие приводит к выводу о хорошем соответствии наблюдаемых колебаний теоретическому представлению о линейных внутренних волнах, позволяет оценить модальный состав волновых колебаний, преобладание низших мод и распространение тепловых возмущений по вертикали от верхней границы термоклина.

Поле скорости имеет более сложную структуру, чем поле температуры, что выражается в сложном поведении взаимных корреляций скорости на плоскости $\mathcal{Z}\mathcal{Z}$, большой их несимметричности, сдвигах зон максимумов, отражающих направленность процессов.

При осреднении за период порядка недели горизонтальные потоки импульса в наших наблюдениях имели максимальные значения порядка десятков $\text{см}^2/\text{с}$, а горизонтальные потоки тепла порядка единиц $\text{см}\cdot\text{град}/\text{с}$ на горизонте 25 м, в стратифицированном слое на порядок меньше. Для неоднородностей с периодами меньше 10 час максимальные потоки импульса оказываются того же порядка и могут даже увеличиваться по сравнению с полными, потоки тепла уменьшаются на порядок в квазиоднородном слое, в 2-5 раз в стратифицированном. Интегральные вертикальные потоки импульса и тепла, полученные по горизонтальным с помощью уравнения неразрывности, имеют максимальные значения того же порядка, что и горизонтальные, и приводят к эффективным коэффициентам порядка 1-10 $\text{см}^2/\text{с}$. Поскольку мелкомасштабная трехмерная турбулентность - явление локализованное, а большие верти-

такие переносы наблюдаются повсеместно, напрашивается вывод о нетурбулентной их природе. Альтернативным механизмом должны быть, по видимому, сами внутренние волны, и соответствующий анализ будет произведен в главе 5.

В § 3.2 производится взаимный спектральный анализ наблюдений. Спектры потоков импульса и тепла в высокочастотной области в большой степени подобны спектрам колебаний скорости и температуры в отдельности, но на низких частотах заметны различия: до периодов 40 мин на взаимных спектрах практически нет участков степенной зависимости; спектры потоков импульса сильно различаются даже на близко расположенных горизонтах; спектры потоков тепла падают круче, чем спектры потоков импульса, т.е. соотношение между этими потоками сильно зависит от масштабов, которыми они осуществляются. В некоторых случаях отмечены большие максимумы в спектрах потоков на высоких частотах, близких к частоте Виясяля (периоды 12-15 мин). В целом степень универсальности спектров потоков значительно меньше, а зависимость от района наблюдений значительно больше, чем для автоспектров.

Вертикальная структура взаимных спектров и передаточных функций очень своеобразна: пространственные колебания довольно однородны по вертикали вблизи горизонтальных масштабов 1000 м и 50 м и имеют довольно сложную структуру между 800 и 50 м и для масштабов больше 1000 м. Временные колебания хорошо связаны в интервалах 2-3 часа и 30-15 мин, но резко усложняют свою структуру на периодах больше 4 часов и меньше 15 мин. Это проявляется в наличии замкнутых максимумов функций S_{ij} , H_{ij} (модуль взаимного спектра и передаточная функция для колебаний на горизонтах i, j), т.е. в большой избирательности стратифицированного океана по отношению к возмущениям на различных глубинах. Эта избирательность в большой мере может быть связана с тонкой структурой поля плотности.

Рассматриваемые в §3.3 двумерные и условные вероятности от-

ражают взаимодействие процессов непосредственно в амплитудах колебаний интересующих нас характеристик и оказываются более чувствительными функциями для описания комбинированных турбулентно-волновых процессов, чем взаимные корреляции и спектры.

Ориентация изолиний двумерных вероятностей под углом 45° к осям t_i, t_j (значения колебаний температуры на горизонтах i, j), симметричные положения максимумов вблизи значений $\pm b$ являются типичными проявлениями сильной взаимосвязи колебаний на различных глубинах при наличии небольшого числа волновых цугов, обеспечивающих взаимосвязь между амплитудами колебаний на удаленных горизонтах. Фильтрация довольно часто приводит к изолиниям двумерной вероятности, близким к концентрическим окружностям, что является отражением тенденции к статистической независимости колебаний при уменьшении масштабов. Поскольку масштабы при этом еще не настолько малы, чтобы относиться к турбулентным, то это явление можно интерпретировать как независимое развитие некоторой части коротковолновых компонент спектра на различных элементах тонкой структуры. При взаимном спектральном анализе это явление отражалось в уменьшении когерентности и появлении замкнутых максимумов взаимных спектров в соответствующем интервале волновых чисел.

Условные вероятности позволяют выявить направленность, асимметричность зависимости колебаний на различных глубинах и четко выявить зоны такой зависимости. Сечения условных вероятностей являются срезами, позволяющими разделить различные составляющие в суммарном процессе -- в нашем случае взаимодействие квазитурбулентных колебаний, проявляющееся при небольших амплитудах на близко расположенных горизонтах, от взаимодействий волновых, проявляющихся при максимальных флуктуациях даже на удаленных горизонтах (трехвершинные условные вероятности или с резкими всплесками типа δ -функций, как для детерминированных процессов).

Глава 4. Наблюдения внутренних волн и тонкой структуры в шельфовой зоне моря.

В §4.1 производится детальный анализ статистических характеристик вертикальных распределений температуры в шельфовой зоне Японского моря. В среднем вертикальная структура характеризуется двумя слоями повышенных и двумя слоями пониженных градиентов, на фоне которых заметны мелкомасштабные неоднородности толщиной 1-2м. Анализ спектров градиентов температуры и числовых статистических характеристик позволил выделить преобладающие масштабы неоднородностей вертикальной структуры 16-18 м и 1,5-2 м. Первый соответствует вертикальному масштабу преобладающей второй моды ВВ, второй - амплитудам ВВ. Аналогичные экспериментальные результаты - соответствие масштабов ТС и вертикальной структуры ВВ, но при других абсолютных значениях - получены Nagata (Nagata, 1978, 1979). Видимо, вертикальные стоячие моды при небольших глубинах на шельфе имеют реальный физический смысл и оказывают влияние на формирование среднего профиля температуры и других характеристик, помимо очевидного кинематического эффекта.

Анализ распределений вероятностей для колебаний температуры, получаемых при вертикальных зондированиях, дает возможность оценить некоторые важные средние свойства ТС: характер асимметрии зон повышенных и пониженных градиентов, увеличение теплозапаса всего стратифицированного слоя по сравнению с линейным профилем при той же разности значений температуры между верхней и нижней границами слоев и т.п. Распределение вероятностей для вертикальных градиентов почти экспоненциальное. Поскольку такое же распределение было получено (Карабашева, Позднын, 1978) для горизонтальных градиентов температуры (при нормировке на соответствующие градиенты распределения идентичны), то можно предположить, что горизонтальная ТС (масштабы 100-2000 м) является выходом на поверхность вертикальной ТС, либо образована под воздействием того же механизма.

В дальнейшем будет показано, что таким довольно универсальным механизмом могут быть внутренние волны.

Наиболее важным результатом рассматриваемых наблюдений является установление с помощью разрезов взаимных корреляций направленного распространения возмущений температуры сверху вниз со средней скоростью 1-2 м/ч в периоды хорошего развития пакетов коротких ВВ. При отсутствии ВВ зоны положительных и отрицательных корреляций не имели наклона к горизонтали, т.е. возмущения вертикальных распределений на глубину не распространялись. Оценки эффективного коэффициента вертикальной теплопроводности приводят к значениям 25-40 см²/с.

В §4.2 рассматривается взаимосвязь внутренних волн и вертикальной структуры скорости течений в океане. Наблюдения производились в Тихом океане в районе 37° с.ш., 150° в.д. и в Охотском море. В обоих случаях вектор горизонтальной скорости вращался с глубиной по часовой стрелке (до четырех оборотов в слое 300-800 м в Тихом океане и в слое 150-300 м в Охотском море), что соответствует направлению фазовой скорости вниз; а групповой скорости и потока энергии вверх. Шаг спирали менялся от 30 до 100 м в Тихом океане и от 20 до 40 м в Охотском море пропорционально $[N(z)]^{-1}$, что говорит о распространении почти монохроматических волн в соответствии с приближением геометрической оптики.

Эллипсы траекторий частиц имели наклон к горизонтали $\sim 10^\circ$, орбитальные скорости были 5-8 см/с. Генерацию таких волн в мощных слоях, отделенных от верхнего и придонного слоев большими квазиоднородными слоями, можно связать с большим сдвигом средней скорости при почти постоянном среднем значении частоты Власяля. Значения сдвига скорости составляли $\sim 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ и были очень близки к частоте наблюдавшихся волн, что указывает на возможность резонансного потока энергии из среднего течения во внутренние волны. Тонкая структура была слабо выражена - только в виде одного-двух неболь-

ших возмущений с масштабами ~ 10 м в нижней части термоклина.

В § 4.3 анализируются особенности вертикальной структуры температуры и ВВ в зоне шельфа и непосредственно вблизи его границы. На основании пространственных разрезов показано, что перед границей шельфа со стороны моря возмущения термоклина с большими амплитудами - чаще всего в виде опусканий типа гидравлического прыжка. Непосредственно над границей часто наблюдаются большие солитоноподобные волны, а дальше к берегу - пакеты коротких ВВ. Поскольку все описанные явления четко выражены в периоды сильных приливов и при отсутствии атмосферных возмущений типа интенсивных циклонов или тайфунов, то можно предположить следующую последовательность процессов: приливо-отливные течения порождают гидравлический прыжок, тот разрушается либо при движении на шельф, либо вследствие амплитудной неустойчивости и порождает солитоны, которые при движении дальше на шельф разрушаются и порождают пакеты коротких внутренних волн. Оценки отношения энергии гидравлического прыжка к энергии волнового пакета $I, I-1,25$ не противоречат такой гипотезе.

Наиболее существенной особенностью поля температуры при наличии ВВ является перестройка вертикальной структуры термоклина на расстояниях порядка 10-15 миль вблизи границы шельфа: он утолщается от 20-30 м в море до 70-80 м на шельфе, появляются элементы тонкой структуры - квазигомогенные и устойчивые слои. Теплосодержание стратифицированных слоев при этом увеличивается в 3-4 раза. Групповая скорость увеличивается непосредственно над границей шельфа и резко уменьшается на шельфе, что приводит к концентрации энергии коротких волн в зоне шельфа.

Дисперсионные связи между частотой и волновым числом указывают на квазилинейность наблюдаемых ВВ, что подтверждает результаты натуральных и лабораторных измерений других авторов. По типу вертикальной структуры $N(z)$ проведено разбиение пришельфовой и шельфовой акватории на четыре зоны, для каждой из которых рассчитаны дис-

персионные характеристики.

В целом результаты четвертой главы приводят к выводам о связи вертикальных масштабов ТС и ВВ, распространении возмущений температуры на глубину со скоростями 1-2 м/ч при наличии ВВ, большой роли ВВ в вертикальной структуре течений, возможности генерации коротких ВВ вблизи границы шельфа приливными течениями через посредство гидравлического прыжка и солитонов, резкой перестройке вертикальной структуры температуры вблизи границы шельфа с утолщением термоклина и появлением тонкой структуры, концентрации энергии коротких ВВ на шельфе и увеличении теплосодержания стратифицированных слоев. С учетом изложенных в главах 2 и 3 результатов (большие потоки тепла в масштабах ВВ, воздействие тонкой структуры на характеристики ВВ) и того факта, что микроструктура как показатель турбулентности практически не наблюдалась (за исключением очень тонких слоев вблизи верхней границы термоклина), возникает необходимость объяснить наблюдавшиеся явления достаточно универсальным способом без привлечения представлений о разрушении ВВ. Этому посвящена пятая глава диссертации.

Глава 5. Численное моделирование и гидродинамическая интерпретация результатов наблюдений.

В § 5.1 с помощью численного моделирования изучается влияние ТС на свободные линейные ВВ. Тонкая структура задается в виде чередования слоев с большими и малыми постоянными внутри каждого слоя значениями $N(z)$. Просчитываются четыре варианта: без тонкой структуры, одна ступенька, две ступеньки, три ступеньки (слои с максимумами $N(z)$).

При наличии ТС в слоях с максимумами $N(z)$ концентрируются максимальные амплитуды и узлы вертикальных мод движений. Для любой моды выше первой можно найти такое расстояние между слоями с максимальными значениями N , что они оказываются внутри слоя с ам-

амплитудой одного знака для данной моды, т.е. слоя, внутри которого данную моду можно считать первой и плотностная структура которого для данной моды не имеет значения. Верно и обратное: слой максимумов амплитуд можно удалить так, что знаки амплитуд в них станут противоположными, а амплитуды в промежуточном слое малыми. Таким образом, характер взаимосвязи колебаний с большими градиентами плотности определяется тремя факторами: величиной N в этих слоях, расстоянием между слоями, модой волнового движения.

Наиболее важным свойством тонкой структуры является то, что она приводит к появлению зон сближения дисперсионных кривых на плоскости ω, k . При учете нелинейных взаимодействий именно в этих зонах будет происходить резонансный обмен энергии между модами, поэтому они названы зонами резонанса. При увеличении числа ступенек в тонкой структуре увеличивается число резонансных зон и число дисперсионных кривых, сходящихся в один узел - до шести мод при трех максимумах $N(z)$.

В физическом пространстве многомодовые взаимодействия сосредоточены на устойчивых прослойках ТС, причем взаимодействие соседних мод может происходить как в одной фазе, так и в противофазе - в этом случае колебания определенной моды в соответствующем слое могут совершенно подавляться. Большая корреляция вертикальной структуры мод возможна и для сильно разнесенных кратных частот при соответствующем разнесении волновых чисел, и зоны такой коррелируемости также стянуты к устойчивым прослойкам ТС.

Сравнение результатов численного моделирования с результатами наблюдений (см. в частности, анализ структурных функций, взаимных спектров и двумерных вероятностей) приводит к выводу, что наблюдаемые особенности вертикальной структуры статистических характеристик во многом обусловлены влиянием тонкой структуры на ВВ, однако многие явления, в частности большие потоки импульса и тепла и само появление ТС, могут быть в той или иной мере обуслов-

лены прямым воздействием ВВ на вертикальную структуру полей плотности и других характеристик.

В § 5.2 производится численное моделирование процесса взаимодействия внутренних волн и вертикальной структуры температуры. (правильнее говорить о взаимодействии ВВ и процессов вертикального переноса тепла, но поскольку процесс теплопроводности воздействует на ВВ через параметр структуры $N(z)$, мы используем менее громоздкое выражение "взаимодействие со структурой").

Уравнение для вертикальной компоненты скорости вынужденных внутренних волн

$$\frac{d^2 w}{dz^2} + \frac{N^2}{g} \frac{dw}{dz} + k^2 \frac{N^2 - \omega^2}{\omega^2 - f^2} w = R(\omega, k, z) \quad (3)$$

с граничными условиями

$$\frac{dw}{dz} + \frac{gk^2}{\omega^2 - f^2} w = 0, \quad z = 0, \quad (4)$$

$$w = 0, \quad z = H, \quad (5)$$

решается совместно с уравнением теплопроводности, описывающим медленное по сравнению с периодом волны изменение параметра $N(z)$:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu (1 + \gamma) \frac{\partial T}{\partial z} \right], \quad (6)$$

$$T(z, t=0) = T_0 - \beta z, \quad (7)$$

$$T|_{z=0} = T_0, \quad T|_{z=H} = T_1, \quad (8)$$

$$N^2 = \frac{g}{f} \frac{\partial \rho}{\partial T} \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \quad (9)$$

Локальные характеристики ВВ (смещения ξ, η по x, z и их градиенты) входят в уравнение теплопроводности через эффективный коэффициент волнового переноса γ , введенный П.Л.Капицей (1951):

$$\gamma = 2 \frac{\partial \xi}{\partial z} + \left(\frac{\partial \eta}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \xi}{\partial x} \right)^2 \quad (10)$$

Немонотонная зависимость ξ, ζ от глубины во внутренних волнах приведет через $\gamma(z)$ к формированию $T(z)$ со всеми признаками тонкой структуры, но скорость перестройки $T(z)$ определяется значением фонового коэффициента μ . Известно, что диссипация кинетической энергии ВВ и течений происходит со скоростью намного большей, чем могут обеспечить молекулярные процессы. Многочисленные оценки эффективных вертикальных коэффициентов диффузии дают значения до $1-10 \text{ см}^2/\text{с}$ в океане и до $100 \text{ см}^2/\text{с}$ в шельфовых зонах. Наши измерения приводят к таким же оценкам. Параметризуя процесс фоновой теплопроводности эффективным коэффициентом $\mu \sim 1-10 \text{ см}^2/\text{с}$ (в данном случае мы имеем в виду традиционный механизм трехмерной мелкомасштабной турбулентности, но в общем случае это могут быть любые процессы, приводящие к тому же результату), мы получили перестройку монотонных профилей $T(z)$ в тонкоструктурные за интервалы времени порядка десятков периодов волн. Поскольку ВВ просто модулируют и незначительно увеличивают перенос, обусловленный фоновой мелкомасштабной турбулентностью, то ясно, что наличие преобладающих мод ВВ приведет к квазирегулярности ТС на соответствующих масштабах, что и отмечается в многочисленных наблюдениях.

Хотя рассмотренная модель дает хорошее согласие с наблюдениями, она нас не совсем устраивает физически, поскольку фоновый эффективный коэффициент μ мы пока связали только с трехмерной турбулентностью (хотя и слабой), которая, по нашим и многим известным наблюдениям, не является таким глобальным и повсеместным явлением в стратифицированном океане, как ТС и ВВ.

В § 5.3 производится физический анализ процессов и механизмов, которые являются более универсальными, чем трехмерная турбулентность, и могут оказаться более существенными в формировании вертикальных переносов и тонкой структуры в океане.

Прежде всего можно рассмотреть эффект нелинейных волн конечной амплитуды. Соответствующая работа была выполнена Вороновичем,

Леоновым, Миропольским (1976), но проще понять ситуацию, используя результаты Магаарда (см. Krauss, 1966). Им получено решение вида

$$\zeta = \frac{f_0}{d\bar{p}/dz} \sin(kx - \omega t) \cdot \sin\left\{\frac{\pi}{H}(z - \zeta)\right\}. \quad (11)$$

Такие волны имеют пологие гребни и острые впадины выше слоя $z = H/2$, острые гребни и пологие впадины ниже $z = H/2$, превращаются в синусоиду при $z = H/2$. Средние смещения выше и ниже середины слоя направлены противоположно, поджимая теплую воду сверху и холодную снизу к середине слоя и тем самым создавая на вертикальном масштабе каждой моды ступеньку с повышенным градиентом плотности. Количественные оценки показывают, что такой механизм может обеспечить необходимую величину деформации вертикальной структуры, но эта деформация исчезнет после прохождения нелинейного пакета, если только не учитывать молекулярные процессы или разрушение.

Наиболее существенным для формирования ТС и вертикальных потоков свойств является, по видимому, стоков перенос во внутренних волнах. При волноводном распространении волн вида

$$\zeta = A(z) \sin \varphi = a \sin mz \cdot \sin(kx - \omega t), \quad (12)$$

$$\xi = K^{-1} A' \cos \varphi = amk^{-1} \cos mz \cdot \cos(kx - \omega t), \quad (13)$$

$$\bar{w} = -\omega A \cos \varphi = -\omega a \sin mz \cdot \cos(kx - \omega t), \quad (14)$$

$$\bar{u} = \omega k^{-1} A' \sin \varphi = amc \cos mz \cdot \sin(kx - \omega t) \quad (15)$$

для компонент стокова переноса получаем:

$$\bar{u}_s = \xi \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \zeta \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} = \frac{1}{2} a^2 m^2 c \cos^2 mz - \frac{1}{2} a^2 m^2 a \sin^2 mz = \frac{1}{2} a^2 m^2 c \cos 2mz, \quad (16)$$

$$\bar{w}_s = \xi \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + \zeta \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0. \quad (17)$$

При параметрах волн $a \sim 3 \text{ м}$, $m \sim 2\pi/150 \text{ м}^{-1}$, $\lambda \sim 1000 \text{ м}$, $\tau \sim 30-60 \text{ мин}$, $c \sim 0,3-0,5 \text{ м/с}$ получим $\bar{u}_s \sim 5-10 \text{ см/с}$. Во фронтальных и шельфовых зонах, а также на границах синоптических вихрей горизонтальные

градиенты средней температуры могут достигать значений $10^{-2}-10^{-1}$ град/км. Тогда градиенты стокова переноса на вертикальном масштабе одной моды приведут за время порядка суток к дополнительной разности температур $0,1-1,0^\circ$. Поскольку процесс идет с положительной обратной связью (появление слоев с повышенными градиентами плотности перестраивает спектр ВВ, увеличивая поток энергии в высшие моды), то получаем направленную тонкоструктурную эволюцию средних распределений при наличии ВВ.

В открытом океане, где горизонтальные градиенты средних полей плотности при отсутствии внутренних волн малы, механизм образования ТС по существу остается тем же, поскольку для коротких волн роль средних играют градиенты полей, формируемые длинными и низкочастотными ВВ. При этом наиболее явно выступает роль ВВ в перемешивании. Наклоны изопикн, создаваемые длинными и низкочастотными волнами, приводят к тому, что частицы, движущиеся под воздействием коротких и высокочастотных волн, получают дополнительное вынужденное смещение по вертикали. В результате появляется вертикальная компонента стокова переноса, которая равна произведению \bar{u}_z короткой волны на крутизну $\partial\gamma/\partial x$ длинной волны. При типичных значениях $\partial\gamma/\partial x \sim 10^{-2}$ получим $\bar{w}_z \sim 0,02-0,10$ см/с, что практически совпадает с полученными в наших измерениях значениями вертикальных скоростей распространения тепловых возмущений (см. § 4.1).

Тот же результат, но в несколько более универсальной форме можно получить на основе уравнения теплопроводности.

Пренебрегая молекулярной теплопроводностью при нулевой средней скорости, уравнение для средней температуры \bar{T} можно записать в виде:

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{u}_z \bar{T})}{\partial x_z} = 0. \quad (18)$$

При горизонтальной неоднородности поля температуры локальные характеристики ВВ в нулевом приближении ВКБ соответствуют гармоническим решениям вида (12)-(15), и локальные потоки тепла также мо-

жно вычислить на основе линейных решений:

$$\bar{u} \bar{T} = Q_x = -A \omega k^{-1} \sin \varphi (A \sin \varphi \frac{\partial \bar{T}}{\partial z} + A k^{-1} \cos \varphi \frac{\partial \bar{T}}{\partial x}) = -\frac{1}{2} A' A c \frac{\partial \bar{T}}{\partial z}, \quad (19)$$

$$\bar{w} \bar{T} = Q_z = \omega A \cos \varphi (A \sin \varphi \frac{\partial \bar{T}}{\partial z} + A k^{-1} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x}) = \frac{1}{2} A' A c \frac{\partial \bar{T}}{\partial x}. \quad (20)$$

Поскольку уравнение (18) решается в медленных переменных t, x (по сравнению с периодом волны τ и длиной волны λ), при вычислении дивергенции потока тепла необходимо учитывать изменение амплитуды и волнового числа по x . Для общей оценки можно принять популярное упрощение постоянной по z и меняющейся только по x частоты Висьяля $N(x)$. В результате интегрирования уравнений распространения (следующее приближение в методе ВКБ) для волнового числа $k(x)$ и амплитуды $A(x)$ получаются асимптотические выражения вида $k \sim N^{-1/2}(x)$, $A \sim N^{-1/2}(x)$. Тогда комбинация $A' A c = A' A \omega k^{-1}$ в (19) оказывается независимой от x , дивергенция потока тепла легко вычисляется, и уравнение (18) можно записать в виде:

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \frac{1}{2} \alpha^2 m^2 c |\cos 2mz| \cdot \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} = 0. \quad (21)$$

Выражение перед $\partial \bar{T} / \partial x$ является скоростью стокова переноса в волнах, по периоду которых производится осреднение. Благодаря зависимости этой скорости от z интегрирование (21) приведет к тонкой вертикальной структуре в соответствии с вертикальной структурой ВВ. В зонах с большими градиентами $\partial \bar{T} / \partial x$ мы этот эффект оценили выше.

В открытом океане, где крупномасштабные поля имеют малые горизонтальные градиенты, основной вклад в $\partial \bar{T} / \partial x$ будут вносить длинные и низкочастотные волны ($\partial \bar{T} / \partial x \approx \partial \bar{T}_s / \partial x$), для которых $\partial \bar{T}_s / \partial x$ можно выразить через средний вертикальный градиент и крутизну волны ($\partial \bar{T}_s / \partial x \approx \partial \bar{T} / \partial z \cdot \partial \gamma_s / \partial x$) и вместо (21) записать:

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \frac{1}{2} \alpha^2 m^2 c |\cos 2mz| \cdot \frac{\partial \gamma_s}{\partial x} \cdot \frac{\partial \bar{T}}{\partial z} = 0. \quad (22)$$

Выражение перед $\partial\bar{T}/\partial z$ является скоростью переноса по вертикали скалярного параметра \bar{T} и образуется за счет стока переноса в коротких ВВ, наложенного на поле плотности, формируемое длинными ВВ. Интегрирование (22) при начальном линейном профиле приводит к образованию хорошо выраженной ТС за время порядка 3-5 час вблизи границы шельфа и за время порядка 30-50 час в океане. Оценка эффективного коэффициента в выражении (20) для потока тепла при измеренных параметрах приводит к значениям 10-50 $\text{см}^2/\text{с}$ в зоне шельфа Японского моря, что хорошо согласуется с наблюдениями.

В § 5.4 рассмотрен еще один механизм воздействия ВВ на вертикальное перемешивание и формирование ТС, обусловленный тем фактом, что в море практически всегда присутствует горизонтальная турбулентность с масштабами порядка сотен метров (см. гл.2). Очевидно, что осуществляемый ею горизонтальный перенос на фоне градиентов, образуемых длинными ВВ, качественно должен приводить к тому же эффекту, что и стоков перенос в коротких ВВ на фоне длинных. На основе приближенных выражений для турбулентных пульсаций T', ξ', ζ' и горизонтальных градиентов в длинных волнах получены выражения для компонент потока тепла Q_x, Q_z и для дивергенции полного потока тепла:

$$Q_x = \overline{u'T'} = -\frac{1}{2} \xi'^2 a^2 \omega \kappa m \cos^2 \varphi \sin 2mz \cdot \frac{\partial \bar{T}}{\partial z}, \quad (23)$$

$$Q_z = \overline{w'T'} = -\frac{1}{2} \xi'^2 a^2 \omega \kappa^2 \sin 2\varphi \sin 2mz \cdot \frac{\partial \bar{T}}{\partial z}, \quad (24)$$

$$\text{div} Q \approx -\left(\xi' \frac{\partial \xi'}{\partial x} a^2 \omega m \cos^2 \varphi \sin 2mz + \xi' \frac{\partial \xi'}{\partial z} a^2 \omega \kappa \sin 2\varphi \sin^2 mz \right) \cdot \frac{\partial \bar{T}}{\partial z}. \quad (25)$$

Величина перед $\partial\bar{T}/\partial z$ в (24) для наблюдавшихся значений $\xi' \sim 100-300$ м, $\omega = 10^{-3}-10^{-4}$ с^{-1} , $\kappa = 10^{-3}-10^{-4}$ м^{-1} , $a = 5-10$ м дает оценку $\mu = 0,1-10$ $\text{см}^2/\text{с}$, т.е. величину того же порядка, что и для волнового переноса в § 5.3.

В § 5.4 рассмотрены также другие аспекты взаимодействия турбулентности с ВВ. В частности, формирование локальных зон с развитой мелкомасштабной турбулентностью может приводить не только к

резко ступенчатым профилям, но и к генерации ВВ на границах этих зон, поскольку в спектрах турбулентности на малых волновых числах под воздействием стратификации появляются максимумы энергии. Возможны также ситуации, когда толщина устойчиво стратифицированного слоя меньше толщин верхнего и нижнего турбулизованного слоев. В этом случае турбулентность в потоке будет по масштабам и периодам модулироваться волнами в промежуточном стратифицированном слое, вследствие чего в спектрах турбулентности появятся хорошо выраженные максимумы (когерентные вихри в турбулентном потоке).

В целом результаты физического и численного анализа в пятой главе приводят к выводу, что перемешивание в стратифицированном потоке, если только энергия возмущений не больше полной энергии устойчивости, не может быть монотонным: и мелкомасштабная турбулентность (фоновая либо локальная), и горизонтальная турбулентность, и стоков перенос во внутренних волнах модулируются вертикальной структурой внутренних волн. В результате формируются средние тонкоструктурные вертикальные распределения всех переносимых свойств (в частности, квазирегулярные структуры при наличии преобладающих ВВ), увеличиваются их вертикальные потоки, перестраиваются параметрически спектры ВВ, т.е. происходит непрерывное взаимодействие и перестройка ВВ и вертикальных структур. Но при этом ВВ подстраиваются к вертикальной структуре плотности очень быстро, за время порядка одного периода, а перестройка поля плотности под воздействием устойчивых ВВ происходит медленно (десятки периодов), что и позволяет описывать основные черты процесса взаимодействия ВВ и средней структуры с помощью довольно простых соотношений.

В заключении изложены некоторые соображения о перспективе теоретических и экспериментальных исследований внутренних волн в океане. На наш взгляд, основные усилия должны быть направлены на решение организационно-технических задач для постановки комплексных, длительных и детализированных экспериментов.

III. Основные результаты.

В диссертации отражены следующие основные результаты работы автора:

- Произведен физический анализ и даны определения понятий процесса, структуры среды, течений, волн, турбулентности. Предложен критерий разделения внутренних волн и турбулентности.

- Даны определения крупной, тонкой и микроструктуры в связи с определенными процессами в океане. Сформулировано соотношение неопределенности для внутренних волн и тонкой структуры.

- Показано, что основные особенности вертикальной структуры статистических характеристик колебаний температуры и скорости течений в масштабах ВВ (большие вертикальные градиенты, максимумы энергетических спектров, максимумы плотностей распределения вероятностей и т.п.) сосредоточены на устойчивых прослойках ТС.

- Подтверждена широкая применимость линейного приближения для описания ВВ в диапазоне периодов от 5 мин до 10-20 час и масштабов от десятков метров до нескольких километров. Нелинейные эффекты на нижнем (~ 100 м) и верхнем (больше 2,5-3 км) конца рассмотренного интервала масштабов обусловлены как большими амплитудами ВВ (проявляются в изменении знака асимметрии с глубиной), так и квазигоризонтальной турбулентностью с масштабами сотни метров.

- Распределения вероятностей спектральных оценок ВВ не являются гауссовскими. Изменение знака асимметрии распределений по волновому числу и большие значения эксцесса отражают перемежаемость волнового поля и слабую нелинейность, а с методической точки зрения указывают на завышение доверительных интервалов и занижение доверительных вероятностей при статистическом анализе с использованием гипотезы нормальности.

- Взаимодействие возмущений температуры по вертикали при наличии ТС осуществляется, главным образом, за счет взаимодействия

колебаний на устойчивых прослойках ТС.

- При анализе взаимных корреляций и взаимных спектров обнаружены наклонное распространение возмущений температуры и скорости под углами $5-10^\circ$ к горизонтали, направленные потоки импульса, тепла, энергии, рассмотрены спектры потоков, получены их количественные оценки и показано, что горизонтальные и вертикальные потоки в масштабах ВВ нельзя объяснить только турбулентными эффектами.

- При наличии максимумов в спектрах ВВ и ТС вертикальные масштабы ТС соответствуют вертикальной структуре основных энергонесущих мод ВВ.

- Возмущения вертикальных распределений температуры, т.е. элементы тонкой структуры по измерениям в шельфовой зоне моря распространяются от поверхности на глубину со скоростью 1-2 м/ч.

- В зоне генерации и распространения пакетов коротких ВВ вблизи границы шельфа происходит быстрая перестройка вертикальной структуры плотности (на расстояниях порядка 10-15 миль и за время порядка 5-10 час) с образованием вертикальной ТС и значительным утолщением термоклина, при этом резко увеличивается теплозапас стратифицированных слоев.

- Образование и усложнение тонкой вертикальной структуры приводит к межмодовому (многомодовому) взаимодействию ВВ, т.е. к потокам энергии из низших мод в высшие, причем взаимодействие сосредоточено на устойчивых прослойках ТС.

- При наличии фоновых коэффициентов вертикальной температуропроводности, соответствующих слабой турбулентности ($1-10 \text{ см}^2/\text{с}$), взаимодействие ВВ с первоначально монотонной вертикальной структурой приводит к образованию ТС за время порядка десятков периодов ВВ и параметрической перестройке спектра ВВ с увеличением энергии высших мод.

- Взаимодействие квазигоризонтальной турбулентности и поля

температуры, создаваемыми внутренними волнами, приводит к вертикальным потокам тепла с эффективными коэффициентами порядка $10 \text{ см}^2/\text{с}$ формированию ТС, соответствующей вертикальной структуре ВВ.

- Увеличение вертикальных потоков плавучести и образование ТС могут происходить за счет механизма стокового переноса при распространении ВВ в зонах с большими горизонтальными градиентами плотности.

- Увеличение вертикальных потоков плавучести и образование ТС могут происходить при параметрическом взаимодействии разномасштабных ВВ, а именно, при конвективном (стоксовом) переносе короткими и высокочастотными волнами в поле градиентов, создаваемых длинными и низкочастотными волнами.

IV. Список работ автора по теме диссертации.

1. Навроцкий В.В. Волнение и турбулентность в поверхностном слое моря.- Океанология, 1967, т.7, № 6, с.973-976.
2. Навроцкий В.В., Казачкина Л.И., Навроцкая С.Е. Некоторые результаты исследования пространственных температурных неоднородностей.- Океанология, 1968, т.8, № 1, с.14-22.
3. Навроцкий В.В. Статистический анализ пространственных колебаний температуры в верхнем слое океана.- Известия АН СССР, Физ. атм. и ок., 1969, т.5, № 1, с.94-110.
4. Лавров В.П., Навроцкий В.В. Критерий и методика оценки качества исследовательской измерительной системы.- Труды 2-го Всесоюзного симпозиума по автоматизации океанологических исследований, 1969, Севастополь, с.162-176.
5. Навроцкий В.В., Филошкин Б.Н. Статистический анализ временных колебаний температуры в поверхностном слое моря.- Изв. АН СССР, Физ. атм. и ок., 1969, т.5, № 7, с. 714-723.
6. Навроцкий В.В., Филошкин Б.Н. Статистический анализ измерений скорости ветра в приповерхностном слое.- Изв. АН СССР, Физ. атм. и ок., 1970, т.6, № 3, с.292-298.

7. Навроцкий В.В. О характеристиках вертикального и горизонтального обмена в поверхностном слое моря при устойчивой стратификации.- Симпозиум по стратифицированным течениям (19-23 октября 1970 г.). Тезисы докладов и сообщений. Новосибирск, 1970.
8. Навроцкий В.В. О статистике слоя скачка в Атлантическом океане.- Океанология, 1971, т.11, № 4, с.616-622.
9. Навроцкий В.В. Анализ термической структуры поверхностного слоя на разрезах в Японском море.- Океанология, 1972, т.12, №1, с.38-48.
10. Навроцкий В.В., Пака В.Т., Карабашева Э.И. Характеристики термических неоднородностей на разрезах в Атлантическом океане.- Изв. АН СССР, Физ. атм. и ок., 1972, т.8, № 3, с.307-320.
11. Навроцкий В.В. О методах обработки и анализа случайных процессов по наблюдениям в океане.- Труды IV Всесоюзного симпозиума "Автоматизация научных исследований морей и океанов", 1972, Севастополь, с.263-269.
12. Навроцкий В.В. Структурный анализ колебаний скорости и температуры в верхнем слое океана.- Изв. АН СССР, Физ. атм. и ок., 1974, т.10, № 3, с.276-288.
13. Навроцкий В.В. Амплитудная структура колебаний скорости и температуры в верхнем слое океана.- Изв. АН СССР, Физ. атм. и ок., 1974, т.10, № 7, с.771-781.
14. Навроцкий В.В. О вертикальной структуре среднескальных колебаний температуры.- В кн.: "Атлантический гидрофизический полигон-70", М., Наука, 1974, с.283-304.
15. Навроцкий В.В. Вертикальная структура колебаний температуры и скорости. Некоторые вопросы эксперимента в верхнем слое океана.- Океанологические исследования, 1974, № 28, М., Наука, с.29-35.
16. Навроцкий В.В. Инерционная турбулентность при наличии стратификации.- В кн.: "Особенности структуры и динамики вод Тихого океана", Владивосток, Изд. ДВНЦ АН СССР, 1975, с. 146-157.

7. Навроцкий В.В. Внутренние волны и вертикальная структура температуры в океане.- В кн.: "Особенности структуры и динамики вод Тихого океана", Владивосток, изд. ДВНЦ АН СССР, 1976, с.101-117.
8. Навроцкий В.В. Двумерные распределения вероятностей для пространственных колебаний температуры в верхнем слое океана.- В кн.: "Особенности структуры и динамики вод Тихого океана", Владивосток, изд. ДВНЦ АН СССР, 1976, с.117-134.
19. Навроцкий В.В., Ростов И.Д., Грабовский Б.Ф. Особенности формирования вертикальной структуры температуры в верхнем слое океана в период прогрева.- В кн.: "Гидрофизические поля Мирового океана", тезисы докладов I-ой Всесоюзной конференции по исследованию и освоению ресурсов Мирового океана 28 сент.-2 окт. 1976 г., Владивосток, 1976, с.87-89.
20. Навроцкий В.В. Внутренние волны и теплопроводность в океане.- В кн.: "Гидрофизические поля Мирового океана". Тезисы докладов I-ой Всесоюзной конференции по исследованию и освоению ресурсов Мирового океана 28 сент. - 2 окт. 1976 г., Владивосток, 1976.
21. Навроцкий В.В. Внутренние волны и тонкая структура в океане.- Доклады АН СССР, 1976, т.231, № 5, с. 1031-1034.
22. Навроцкий В.В., Улинович Н.А. О распределении спектральных оценок для внутренних волн в океане.- В кн.: "Исследование океанологических полей Индийского и Тихого океанов", Владивосток, изд. ДВНЦ АН СССР, 1977, с.149-159.
23. Навроцкий В.В. Спектральный анализ среднemasштабных колебаний температуры и скорости в верхнем слое океана.- В кн.: "Гидрофизические исследования в северо-западной части Тихого океана", Владивосток, изд. ДВНЦ АН СССР, 1978, с. 101-105.
24. Навроцкий В.В. Взаимный анализ колебаний температуры и скорости в верхнем слое океана.- В кн.: "Гидрофизические исследования в северо-западной части Тихого океана", Владивосток, изд.

- ДВНЦ АН СССР, 1978, с. 116-142.
25. Шауб Ю.Б., Навроцкий В.В., Разживин В.В. Некоторые результаты изучения микроструктуры вод по удельной электропроводности.- В кн.: "Гидрофизические исследования в северо-западной части Тихого океана и дальневосточных морях", Владивосток, изд. ДВНЦ АН СССР, 1979, с. 116-127.
26. Навроцкий В.В. Теоретическое и экспериментальное изучение взаимодействия внутренних волн и тонкой структуры в океане.- XIV Тихоокеанский научный конгресс, Хабаровск, 1979, Тезисы докладов, Москва, 1979, с.138-139.
27. Парамонов А.Н., Лебедева Т.П., Навроцкий В.В. Особенности температурной структуры верхнего слоя океана в районе Срединно-Атлантического хребта.- Изв. АН СССР, Физ. атм. и ок., 1980, т.16, № 11, с.1220-1225.
28. Навроцкий В.В. Понятие тонкой структуры и ее выделение в океане. Всесоюзный семинар-симпозиум "Тонкая структура и синоптическая изменчивость океанов и морей". Расширенные тезисы докладов, Таллин, 1980, с. 122-125.
29. Варлатый Е.П., Навроцкий В.В., Ростов И.Д. Вертикальная структура скорости течения и внутренние волны в океане.- Всесоюзный семинар-симпозиум "Тонкая структура и синоптическая изменчивость океанов и морей". Расширенные тезисы докладов, Таллин, 1980, с.39-43.
30. Варлатый Е.П., Навроцкий В.В., Ростов И.Д. Мелкомасштабная структура термодинамических полей северо-западной части Тихого океана. 2-ой Всесоюзный съезд океанологов, тезисы докладов, вып. 1, Севастополь, 1982.
31. Навроцкий В.В. О роли вращения Земли и течений в процессе генерации внутренних гравитационных волн в океане. 2-ой Всесоюзный съезд океанологов, тезисы докладов, вып.2, Севастополь, 1982.
32. Буздин А.А., Лебле С.В., Навроцкий В.В. О теплопроводности

при наличии внутренних волн.- В кн.: Исследование гидрофизических полей океана акустическими методами. Изд.ДВНЦ АН СССР, Владивосток, 1983., с.67-74.

33. Навроцкий В.В. Статистические характеристики тонкой структуры по наблюдениям в шельфовой зоне моря.- В кн.: Исследование гидрофизических полей океана акустическими методами. Изд.ДВНЦ АН СССР, Владивосток, 1983., с.51-66.

34. Навроцкий В.В., Новотрясов В.В., Аханынова Г.В. О влиянии тонкой структуры плотности и течений на внутренние волны в океане. IV Всесоюзная конференция "Проблемы научных исследований в области изучения и освоения Мирового океана", тезисы докладов, изд.ДВНЦ АН СССР, Владивосток, 1983.

35. Навроцкий В.В., Новотрясов В.В., Ростов И.Д. Вертикальная структура внутренних волн: теория и наблюдения. IV Всесоюзная конференция "Проблемы научных исследований в области изучения и освоения Мирового океана", тезисы докладов, изд.ДВНЦ АН СССР, Владивосток, 1983.

36. Ильичев В.И., Навроцкий В.В. Генерация внутренних волн и вертикальная структура температуры вблизи границы шельфа. Доклады АН СССР, 1987, т.294, № 1., с.216-220.

37. Ильичев В.И., Навроцкий В.В. Волновой перенос в стратифицированных жидкостях. Доклады АН СССР, 1987, т.294, № 2, с.462

38. Ильичев В.И., Навроцкий В.В. Внутренние волны и вертикальная структура температуры вблизи границы шельфа. III съезд советских океанологов, тезисы докладов. Гидрометеоиздат, Ленинград, 1987, 102-104.

39. Навроцкий В.В. Вертикальный перенос при наличии разномасштабных внутренних волн. III съезд советских океанологов, тезисы докладов. Гидрометеоиздат, Ленинград, 1987, 134-136.

40. Навроцкий В.В. Внутренние волны, турбулентность и вертикальная диффузия в океане.- Тезисы докладов IV республиканской научно-технической конференции по прикладной гидромеханике "Поверхностные и внутренние волны в океане и прибрежной зоне шельфа", 24-26 ноября 1987 г., Киев, 1987.

41. Navrotsky V.V. Statistical analysis of velocity and temperature measurements in the sea.- JAPSO, Proces-Verbeau, 1972, No.12, San-Diego, California, JAPSO Meetings at Moscow, July-Aug., 1971.

42. Navrotsky V.V., Il'yichev V.I. Vertical structure of hydrophysical characteristics and internal waves near the shelf boundary.- Geojournal, 1988, 16.1, p.11-17.