

Министерство образования Российской Федерации  
РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи  
УДК 551.465.072 (265.15)

Нанси Лилиана Вильегас Боланьос

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ  
СТРУКТУРЫ КОЛУМБИЙСКОЙ ЧАСТИ ТИХОГО ОКЕАНА

Специальность 25.00.28 - океанология

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт Петербург  
2003

Работа выполнена в Российском государственном гидрометеорологическом университете

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,  
профессор Л. Н. Карлин

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
Костяной Андрей Геннадиевич,  
кандидат физико-математических наук,  
Данилов Александр Иванович.

Ведущая организация: Гидрометцентр Р.Ф. г. Москва

Защита диссертации состоится «13» марта 2003 г., в 15<sup>30</sup> часов на заседании специализированного совета (Д.212.197.02) Российского государственного гидрометеорологического университета по адресу: 195196, г. Санкт-Петербург, Малоохтинский проспект, 98.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского государственного гидрометеорологического университета

Автореферат разослан «13» февраля 2003 г.

Ученый секретарь специализированного совета,

Кандидат географических наук

Воробьев В. Н.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Исследование закономерности формирования термодинамической структуры Колумбийской Части Тихого океана (КЧТО) в различных масштабах изменчивости является актуальной проблемой для республики Колумбии. Особенно в последние годы, когда значительно интенсифицируется эксплуатация природных ресурсов КЧТО, что очень важно для экономики страны. КЧТО имеет многие потенциальные ресурсы, которые могут рассматриваться как источник экономического развития через продвижение таких областей, как морской рынок, морской транспорт и порты, рыболовство и аквакультура, туристическая индустрия, добыча минералов, нефти и других альтернативных источников энергии, инженерных гидротехнических сооружений и т.д.

Кроме того, КЧТО находится в районе влияния глобальных атмосферных и океанологических явлений, таких как Внутритропическая Зона Конвергенции (ВЗК) и Эль-Ниньо – Южное Колебание (ЭНЮК), которые, в свою очередь, оказывают влияние на развитие сельскохозяйственной культуры (кофе, бананы, декоративные цветы, какао, вата и т.д.). Поэтому КЧТО представляет большой интерес для учёных, занимающихся вопросами, связанными с региональными и глобальными океанологическими и метеорологическими явлениями, а также для тех, кто занимается социальными, экономическими и политическими проблемами.

Отмеченная хозяйственная и научно-исследовательская деятельности требуют подробного знания характеристик морской среды. Вместе с тем, для КЧТО отсутствует сколько-нибудь систематизированная база натуральных данных гидрометеорологических характеристик. Наблюдения начали проводиться сравнительно недавно, крайне нерегулярно и в ограниченном количестве. В связи с этим формирование режима, закономерности пространственно-временной изменчивости характеристик термохалинной и динамической структуры КЧТО изучены не достаточно. Поэтому исследования по данной тематике представляются оправданными и актуальными.

Цели и задачи исследования. Целью работы является исследование закономерностей формирования и изменчивости характеристик термодинамической структуры КЧТО в различных пространственно-временных масштабах, с использованием методов математического моделирования и обработки имеющихся натуральных данных. Для достижения поставленной цели необходимо было решить ряд задач:



- сделать анализ исходных натуральных данных, полученных в водах КЧТО для представления общей картины состояния информации о термохалинных и динамических структурах КЧТО;

- выделить путём обработки натуральных данных характерные квазиоднородные районы внутри КЧТО;

- проанализировать влияния атмосферных явлений на данный район с целью определения и формулировки математических инструментов для изучения КЧТО путём моделирования;

- сформулировать математическую модель вертикальных движений вод применительно к КЧТО и на основе этой модели исследовать закономерности вертикальных движений вод КЧТО при различных гидрометеорологических условиях;

- сформулировать нестационарную математическую модель изменчивости термохалинных и динамических характеристик вод применительно к КЧТО;

- провести расчёты термохалинных и динамических характеристик вод Тихого океана при диагностической задаче для формирования краевых условий для прогностической задачи;

- провести численные эксперименты по моделированию термохалинных и динамических характеристик вод КЧТО при прогностической задаче для установления закономерностей их формирования и изменчивости;

- изучить закономерности формирования приповерхностного слоя в КЧТО на основе натуральных данных;

- сформулировать математические модели различных режимов приповерхностного слоя и провести численные эксперименты на моделях с использованием натуральных данных для изучения закономерностей формирования приповерхностного слоя в КЧТО;

- проанализировать механизмы формирования тонкой термохалинной структуры верхнего слоя КЧТО, на основе анализа натуральных данных выделить слои с преобладанием различных механизмов формирования тонкой структуры;

- провести анализ результатов численных экспериментов для нахождения общей картины закономерностей формирования термохалинных и динамических структур вод КЧТО в различных пространственно-временных масштабах.

Научная новизна. В ходе проведенного в диссертации исследования были получены следующие новые результаты:

- сформулирована информационная база данных характеристик термохалинного режима КЧТО. На основе этой базы осуществлено районирование КЧТО по термохалинным характеристикам с использованием кластерного анализа;

- впервые применён математический подход к изучению и выявлению закономерностей формирования термохалинной и динамической структуры вод КЧТО в различных пространственно-временных масштабах;

- впервые выделены закономерности климатической изменчивости распределения и интенсивности вертикальных движений и зон апвеллинга КЧТО;

- установлены закономерности межгодовой и внутригодовой изменчивости циркуляций вод КЧТО;

- выделены закономерности межгодовой и внутригодовой изменчивости термохалинной структуры вод КЧТО;

- впервые исследованы закономерности формирования тонкой термохалинной структуры приповерхностного слоя КЧТО по натурным данным и на математических моделях;

- с использованием информационной базы данных выделены области с преобладанием возможных механизмов формирования тонкой термохалинной структуры КЧТО.

Практическая значимость и внедрение. Полученные в работе результаты имеют большое практическое значение и могут быть использованы в органах государственной власти Колумбии при принятии управленческих решений, связанных с эксплуатацией и охраной ресурсов КЧТО, в организациях, занимающихся добычей и использованием морских ресурсов в КЧТО, а также в научных организациях, занимающихся исследованием Тихого океана и взаимодействием океана и атмосферы. В настоящее время отдельные результаты уже нашли своё внедрение:

- в Центре Контроля по Загрязнению Тихого Океана (ЦКЗТО) используются результаты диссертации, такие, как исследования вертикальных движений и зон апвеллинга, изучение характеристик приповерхностного слоя КЧТО, определение квазиоднородных зон и анализ термохалинной и динамической структуры вод КЧТО;

- в научных программах организуемых Колумбийской Комиссией Океана (ККО) (Национальный План по Науке и Технологиям Моря (НПНТМ), План Развития Генерального Морского Управления (ПРГМУ) и Региональная Программа по Изучению Явления Эль-Ниньо (РПИЯЭН) совместно со странами Южной Америки), используются результаты

диссертации о межгодовой и внутригодовой изменчивости термохалинной и динамической структуры вод КЧТО, для изучения влияния ВЗК и ЭНЮК на гидрометеорологические процессы КЧТО и моделирования приповерхностного слоя океана для исследования взаимодействия атмосферы с океаном;

- в Центре Исследования по Океанографии и Гидрологии Колумбии (ЦИОГК), где используются результаты данной диссертации для изучения возможностей употребления гидродинамических моделей в практической океанографии;

- в Национальном Университете Колумбии (НУК) на факультете географии заинтересованы в употреблении результатов данной диссертации для разработки образовательной программы магистратуры для метеорологов;

- Институт Морских и Прибрежных Исследований Колумбии (ИМПИК) подтверждает, что данная диссертация послужит основой для исследования гидрологических особенностей континентальных вод и их взаимодействия с прибрежными водами КЧТО, которые входят в программы Министерства Окружающей Среды Колумбии (МОСК);

- финансовый институт развития наук Колумбии (КОЛНАУК) считает, что настоящая диссертация является интересной темой, которую можно включать в программах развития морских изучений Колумбийской части Тихого океана;

- Автономно-Региональной Корпорации Района Нариньо (АРКРН) необходимы результаты данного исследования для планирования, оценки степени естественной и антропогенной нагрузки на район, защиты и рационального использования природных морских ресурсов и изучение социально-экономического развития КЧТО.

Апробация работы. Отдельные положения и трактовка результатов исследования, заложенных в основу настоящей работы, докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедры промысловой океанологии и охраны природных вод РГГМУ, на итоговых сессиях учёного совета РГГМУ в период 2002-2003 гг., на научных семинарах в Центре контроля по загрязнению Тихого океана республики Колумбии.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 19 работ из них 13 на испанском языке.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из 7 основных частей: введение, пяти глав, заключения и списка литературы, содержащего 127 источников из них 57 русскоязычных. Общий объём работы составляет 189 страниц текста, включая 76 рисунков и 6 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы, излагаются цели и задачи диссертационной работы, новизна и внедрение результатов данной работы.

Во первой главе даются общая характеристика термодинамической структуры КЧТО по данным наблюдений, географические характеристики и климат КЧТО. Реализуется обзор существующих баз данных КЧТО, раскрываются трудности получения натуральных данных в исследуемом районе, анализируется имеющаяся информация из данных наблюдений за океанологическими характеристиками КЧТО. На основе полученной базы данных и её анализа представляется районирование КЧТО по термохалинным характеристикам. Выделено 7 однородных районов: из них первые два по своим параметрам наиболее отличны от других из-за близкого расположения к побережью. Третий район показывает смещения прибрежных вод с океаническими водами. Четыре последние района имеют океанические воды.

Во второй главе представлен обзор моделей, которые обычно употребляются при решении диагностических и прогностических задач термодинамической структуры океана: диагностическая модель расчёта уровня и скорости течений, диагностическая модель расчёта функции полного потока и скорости течения и эволюционная формулировка задачи.

Во третьей главе изложена диагностическая модель вертикальной циркуляции, использованная для расчёта вертикальных движений КЧТО и определения зон апвеллинга. Для КЧТО были произведены численные расчёты вертикальных движений вод по выражению, полученному при интегрировании уравнения неразрывности по вертикали. Из него следует, что структура вертикальной составляющей скорости течения  $V_z$  определяется следующими факторами:

- неоднородностью поля атмосферного давления (ветровая компонента);
- зональным градиентом и неоднородностью поля уровня поверхности моря (градиентная компонента);
- зональным градиентом интегральной бароклинности (бароклинная компонента).

В работе приводятся сведения о характеристиках натуральных данных, используемых при расчётах вертикальной циркуляции КЧТО: климатические значения плотности и для трёх выбранных лет, в которых

наблюдалось проявление явления Эль-Ниньо (1986 г.), Ла-Нинья (1988 г.) и начало развития Эль-Ниньо (1990 г.). Из расчётов вертикальных движений по среднем климатическим данным КЧТО было установлено, что средняя скорость этих движений в верхнем слое от 0 до 100 м составляет  $14 \times 10^{-5}$  м/с. Скорость поднимающихся вверх вод, превышает значения скорости вод двигающихся вниз на  $2 \times 10^{-5}$  м/с. Максимальная скорость вертикальных движений наблюдалась в феврале и марте и минимальная в октябре-ноябре. Зоны апвеллинга в КЧТО наблюдаются в течение всего года. Наибольшие по интенсивности и по площади зоны апвеллинга имеют место в первые месяцы года (февраль-апрель) и в последние два месяца (ноябрь-декабрь). Зоны апвеллинга начинают уменьшаться в мае и достигают наименьшей площади в период с августа по октябрь. Первые месяцы года зоны апвеллинга распределены по всему КЧТО, наиболее интенсивные зоны наблюдаются на юго-западе района. С мая эти зоны распределены вдоль меридиана  $81^{\circ}30'$  з.д., смещаясь внутрь КЧТО на 30 миль, с августа по октябрь зоны сосредоточены в центре КЧТО над меридианом  $80^{\circ}$  з.д. и уменьшают свои площади. В ноябре и декабре зоны снова распределяются по всему КЧТО. Зоны апвеллинга с толщиной слоя 100 метров в среднем имеют размер 208 миль на 75 миль (15600 квадратных миль). Вокруг островов КЧТО (Горгона на юго-востоке района и Мальпело – на западе) можно видеть, что у острова Горгона апвеллинг наблюдается только в феврале, апреле и декабре, но он более интенсивен, чем у острова Мальпело, где поднятие вод наблюдается в течение всего года за исключением ноября и декабря. Очаги апвеллинга наблюдаются в пяти точках КЧТО:  $78^{\circ}30'$  з.д. –  $4^{\circ}30'$  с.ш.;  $79^{\circ}$  з.д. –  $3^{\circ}$  с.ш.;  $80^{\circ}$  з.д. –  $2^{\circ}30'$  с.ш.;  $80^{\circ}$  з.д. –  $3^{\circ}30'$  с.ш. и  $81^{\circ}30'$  з.д. –  $2^{\circ}$  с.ш. Представлен анализ результатов расчёта вертикальной циркуляции вод и зон апвеллинга по данным трёх выбранных лет, из которого следует, что на вертикальные движения оказывают влияния изменчивость южного колебания. Сплошной апвеллинг получен во время явления Ла-Нинья, а разрушение апвеллинга наблюдается во время Эль-Ниньо и во время развития этого явления.

В четвертой главе описана прогностическая модель, использованная для моделирования термодинамической структуры КЧТО. Раскрывается алгоритм численно разностной схемы. Модель, предназначенная для прогноза динамических и термохалинных характеристик КЧТО, основана на полных уравнениях движения вязкой несжимаемой жидкости в сферических координатах в приближениях Буссинеска и гидростатики, уравнениях переноса тепла и соли и уравнения состояния морской воды в форме ЮНЕСКО:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{g}{R \sin \theta} \frac{\partial \zeta}{\partial \lambda} - \frac{g}{\rho_0 R \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \lambda} \int_{-z}^0 \rho dz + lv + \frac{\partial}{\partial z} v \frac{\partial u}{\partial z} + \mu \Delta u ;$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{g}{R} \frac{\partial \zeta}{\partial \theta} - \frac{g}{\rho_0 R} \frac{\partial}{\partial \theta} \int_{-z}^0 \rho dz + lu + \frac{\partial}{\partial z} v \frac{\partial v}{\partial z} + \mu \Delta v ;$$

$$\left[ \frac{\partial u}{\partial \lambda} + \frac{\partial v \sin \theta}{\partial \theta} \right] \frac{1}{R \sin \theta} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 ;$$

$$\frac{\partial(T, S)}{\partial t} + \frac{1}{R \sin \theta} \left[ \frac{\partial u(T, S)}{\partial \lambda} + \frac{\partial v(T, S) \sin \theta}{\partial \theta} \right] + \frac{\partial w(T, S)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} v_{t, S} \frac{\partial(T, S)}{\partial z} + \mu_{T, S} \Delta(T, S) ;$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} = -\rho g ; \quad \rho = f(T, S, P) .$$

где  $z$  – вертикальная координата направлена вверх с началом на поверхности океана;  $u, v, w$  – составляющие скорости, проектированные на осях  $\lambda, \theta, z$  соответственно.

На поверхности океана задаются компоненты напряжения ветра; потоки тепла и солей; кинематическое условие; коротковолновая и длинноволновая радиация.

На дне задаются компоненты вектора касательного напряжения трения, на твердых горизонтальных границах условие не протекания со скольжением. Для уравнений переноса тепла и соли на твёрдых границах ставятся условия тепло-солеизоляции. Для определения свободной поверхности получено уравнение посредством интегрирования уравнения неразрывности по глубине от дна до поверхности с учётом соответствующих граничных условий.

На жидких границах ставятся условия, зависящие от направления потока. В случае вытекающего потока задаётся радиационное условие Зоммерфельда. В противном случае граничное значение задаётся климатическим значением.

Для параметризации вертикального турбулентного обмена используется так называемая В-Л модель, т.е. решается уравнение бюджета турбулентной энергии с привлечением гипотезы Колмогорова, а масштаб турбулентности определяется по известной формуле Вольцингера-Монтгомери с поправкой на стратификацию жидкости. Локальное уравнение баланса турбулентной энергии имеет вид:

$$\frac{\partial b}{\partial t} = k_m \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 + \frac{g}{\rho_0} \alpha_\rho \frac{\partial \rho}{\partial z} \right] - \varepsilon_D + \frac{\partial}{\partial z} k_b \frac{\partial b}{\partial z}.$$

где  $b$  – является удельной кинетической энергией турбулентности;  $\alpha_\rho$  – параметр;  $\varepsilon_D$  – диссипация турбулентной энергии, которая определяется гипотезам Колмогорова-Обухова.

Турбулентные и скрытые (латентные) потоки тепла рассчитаны по известным формулам:

$$q_T = \rho_a c_p \cdot c_h |V_g| (T_a - T_w); \quad q_E = \rho_a L \cdot c_h |V_g| (q_a - q_w).$$

где  $L = 2.5 \times 10^6$  Дж.кг<sup>-1</sup> для испарения и  $2.834 \times 10^6$  Дж.кг<sup>-1</sup> для конденсации;  $\rho_a$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $q_a$  – влажность в высоте 10 м;  $q_w$  – влажность поверхности океана;  $T_w$  – температура поверхности океана, °С.

В качестве верхнего граничного условия принято, что поток тепла на поверхности равен результирующему потоку составляющих теплового баланса.

$$Q_a = q_T + q_E + q_e + (1 - \alpha_w) q_s - \sigma T_w^4.$$

где  $\alpha_w$  – альbedo водной поверхности.

Уравнения модели для численной реализации преобразуются в конечно-разностный вид. Для генерации начальных и граничных условий был использован стационарный (диагностическая задача) вариант модели для Тихого океана с шагом 1°. Для этого в качестве исходных полей температуры и солёности задавались средние сезонные значения температуры и солёности из массива на CD-ROM WORLD OCEAN 1994 ATLAS (NODC). В качестве метеорологического обеспечения модели использовались значения метеозлементов из архива NCEP/NCAR. В результате были получены диагностические поля скорости течений и рельеф свободной поверхности для Тихого океана для 4 сезонов. Результаты расчётов циркуляции вод на поверхности Тихого Океана из диагностической задачи представлены для зимы и лета. Полученные термогидродинамические поля, использовались в качестве граничных и

начальных условий для прогностической задачи региональной модели КЧТО. Региональная задача решалась с пространственным разрешением сетки 10 минут. Рельеф дна для этой задачи взят из архива ETOPO-5, средние месячные расходы вод трёх рек (Сан Хуан, Патия и Мира) из базы данных ЮНЕСКО и значения метеозлементов из ежедневных полей метеозлементов NCEP/NCAR за период 1948 – 2000 гг. Шаг по времени составлял 20 минут. Результатами прогностического моделирования являются поля температуры, солёности, урвенной поверхности и компоненты скорости U и V с 1948 по 2000 гг. Модель позволяет описать сезонный и годовой ход термохалинных характеристик в исследуемом районе. Распределение среднеквадратического отклонения рассчитанной температуры воды от натурной температуры воды на поверхности КЧТО, показывает, что в целом модель достаточно удовлетворительно описывает термохалинный режим КЧТО. Наибольшие ошибки наблюдаются в прибрежной зоне. В результате численных экспериментов выявлены закономерности формирования крупномасштабной термодинамической структуры КЧТО. Показано, что основной вклад в межгодовую изменчивость полей температуры и солёности вносит явление ЭНЮК. Годовой ход выражен менее ярко. Амплитуда годовых колебаний уменьшается с глубиной. После 200 м годовой ход практически не выражен. Минимальная температура имеет место в марте, максимальная – в июне, что и подтверждается натурными данными. Формирование режима изменчивости полей температуры, солёности и течений находится под воздействием миграций ВЗК над КЧТО, которое проявляется в верхних слоях КЧТО. Ниже этих слоёв вертикальное распределение термохалинных характеристик практически не меняется, так как не сказывается влияния атмосферных воздействий, кроме того, существование подводных Кордильер препятствует обмену вод КЧТО с другими водами. Анализ компонент скорости U, V показывают, что на закономерности их изменчивости оказывает влияние ВЗК. В слое от 0 до 80 м, компонента U имеет западное направление в марте, а начиная с июня – восточное. Компонента V имеет южное направление в марте, и начиная с июня северное. Наблюдается трёхслойная вертикальная структура циркуляции. Выделяются в среднем слои от 0 до 80, от 80 до 200 м и от 200 м до дна. Данная структура циркуляции имеет место не только из-за влияния ВЗК, но и под воздействием четырёх поверхностных и подповерхностных течений (Перуанское, Межпассатное, Колумбийское и Панамское течения), которые меняют свои интенсивности в течение года в зависимости от воздействия пассатных ветров. Здесь снова играют роль подводные кордильеры,

которые влияют на формирование циркуляции вод КЧТО, образуя в нижних слоях движение вод с чисто локальным характером.

В пятой главе рассматривается понятие приповерхностного слоя, и анализируются модели мелкомасштабной термохалинной структуры приповерхностного слоя океана. Выделено четыре режима приповерхностного слоя, которые реализуются в КЧТО: ветро-волнового перемешивания, конвекции, объёмного поглощения лучистой энергии и при осадках. Для КЧТО приспособлены модели, описывающие эти режимы. Основу модели ветро-волнового перемешивания составляют уравнение теплопереноса, проинтегрированы в пределах верхнего перемешанного слоя, уравнение баланса энергии турбулентности, проинтегрированное в пределах перемешанного слоя. Система уравнений замыкается в предположение запирающего термоклина (при уменьшении толщины перемешанного слоя) и гипотезой автомодельности (при заглублении перемешанного слоя). В результате преобразования этих уравнений получаются следующие формулы для расчета толщины перемешанного слоя и температуры воды в нём. Для гипотезы запирающего термоклина:

$$h = \frac{2mU_*^3}{g\alpha_p q_0^T}; \quad \delta T_0 = \frac{q_0^T}{h} \delta t.$$

где  $h$  – толщина верхнего перемешанного слоя, м;  $m$  – эмпирический коэффициент пропорциональности;  $U_* = \sqrt{\frac{\rho_a c_p u_v}{\rho}}$  – динамическая скорость, м/с;  $c_p$  – коэффициент сопротивления;  $u_v$  – скорость ветра, м/с;  $q_0^T$  – поток тепла через границу вода-воздух, °См/с;  $\alpha_p$  – коэффициент термического расширения, 1/°С;  $\delta T_0$  – изменение температуры верхнего перемешанного слоя за расчётный шаг по времени  $\delta t$ , °С.

При гипотезе автомодельности уравнения для расчёта  $h$  и эволюции температуры в нём используются уравнения:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{2mU_*^3}{g\alpha_p h(T_0 - T_H)\alpha_T} - \frac{q_0^T}{(T_0 - T_H)\alpha_T} - \left( \frac{2q_0^T}{h} - \frac{2mU_*^3}{gh^2\alpha_p} \right) \frac{(H-h)(1-\alpha_T)}{(T_0 - T_H)\alpha_T};$$

$$\frac{\partial T_0}{\partial t} = \frac{2q_0^T}{h} - \frac{2mU_*^3}{gh^2\alpha_p}.$$

где  $T_0$  – температура воды в верхнем перемешанном слое, °С;  $T_H$  – температура воды нижней границы перемешанного слоя, °С;  $\alpha_T$  – безразмерный коэффициент автомодельности;  $H$  – глубина термоклина, м.

Конвективное перемешивание происходит за счёт гидростатической неустойчивости, когда плотность воды на поверхности океана увеличивается (при охлаждении или осолонении) и это даёт увеличение толщины приповерхностного слоя. Конвекция может сопровождаться воздействием ветра, и тогда согласно теории Филлипса для эволюции толщины приповерхностного слоя  $h$  и его температуры  $T$  имеются уравнения:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = -\frac{k_q q_0^T}{T_0 - T_H} + \frac{2mU_*^3}{g\alpha_p h(T_0 - T_H)}; \quad \frac{\partial T}{\partial t} = 1.2 \frac{q_0^T}{h} - 2m \frac{U_*^3}{g\alpha_p h^2}.$$

где  $k_q$  – безразмерный коэффициент для соотношения при свободной конвекции.

При слабых ветрах в солнечную погоду имеет место режим объёмного поглощения лучистой энергии. В этом случае модель приповерхностного слоя замыкается уравнением баланса энергии турбулентности, в котором архимедовы силы генерируют энергии турбулентности за счёт объёмного поглощения лучистой энергии. Модель рассматривается в двух вариантах. Гипотеза запирающего термоклина (при уменьшении толщины верхнего однородного слоя это наблюдается, как правило, до полудня) и гипотеза вовлечения (после полудня). Тогда в первом случае уравнения имеют вид:

$$rh = \frac{2(1 - e^{-rh})}{1 + e^{-rh} + 0.2 \left( \frac{q_0^T \Sigma}{q_S} \right)}; \quad \frac{\partial T_0}{\partial t} h = q_0^T \Sigma + q_{S0} - q_h.$$

где  $r$  – эффективный коэффициент ослабления солнечной энергии в морской воде,  $\text{м}^{-1}$ ;  $q_{0\Sigma}^T$  – поток тепла через поверхность за счёт испарения, турбулентного теплообмена и длинноволнового излучения,  $^\circ\text{См/с}$ ;  $q_S$  – поток коротковолнового излучения, поступающий к поверхности океана,  $^\circ\text{См/с}$ ;  $q_{S_0}$  – поток лучистой энергии через границу океан-атмосфера,  $^\circ\text{См/с}$ ;  $q_h$  – поток лучистой энергии на нижней границе слоя конвекции,  $^\circ\text{См/с}$ . Во втором случае, при увеличении толщины слоя перемешивания, используются уравнения:

$$q_h^T = \frac{\partial h}{\partial t}(T_0 - T_z); \quad \frac{q_{0\Sigma}^T + q_h^T}{2} h + q_S \left[ \frac{h}{2}(1 + e^{-rh}) - \frac{1}{r}(1 - e^{-rh}) \right] = 0.4 |q_{0\Sigma}^T| h.$$

где  $(T_0 - T_z)$  – разность значений температуры воды в слое конвекции и на уровне  $z = h_{+0}$ ,  $^\circ\text{С}$ ;  $q_h^T$  – поток тепла через нижнюю границу перемешанного слоя,  $^\circ\text{См/с}$ .

В КЧТО часто имеет место дождливая погода, при которой реализуется режим при осадках. Предполагая, что распреснённый слой, сформированный в момент выпадения осадков, имеет конечную толщину, а вследствие интенсивного турбулентного перемешивания его солёность не меняется по вертикали, для режима приповерхностного слоя океана при осадках  $h$  и эволюция аномалии его солёности  $\delta S$  рассчитывается так:

$$h = \frac{\lambda U_*^3}{g I \beta_c S_0} \ln \frac{t}{t_0}; \quad \delta S = \frac{(IS_0)^2 \beta_c g}{\lambda U_*^3} \frac{t}{\ln \frac{t}{t_0}}.$$

где,  $\lambda$  – коэффициент вовлечения, который является функцией диаметра падающих капель;  $I$  – интенсивность выпадения осадков,  $\text{м/с}$ ;  $S_0$  – солёность верхней границы перемешанного слоя, ‰;  $t$  – время, отсчитываемое от начала образования слоя распреснения, с;  $t_0$  – интервал времени от начала дождя до начала образования слоя распреснения, с;  $\beta_c$  – коэффициент солёностного сжатия,  $1/\text{‰}$ .

$U_*$  во время осадков будет равно сумме традиционной динамической скорости  $U_*$  с некоторой  $U_{*1}$ :

$$U_{*1}^3 = \frac{I u_k^2}{2}$$

где  $U_{*1}$  – динамическая скорость в воде за счёт турбулизирующего влияния падающих капель,  $\text{м/с}$ ;  $u_k$  – вертикальная скорость падения капель,  $\text{м/с}$ .

После прекращения дождя наблюдается размывание слоя распреснения. В этом случае толщина заглубляющегося распреснённого слоя и эволюция слоя скачка на его нижней границе после дождя рассчитывается так:

$$h_t = h_0 + \frac{5U_*^3 S_0 t}{g \delta S_0 h_0}; \quad \delta S_t = \delta S_0 \frac{h_0}{h_t}.$$

где  $h_t$  – толщина распреснённого слоя в момент времени  $t$ , отсчитываемый от момента прекращения осадков, м;  $h_0$  – толщина распреснённого слоя в момент прекращения осадков, м;  $\delta S_0$  – скачок солёности на нижней границе распреснённого слоя в момент прекращения осадков, ‰.

В работе проведён анализ натуральных данных для определения режимов по ежечасной метеорологической информации и рассчитаны потоки на границе океан-атмосфера на примере трёх гидрологических станций. Показан анализ ежечасной эволюции глубины приповерхностного слоя, температуры и солёности по натурным данным трёх гидрологических станций. Раскрыта закономерность формирования термохалинной структуры приповерхностного слоя КЧТО по данным моделирования различных его режимов.

В работе исследована мелкомасштабная термохалинная структура КЧТО ниже приповерхностного слоя. Проанализированы по данным наблюдений особенности тонкой термохалинной структуры и с использованием критериев (плотностного соотношения, фоновых T-S профилей, устойчивости, соотношения вкладов температуры и солёности в устойчивость), выделены слои с преобладанием различных механизмов тонкой структуры.

В заключении сформулированы основные результаты, исследований:



1. Выполнен анализ всех имеющихся данных натуральных наблюдений за термохалинными и динамическими характеристиками КЧТО. Произведена обработка и анализ этих данных. Сформулирована информационная база данных термохалинных и динамических характеристик КЧТО. На основе этой базы данных сделан предварительный анализ закономерностей формирования режима КЧТО. Произведено районирование КЧТО по термохалинным характеристикам на основе кластерного анализа. Выделено 7 однородных районов: из них первые два по своим параметрам наиболее отличны от других из-за близкого расположения к побережью. Третий район показывает смещения прибрежных вод с океаническими водами. Четыре последние района имеют океанические воды.

2. Сформулирована диагностическая модель вертикальных движений в КЧТО. Путём математического моделирования выделены климатические зоны подъёма и опускания вод. Наибольшие по площади зоны апвеллинга наблюдаются в первые месяцы года (февраль-апрель), распределённые по всему району с наибольшей интенсивностью на юго-западе КЧТО. В мае наблюдается уменьшение интенсивности апвеллинга. С августа по октябрь зоны имеют наименьшие площади и сосредоточены в основном в центре КЧТО. В последние два месяца (ноябрь-декабрь) зоны апвеллинга снова распределяются по всему КЧТО с повышением интенсивности. В результате расчётов для конкретных лет получилось, что сплошной апвеллинг наблюдался в период Ла-Нинья (1988 г.), а разрушение апвеллинга имеет место при Эль-Ниньо и в начале развития этого явления.

3. Сформулирована прогностическая модель эволюции термохалинных и динамических характеристик КЧТО удовлетворительно описывающая особенности режима КЧТО. На основе моделирования определено время формирования климата КЧТО. Формирование режима и изменчивости полей температуры, солёности и течений находится под воздействием миграций ВЗК над КЧТО, которое проявляется в верхних слоях КЧТО. Ниже этих слоёв вертикальное распределение термохалинных характеристик практически не меняется, так как не сказывается влияния атмосферных воздействий, кроме того, существование подводных Кордильер препятствует обмену вод КЧТО с другими водами. В системе циркуляции наблюдается трёхслойная вертикальная структура, в слоях от 0 до 80 м, от 80 до 200 м и от 200 м до дна. Данная структура циркуляции имеет место не только из-за влияния ВЗК, но и под воздействием четырёх поверхностных и подповерхностных течений (Перуанское, Межпассатное,

Колумбийское и Панамское течения), которые меняют свои интенсивности в течение года в зависимости от воздействия пассатных ветров. Здесь снова играют роль подводные Кордильеры, которые влияют на формирование циркуляции вод КЧТО, образуя в нижних слоях движение вод с чисто локальным характером.

4. Сформулированы математические модели различных режимов формирования приповерхностного слоя КЧТО. На основе анализа натуральных данных и результатов моделирования показано, что в КЧТО имеют место следующие режимы приповерхностного слоя: ночной конвекции, ветро-волнового перемешивания, объёмного поглощения лучистой энергии и режим при осадках. Толщина перемешанного слоя при режиме ночной конвекции заглубляется в среднем на 15 м, с изменением температуры от 27.3 до 26.9 °С. При режиме ветро-волнового перемешивания толщина меняется в среднем на 10 м, с незначительным изменением температуры. В режиме при осадках толщина слоя распреснения меняется от 1 м до 5 м с изменением температуры в пределах 0.2 °С и солёности 0.3 ‰ во время дождя и после дождя толщина меняется от 5 до 9 м с постепенным размыванием скачка солёности.

5. Дан анализ тонкой термохалинной структуры КЧТО на основе созданной информационной базы данных. Проанализированы механизмы, формирующие тонкую структуру в КЧТО. В КЧТО преобладает полная устойчивость в верхнем 150 метровом слое. Ниже 200 м наблюдается стратификация типа солевых пальцев в основном на юго-востоке района, и диффузионная неустойчивость наблюдается на юго-западе КЧТО. В открытой части КЧТО видно по всей вертикали чередование стратификацией типа полной устойчивости и солевых пальцев. Остальные районы имеют устойчивую стратификацию.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. Málkov I. y N. Villegas. Calibración de datos oceanográficos obtenidos en los cruceros sobre el Pacífico Colombiano durante 1970 – 1996: Informe Final.– Tumaco.: Centr. Contr. Cont. Pac., 1997.– 387 p.

2. Reyna J., N.L. Villegas et al. Condiciones hidrológicas y biológicas en el Pacífico Colombiano y en la Ensenada de Tumaco durante el período de 1996: Reporte Final.– Tumaco.: Centr. Contr. Cont. Pac., 1996.– 300 p.

3. Pineda A.R., N.L. Villegas et al. Estudio del comportamiento hidrológico y fitoplanctónico del Pacífico Colombiano durante los cruceros oceanográficos de 1997 y de la Ensenada Tumaco periodo enero – diciembre de 1997: Informe Final.– Tumaco.: Centr. Contr. Cont. Pac., 1997.– 230 p.

4. Camacho G., N.L. Villegas et. al. Condiciones hidrometeorológicas y biológicas del Pacífico Colombiano y de la Ensenada Tumaco durante el período de 1997: Reporte Final.– Tumaco.: Centr. Contr. Cont. Pac., 1998.– 350 p.

5. Villegas N. Estructura vertical de las aguas en el Océano Pacífico Colombiano: Informe Final.– Tumaco.: Centr. Contr. Cont. Pac., 2001.– 89 p.

6. Villegas N. Variación anual del contenido de calor de la capa activa del Océano Pacífico Colombiano//Boletín Científico Centr. Contr. Cont. Pac.– Tumaco.: Centr. Contr. Cont. Pac., 2002. – 9. – P. 25-35.

7. Вильегас Н.Л. Определение однородных зон в поверхностных водах Колумбийской части Тихого океана//Материалы итоговой сессии Учёного совета 30 – 31 января 2002.– СПб.: Изд. РГГМУ, 2002.–С. 126–128.

8. Villegas N. Evolución mensual de las corrientes verticales y zonas de surgencia en la Cuenca del Pacífico Colombiano//Boletín Científico Centr. Contr. Cont. Pac.– Tumaco.:Centr. Contr. Cont. Pac., 2002.– 9.– P. 36–46.

9. Villegas N. Estudio del movimiento de las aguas en la región este de la cuenca del Pacífico Colombiano//Boletín Científico Centr. Contr. Cont. Pac.– Tumaco.: Centr. Contr. Cont. Pac., 1997.– 6.– P. 71–80.

10. Villegas N. Movimiento vertical de las aguas en el Pacífico Colombiano durante junio y octubre de 1996//Boletín Científico Centr. Contr. Cont. Pac.– Tumaco.: Centr. Contr. Cont. Pac., 1997.– 6.– P. 81–93.

11. Villegas N. Movimiento vertical de las aguas en el Pacífico Colombiano en mayo del 2000: Informe Final.– Tumaco.: Centr. Contr. Cont. Pac., 2001.– 30 p.

12. Вильегас Н.Л., Неелов И.А. Моделирование сезонной изменчивости циркуляции вод Колумбийской части Тихого океана//Материалы итоговой сессии Учёного совета 30 – 31 января 2002.– СПб.: Изд. РГГМУ, 2002.– С.123–124.

13. Вильегас Н.Л., Моделирование циркуляции и термохалинной структуры вод Колумбийской части Тихого океана//Сборник трудов молодых учёных.– СПб.: Изд. РГГМУ, 2002.

14. Villegas, N.L.; I. Malikov et al. Compilación oceanográfica de la Cuenca Pacífica Colombiana. Panamericana formas e impresos S.A.– Tumaco.: Centr. Contr. Cont. Pac., 2002.– 110 p.

15. Вильегас Н.Л. Приповерхностный слой в Колумбийской Части Тихого Океана (КЧТО) и его моделирование//Материалы итоговой сессии Учёного совета 30 – 31 января 2002.– СПб.: Изд. РГГМУ, 2002.– С.125–126.

16. Villegas N.L. Modelación de la evolución horaria de las características termohalinas y profundidad de la capa superior (subsuperficial) de

la CPC debido a cambios atmosféricos: Informe Final.– Tumaco.: Centr. Contr. Cont. Pac., 2002.– 43 p.

17. Villegas N. Estabilidad de las aguas en el Océano Pacífico Colombiano en mayo del 2000//Boletín Científico Centr. Contr. Cont. Pac.– Tumaco.: Centr. Contr. Cont. Pac., 2002.– 9.– P. 35–45.

18. Карлин, Л.Н. Вильегас Н.Л. Выделение слоёв в Колумбийской части Тихого океана (КЧТО) с преобладанием различных механизмов формирования тонкой структуры//Материалы итоговой сессии Учёного совета 27 – 28 января 2003 г. Часть II Секции океанологии, экологии и физики природной среды.– СПб.: Изд. РГГМУ, 2003.– С. 26–28.

19. Карлин, Л.Н. Вильегас Н.Л. Моделирование вертикальной циркуляции и апвеллинга в Колумбийской части Тихого океана (КЧТО) с помощью диагностической модели. // Материалы итоговой сессии Учёного совета 27 – 28 января 2003 г. Часть II Секции океанологии, экологии и физики природной среды.– СПб.: Изд. РГГМУ, 2003.– С. 29–31.

*Nancy J. Villegas B.*

Отпечатано с готового оригинал-макета

00 от 30.12.96

ригинал-макета

1. Печать трафаретная.

аж 100 экз. Заказ №

хтинский пр. 98