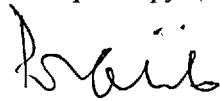


На правах рукописи



Рогачёв Константин Анатольевич

**Структура и изменчивость пограничных течений
западной субарктики Тихого океана**

(Специальность 25.00.28 – океанология)

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
доктора географических наук

Владивосток, 2006

Работа выполнена в Тихоокеанском океанологическом институте
им. В. И. Ильичёва ДВО РАН, г. Владивосток

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
Ю. Д. Реснянский

доктор географических наук,
В. И. Чупрынин

доктор географических наук,
В. В. Плотников

Ведущая организация: Институт океанологии им. П.П. Ширшова

Защита состоится 1 декабря 2006 года в 14 часов на заседании
Диссертационного совета Д 005.017.02 при Тихоокеанском
океанологическом институте им. В. И. Ильичёва ДВО РАН по адресу:
690041, Владивосток, улица Балтийская, 43.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Тихоокеанского
океанологического института

Автореферат разослан " 11 " 04.12.06 2006 г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета



доктор технических наук
Коренбаум В.И.

1. Общая характеристика работы

Актуальность проблемы

Успех в решении задачи диагноза и прогноза климата определяется знанием полей температуры и солёности океана. Быстрое изменение климата вызывает необходимость контроля основных физических процессов в океане, которые влияют на биоту, распределение осадков на континенте, температуру, смену сезонов, продолжительность теплого периода. Биота дальневосточных морей зависит от основных физических характеристик: температуры, циркуляции вод, мезомасштабных вихрей, и положения основных гидрологических фронтов. Составной частью экосистемы субарктических вод Тихого океана является самое значительное по своей биомассе сообщество мезопелагических рыб (*Лапко, Иванов, 1993; Шунтов, Дулепова, 1995*). Устойчивость таких экосистем зависит от вариаций основных характеристик океана. Новые океанографические данные, собранные в последние годы, вместе с данными дрейфующих буёв Арго, могут быть использованы для мониторинга состояния промысловых районов в океане.

Пограничные течения - основные компоненты западного субарктического круговорота Тихого океана. Западные пограничные течения субарктики Тихого океана - Камчатское течение и Ойясио - простираются более чем на 2000 км вдоль побережья Камчатки и Курильских островов. Перенос вод этими течениями определяется градиентом давления, связанным с заглублиением халоклина у континентального склона. Гестрофический перенос вод Камчатским течением относительно 1000 дбар меняется в пределах $1.4-14.8 \cdot 10^6 \text{ м}^3 \text{ с}^{-1}$.

Важная особенность западных пограничных течений - существование больших (диаметром 150-200 км) антициклонических вихрей (*Булатов, Лобанов, 1983; Лобанов с соавт., 1991; Храпченков, 1987, 1989*). Наблюдения показывают, что вихри Камчатского течения и Ойясио

различаются по своему происхождению, структуре, положению относительно берега, а также по скорости дрейфа. Антициклонические вихри растянуты вдоль всей длины Курило-Камчатского жёлоба и играют важную роль в смещении вод в субарктике. Эти вихри содержат хорошо перемешанное ядро, которое называют областью низкой потенциальной завихренности.

На основании данных, собранных автором за период с 1975 по 2005 г. найдено, что в субарктике Тихого океана в последние десятилетия происходили быстрые и значительные изменения термохалинных характеристик. Собранные данные позволяют рассматривать изменения в Охотском и Беринговом морях, в области Ойясио, Камчатского, Аляскинского и Восточно-Сахалинского течений.

Значительная доля изменчивости в океане - это результат взаимодействия океана и атмосферы. Океан обладает характерным масштабом времени циркуляции (или временем распространения планетарных волн) в несколько лет. Сигнал, вызванный ветровым воздействием, может распространяться с планетарными волнами в течение нескольких лет и усиливаться в области пограничных течений. Поэтому особенно важно понять механизмы взаимодействия океана с атмосферой и основные физические процессы в океане, формирующие аномалии температуры, солёности и уровня моря. Наиболее трудная проблема диагноза состояния океана связана с недостатком надёжных продолжительных наблюдений.

Многолетняя изменчивость в средних широтах хорошо проявляется в Тихом океане (*Карасёв, 1981; Ломакин, 1983; White, 1977; Верхунов, Ткаченко, 1992; Latif, Barnett, 1996; Андреев, Батурина, 2005*). Изучение многолетней изменчивости в субарктике Тихого океана стало в фокусе океанографических проектов, таких как ВОСЕ (Международный проект по изучению циркуляции в океане). Такое внимание вызвано исключительно большими вариациями климатических характеристик, начиная с 1976 г., -

времени недавней смены режима в Тихом океане (*Ломакин, Рогачёв, 1983; Latif, Barnett, 1996*).

Смена режима в океане 1976-78 гг. была одной из главных тем исследований совсем недавно. Особые условия наблюдались в то время не только в океане. Продолжительный ряд наблюдений за осадками во Владивостоке и в Приморье указывает на сильную засуху 1976 и 1977 года. Другие подобные периоды наблюдались в 1996-1997 гг. и в 2003 г. Между двумя засушливыми периодами наблюдался длительный период с экстремальным обилием осадков во Владивостоке и в Приморье. Начиная с 1976 г., наблюдался постепенный рост суммы осадков до его максимальных значений в 1989-91 гг. В период с 1988 по 1992 г. сумма осадков в теплый период года превышала это значение в засуху 1976 г. в четыре раза. Актуальность исследования характеристик пограничных течений прямо связана с необходимостью понимания причин подобных вариаций климата.

Несмотря на достижения в понимании происходящих изменений в океане, ряд важных вопросов оставался нерешённым:

- Какова структура пограничных течений западной субарктики? Каковы основные свойства мезомасштабных вихрей пограничных течений?
- Какие механизмы управляют многолетней изменчивостью в западной субарктике?
- Какие индексы характеризуют состояние климатической системы в западной субарктике Тихого океана?
- Какие процессы меняют стратификацию вод в различных слоях? Что управляет значительной изменчивостью солёности и плотности в промежуточных слоях?

Цели и задачи работы

Цель настоящего исследования – изучение структуры пограничных течений и основных физических процессов, вызывающих многолетние

изменения термохалинных характеристик и циркуляции вод в западной субарктике Тихого океана. А также определение роли мезомасштабных вихрей в динамике пограничных течений. Поставленные в работе задачи включали:

- Организацию экспериментов в море и сбор данных наблюдений;
- Поиск океанографических индексов, которые могут быть использованы для диагноза состояния западного субарктического круговорота и для длительных измерений в системе возобновляемых наблюдений.

Данные

Основой настоящей работы послужили данные, полученные проектом ИНПОК (международная программа по изучению климата океана, начатая ТОИ и Институтом океанологических наук, г. Сидней), а также других подобных исследованиях ТОИ в субарктике Тихого океана в последующие годы (*Розачёв, 1996, 1997, 2000, 2003, 2004, 2005*). Одним из основных результатов этих проектов стало детальное описание структуры западных пограничных течений в субарктических водах Тихого океана (*Розачёв с соавт., 1991, 1993, 1996*). Программа ИНПОК включала 4 рейса в области Ойясио и Камчатского течения в период с 1990 по 1992 г.: два весной (март-апрель), и два осенью (август-сентябрь), выполненных НИС *Академик А. Виноградов, Академик М.А. Лаврентьев, Прилив*. Детальными съёмками была покрыта область Камчатского течения и Ойясио с разрешением основных элементов циркуляции западной субарктики: прибрежной и морской струй Ойясио и больших антициклонических вихрей, цепь которых растянута вдоль Японского и Курило-Камчатского желоба от Куроисио на 36° с. ш. до Камчатки на 58° с.ш.

Цепь больших вихрей, расположенных вдоль оси Курило-Камчатского желоба или Курильской котловины, - главное явление в области Ойясио, Камчатского течения и Курильской котловины Охотского моря. Такие

вихри в области Ойясио и фронтальной зоны Ойясио-Курисио медленно движутся вдоль желоба на северо-восток со скоростью около 1-2 см/с (Kitano, 1975; Булатов, Лобанов, 1983; Лобанов с соавт., 1991; Рогачёв, Горячев, 1991; Рогачёв, 2000; Yasuda et al., 2000). Поэтому каждый год у пролива Буссоль находилась новый антициклонический вихрь.

При проведении съёмки вихрей всегда выполнялось два перпендикулярных разреза для определения точного положения их центра. При этом мы исходили из найденной ранее закономерности: центр вихрей всегда был над Курило-Камчатским жёлобом (Булатов, Лобанов, 1983; Лобанов с соавт., 1991; Рогачёв, Горячев, 1991; Rogachev et al., 1996; Rogachev, 2000). Зондирования выполнялись, по крайней мере, до уровня 1000 дбар. Первичные данные осредняли на интервале 1 дбар, а солёность была калибрована с помощью отобранных проб солемером непосредственно в море и затем в лаборатории.

Осенью 1993 г. STD наблюдения у пролива Буссоль были выполнены НИС Академик А. Несмеянов как совместный российско-канадский проект ВОСЕ.

В 1994-1996 гг. детальные измерения структуры и циркуляции вод в Курильской котловине Охотского моря и Ойясио были выполнены НИС Академик Лаврентьев и Профессор Гагаринский в рамках проекта ТОИ по изучению устойчивости экосистем дальневосточных морей и климата субарктики. Одной из задач этого проекта являлся поиск океанографических индексов, способных достаточно полно дать представление о происходящих изменениях и одновременно не требующего больших затрат судового времени. Эти данные явились основой возобновляемых наблюдений за структурой Ойясио и Камчатского течения.

Дополнительными данными послужили регулярные наблюдения, полученные в совместном проекте Национального рыболовного института Хоккайдо (HNFRI) и Тихоокеанского института рыбного хозяйства и океанографии (ТИНРО) на НИС Хокко-Мару в 1990-1997 гг. Эти съёмки

выполнялись ежегодно в одно и тоже время (в августе и сентябре) японским институтом. Данные любезно предоставлены Ясухио Кавасаки и Макото Кашиваи (HNFRJ).

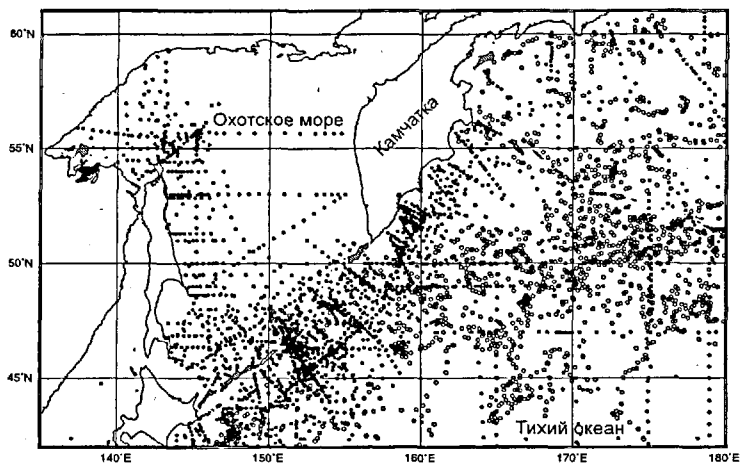


Рис. 1. Положение STD (черные круги) и станций, выполненных буями Арго (белые круги), использованных в работе

После длительного перерыва, наблюдения за вихрями Ойясио и Камчатского течения были продолжены в мае-июне (17.05-3.06) 2000 г. в экспедиции японского центра морских наук и технологий (JAMSTEC) с участием сотрудников ТОИ ДВО РАН на НИС "Мирай" (Рогачёв и Лобанов, 2001). Измерения на НИС "Мирай" выполнялись зондом Seabird-911, прошедшим калибровку перед экспедицией с измерениями солёности на солемере, а также отрывными ХВТ и ХСТД.

Все, собранные в настоящее время наблюдения за вихрями, представляют уникальный по продолжительности ряд. Вместе с наблюдениями над вихрем WCR86B, начатыми в 1987-88 г., этот ряд превышает 13 лет.

Данные за последние годы включают наблюдения, выполненные автономными буями Арго. В настоящее время число буёв растёт. По сути, буи должны стать главным источником океанографических данных. Буи свободно дрейфуют в океане на "парковочной" глубине и регулярно зондируют всю толщу (верхние 1000-2000 м) океана (рис. 1). Такие данные открывают новую эпоху в океанографии – оперативную океанографию. Буи Арго являются новым инструментом изучения океана. Никогда раньше подобные исследования и в таких масштабах не предпринимались океанографическим сообществом.

Данные со спутников НОАА использовались для определения положения фронтов на поверхности океана и были получены из лаборатории спутникового мониторинга ИАПУ ДВО РАН. Пакет программ, разработанных в лаборатории, позволяет пользователю получить изображения вихрей и фронтов с высоким разрешением.

Среднемесячные данные об уровне на прибрежных станциях Вакканай и Петропавловск, скорректированные на атмосферное давление, получены из международной программы IGOSS (ISLP-Рас). В качестве сроков переходных сезонов на континенте использовались даты перехода температуры через 0°C на дальневосточных станциях.

В качестве наблюдений за ветром использованы месячные спутниковые данные программы ВОСЕ. Эти данные были получены из института CERSAT, IFREMER (Plouzané, Франция). Интервал спутниковых наблюдений за ветром начинается в 1991 г. и продолжается по настоящее время. Скаттерометры ERS 1/2 и Quikscat измеряют изменение рассеянного сигнала радара у поверхности моря и позволяют определить скорость ветра с пространственным разрешением 0.5° . Средняя квадратичная ошибка осредненного за неделю ветра составляет 0.8 мс^{-1} .

Дрифтеры 1990 г. были предоставлены профессором П. Ле Блоном. Источник данных дрейфтеров 1993 и 1999 гг. – канадский департамент рыболовства и океанов. Буи отслеживались спутниковой системой Аргос.

Дрифтеры созданы в соответствии с рекомендациями программы поверхностных течений международного проекта ВОСЕ.

Научная новизна, основные результаты и выводы

В диссертационной работе получены следующие существенные научные результаты.

- Впервые на основе детальных океанографических съёмок исследована структура западных пограничных течений субарктики Тихого океана. Определены характеристики больших антициклонических вихрей Камчатского течения, Ойясио и Аляскинского течения. Получены новые результаты о циркуляции вод в Курильской котловине Охотского моря. Установлено, что циркуляция в котловине определяется цепью больших антициклонических вихрей. Определены характеристики этих вихрей.
- Большие антициклонические вихри формируются в месте слияния Куроисио и Ойясио к востоку от Японии. Показано, что эти вихри вытягивают промежуточные воды (200–400 м) Куроисио в своё ядро. Найдено, что они переносят тёплую воду на север вплоть до пролива Буссоль. Вихри движутся со скоростью около 1–2 см·с⁻¹ против течения. Они растянуты вдоль всей длины Курило-Камчатского жёлоба и играют важную роль в переносе вод в области западных пограничных течений. Показано, что термохалинные характеристики вихрей могут служить новыми индексами многолетних изменений (термохалинного перехода) в субарктике Тихого океана.
- На основе новых наблюдений, исследована детальная структура Камчатского течения и долговременная эволюция его мезомасштабных вихрей. Важная особенность Камчатского течения - присутствие системы антициклонических вихрей, которые относительно быстро (со скоростью ~ 4–5 см·с⁻¹) движутся с севера на юг. Вихри Камчатского течения имеют холодное ядро вод низкой солёности и поэтому переносят воду пониженной солёности. Показано, что вихри Камчатского течения

движутся из Берингова моря. Два смежных течения - Ойясио и Камчатское, по сути, содержат две разных системы антициклонических вихрей.

- На основе многолетних океанографических наблюдений показан заметный рост температуры ($\sim 1^{\circ}\text{C}$) промежуточных слоёв западной субарктики Тихого океана в период наблюдений. Установлено, что на изменение характеристик Камчатского течения и его продолжения Ойясио существенное влияние оказывает перенос тёплой воды антициклоническими вихрями Аляскинского течения. Такие вихри движутся с востока на запад и переносят тёплую воду ($> 3.8^{\circ}\text{C}$) в своём ядре (200-600 м). Этим тёплым ядром они отличаются от вихрей Камчатского течения, которые имеют холодное ядро ($< 0.2^{\circ}\text{C}$) и переносят холодную воду из Берингова моря. Перенос тёплой воды связан с отделением антициклонических вихрей Аляскинского течения и их движением на запад. Эти результаты имеют практическое значение, поскольку устанавливают механизм вариаций температуры промежуточных слоёв.

- Впервые обнаружен термохалинный переход в западной субарктике, который выразился в значительной перестройке структуры западных пограничных течений субарктического круговорота, изменении переноса вод и смене стратификации. Термохалинный переход сопровождался значительным усилением прибрежной ветви Ойясио (увеличение на порядок переноса вод, в 1994-1997 гг.) и хорошо выраженной трансформацией характеристик теплого промежуточного слоя субарктики. Во время термохалинного перехода произошли значительные изменения структуры Камчатского течения и Ойясио. Существенное ослабление прибрежной ветви Ойясио и усиление его морской ветви в 1990 г. было связано с понижением температуры в Камчатском течении.

- Показано, что термохалинный переход отражается в изменении структуры антициклонических вихрей (например, их размеры и динамическая высота сократились, в то время как стратификация усилилась). Характеристики вихрей: температура, динамический уровень, глубина халоклина, положение относительно главной ветви Ойясио, могут

быть использованы как индексы для контроля над крупномасштабной изменчивостью в регионе.

- Показано, что термохалинный переход сопровождался выраженной миграцией осадков в западной субарктике Тихого океана. Усиление осадков на юге региона наблюдалось в «тёплой фазе» состояния системы западных пограничных течений субарктики.

- Установлено, что вместе с изменением физических свойств системы западных пограничных течений происходит изменение структуры звукорассеивающих слоёв, которые отражают сообщество мезопелагических рыб. Такая реакция звукорассеивающих слоёв (ЗРС) показывает, что региональный климат океана и соответствующая биота сильно зависят от пути и силы основной ветви Ойясио. Мезопелагическое сообщество представляет собой слабо изученную компоненту экосистемы субарктики Тихого океана. В области Ойясио и Камчатского течения структура этого сообщества сильно зависит от присутствия вихрей с ядром низкой солёности и связанных с ними мезомасштабных явлений: локальных фронтов, струй и интрузий.

- На основе прямых наблюдений над течениями установлено, что ядро вихря Ойясио содержит усиленные около-инерционные возмущения большой амплитуды с возмущениями скорости $\sim 120\text{-}140 \text{ см с}^{-1}$. Предложен механизм усиления и захвата инерционных возмущений, который связан с понижением локальной инерционной частоты в вихре. Показано, что наблюдавшийся период инерционных возмущений в вихре больше, чем его планетарное значение.

- Обнаружено, что усиленные инерционные волны формируют хорошо перемешанное ядро вихря Ойясио и поэтому могут играть существенную роль в трансформации водных масс в регионе. Относительная завихренность антициклонического вихря сдвигает нижнюю границу диапазона инерционных волн в сторону низких частот (к эффективной частоте Кориолиса). Накопление энергии волн приводит к сильному перемешиванию в ядре вихря.

Предложены две гипотезы генерации усиленных инерционных движений в вихре: сильное ветровое воздействие (прохождение шторма) и приливное воздействие. Поскольку источник энергии инерционных волн не внутренний, а внешний, характеристики вихрей и время их жизни должны зависеть от внешних условий.

- На основе наблюдений за ветром рассмотрены причины многолетних изменений уровня моря в области Камчатского течения. Прибрежный уровень в Петропавловске (Камчатка) имеет выраженный положительный тренд (~ 3 см/10 лет) и значительную сезонную амплитуду (~ 10 см). Размах многолетних изменений уровня имеет величину около 12 см. Для того чтобы связать вариации уровня с характеристиками Камчатского течения, рассмотрены спутниковые наблюдения за ветром в океане (1991-2004 гг.). В области Камчатского течения в последние 13 лет наблюдались значительные многолетние вариации вихря напряжения ветра ($\sim 2 \cdot 10^{-7}$ Па/м). Установлено, что вихрь ветра является важным механизмом многолетней изменчивости уровня в области Камчатского течения.

- На основе первых прямых наблюдений над течениями и уровнем изучено приливное перемешивание на банке Кашеварова. Показано, что на банке доминируют суточные приливы и приливные течения. Суперпозиция двух суточных гармоник K_1 и O_1 приводит к исключительно сильной двухнедельной (M_2) изменчивости модуля скорости и приливного перемешивания. Показано, что приливное перемешивание на банке играет значительную роль в вентилиации холодных промежуточных вод Охотского моря и формировании полыньи на банке. Амплитуда скорости приливных течений достигает величины около 2 м с^{-1} . Сильное приливное перемешивание создаёт выраженный фронт вокруг банки. Этот фронт разделяет хорошо перемешанные воды на банке от стратифицированных вод в глубоком море.

- На основе прямых наблюдений за дрейфом буёв определены характеристики приливных течений на банке Крузенштерна. Главные оси приливных эллипсов K_1 (0.61 м с^{-1}) и O_1 (0.28 м с^{-1}) вытянуты вдоль изобат.

Биения, вызванные сложением двухсуточных гармоник K_1 и O_1 , приводят к сильной двухнедельной модуляции течений и поэтому степени приливного перемешивания. Приливное перемешивание на банке приводит к формированию плотных поверхностных вод высокой солёности. Применение модели шельфовых волн к батиметрии банки Крузенштерна показало, что их частота близка к суточному приливу. Локальный резонанс, вызванный совпадением приливной частоты с естественной частотой банки, приводит к усилению приливных течений на банке. Приливные течения большой амплитуды приводят к диапикническому перемешиванию вод. Приливное перемешивание приводит к существенной потере тепла тёплого промежуточного слоя. Установлено, что один и тот же физический механизм определяет усиленные приливные течения на банках Крузенштерна и Кашеварова.

Научная новизна подтверждена публикациями в рецензируемых научных изданиях, представлением докладов на международных и отечественных симпозиумах, экспертной оценкой на конкурсах РФФИ и ДВО РАН.

Обоснованность выводов

Выводы основаны на многочисленных детальных океанографических наблюдениях, выполненных с высоким разрешением и современными инструментами. Результаты опубликованы в ведущих российских и зарубежных рецензируемых журналах.

Результаты обсуждались на международных конференциях. Полученные выводы подтверждены последующими публикациями многих исследователей, которые использовали результаты диссертанта (*Yasuda, 2000, 2004; Kowalik, Polyakov, 1999; Ohshima, Wakatsuchi, 2002; Qiu, 2002; Hays, 2004; McClatchie, Dunford, 2003; Minobe, Nakamura, 2004; Martin, Polyakov, Markus, Drucker, 2004; Mitsudera, Taguchi, Yoshikawa, Nakamura, Waseda, Qu, 2004; Ohshima, Wakatsuchi, Saitoh, 2005; Kawasaki et al., 1999;*

Chen, Andreev, Kim, Yamamoto, 2004; Yamamoto, Watanabe, Tsunogai, Wakatsuchi, 2004; Гладышев, 2002; Rabinovich, Thomson, 2002; Ono, Ohshima, Mizuta, Fukamachi, Wakatsuchi, 2006; Rabinovich, Thomson, Bograd, 2002).

Научное и практическое значение

- Научная значимость работы состоит в том, что исследование углубляет понимание природы пограничных течений и раскрывает роль мезомасштабных вихрей в их динамике. Научная значимость подтверждена фактом цитирования опубликованных результатов другими исследователями.
- Полученные в диссертации результаты способствуют развитию региональной оперативной океанографии. А также решению практических задач по диагностике состояния пограничных течений субарктики Тихого океана. Результатом работы стало лучшее понимание физических процессов, определяющих вариации климата океан.
- Получена качественно новая, детальная и полная информация о физических процессах в промысловых районах.
- Определены новые климатические индексы и построены временные ряды основных климатических параметров, которые позволяют понять причины изменения характеристик пограничных течений.

Новые представления, полученные в работе, позволяют использовать её результаты в целях диагноза характеристик пограничных течений. Полученные результаты использованы при выполнении НИР ДВО РАН и фундаментальных проектов ДВО РАН и РФФИ.

Связь с основным планом научных исследований

Диссертационная работа выполнялась в рамках федеральной целевой программы «Мировой океан». Представленная работа выполнена в

Тихоокеанском океанологическом институте ДВО РАН и являлась частью плановых тем:

- 1) *Состояние и устойчивость экосистем дальневосточных морей России;*
- 2) *Закономерности функционирования и биоразнообразие прибрежных экосистем, оценка их возможных изменений под воздействием природных и антропогенных факторов;*
- 3) *Развитие дистанционных методов и эффективное использование космической информации для изучения состояния дальневосточных морей и шельфовой зоны Тихого океана (проект 4.5.1. ФЦП "Мировой океан").*
- 4) Кроме того, работа выполнялась как часть проектов Российского фонда фундаментальных исследований: 97-05-65782; 97-05-74827; 99-05-64533; 01-05-96902-р2001приморье; 01-05-99402; 02-05-74854; *Быстрые изменения климата в западной субарктике Тихого океана; Физические процессы, управляющие климатическими изменениями в западной субарктике Тихого океана;* а также проектов ДВО РАН: *Структура и изменчивость пограничных течений западной субарктики Тихого океана; Морская экосистема залива Академии.*

Данные, использованные в работе, были собраны автором в экспедициях на НИС "Степан Малыгин", "Профессор Богоров", "Профессор Гагаринский", "Академик Лаврентьев", "Академик Александр Виноградов", "Дмитрий Менделеев", "Прилив", "Океан", "Луговое". Экспедиции были организованы ТОИ ДВО РАН при непосредственном и активном участии автора работы, по следующим проектам ДВО РАН: *Структура пограничных течений и уровень моря в западной субарктике Тихого океана; Роль мезомасштабных вихрей в динамике Камчатского и Аляскинского течений; Структура и динамика морской экосистемы залива Академии Охотского моря: воздействие сильного приливного перемешивания на биоту № 03-3-Е-06-023; Структура и изменчивость пограничных течений западной субарктики Тихого океана № 03-3-А-07-128; Морская экосистема залива Академии;* и проектам ФЦП "Мировой океан", подпрограммы: *Исследование природы Мирового океана, темы:*

Динамика экосистем, формирование биопродуктивности и биоресурсов Мирового океана; Комплексные исследования процессов, характеристик и ресурсов дальневосточных морей; международных проектов ИНПОК и ВОСЕ.

Апробация результатов

Результаты работы докладывались и обсуждались на конференциях: Международной организации по морским наукам (PICES, Владивосток, 1999; Немуро, 1996; Виктория, Канада, 2001; Циндао, Китай, 2002; Владивосток, 2005); ВЕСТПАК (Китай, 2004); Международных конференциях по Охотскому морю (Немуро, Япония, 1998, Владивосток, 1995); Международных конференциях ВОСЕ (Галифакс, Канада, 1998; США, 2002), Международной конференции по наблюдениям в океане (Сан Рафел, Франция, 1999); Международной конференции по изменениям климата в субарктических морях и морским экосистемам GLOBEC (Виктория, Канада, 2005).

По материалам диссертации имеется 50 публикаций. Из них в международных и центральных научных журналах -31, в трудах международных и отечественных конференций опубликовано 16 работ, в региональных изданиях -3.

Основные материалы представленных исследований опубликованы в статьях в отечественных и зарубежных журналах, из них 20 лично, а остальные в соавторстве. Наиболее значимые результаты опубликованы в журналах: *Доклады российской АН, Океанология, Природа, Метеорология и гидрология, Исследование Земли из Космоса, Journal of Geophysical Research, Journal of Oceanography, Journal of Marine Systems, Progress in Oceanography, Fisheries Oceanography.*

Личный вклад автора

Основная часть результатов получена лично автором. Автор организовал и участвовал в организации 15 морских экспедиций ТОИ в Тихий океан, в Охотское и Берингово моря. На основе собранных им самим данных изучил термохалинный переход в субарктике Тихого океана. Выполнил анализ и интерпретацию гидрологических данных и данных дрейфующих буёв.

Личный вклад автора состоит в непосредственном участии в организации и выполнении проектов, проведении анализа и обработке данных. Все научные работы по теме диссертации написаны самим диссертантом. Во всех экспериментальных работах диссертант осуществлял руководство исследованиями, экспериментами, выполнял обработку экспериментальных данных и интерпретировал полученные результаты исходя из теоретических представлений, развитых самим диссертантом.

Выполненная работа связана с экспериментами и сбором наблюдений в море, получением и обработкой первичных данных. Публикация части полученных результатов выполнена с коллегами по работе. Результаты по долговременной эволюции вихря WCR86B получены совместно с В.Б. Лобановым, Н.В. Булатовым, А.Ф. Ломакиным и К.П. Толмачёвым. В работах, выполненных с соавторами, автор вместе с ними выдвигал научные идеи, участвовал в организации экспериментов, анализе данных и интерпретации результатов. Автор признателен за согласие на включение материалов совместных исследований в диссертационную работу.

Краткое содержание работы

Работа состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы.

Во введении показана актуальность проблемы, представлены основные идеи и структура работы.

В первой главе Термохалинный переход в западной субарктике Тихого океана, показаны основные характеристики пограничных течений – Ойясио

и Камчатского течения, и их изменения. Эти два смежных течения имеют две разные системы антициклонических вихрей (рис. 2, 3). Другая последовательность антициклонических вихрей присутствует в Курильской котловине Охотского моря (рис. 4).

Вихри Камчатского течения движутся из Берингова моря (рис. 5-6). Долговременные исследования структуры западных пограничных течений позволили найти быстрые изменения в субарктических водах Тихого океана, названные в работе термохалинным переходом. Эти изменения достаточно велики и затрагивают не только западные пограничные течения субарктики Тихого океана, но и связаны с экстремальными климатическими условиями на Дальнем Востоке и Приморском крае (например, засуха в Приморье в 1996-1997 годах). Изменчивость западных пограничных течений сопровождалась сопутствующими трендами других климатических индикаторов, включающих продолжительность зимы на континенте, сумму осадков в восточной Сибири, вариации уровня моря в Петропавловске (Камчатка).

Во второй главе Физические процессы, определяющие термохалинный переход, исследованы физические процессы, определяющие термохалинный переход в субарктике Тихого океана. Во время перехода океана в новое состояние температура верхнего слоя в южной части региона понизилась одновременно с понижением солёности (рис. 7-8). В окраинных морях происходит охлаждение основания халоклина. Это приводит к понижению температуры верхнего слоя субарктических вод.

Понижение температуры и солёности верхнего слоя явилось одним из признаков быстрых изменений в структуре западных пограничных течений. Кроме того, наблюдения показали усиление прибрежной ветви Ойясио по сравнению с его морской ветвью во время "термохалинного перехода", увеличение температуры теплого промежуточного слоя, усиление стратификации, и хорошо выраженное изменение характеристик антициклонических вихрей Ойясио (в период с 1990 по 1997 г.).

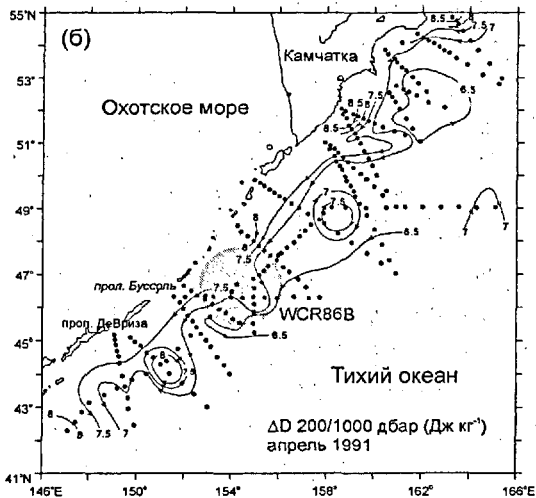
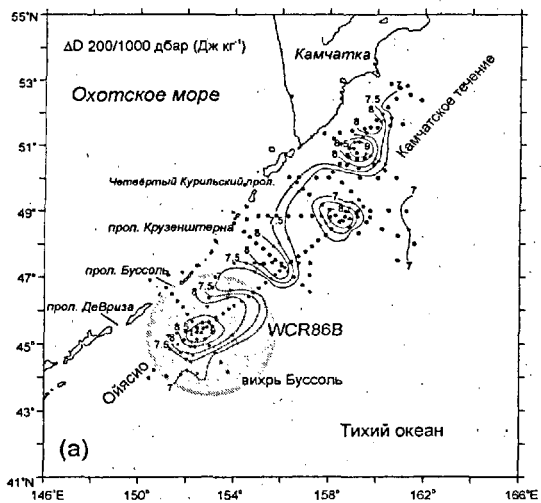


Рис. 2. Динамическая топография поверхности 200 дбар относительно 1000 дбар. Показано положение вихря WCR86B. (а) сентябрь 1990 г. (б) апрель 1991 г.

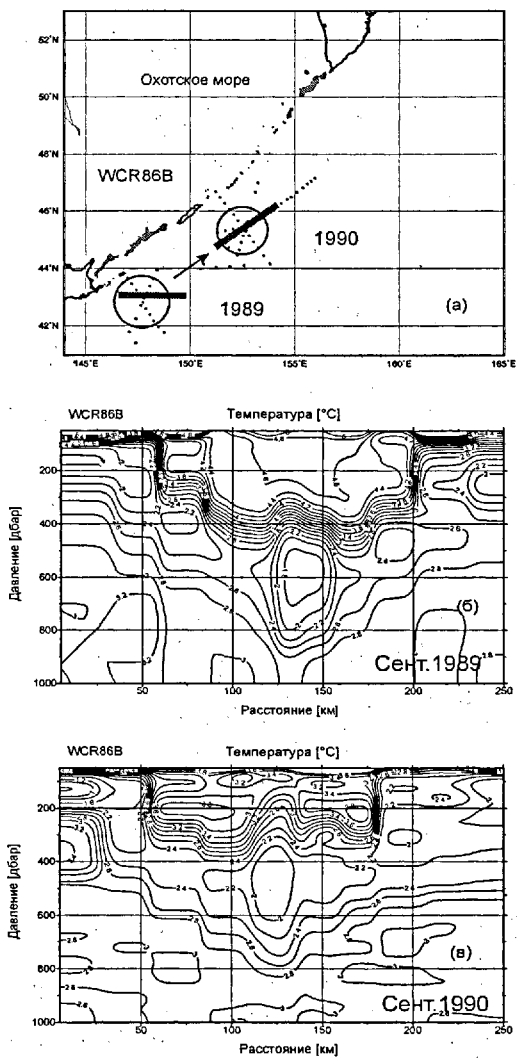


Рис. 3. Траектория вихря WCR86B с 1989 по 1990 г. (а) и разрезы температуры, выполненные в 1989 г. (б) и в 1990 г. (в) Разрезы показывают перенос тёплой воды в ядре этого вихря на север

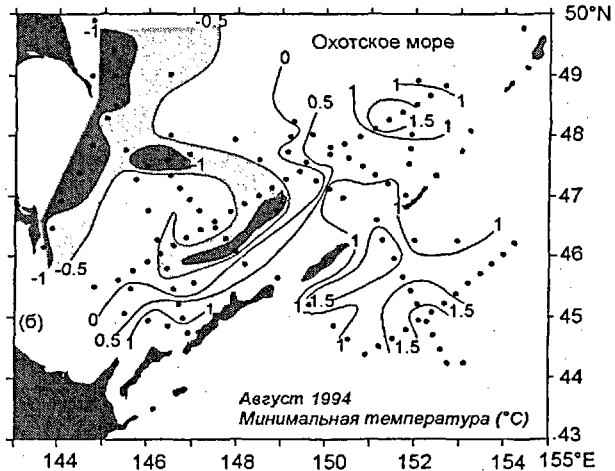
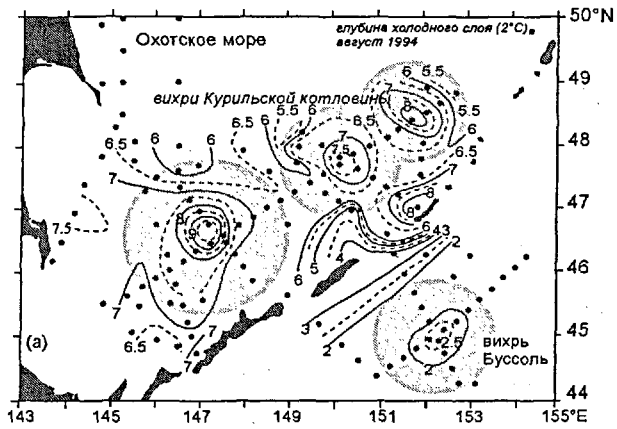


Рис. 4. (а) глубина нижней границы холодного слоя, определённая как глубина изотермы 2°C (x100м) в августе 1994 г. Цепь из трёх антициклонических вихрей вытянута вдоль оси Курильской котловины. (б) минимальная температура холодного промежуточного слоя в Охотском море и Ойясио. Холодная вода смешивается с тёплыми водами в пределах антициклонического вихря.

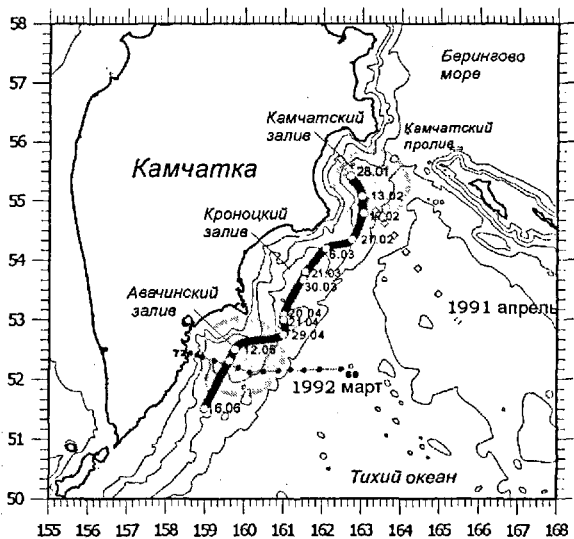


Рис. 5. Траектория антициклонического вихря Камчатского течения в первые 6 месяцев 2002 г. Показано положение разрезов и вихрей (серые круги) в марте 1992 г. И в апреле 1991 г.

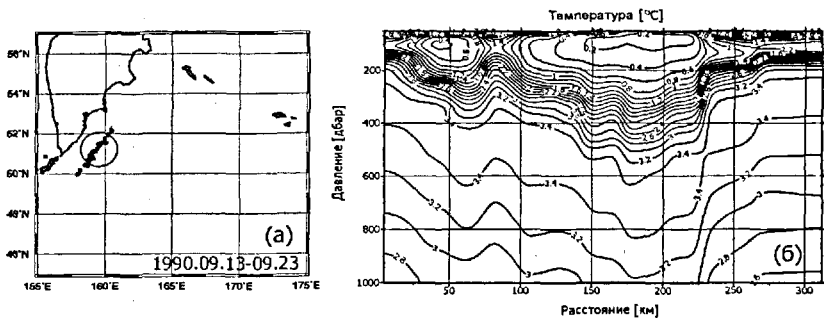


Рис. 6. Холодная вода в Камчатском вихре в 1990 г. Разрез выполнен через центр вихря, схематически показанном на карте (а). Оба промежуточных слоя (холодный и тёплый) имеют низкую температуру (б)

На основе спутниковых наблюдений за ветром, рассмотрены причины многолетних изменений уровня моря в области Камчатского течения. Вместе с изменениями структуры Камчатского течения и Ойясио в последние 30 лет наблюдались выразительные вариации прибрежного уровня на Камчатке. Вариации уровня можно разделить на три разных временных масштаба. Первый из них - это хорошо выраженный положительный тренд уровня (~3 см/10 лет). Второй временной масштаб связан с сезонной изменчивостью (с амплитудой около 10 см). В настоящей работе рассмотрена хорошо выраженная *многолетняя* изменчивость уровня и вихря напряжения ветра. Размах многолетних колебаний уровня в Камчатском течении достигает 12 см. Интерес к такой изменчивости определяется необходимостью понимания причин и механизмов вариаций уровня и возможностью использования данных об уровне для диагноза климатических изменений в субарктике.

Согласно результатам диссертанта, многолетние изменения уровня связаны с вариациями глубины халоклина, которая в свою очередь, определяется вихрем напряжения ветра. Доступные нам данные показывают, что многолетние изменения вихря напряжения ветра достаточно велики (~2·10⁷ Па/м). Вертикальная скорость, вызванная ветром, соответствует скорости погружения халоклина. Аномалия вихря ветра имела минимальное значение в 1995 г. Это соответствует максимальной скорости погружения халоклина (росту уровня) в период с 1992 по 1996 г. Максимальное положительное значение вихря ветра достигнуто в 1999 г. и соответствует падению уровня, что согласуется с наблюдениями за уровнем. Тем самым показано, что вариации вихря напряжения ветра являются одним важным механизмом заглужения халоклина и роста уровня в области Камчатского течения на этом масштабе времени.

На основе многолетних океанографических наблюдений (данных СТД, буёв Арго и спутниковых наблюдений) показано значительное повышение температуры (~1°C) тёплого и холодного промежуточных слоёв западной субарктики Тихого океана. В 1990 г. воды Камчатского течения

на 49-51°с.ш. имели самую низкую температуру холодного и тёплого промежуточных слоёв за весь период наблюдений. Начиная с осени 1994 г., и, по крайней мере, до 2005 г. температура росла. Установлено, что изменение характеристик Камчатского течения и его продолжения Ойясио в период с 1990 по 2004 г. связано с выносом тёплой воды антициклоническими вихрями Аляскинского течения. Такие вихри движутся с востока на запад и переносят тёплую воду ($>3.8^{\circ}\text{C}$) в своё ядро (рис. 8). Этим тёплым ядром они отличаются от вихрей Камчатского течения, которые имеют холодное ядро ($<0.2^{\circ}\text{C}$) и переносят холодную воду из Берингова моря. Однако, они похожи на вихри Куроисио с тёплым ядром, которые переносят тёплую воду в область Ойясио. Перенос тёплой воды связан с отделением антициклонических вихрей Аляскинского течения и их движением на запад. Перенос массы вихрями оценивается величиной около 2.5 мегатонн в секунду.

В третьей главе Внутренняя структура антициклонических вихрей, исследована внутренняя структура антициклонических вихрей Ойясио. На основе прямых наблюдений над течениями показано, что ядро вихря Ойясио содержит инерционные возмущения большой амплитуды (рис. 9-10). В ядре вихря период инерционных возмущений отличается от локального инерционного периода. Изменение инерционного периода вызвано отрицательной завихренностью, которая понижает локальную инерционную частоту. Понижение частоты в центре вихря обеспечивает захват и усиление инерционных волн внутри вихря.

Предложены два объяснения генерации инерционных движений большой амплитуды. Первое связано с самой относительной завихренностью вихря, сдвигающей нижнюю границу диапазона инерционных волн к эффективной частоте Кориолиса, которая близка к суточному приливу и поэтому позволяет захват приливной энергии на суточной частоте.

Второе объяснение состоит в том, что вызванные ветром возмущения могут быть захвачены и усилены внутри вихря. Поэтому степень перемешивания в ядре вихря должна меняться с внешним воздействием.

В четвёртой главе Приливное перемешивание и его роль на банках Кашеварова и Крузенштерна, на основе первых наблюдений над течениями и уровнем изучено приливное перемешивание на банке Кашеварова в Охотском море и на банке Крузенштерна в Тихом океане. В этой главе показана ведущая роль приливного перемешивания в перераспределении тепла и соли на примере банок Кашеварова и Крузенштерна.

Холодный халоклин в окраинных морях поддерживается адвекцией плотной воды с прилегающего шельфа, где она формируется во время образования льда. Ежегодный цикл формирования и таяния льда на шельфе приводит к образованию поверхностного слоя низкой солёности *независимо от других внешних источников пресной воды*. Этот источник воды низкой солёности достаточно велик. В тёплый период слой низкой солёности создаёт повышенную устойчивость верхнего слоя. Это препятствует смешению холодных промежуточных вод Охотского моря с теплым верхним слоем.

Холодный промежуточный слой наполняется во время зимней конвекции. Поэтому сезонный цикл замерзания и таяния - эффективный процесс переноса соли с поверхности в придонный слой на шельфе и создания стратификации. Другие источники солёной воды - это тёплые и солёные промежуточные воды Тихого океана и течения Соя. Тёплые промежуточные воды поступают в Охотское море через проливы Курильских островов. Этот поток теплых и солёных вод является составной частью термохалинной циркуляции западной субарктики, обеспечивающей вентиляцию промежуточных вод Охотского моря и формирования тихоокеанских промежуточных вод. Однако устойчивая стратификация препятствует вертикальному перемешиванию и поступлению тёплых и солёных вод в верхний слой моря. Поэтому

внутреннее диапикническое перемешивание важно для формирования промежуточных вод в Тихом океане.

Интенсивность термохалинной циркуляции и, следовательно, связанных с ней потоков тепла и соли, определяется степенью перемешивания. Основные источники энергии для внутреннего перемешивания - ветер и приливы.

По современным представлениям вся диссипация приходится на придонный пограничный слой в ограниченных областях окраинных морей. Некоторая часть доступна для перемешивания глубоких областей океана (*Munk, 1997; Munk, Wunsch, 1998; Morozov, 1995*). Важно представлять, что степень перемешивания исключительно неравномерна в пространстве. Только небольшие области ответственны за основную часть приливного перемешивания. Это означает, что небольшие области с сильными приливными течениями исключительно важны для перемешивания всей массы вод, вовлеченной в термохалинную циркуляцию. В настоящей работе на основе первых прямых инструментальных наблюдений приливов и приливных течений изучено сильное приливное перемешивание на банках Кашеварова и Крузенштерна. Приливное перемешивание на банке Кашеварова играет значительную роль в вентиляции холодных промежуточных вод Охотского моря. Показано доминирование двух суточных приливных гармоник разной частоты в течениях (O_1 и K_1). Большие полуоси соответствующих приливных гармоник составляют 0.66 и 0.59 м с⁻¹. Это создаёт ярко выраженную двухнедельную модуляцию степени перемешивания. Амплитуда скорости приливных течений достигает величины около 2 м с⁻¹ (рис. 11). Сильное приливное перемешивание создаёт выраженный фронт вокруг банки. Этот фронт разделяет хорошо перемешанные воды на банке от стратифицированных вод в глубоком море.

Наблюдения за дрейфом буев показывают, что банка Кашеварова не единственное место, где наблюдаются усиленные приливные течения. Установлено, что один и тот же физический механизм отвечает за

усиленные приливные течения и приливное перемешивание на банках Кашеварова и Крузенштерна.

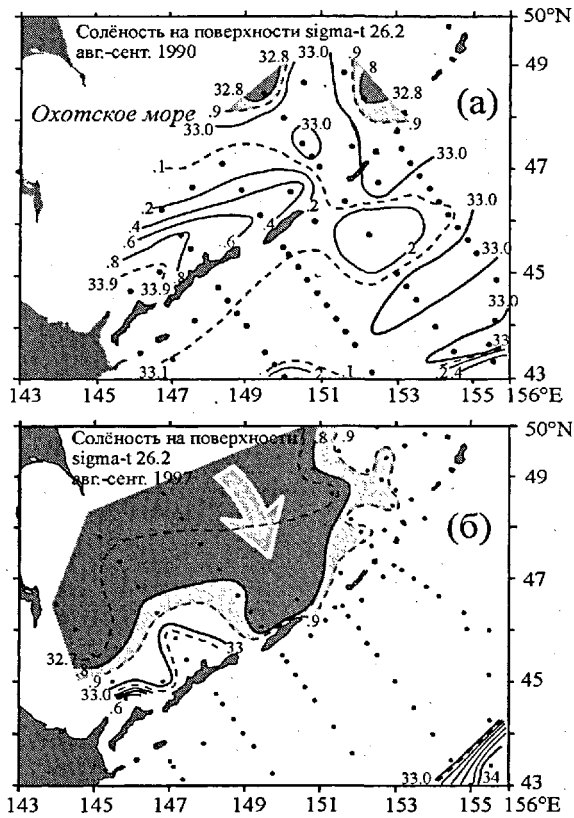


Рис. 7. Понижение солёности верхнего слоя в августе-сентябре 1990-97 гг. (солёность на поверхности $\sigma\text{-}T=26.2$). Вода с низкой солёностью (<32.8) распространялась к югу в 1997 г. В 1990 г. вода с высокой солёностью (>33.1) распространялась к северу

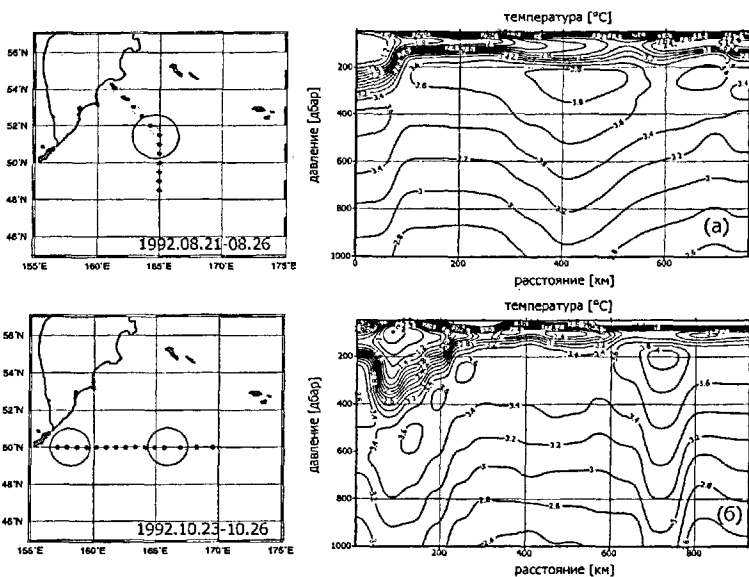


Рис. 8. Разрезы температуры через вихри Аляскинского течения в 1992 г. Вихри имеют тёплое ядро на горизонте 175-500 дбар, дистанция 400 км, (а) и 150-500 дбар, дистанция 700 км (б). В западной части разреза на дистанции 100 км (б) расположен вихрь Камчатского течения с холодным ядром

Банка Крузенштерна расположена в океане к востоку от пролива Крузенштерна. Наблюдения за дрейфом буёв на банке Крузенштерна показали усиленные суточные приливные течения до 2 м с^{-1} : Главные оси приливных эллипсов K_1 и O_1 вытянуты вдоль изобат с вращением вектора скорости по часовой стрелке. Большие полуоси приливных эллипсов K_1 и O_1 составляют 0.61 и 0.25 м с^{-1} соответственно. Биения, вызванные сложением двухсуточных гармоник K_1 и O_1 , приводят к сильной двухнедельной модуляции течений и поэтому степени приливного перемешивания. Приливные течения вызывают сильное диапикническое перемешивание холодных промежуточных вод с поверхностными и тёплыми промежуточными водами. Приливное перемешивание на банке

приводит к формированию плотных поверхностных вод высокой солёности.

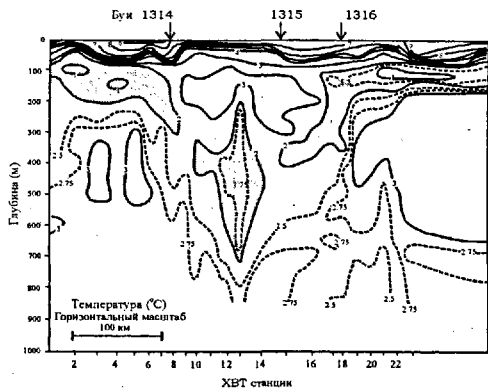


Рис. 9. Разрез температуры (°C) через вихрь Ойясио 7 ноября 1990 г. Разрез выполнен одновременно с постановкой буёв

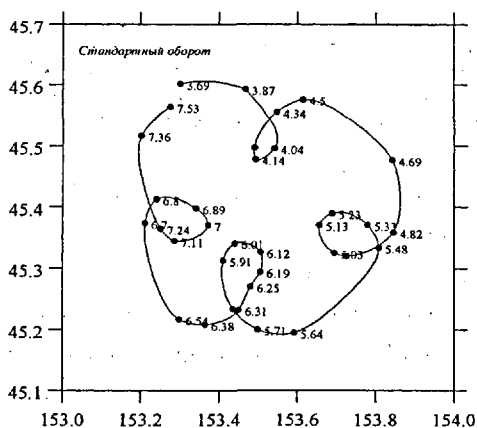


Рис. 10. Фрагмент траектории буя во время стандартного оборота. Цифры указывают время в сутках с начала наблюдений

По результатам наблюдений за дрейфом буёв в разные годы установлена антициклоническая циркуляция на банке и усиление суточных

приливных течений. Применение модели шельфовых волн к батиметрии банки Крузенштерна показало, что их частота близка к суточному приливу. Локальный резонанс, вызванный совпадением приливной частоты с естественной частотой банки, приводит к усилению приливных течений на банке. Приливное перемешивание приводит к существенному охлаждению тёплого промежуточного слоя тихоокеанских вод в регионе. Если вода на банке перемешана в течение двухнедельного приливного цикла, то скорость формирования перемешанного слоя будет составлять около $3 \cdot 10^6$ м³/с. Это составляет около половины переноса вод Камчатским течением и поэтому представляет собой значительную величину.

В разделе *основные результаты* формулируются основные выводы диссертации, которые приводятся в автореферате в разделе *научная новизна и основные результаты*.

Положения, выносимые на защиту

Показано существование трёх разных систем вихрей Ойясио, Камчатского, и Аляскинского течений

Два смежных течения - Ойясио и Камчатское содержат две разных системы антициклонических вихрей. На основе новых наблюдений, исследована детальная структура Камчатского течения и долговременная эволюция его мезомасштабных вихрей. Впервые показано, что термохалинные характеристики вихрей могут служить новыми индексами многолетних изменений климата (термохалинного перехода) в субарктике Тихого океана.

Вихри Аляскинского течения также как вихри Куроисио, имеют тёплое ядро и их диаметр значительно больше, чем у вихрей Камчатского течения. Из-за своего размера вихри переносят значительную массу вод Аляскинского течения. Во время отделения вихря от Аляскинского течения, его диаметр может достигать 300 км. Такие вихри переносят

тёплую воду на уровне 200-500 дбар. Перенос массы таким вихрем глубиной 2000 м составляет ~2.5 мегатонн в секунду.

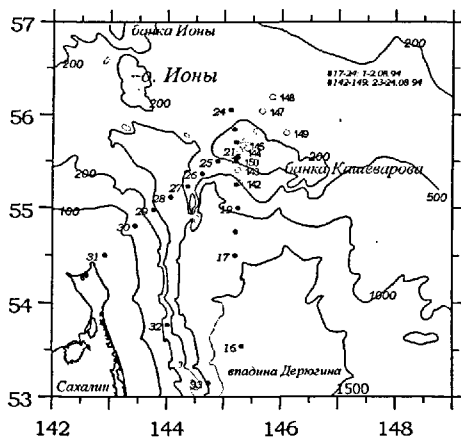


Рис. 11а. Положение океанографических станций на банке Кашеварова в августе 1994 года в разные фазы двухнедельного цикла. Звёздами показано положение измерителей уровня и течений в 1994 и 1996 годах. Изобаты в метрах

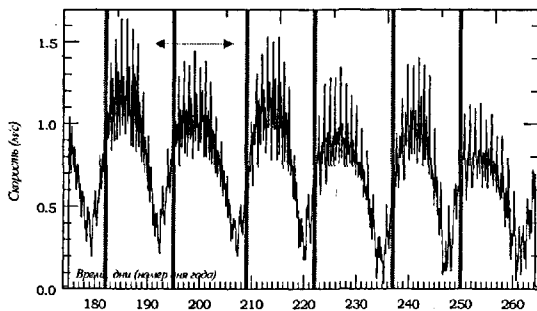


Рис. 11б. Измеренная скорость течения на банке Кашеварова в 1996 г. Хорошо выражен двухнедельный цикл (M). Этот цикл приводит к сильной изменчивости степени перемешивания и средней циркуляции вод. Дни с максимальным склонением Луны отмечены вертикальными линиями

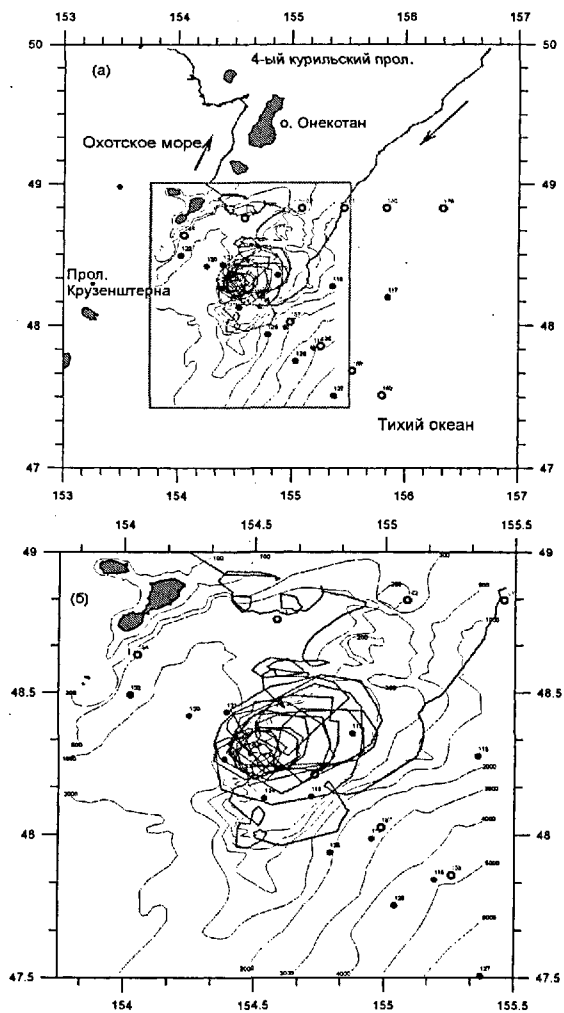


Рис. 12а. Карта района исследований, положение гидрологических станций и траектория поверхностного буя V99. Во внутреннем прямоугольнике показана детальная батиметрия. (б) Детальная батиметрия на банке Крузенштерна и траектория поверхностного буя. Изобаты в м. Стрелки указывают направление дрейфа буя.

Существует два пути распространения вихрей Аляскинского течения - северный и южный. Вихри, которые движутся по северному пути, оказывают существенное влияние на свойства и перенос вод Камчатским течением.

Обнаружен термохалинный переход

Впервые обнаружен термохалинный переход в западной субарктике, который выразился в значительной перестройке структуры западных пограничных течений субарктического круговорота, изменении переноса вод и смене стратификации. Термохалинный переход сопровождался значительным усилением прибрежной ветви Ойясио (увеличение на порядок переноса вод) и хорошо выраженной трансформацией характеристик теплого промежуточного слоя субарктики.

Показано, что термохалинный переход отражается в изменении структуры антициклонических вихрей (например, их размеры и динамическая высота сократились, в то время как стратификация усилилась). Характеристики вихрей: температура, динамический уровень, глубина халоклина, положение относительно главной ветви Ойясио могут быть использованы как индексы для контроля над крупномасштабной изменчивостью термохалинных характеристик в регионе.

Определен важный механизм многолетних изменений уровня моря в области Камчатского течения

На основе спутниковых наблюдений за ветром установлены причины многолетних изменений уровня моря в области Камчатского течения. Показано, что вариации вихря напряжения ветра являются важным механизмом многолетней изменчивости уровня в Камчатском течении.

Показано присутствие инерционных возмущений большой амплитуды во внутренней области вихря Ойясио

На основе прямых наблюдений над течениями впервые показано, что ядро вихря Ойясио содержит усиленные около-инерционные возмущения. Предложен механизм усиления и захвата около-инерционных возмущений, который связан с понижением локальной инерционной частоты в вихре.

На основе прямых наблюдений определён механизм перемешивания на банках (Кашеварова в Охотском море и Крузенштерна в Тихом океане)

На основе первых прямых наблюдений над течениями и уровнем изучено приливное перемешивание на банке Кашеварова. Показано, что на банке доминируют суточные приливы и приливные течения. Суперпозиция двух суточных гармоник K_1 и O_1 приводит к исключительно сильной двухнедельной (M_2) изменчивости модуля скорости и приливного перемешивания. Показано, что приливное перемешивание на банке играет значительную роль в вентилизации холодных промежуточных вод Охотского моря и формировании льда на банке.

Усиление суточных приливных течений K_1 и O_1 и антициклоническая циркуляция на банке Крузенштерна установлена по результатам наблюдений за дрейфом буёв. Применение модели шельфовых волн к батиметрии банки Крузенштерна показало, что их частота близка к суточному приливу. Локальный резонанс, вызванный совпадением приливной частоты с естественной частотой банки, приводит к усилению приливных течений на банке. Приливные течения большой амплитуды приводят к диапикническому перемешиванию вод. Усиление приливного перемешивания ведёт к формированию плотной воды верхнего слоя. Приливное перемешивание приводит к существенной потере тепла тёплого промежуточного слоя. Установлено, что один и тот же физический механизм отвечает за усиление приливных течений и приливное перемешивание на банках Крузенштерна и Кашеварова.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Рогачёв К. А., Горин И. И. Перенос массы и долговременная эволюция вихрей Камчатского течения // *Океанология*. 2004. Т. 44, № 1. С. 15-21.
2. Рогачёв К. А., Шлык Н. В. Многолетние изменения вихря ветра и уровень моря в Камчатском течении // *Океанология*. 2005. Т. 45, № 3. С. 339-348.
3. Рогачёв К. А., Лобанов В. Б. Быстрая изменчивость структуры западных пограничных течений субарктики Тихого океана: 10 лет наблюдений за вихрями Ойясио // *ДАН*. 2001. Т. 378, № 5. С. 681-685.
4. Рогачёв К. А., Саломатин А. С., Юсупов В. И., Кармак Э. К. Внутренняя структура антициклонических вихрей Курильского течения // *Океанология*. 1996. Т. 36, № 3. С. 347-354.
5. Рогачёв К. А. Полынья на банке Кашеварова // *Природа*. 2001. № 3. С. 33-38.
6. Рогачёв К. А., Гогина Л. В. Вихри течения Ойясио // *Природа*. 2001. № 12. С. 36-42.
7. Рогачёв К. А. Камчатское течение // *Природа*. 2003. № 2. С. 45-49
8. Рогачёв К. А. Развитие мезомасштабных струй во фронтальной зоне Куроисио-Ойясио // *Исследование Земли из Космоса*. 1993. № 4. С. 25-32.
9. Рогачёв К. А. Кислородное пересыщение и оценки первичной продукции на границах теплого вихря Куроисио // *Океанология*. 1989. Т. 29, № 6. С. 960.
10. Лобанов В.Б., Рогачёв К. А., Булатов Н.В., Ломакин А.Ф., Толмачев К.П. Долговременная эволюция теплого вихря Куроисио // *ДАН СССР*, 1991. Т. 317, № 4. С. 984-988.
11. Рогачёв К. А. О спиральной структуре синоптических вихрей // *Морской гидрофизический журнал*. 1986. № 6. С. 46-51.
12. Рогачёв К. А., Кармак Е., Мияки М., Томсон Р., Юрасов Г. И. Дрейфующий буй в антициклоническом вихре Ойясио // *ДАН СССР*. 1992. Т. 326, № 3. С. 547-550.
13. Рогачёв К. А., Булатов Н. В. Долгопериодная изменчивость структуры субарктической фронтальной зоны Куроисио-Ойясио, определенная по спутниковой информации // *Исследование Земли из Космоса*. 1991. № 4. С. 104-110.
14. Ломакин А. Ф., Рогачёв К. А. Связь аномалий температуры поверхности северной части Тихого океана с атмосферными процессами в переходные сезоны // *Метеорология и гидрология*. 1983. № 11. С. 60-67.
15. Рогачёв К. А. Изменчивость характеристик деятельного слоя в северо-западной части Тихого океана при прохождении шторма // *Метеорология и гидрология*. 1980. № 8. С. 65-68.

16. Рогачёв К. А. Быстрые изменения в холодных водах субарктики Тихого океана // *Российская наука. Российский фонд фундаментальных исследований*. М. : Академия, 1999. С. 342-354.
17. Рогачёв К.А. Океан и климат // *Дальневосточное собрание*. 2001. № 15 (22). С. 6.
18. Горячев В. А., Рогачёв К. А., Соيفер В. Н. Перенос трития в теплых вихрях Куроисио // *Океанология*. 1991. Т. 31, № 4. С. 599-605.
19. Рогачёв К. А. О диссипации кинетической энергии в циклоне над океаном // *Метеорология и гидрология*. 1982. № 3. С. 57-64.
20. Рогачёв К. А. Закономерности формирования аномалий температуры поверхности в северной части Тихого океана // *Метеорология и гидрология*, 1984. № 5. С. 72-78.
21. Рогачёв К. А. О структуре неоднородностей Камчатского течения // *Метеорология и гидрология*. 1988. № 3. С. 128-131.
22. Рогачёв К. А. Долговременная изменчивость солёности в области Ойасио // *Метеорология и гидрология*, 1991. № 6. С. 67-72.
23. Ильичев В. И., Лобанов В. Б., Рогачев К. А. Особенности динамики теплового вихря Куроисио - быстрые движения внутренних структур при медленном вращении формы // *ДАН*. 1989. Т. 308, № 5. С. 1224-1228.
24. Rogachev K.A., Carmack E. C. Evidence for the trapping and amplification of near-inertial motions in a large anticyclonic ring in the Oyashio // *Journal of Oceanography*. 2002. Vol. 58. P. 673-682.
25. Rogachev K. A. Recent variability in the Pacific western subarctic boundary currents and Sea of Okhotsk // *Progress in Oceanography*. 2000. Vol. 47/2-4. P. 299-336.
26. Rogachev K.A., Carmack E. C., Salomatin A. S. Strong tidal mixing and ventilation of cold intermediate water at Kashevarov Bank, Sea of Okhotsk // *Journal of Oceanography*. 2000. Vol. 56, No. 4. P. 439-447.
27. Rogachev K. A., Carmack E. C., Salomatin A. S., Alexanina M. G. Lunar fortnightly modulation of tidal mixing near Kashevarov Bank, Sea of Okhotsk, and its impacts on biota and sea ice // *Progress in Oceanography*. 2001. Vol. 49, No. 1-4. P. 373-390.
28. Rogachev K.A., Carmack E.C. Eddies in the western Subarctic Pacific: Dynamical structure and their potential biological significance // *International WOCE Newsletter*. 2002. P. 25-28.
29. Rogachev K. A. Rapid thermohaline transition in the Pacific western subarctic and Oyashio fresh core eddies // *Journal of Geophysical Research*. 2000. Vol. 105, No. C4. P. 8513-8526.
30. Rogachev K. A., Tishchenko P. Ya., Pavlova G. Yu., Bychkov A. S., Carmack E. C., Wong C. S., Yurasov G. I.. The influence of fresh-core rings on chemical concentrations (CO₂, PO₄, O₂ and pH) in the western subarctic Pacific Ocean // *Journal of Geophysical Research*. 1996. Vol. 101, No. C1. P. 999-1010.
31. Rogachev K. A., Goryachev V. A. Mixing in warm-core ring of the Kuroshio // *Journal of Geophysical Research*. 1991. Vol. 96, No. C5. P. 8773-

8777.

32. Rogachev K.A., Carmack E. C., Salomatin A. S. Recent thermohaline transition in the Pacific western subarctic boundary currents and their fresh core eddies : the response of sound scattering layers // *Journal of Marine Systems*. 2000. Vol. 26 No 3-4. P. 239-258.
33. Rogachev K. A., Salomatin A. S., Carmack E. C. Concentration of pelagic organisms at mesoscale fronts in the western subarctic Pacific : small fish on long waves // *Fisheries Oceanography*. 1996. Vol. 5, No. 3/4. P. 153-162.
34. Rogachev K. A. Oyashio west path culmination // *PICES Scientific Report*. 1999. No. 12. P. 95-99.
35. Rogachev K. A., Verkhunov V. A. Circulation and water mass structure in the southern Okhotsk Sea // *PICES Scientific Report*. 1995. No. 6. P. 144-149.
36. Rogachev K. A., Bychkov A. S., Carmack E. C., Tishchenko P. Y., Nedashkovsky A. P., Wong C. S. Regional carbon dioxide distribution near Kashevarov Bank (sea of Okhotsk) : effect of tidal mixing // *Biochemical Processes in the North Pacific* / ed. S. Tsunogai. Tokyo : Japan Marine Science Foundation 1997. P. 52-69.
37. Rogachev K. A. Recent speeding up of the Pacific Subarctic Circulation // *International WOCE Newsletter*. 1997. No. 26. P. 40-42.
38. Rogachev K. A., Tishchenko P. Y., Pavlova G., Bychkov A. S., Carmack E., Wong C. S., Yurasov G. I. The role of the Oyashio anticyclonic rings in controlling carbon dioxide flux // *Nemuro Workshop on Western Subarctic Circulation*. Kushiro ; Hokkaido, Japan, 1993. P. 103-106.
39. Rogachev K. A., Carmack E. C., Yurasov G. I., Miyake M., Sosnin V. Structure of anticyclonic rings and volume transport of the Oyashio // *Nemuro Workshop on Western Subarctic Circulation*. Kushiro; Hokkaido; Japan, 1993. P. 141-144.
40. Rogachev K.A. The structure and variability of the Pacific western subarctic boundary currents : Two distinct systems of mesoscale eddies and planetary waves in the Kamchatka-Oyashio current system // Challenges for Marine Science in the Western Pacific : *Proc. of the 6th IOCWESTPAC Intern. Scientific Symposium*. Hangzhou, China, 2004. P. 4.
41. Carmack E., Lake R., Yurasov G., Rogachev K., Pyatin O., Vanin N., Talley L., Musgrave D. The INPOC program // *Nemuro Workshop on Western Subarctic Circulation*. Kushiro ; Hokkaido, Japan, 1993. P. 8-12.
42. Rogachev K.A. Recent rapid changes in the Pacific western subarctic: control of circulation by the Kuril sills // *OCEANOBS 99*. Saint-Raphael, France, 1999.
43. Rogachev K. A., Carmack E. C. Variability of western subarctic Pacific boundary currents and coastal sea elevations // *CLIVAR Exchanges*. 2003. No. 26. P. 1-2.
44. Rogachev K.A., Shlyk N. V., Carmack E.C. Warming in the Kamchatka Current and circulation anomaly in the western subarctic Pacific//

- GLOBEC symposium: Climate variability and subarctic marine ecosystems.* Victoria, Canada, 2005. p. 22.
45. Rogachev K.A., E.C. Carmack and Foreman M. Bowhead whales feed on plankton concentrated by tidal currents in Academy Bay, Sea of Okhotsk // *GLOBEC symposium: Climate variability and subarctic marine ecosystems.* Victoria, Canada, 2005. p. 69.
46. Rogachev K.A. Physical forcing of marine ecosystems and long-term changes of oceanographic parameters in the Sea of Okhotsk // *PICES Annual Meeting Abstracts XIV.* 2005. p. 34
47. Rogachev K.A. Nodal modulation of air temperature in the Sea of Okhotsk // *PICES/GLOBEC Symposium Climate variability and ecosystem impacts on the North Pacific: a basin- scale synthesis. Book of Abstracts.* 2006. p. 11.
48. Rogachev K.A., Shlyk N.V. The role of Alaskan Stream eddies in the dynamics of the Kamchatka Current and western subpolar gyre // *PICES/GLOBEC Symposium Climate variability and ecosystem impacts on the North Pacific: a basin- scale synthesis. Book of Abstracts.* 2006. p. 10.
49. Рогачёв К.А., Шлык Н.В. Роль мезомасштабных вихрей в динамике Камчатского и Аляскинского течений // *Известия ТИПРО.* 2006. Т. 145. С. 228-234.
50. Rogachev K.A. Cooling at hotspots: Amplification of tidal currents over banks and 18.6-year tidal cycle in the Oyashio and Sea of Okhotsk // *Book of Abstracts. Sidney, B.C., Canada.* 2006. *PICES XV. POC Paper-2818.*

Константин Анатольевич РОГАЧЕВ

**СТРУКТУРА И ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПОГРАНИЧНЫХ ТЕЧЕНИЙ
ЗАПАДНОЙ СУБАРКТИКИ ТИХОГО ОКЕАНА**

Автореферат

Изд. лиц. ИД № 05497 от 01.08.2001 г. Подписано к печати 02.10.2006 г.

Печать офсетная. Формат 60х90/16. Бумага офсетная.

Усл. п. л. 2,5. Уч.-изд. л. 2,39.

Тираж 100 экз. Заказ 145

Отпечатано в типографии ФГУП Издательство «Дальнаука» ДВО РАН
690041, г. Владивосток, ул. Радио, 7