

Санкт-Петербургский государственный университет

На правах рукописи

Колдунов Виктор Владимирович

**ПОЛУГОДОВЫЕ КОЛЕБАНИЯ УРОВНЯ
СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ ТИХОГО ОКЕАНА**

специальность 25.00.28 – океанология

Автореферат диссертации на соискание учёной степени
кандидата географических наук

Санкт-Петербург – 2011

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном университете.

Научный руководитель: доктор географических наук, профессор кафедры океанологии СПбГУ **Фукс Виктор Робертович**

Официальные оппоненты: доктор географических наук, профессор кафедры промышленной океанологии и охраны природных вод Российского государственного гидрометеорологического университета **Малинин Валерий Николаевич**

кандидат географических наук, заместитель директора по научной работе Тихоокеанского океанологического института им. В.И.Ильичева ДВО РАН **Лобанов Вячеслав Борисович**

Ведущая организация: Санкт-Петербургское отделение ФГУ "Государственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова"

Защита состоится « » мая 2011 года в часов минут на заседании совета ДМ212.232.21 по защите докторских и кандидатских диссертаций при Санкт-Петербургском государственном университете по адресу: 199178, Санкт-Петербург, 10-я линия В.О., д. 33, центр дистанционного обучения «Феникс»; e-mail: spb.geograph@gmail.com; факс: (812) 328-41-59

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке им. А.М. Горького Санкт-Петербургского государственного университета по адресу: 199034, Санкт-Петербург, Университетская набережная 7/9

Автореферат разослан « » 2011 года.

Учёный секретарь
диссертационного совета
к.г.н.

Г.В. Пряхина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Уровень океана является индикатором разномасштабных динамических и термодинамических процессов. Значительная роль полугодового ритма в режиме морей и океанов не вызывает сомнений, в то время как происхождение этих колебаний остаётся ещё не достаточно исследовано. Решение этой проблемы позволит более достоверно описывать сезонную изменчивость океанологических характеристик, а также повысить качество гидрометеорологических и рыбопромысловых прогнозов.

Исследования годовых и полугодовых колебаний северной части Тихого океана, проводимых во второй половине двадцатого века, оставались ограниченными из-за отсутствия наблюдений за колебаниями уровня в открытых районах морей и океанов. Существенное расширение представлений о географическом распределении полугодовых колебаний уровня моря даёт использование современных методов спутниковой альтиметрии, которая обеспечивает измерения глобальной топографии поверхности моря с высоким временным и пространственным разрешением. Большой поток спутниковой информации о состоянии морей и океанов ставит перед исследователями техническую задачу освоения, разработки и внедрения новых методов усвоения и интерпретации этой информации.

С развитием компьютерных технологий появились новые технические возможности для реализации численных экспериментов на гидродинамических моделях, что позволяет перейти от простого описания явления к физически обоснованному изучению механизмов формирования полугодовых колебаний уровня моря.

Цель исследования: оценка и интерпретация пространственно-временной изменчивости полугодовых колебаний уровня северной части Тихого океана и определение механизмов их формирования.

Для достижения этой цели решались следующие основные задачи:

- 1) Систематизация и классификация основных представлений о возможных механизмах формирования полугодовых колебаний уровня моря.
- 2) Выделение и описание основных закономерностей пространственно-временной изменчивости амплитуд и фаз полугодовых колебаний уровня северной части Тихого океана.
- 3) Выявление пространственно-временной изменчивости амплитуд и фаз полугодовых колебаний уровня моря и оценка их связи с метеорологическими и геофизическими процессами.
- 4) Физическая интерпретация пространственно-временной изменчивости амплитуд и фаз полугодовых колебаний уровня моря.
- 5) Оценка сравнительного вклада различных гидрометеорологических процессов в формирование полугодовых колебаний уровня моря по результатам численных экспериментов на гидродинамической модели.

Научная новизна.

- Предложена общая классификация механизмов генерации полугодовых колебаний уровня моря.

- Построены новые карты амплитуд и фаз полугодовых волн северной части Тихого океана, которые получены на основе спутниковой альтиметрической информации с высоким пространственным разрешением ($1/3^\circ$ по широте на $1/3^\circ$ по долготе).

- Установлена тесная статистическая связь полугодовых колебаний уровня моря с атмосферными процессами (температурой воздуха, скоростью ветра, атмосферным давлением) в северной части исследуемой акватории.

- Предложена новая методология интерпретации пространственно-временной изменчивости полугодовых колебаний уровня моря, на основе вейвлет анализа.

- Впервые доказывается, что в полугодовые колебания уровня северной части Тихого океана существенный вклад вносят полугодовые стояче-поступательные волны типа градиентно-вихревых.

- Впервые проведена оценка сравнительной роли различных составляющих полугодовых колебаний с помощью численных экспериментов на гидродинамической модели.

Основные результаты, выносимые на защиту:

1. Закономерности пространственного распределения амплитуд и фаз полугодовых колебаний уровня моря и их нестационарности в северной части Тихого океана, полученные на основе совместного анализа спутниковой альтиметрической информации и измерений на береговых мареографных постах.

2. Интерпретация полугодовых колебаний уровня северной части Тихого океана как полугодовых стояче-поступательных волн типа градиентно-вихревых.

3. Механизмы генерации полугодовых колебаний уровня моря в северной части Тихого океана на основе статистического анализа и гидродинамического моделирования.

Практическая значимость. В широком спектре пространственно-временных масштабов изменчивости уровня моря, полугодовые колебания дают значимый вклад и разнообразны по механизмам их генерации.

Полученные в работе результаты могут быть использованы при разработке методов расчёта и прогноза колебаний уровня моря в северной части Тихого океана, необходимых для обеспечения мореплавания, рыболовства, экологической безопасности, гидротехнического строительства, в гидрометеорологических и рыбопромысловых прогнозах. Знание закономерностей распределения полугодовой составляющей колебаний уровня моря необходимо для систем глобальной спутниковой навигации GPS и ГЛОНАСС, а также спутниковых альтиметрических измерений и других геофизических приложений, в которых требуется точная корректировка получаемой информации.

Личный вклад автора. Все основные научные результаты исследования, изложенные выше, а также их интерпретация получены лично автором. Проводились: подготовка к работе исходных массивов данных, разработка программ (на языке программирования Matlab) для анализа и картирования натуральных и экспериментальных данных. Осуществлялся статистический анализ

данных, систематизация результатов исследования, оценка вклада различных составляющих в полугодовые колебания уровня моря. Построение гидродинамической модели Японского и Охотского морей на основе Принстонской океанской модели (ПОМ) осуществлялось совместно с ассистентом кафедры океанологии СПбГУ Р. И. Маем. Постановка и анализ численных экспериментов на гидродинамической модели проводились автором лично.

Апробация результатов исследования. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на российских и международных научных конференциях и семинарах:

- Итоговая сессия Санкт-Петербургской секции Учёного совета «ГОИН» по результатам работ 2009 года. Санкт-Петербург, Государственное учреждение "Государственный Океанографический Институт" Санкт-Петербургское отделение. 3-4 февраля 2011 г.
- International Polar Year Oslo Science Conference, Oslo, Norway, 8-12 June 2010.
- Семинар ФАЛ в рамках Программы поддержки молодых ученых ААНИИ Росгидромета, Санкт-Петербург, 1-3 декабря 2010.
- Итоговая сессия Санкт-Петербургской секции Учёного совета «ГОИН» по результатам работ 2009 года. Санкт-Петербург, Государственное учреждение "Государственный Океанографический Институт" Санкт-Петербургское отделение. 3-4 февраля 2010 г.
- Research workshop. Norwegian Polar Institute, Tromsø, Norway, 12 November, 2009.
- Итоговая научная конференция "Фундаментальные проблемы океанологии". Москва, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 27-28 ноября 2008 г.
- Шестая всероссийская открытая ежегодная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» Москва, ИКИ РАН, 10-14 ноября 2008 г.
- 4-я Международная конференция по программе PEACE «СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ОКЕАНОГРАФИИ ОКРАИННЫХ МОРЕЙ АЗИИ» 17-19 сентября 2008 г., Владивосток, Россия.
- The Ninth Biennial Pan Ocean Remote Sensing Conference-PORSEC 2008 "Oceanic Manifestation of Global Changes", 2—6 December, 2008, Guangzhou, China.
- International conference «Advances of satellite oceanography: understanding and monitoring of Asian Marginal Seas». Vladivostok, Russia, 3-6 October, 2007.
- PEACE III, Qingdao, China. 29-30 November, 2006.
- The North Pacific Marine Science Organization (PICES) Fifteenth Annual Meeting (PICES XV). Yokohama, Japan. 13 - 22 October, 2006.

Работа над диссертацией была поддержана стипендией им. Ф. Нансена («The NANSEN Grant – 2006»). Исследования, представленные в диссертации, поддержаны Российским Фондом Фундаментальных Исследований (гранты: 04-05-64876-а, 07-05-00692-а, 08-05-07006-д, 11-05-07008-д). Работа выполнялась при финансовой поддержке Федеральной целевой программы "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России".

По материалам диссертации автором опубликовано **10 работ** (5 из которых подготовлены в соавторстве), из них: **4** – статьи в изданиях по перечню ВАК; **2** – монографии; **4** – работы, опубликованные в материалах всероссийских и

международных конференций. Результаты исследований отражены также в научно-технических отчётах СКБ САМИ ДВО РАН, Южно-Сахалинск (2006 и 2007 гг.) и СПбГУ (2005, 2006, 2007, 2008, 2009 и 2010 гг.).

Объём и структура работы. Диссертация состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка использованных источников и приложений с материалами, которые не вошли в основной текст. Объём диссертации 173 страницы и содержит, кроме основного текста, 90 рисунков (из них 39 в приложении), 4 таблицы и список использованных источников из 308 наименований, в том числе 208 на иностранных языках.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** описывается актуальность исследования, сформулированы цель и задачи, отмечается научная новизна и практическая значимость работы, представлены основные положения, выносимые на защиту.

В **разделе 1 «Гипотезы происхождения полугодовых колебаний уровня моря»** на основе проведенного обзора литературных источников структурированы и обобщены основные представления о причинах возникновения полугодовой периодичности в атмосферных и океанических процессах. Освещены основные гипотезы формирования полугодовых колебаний уровня моря: генерация полугодовых колебаний уровня моря полугодовыми колебаниями геофизических и атмосферных процессов; океанических процессов; полугодовые градиентно-вихревые волны; полугодовая периодичность приливного происхождения; полугодовые колебания, как результат нелинейного резонансного взаимодействия различного происхождения.

Обсуждаются оценки полугодовых колебаний, полученные разными учёными в работах: Галеркин Л. И. и др. 1962; Balay A. 1958; Lisitzin E. 1953; Lisitzin E. 1956; Puttulo J. et al 1955; Максимов И.В, 1959; Смирнов Н.П., 1965; Фукс В.Р., 1977; Weisberg и Horigan, 1981; Ekman и Stigebrandt, 1990; Le Traon, P.-Y., и J.-F. Minster, 1993; Hall, 1997; Mercier и Speer, 1998; Thierry, 2002.

Для северной части Тихого океана впервые структурируются и проверяются основные гипотезы формирования полугодовых колебаний уровня моря. Предлагается общая классификация механизмов генерации полугодовых колебаний уровня моря на основе их гидродинамической интерпретации:

1. Свободные волны полугодового периода.

- 1.1. Гравитационные волны.
- 1.2. Геострофические волны
- 1.3. Градиентно-вихревые волны
 - 1.3.1. Волны Россби
 - 1.3.2. Топографические волны
 - 1.3.3. Сдвиговые и струйные волны
 - 1.3.4. Фронтальные волны

2. Линейные механизмы генерации вынужденных колебаний и волн полугодового периода.

- 2.1. Приливные движения

- 2.1.1. Баротропные приливы
- 2.1.2. Бароклинные приливы
- 2.2. Анемобарические воздействия
 - 2.2.1. Градиент атмосферного давления
 - 2.2.2. Тангенциальное напряжение ветра
- 2.3. Водный баланс.
 - 2.3.1. Пресноводный баланс
 - 2.3.2. Водообмен с окружающими бассейнами
- 2.4. Стерические эффекты
 - 2.4.1. Потоки тепла
 - 2.4.2. Потоки солей
 - 2.4.3. Потоки плотности
- 3. Нелинейные механизмы генерации вынужденных колебаний и волн полугодового периода.
 - 3.1. Первый обертона годовых колебаний
 - 3.2. Разность частот взаимодействующих волн
 - 3.3. Трёхволновое резонансное взаимодействие

По кинематике механизмов, полугодовая изменчивость может быть подразделена на следующие типы:

- 1. Полугодовые колебания уровня моря
 - 1.1. Свободные колебания от начальных возмущений
 - 1.2. Вынужденные резонансные колебания
- 2. Поступательные полугодовые волны.
 - 2.1. Свободные полугодовые волны от начальных или граничных возмущений.
 - 2.2. Вынужденные полугодовые волны – волны, находящиеся под непосредственным воздействием сил, их возбуждающих.
- 3. Стоячие полугодовые волны
 - 3.1. Свободные полугодовые волны от начальных или граничных возмущений.
 - 3.2. Вынужденные полугодовые волны – волны, находящиеся под непосредственным воздействием сил, их возбуждающих.
- 4. Поступательно-стоячие полугодовые волны
- 5. Бездивергентные и дивергентные волны

В разделе 2 «Экспериментальные данные и методы исследования» описываются экспериментальные данные и методы их обработки. Для оценки влияния на колебания уровня моря полугодовой изменчивости атмосферных и океанических условий, используются массивы метеорологической (атмосферное давление, скорость ветра, температура воздуха) и океанографической (температура поверхности воды, гармонические постоянные приливов) информации. Среднесуточные значения уровня моря, измеренные на 115 береговых постах северной части Тихого океана взяты из архива JASL (The Joint Archive for Sea Level).

В качестве альтиметрической информации использовались данные SLA, т.е. аномалии уровня моря относительно модели CLS01 со спутников Jason,

TOPEX/Poseidon, ENVISAT, GFO-1, ERS1/2, GEOSAT, интерполированные системой SSALTO в узлы регулярной сетки с шагом $1/3^\circ$ на $1/3^\circ$. Вводились следующие поправки: уточнённая орбита, сухая тропосферная поправка, поправка на влажность, ионосферная поправка, поправка на состояние подстилающей поверхности, океанские приливы FES2004 (M2, S2, K2, N2, 2N2, O1, P1, K1, Q1, Mf, Mtm, Mm, Msqm и M), приливы в земной коре, полюсные приливы, комбинированная атмосферная коррекция (включая поправку на эффект «обратного барометра»). Период наблюдений - с 14.10.1992 по 23.05.2007. Временная дискретность - 7 суток. Границы района: 0° – 65° с.ш., 110° в.д.– 105° з.д.

Данные NOAA_OI_SST_V2 о температуре поверхности моря (SST) имеют дискретность 7 суток и пространственное разрешение $1^\circ \times 1^\circ$. Период наблюдений с 01.01.1990 по 03.04.2010. В качестве метеорологических данных использовался массив реанализа NCEP/NCAR Reanalysis с суточной временной дискретностью. Период наблюдений с 1948 по 2008. Пространственная дискретность - $2,5^\circ \times 2,5^\circ$.

Также в разделе описываются модификации методов статистического анализа натуральных данных и результатов численного моделирования: спектральный, взаимно-спектральный, вейвлет анализ. Впервые использован метод построения изоплет на основе вейвлет анализа для оценки пространственно-временных неоднородностей полугодовых колебаний уровня моря.

В разделе 3 «Оценка пространственно-временных закономерностей полугодовых колебаний северной части Тихого океана» рассматриваются основные закономерности распределения амплитуд и фаз полугодовых колебаний уровня северной части Тихого океана на основе спутниковых и мареографных наблюдений, а также их связь с атмосферными и океаническими процессами.

Построены новые карты полугодовых колебаний уровня моря на основе мареографных данных. Описаны основные закономерности пространственного распределения амплитуд и фаз полугодовых колебаний уровня моря. Выделены локальные зоны интенсификации полугодовых колебаний: в Восточно-Китайском и Южно-китайском морях, а также в восточной части Тихого океана у берегов Северной Америки (с 35° по 50° с.ш.) и вблизи Панамского канала. Значения амплитуд для этих районов порядка 5-7 см.

Рассмотрен вопрос о приливном происхождении полугодовых колебаний уровня моря. Согласно статической теории приливов, волна, вызванная полугодовыми изменениями приливообразующей силы Солнца (Ssa) приводит к возрастанию амплитуды к северу и к югу от 35° с.ш., а значения фазы при прохождении через 35° с.ш. меняются на противоположные.

Автором показано, что значения амплитуд полугодовых колебаний уровня моря на станциях вблизи 35° с.ш. в среднем несколько меньше (порядка 3 см) амплитуд на станциях, находящихся севернее и южнее этой широты (порядка 5 см), однако нельзя говорить об очевидной закономерности из-за большой неоднородности расположения постов. Анализ значений фаз полугодовой гармоник также говорит о расхождении со статической теорией приливов. Таким образом, статическая теория приливов не может в полной мере описывать полугодовые колебания уровня в реальных океанах и морях.

Также в разделе проводится анализ альтиметрической информации для северной части Тихого океана. На рис. 1 представлены амплитуды, а на рис. 2 фазы полугодовых колебаний аномалий уровня моря, рассчитанные по альтиметрическим данным.

Амплитуда полугодовых колебаний в среднем изменяется в пределах 2-3 см. Фазовая картина характеризуется относительным постоянством на северных широтах от 40° до 50° и неоднородностью в остальных областях исследуемого района. Такая особенность фазовой картины может свидетельствовать о стояче-поступательном характере явления. На рис. 1 хорошо заметна интенсификация полугодовых колебаний в системе вод течения Куроисио.

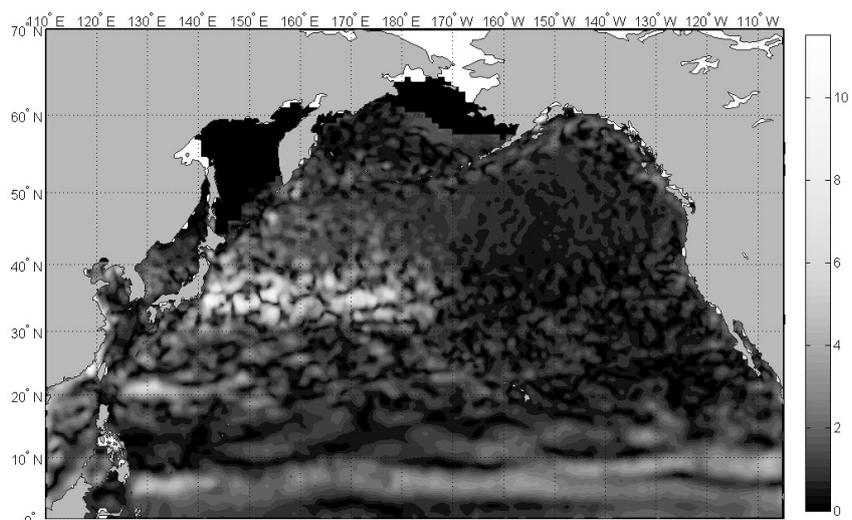


Рис. 1. Амплитуды полугодовых колебаний уровня, в см.

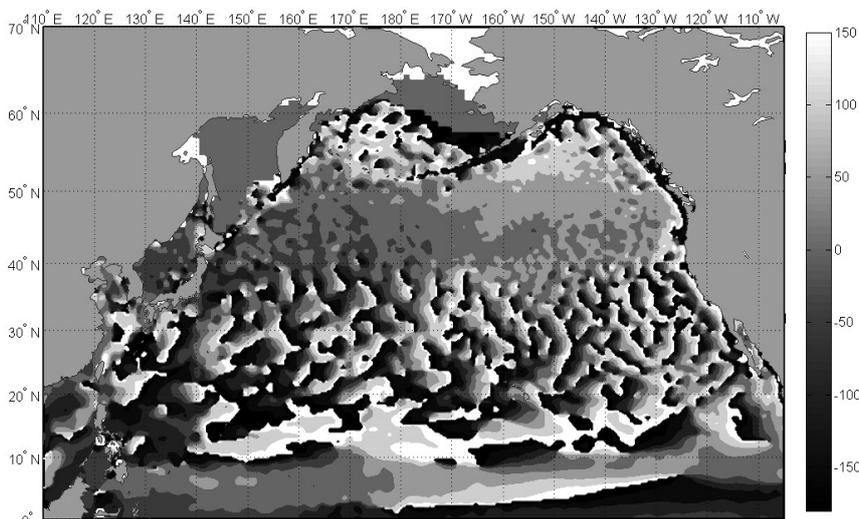


Рис. 2. Фазы полугодовых колебаний уровня, в градусах.

Разработан новый метод исследования пространственно-временной изменчивости амплитуд и фаз полугодовых колебаний уровня моря. Для каждой точки зональных и меридиональных разрезов был проведён вейвлет анализ временных рядов и вычислены вейвлет-коэффициенты для полугодового масштаба как функции времени.

Вейвлет-коэффициенты были картированы в виде изоцвет (см. рис. 3 и рис. 4), где по оси абсцисс отложено время (в годах), а по оси ординат – широта (в градусах) для меридионального разреза и долгота (в градусах) для широтного разреза. Цветом показаны градации вейвлет-коэффициентов. Таким образом, можно проследить пространственно-временную изменчивость полугодовых и годовых колебаний уровня моря.

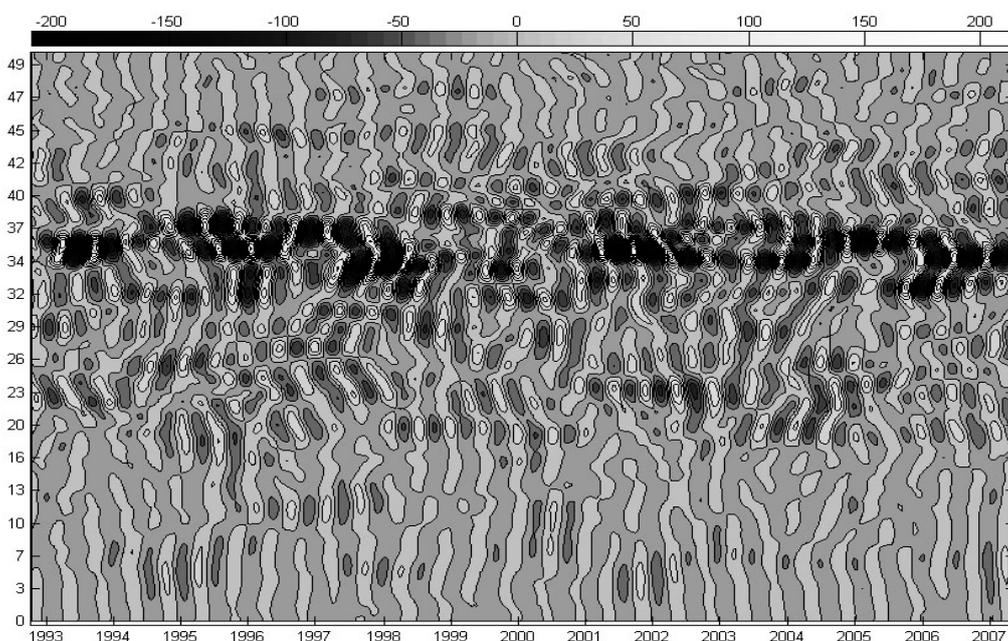


Рис. 3. Изоцветы значений вейвлет-коэффициентов для полугодовых масштабов колебаний уровня моря на меридиональном разрезе по 150° в.д.

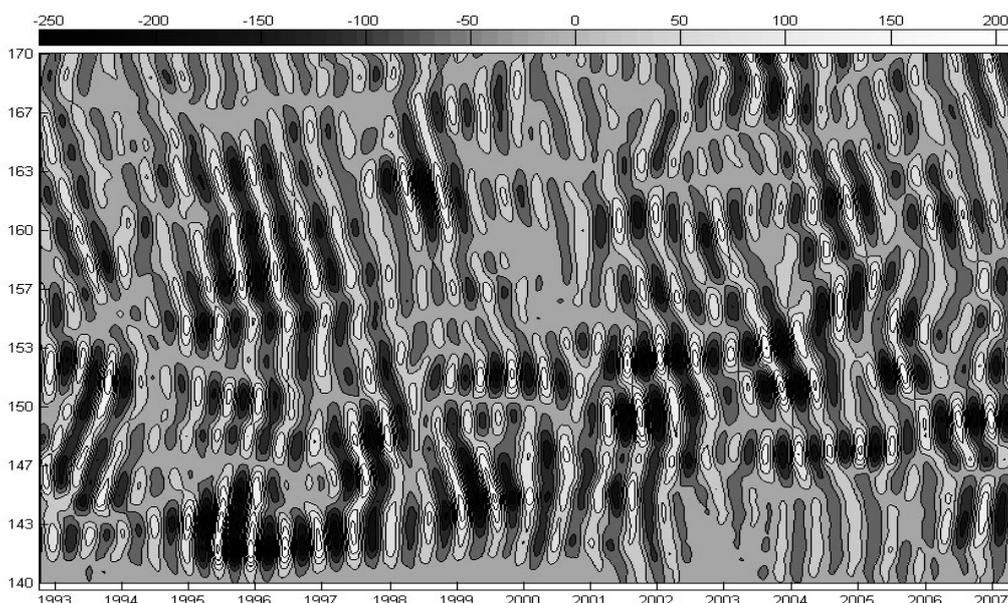


Рис. 4. Изоцветы значений вейвлет-коэффициентов для полугодовых масштабов колебаний уровня моря на зональном разрезе по 35° с.ш.

Интенсивность полугодовых колебаний уровня моря имеет неоднородный характер (рис.3) как по времени, так и по пространству. Изменчивость

интенсивности вклада полугодических колебаний зависит от широты. Выделяются области высоких значений амплитуд полугодических колебаний в зоне 32-38° с.ш. Эти области смещаются во времени по широте, что свидетельствует о наличии на этом участке поступательных волн полугодического периода. В промежутках времени 1995-1997 гг. зональная составляющая волны имела выраженную южную составляющую, а в 1997-1999 гг. – северную. Смена направления происходит с периодичностью примерно 4 года.

На разных широтах также видны узловые точки поступательно стоячей волны, относительно которых происходит колебание с полугодическим периодом, например, в полосе широт 24-25° с.ш. в периоды 1995-1998 и 2001-2006 гг. Сделан вывод о стояче-поступательном характере полугодических волн на данном участке.

Показано, что при рассмотрении зонального разреза (рис. 4) чётко прослеживается преимущественно поступательный характер полугодических волн, причём наклон гребня указывает на то, что волны распространяются преимущественно на запад. Рассчитанная по углу наклона фазовая скорость волн равна 3-4 см/с, что согласуется с оценками скоростей градиентно-вихревых волн для данного района.

Изоплеты, построенные на основе вейвлет анализа, показывают, что наличие полугодической периодичности в колебаниях уровня моря в системе вод течения Куроиси обусловлено распространением стояче-поступательных градиентно-вихревых волн. Анализ альтиметрической информации в целом свидетельствует о том, что полугодическая периодичность колебаний уровня моря в системе вод течения Куроиси связана, главным образом, с распространением стояче-поступательных градиентно-вихревых волн.

Далее анализировались метеорологические данные с суточной временной дискретностью для проверки их связи с полугодическими колебаниями уровня моря. Эта связь может проявляться в виде линейной генерации полугодических колебаний уровня моря вынуждающими анемобарическими силами (градиента атмосферного давления и тангенциального напряжения ветра) и колебаниями температуры воздуха через стерические эффекты. Выделены области сильной когерентной связи (порядка 0.7–0.8) полугодических колебаний уровня моря с атмосферными процессами в северной части и области незначительной когерентной связи в центральной части исследуемого района.

Также анализировались данные температуры поверхности воды (SST) для оценки вклада стерических эффектов в колебания уровня моря. Максимальные значения амплитуд полугодической гармоники достигают значения 2,5°C в Охотском и Баренцевом море. Большая область с амплитудами около 1°C находится в центральной части Тихого океана. В северных районах зимние температуры поверхности моря близки к точке замерзания и остаются практически постоянными в течение 2-3 месяцев. Второй пик полугодических колебаний происходит в августе, как правило, соответствуя вершине годового пика.

Рассмотрен вопрос о связи уровня моря с температурой поверхности воды, как линейного механизма генерации вынужденных колебаний уровня моря через стерические эффекты. Этот вопрос особенно слабо изучен для полугодической изменчивости. Была рассчитана когерентность временных рядов температуры

поверхности воды со значениями аномалий уровня моря на годовом и полугодовом периоде.

Полугодовые колебания температуры поверхности воды и уровня моря когерентны в северной и южной частях исследуемого района, где значения когерентности оказались равными 0.8–0.9. Неоднородный характер распределения значений когерентности в центральной части акватории свидетельствует о том, что линейная зависимость между возвышениями уровня и температурой поверхности воды на полугодовых масштабах не выражена.

На основе полученных оценок амплитуд и фаз суммарных полугодовых колебаний уровня моря по исходным альтиметрическим измерениям, и принимая амплитуду и фазу стерических колебаний как их средние значения по широте, автором оцениваются динамические возвышения уровня моря, как разность суммарных и стерических. Вычитание осреднённых по широте значений амплитуд и фаз полугодовых колебаний уровня моря не существенно изменило характер распределения амплитуд и фаз полугодовых колебаний. Эффект фазовой неустойчивости, хорошо заметный на рис. 2, только усилился, особенно в северной части исследуемого района, где, судя по всему, стерическая составляющая сезонных колебаний значительно превосходит динамическую.

В разделе 4 «Гидродинамическая модель Японского и Охотского морей» оценивается относительный вклад различных механизмов в формирование полугодовых колебаний уровня моря по результатам численных экспериментов на гидродинамической модели общей динамики вод Японского и Охотского морей. Описываются основные уравнения движения и неразрывности модели Принстонского Университета (РОМ), на численных алгоритмах которой была создана модель Японского и Охотского морей. Система уравнений движения и неразрывности в модели РОМ реализована в σ -координатах. Для оптимизации расчёта автором использовалась баротропная модификация модели.

Приводятся параметры модели, начальные и граничные условия, а также описание выбранной сеточной области. Сеточная область модели Японского, Охотского и юго-западной части Берингова моря имеет три открытых границы: (1) Корейский (Цусимский) пролив, (2) линия от японского остова Хонсю до острова Атту Алеутского архипелага, и (3) граница - от острова Атту до Камчатки. Модель имеет пространственный шаг 15 км. Размер сеточной области составляет 28944 ячеек (268 x 108). Из них 15976 приходятся на открытую воду. Значения глубин задавались из базы данных ETOPO2. В качестве начальных условий предполагается состояние покоя в начальный момент времени. Для горизонтальной скорости граничные условия на дне принимались в виде условия скольжения. На открытой границе задавались приливные явления, предвычисленные на календарную дату по гармоническим постоянным главных приливных волн (M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1, Q1), взятым из работы (Padman, Erofeeva, 2004). В модели использовались импедансные граничные условия. Под импедансным граничным условием подразумевается вариант, при котором интенсивность излучения задаётся с помощью определённых соотношений между уровнем и течением. При таком условии граница пропускает генерируемые моделью нелинейные эффекты, т.е. граничные условия корректируются в

соответствии с нелинейным характером процесса. Условия на твёрдой границе определяются условием непротекания, когда компонента скорости, перпендикулярная берегу, приравнивается нулю. В качестве метеорологической информации использовались данные NCEP/NCAR Reanalysis. Приток вод на открытой границе задаётся только для Корейского пролива, а сток вод имитируется условием излучения. Данные по расходам воды в Корейском проливе были взяты из работы (Teague et al., 2006).

Целью численных расчётов было восстановление уровня поверхности вод Японского и Охотского морей под действием внешних возбуждающих сил: анемобарических воздействий, приливных явлений и притока воды через Корейский пролив. Для сравнения полученных результатов моделирования с натурными наблюдениями использовались данные, измеренные на береговых мареографных постах Японского и Охотского морей. Продемонстрировано хорошее соответствие результатов численного моделирования натурным данным. Прослеживаются синоптическая и суточная изменчивости колебаний уровня моря, в которых преобладают приливные колебания и штормовые нагоны. Анализ временных рядов и сопоставление пространственных закономерностей основных возмущений позволили сделать вывод о приемлемом качестве модельных расчетов.

Выделены полугодовые колебания уровня моря в результатах численной реализации модели. Полученные результаты хорошо согласуются с количественными и качественными оценками полугодовых колебаний уровня моря, полученными на основе мареографных и альтиметрических данных. Численные эксперименты подтверждают работоспособность и вычислительную эффективность разработанной модели динамики вод Японского и Охотского морей для имитации колебаний уровня моря с полугодовым периодом.

В разделе 5 «Численные эксперименты по выделению механизмов генерации полугодовых колебаний уровня моря» описываются результаты численных экспериментов при различных сценариях с учётом только выделенных по-отдельности факторов, что позволяет определить вклад различных составляющих в общую динамику вод. Целью этих экспериментов являлось определение сравнительного вклада в полугодовые колебания уровня полугодовых колебаний в тангенциальном напряжении ветра и атмосферном давлении; полугодовых колебаний водного баланса; полугодовых колебаний, вызванных приливообразующими силами Луны и Солнца. Из-за отсутствия необходимых данных, принимались в расчёт только восемь основных приливных гармоник, а непосредственное влияние полугодового прилива на воды исследуемого бассейна не рассматривалось. Показано как нелинейные эффекты взаимодействия этих волн порождают гармоники, имеющие частоту, равную разности частот гармоник S_2 и K_2 и гармоник K_1 и P_1 , соответствующие частоте полугодовой гармоники S_{sa} (период 182.6211 сут.).

Анализ результатов гармонического анализа и сравнение карт пространственного распределения амплитуд и фаз полугодовых колебаний уровня моря приводит к выводу, что из всех анализируемых факторов наиболее значительный вклад в колебания уровня (амплитуда порядка 1,7 см) Японского

моря оказывает водообмен с Восточно-Китайским морем через Корейский пролив. Менее значительный вклад (порядка 0,8 см) вносят анемобарические процессы. Нелинейные взаимодействия восьми основных приливных гармоник на полугодовую изменчивость уровня Японского моря практически не влияют (амплитуда менее 0,2 см). Для Охотского моря определяющее значение имели механизмы анемобарического происхождения, причём в большей степени за счет действия поля атмосферного давления, на долю которого приходится амплитуды до 2 см. Полугодовые возмущения уровня моря, вызванные тангенциальным напряжением ветра, вносят чуть меньший вклад (до 1.3 см). Амплитуды полугодовых колебаний в Охотском море увеличиваются с востока на запад. Фазы также имеют зональный сдвиг, хотя и имеются небольшие отклонения.

В заключении приведены основные результаты диссертационной работы:

1. По результатам детального анализа основных гипотез формирования полугодовых колебаний, впервые предложена общая классификация механизмов генерации полугодовых колебаний уровня моря.

2. Построены новые карты амплитуд и фаз полугодовых колебаний северной части Тихого океана на основе спутниковой альтиметрической информации с высоким пространственным разрешением ($1/3^\circ$ по широте на $1/3^\circ$ по долготе). Такие детальные карты позволили выявить закономерности пространственного распределения амплитуд и фаз полугодовых колебаний уровня моря, которые имеют сложный характер, не наблюдавшийся в исследованиях других авторов.

3. Получена оценка связи полугодовых колебаний уровня моря с атмосферными и геофизическими процессами. Выделены области выраженной когерентности полугодовых колебаний уровня моря с атмосферными характеристиками (атмосферным давлением, ветром и температурой воздуха) в северной части исследуемого района. Это позволяет утверждать, что именно в этих областях генерируются вынужденные волны полугодового периода.

4. Впервые предложен метод интерпретации пространственно-временной изменчивости полугодовых колебаний уровня моря, выделенной с помощью вейвлет анализа. Такой анализ позволил детально проанализировать сложную амплитудно-фазовую картину полугодовых колебаний уровня моря.

5. Установлено, что полугодовая периодичность колебаний уровня моря в системе вод течения Куроисио связана, главным образом, с распространением стояче-поступательных градиентно-вихревых волн. Распределение амплитуд и фаз полугодовых колебаний уровня северной части Тихого океана имеет сложный характер, связанный с сочетанием поступательных и поступательно-стоячих полугодовых волн. Соответствующая фазовая картина характеризуется чередованием узловых линий и распространяющимися между ними поступательными волнами. Выделены узловые линии, относительно которых полугодовые колебания происходят в противофазе. Между узловыми линиями отмечено распространение поступательных полугодовых волн на запад.

6. На основе программных алгоритмов Princeton Ocean Model (POM) разработана гидродинамическая модель Японского и Охотского морей. С помощью численных экспериментов на гидродинамической модели оценены сравнительные вклады различных механизмов формирования полугодовых

колебаний уровня Японского и Охотского морей (были рассмотрены следующие механизмы: полугодовые градиентно-вихревые волны, полугодовые приливные движения, полугодовые колебания в водном балансе бассейна и полугодовые колебания, обусловленные различными нелинейными эффектами). Доказывается преобладание в исследуемых морях полугодовых волн, связанных с механизмами анемобарического происхождения.

Публикации автора в изданиях по перечню ВАК:

1) Т.В. Белоненко, **В.В. Колдунов**. К оценке трендов и штормовых нагонов в колебаниях уровня северной части Тихого океана. // Общество, среда, развитие. № 4 (17) 2010. (стр. 232-236).

2) **В.В. Колдунов**. Выделение полугодовой периодичности в колебаниях уровня моря. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2009. Т. 6. № I. (стр. 386-391).

3) **Колдунов В.В.** Межгодовые и сезонные колебания уровня северной части Тихого океана // Вестн. С.-Петербур. у-та. Сер. 7. 2007. Вып. 2. (стр. 142-148).

4) Белоненко Т.В., **Колдунов В.В.** Межгодовая изменчивость альтиметрических измерений уровня океана на Восточно-Сахалинском шельфе // Вестн. С.-Петербур. у-та. Сер. 7. 2007. Вып. 2. (стр. 128-134).

Прочие публикации автора:

5) Белоненко Т. В., **Колдунов В.В.**, Колдунов А. В., Старицын Д. К., Фукс В. Р. Спутниковая альтиметрия северо-западной части Тихого океана. Мореходство и морские науки-2009: избранные доклады Второй Сахалинской региональной морской научно-технической конференции (23 сентября 2009 г.) / Под ред. В. Н. Храмушина. – Южно-Сахалинск: СахГУ, 2010. – 292 с. (стр. 105-119)

6) Белоненко Т.В., **Колдунов В.В.**, Старицын Д.К., Фукс В.Р., Шилов И.О. "Изменчивость уровня Северо-западной части Тихого океана". Издательство СММО-ПРЕСС, СПб, 2009. 309 с.

7) **В.В. Колдунов**. Полугодовые колебания уровня северо-западной части Тихого океана. Современные проблемы океанографии окраинных морей Азии: тезисы докладов 4-й конференции по Международной программе PEACE, 17–19 сент. 2008 г., Владивосток, Россия. – Владивосток: ДВО РАН, 2008. – 63 с. (с. 29)

8) **Колдунов В.В.**, Старицын Д.К., Фукс В.Р. и др. Изменчивость уровня Охотского и Японского морей по данным спутниковых альтиметрических измерений. Дальневосточные моря. Кн. 1. Океанологические исследования. Москва. "Наука". Под ред. В.А. Акуличева. 2007. (стр. 184-231).

9) **Колдунов В.В.** Вейвлет-анализ годовых и полугодовых колебаний уровня Северо-Западной части Тихого океана. В сборнике «Достижения в спутниковой океанографии: изучение и мониторинг окраинных морей Азии (к 50-летию запуска первого искусственного спутника Земли)». Материалы международной научной конференции. Владивосток: Дальнаука, 2007. 160 с. (стр. 71-72)

10) **V.V. Koldunov**. Research of interannual variability of the mean sea level in the North Pacific. The North Pacific Marine Science Organization (PICES) Fifteenth Annual Meeting (PICES XV), 2006. POC_Paper-2795. 292 p. (p. 159)