

На правах рукописи

Белоненко Татьяна Васильевна

**Крупномасштабная изменчивость уровня северо-западной части
Тихого океана на основе спутниковых альтиметрических измерений**

Специальность 25.00.28 - Океанология

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора географических наук

Санкт-Петербург – 2014

Работа выполнена в лаборатории региональной океанологии и на кафедре океанологии факультета географии и геоэкологии Санкт-Петербургского государственного университета.

Научный консультант: доктор географических наук, профессор Виктор Робертович Фукс

Официальные оппоненты:

Владимир Владимирович Жмур, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой термогидромеханики океана Московского физико-технического института (государственного университета), Москва.

Владимир Викторович Плотников, доктор географических наук, профессор, заведующий лабораторией Тихоокеанского океанологического института им. В.И.Ильичева Дальневосточного отделения РАН, Владивосток.

Войнов Геннадий Николаевич, доктор географических наук, заведующий лабораторией Санкт-Петербургского отделения Государственного океанографического института им. Н.Н. Зубова, Санкт-Петербург.

Ведущая организация Институт космических исследований РАН (ИКИ РАН), г. Москва.

Защита состоится 2014 г. на заседании Диссертационного совета Д 212.197.02 при Российском государственном гидрометеорологическом университете по адресу: 195196 Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке РГГМУ по адресу: Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98

Автореферат разослан 2014 г.
Ученый секретарь диссертационного совета

Воробьев
Владимир Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

Уровень океана, являясь интегральной характеристикой, несущей в себе информацию о термодинамическом состоянии океана, может рассматриваться и как индикатор синоптических, сезонных и климатических изменений на Земле (Church, White, 2011). Особую актуальность приобретает проблема возможных колебаний уровня океана в связи с дискуссией о повышении уровня Мирового океана и механизмах антропогенных изменений (Малинин, 2012). Вот почему изучение колебаний уровня океана и вклада в них различных факторов является одним из приоритетных направлений исследования Мирового океана. Исследование природы колебаний уровенной поверхности необходимо для понимания причин наблюдаемых изменений в системе бассейна Тихого океана.

Развитие современной океанологии невозможно без применения спутниковых методов получения информации об океане, что обусловлено их неоспоримыми преимуществами, к главным из которых относятся: пространственная репрезентативность, обеспечивающая проведение региональных и глобальных исследований; оперативность получения информации, возможность организации оперативного комплексного мониторинга в любой точке Мирового океана, низкая стоимость спутникового мониторинга по сравнению контактными методами исследования океана (Лаврова и др., 2011; Костяной и др., 2011). Представления об изменчивости уровня в северо-западной части Тихого океана (СЗТО) были до недавнего времени основаны на данных наблюдений за уровнем на береговых станциях (мареографах). Эти измерения репрезентативны только для узкой прибрежной зоны и не дают информации об уровне для открытых районов океана (Дальневосточные моря, 2011), в то время как спутниковые альтиметрические измерения, доступные сегодня с временной дискретностью 7 суток и пространственной $1/3$ градуса широты и долготы, позволяют исследовать изменчивость уровня океана в широком диапазоне

пространственно-временных масштабов и изучить основные механизмы синоптической, сезонной и межгодовой изменчивости океанологических полей. При этом объёмы информации, получаемой с искусственных спутников Земли, колоссальны, поэтому возникает проблема выбора методов ее обработки и анализа.

Целью работы является разработка теоретических основ и методов оценки физических механизмов низкочастотной волновой изменчивости уровня СЗТО на основе спутниковой альтиметрической информации.

Для достижения цели исследования были поставлены следующие задачи:

- 1) Выявление физико-географических закономерностей низкочастотной изменчивости уровня и течений СЗТО.
- 2) Обобщение полученных результатов в виде «Атласа изменчивости уровня северо-западной части Тихого океана».
- 3) Исследование эволюции вклада компонент разного масштаба изменчивости уровня в отдельных пунктах СЗТО.
- 4) Исследование полей дивергенции полных потоков в СЗТО на основе спутниковых альтиметрических измерений для различных масштабов осреднения.
- 5) Выявление межгодовой и сезонной изменчивости геострофических течений в СЗТО.
- 6) Оценка параметров градиентно-вихревых волн типа волн Россби в СЗТО и выявление закономерностей их изменчивости.
- 7) Исследование кинематики стояче-поступательных волн в море и океане.
- 8) Создание модели переноса и трансформации океанографических и биотических характеристик градиентно-вихревыми волнами в океане.
- 9) Выявление нелинейных механизмов переноса температурных свойств и пассивной примеси в СЗТО.

Для решения поставленных в работе задач:

- собран и обработан репрезентативный массив океанографической спутниковой информации, в котором основой выполненного исследования послужил архив альтиметрической информации AVISO (спутники GEOSAT, ERS-1, TOPEX/Poseidon, ERS-2, GFO-1, Jason-1, Envisat, OSTM/Jason-2);
- выполнена статистическая обработка данных натуральных наблюдений при различных масштабах осреднения; используемые материалы обобщены и генерализованы в виде «Атласа изменчивости уровня Северо-западной части Тихого океана»;
- получены оценки эмпирических характеристики волн Россби и шельфовых волн в СЗТО; проведено исследование кинематики этих волн;
- предложен адвективный механизм проявления волн Россби в полях пассивной примеси;
- проведен анализ изменчивости уровня с оценкой сравнительного вклада компонент разного масштаба на основе методов, связанных с вейвлет-преобразованием.

Научная новизна. Ниже приводятся основные результаты исследования, которые были получены **впервые:**

- Выявлены новые физико-географические закономерности низкочастотной изменчивости морского уровня и течений в СЗТО, описывающие оценки пределов изменчивости статистических характеристик, их пространственное распределение и особенности их межгодовой и сезонной изменчивости.
- На основе вейвлет-анализа установлена эволюция разномасштабной изменчивости морского уровня с оценкой обмена энергией между процессами различных масштабов.
- Выявлена изменчивость фронтальных зон и струйных потоков в СЗТО на основе полей дивергенции полных потоков, рассчитанных по скорости изменения уровня.

- Установлено, что для СЗТО геострофические течения, рассчитанные по аномалиям уровня, характеризуют квазистационарные вихри. Выявлены особенности их межгодовой и сезонной изменчивости.
- Показано, что синоптическая изменчивость поля скоростей течений на акватории "Мегаполигона" ($38-42^{\circ}$ с.ш., $151-157^{\circ}$ в.д.) обусловлена не только синоптическими вихрями, но и низкочастотными волновыми возмущениями.
- На основе спутниковой альтиметрической информации в СЗТО получены эмпирические оценки параметров волн Россби: средние длины волн находятся в промежутке от 134 до 879 км, периоды изменяются от 95 до 259 сут., а фазовая скорость уменьшается к северу от 7.4 см/с (на 30° с.ш.) до 1.3 см/с (на 55° с.ш.), что соответствует теоретическим оценкам по дисперсионным соотношениям.
- Показано, что вопреки сложившимся феноменологическим представлениям о низкочастотной волновой динамике как системе поступательных волн, градиентно-вихревые волны в Мировом океане являются преимущественно стояче-поступательными волнами. Исследование их кинематических особенностей на основе спутниковых альтиметрических измерений подтверждает сложную ячеистую структуру и шахматную упаковку вихревых образований в поле возвышений уровня и течений, соответствующую теоретическим представлениям о динамике волн Россби в замкнутых бассейнах.
- Выявлены нелинейные механизмы переноса температурных свойств и пассивной примеси в СЗТО, определяемые адвекцией меридиональными составляющими волн Россби.
- Разработана модель переноса и трансформации океанографических и биотических характеристик градиентно-вихревыми волнами в океане, которая позволяет объяснить проявления волн Россби в полях концентрации хлорофилла и температуры поверхности океана, фиксируемые на зональных изоплетах.

Основные положения, выносимые на защиту:

- 1) Физико-географические закономерности низкочастотной изменчивости уровня и течений СЗТО.
- 2) Гидродинамические и феноменологические модели низкочастотной изменчивости уровня океана.
- 3) Оценка параметров градиентно-вихревых волн и выявление закономерностей их изменчивости в СЗТО.
- 4) Модель стояче-поступательных градиентно-вихревых волн и оценка их параметров для СЗТО.
- 5) Модель переноса и трансформации океанографических и биотических характеристик градиентно-вихревыми волнами в океане и нелинейные механизмы переноса температурных свойств и пассивной примеси в СЗТО.

Достоверность представленных результатов определяется репрезентативностью спутниковой альтиметрической информации, которая дает возможность исследования океанологических полей в широком диапазоне пространственно-временных масштабов изменчивости. Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, содержащихся в диссертационном исследовании, обеспечивается апробированной методологией и применением современных методов анализа эмпирической информации и гидродинамических моделей, описывающих рассматриваемые процессы.

Практическая значимость работы определяется тем, что в ней на примере СЗТО разрабатываются и обобщаются основные методы обработки и интерпретации спутниковой альтиметрической информации, которые позволят на качественно новом уровне ставить и решать фундаментальные и прикладные задачи исследования океана.

Результаты диссертации непосредственно использовались при разработке хозяйственных тем (Старицын и др., 2003, 2004, 2010; Старицын, Фукс, 2008; Белоненко и др., 2010), выполненных лабораторией региональной океанологии с ТИНРО и ТОИ РАН, и нашли приложение при научном обеспечении промысла

сайры и кальмара в Южно-Курильском промысловом районе (Справка о внедрении предоставлена Генеральным директором ЗАО «Рыбокомбинат Островной»). Результаты исследования применялись при информационно-прогностическом обслуживании российских судовладельцев Северного и Западного бассейнов, ведущих океанический промысел массовых пелагических видов рыбы (сельдь, скумбрия, путассу, окунь, мойва) в Северо-Восточной Атлантике (Справка о внедрении предоставлена директором НПК «Морская информатика», д.б.н. Д.Н. Ключковым).

Результаты использовались также при разработке программы 2001-2003 гг. «Исследование изменчивости океанологических условий промысла по совместным данным спутниковых альтиметрических и ИК-измерений», выполненной для Научно-технической фирмы «Комплексные системы» (г. Мурманск).

Исследования, составившие содержание данной работы, получили финансовую поддержку РФФИ (гранты 1996 г., 1997 г., 1998-2000 гг., 2004-2006 гг., 2008 г., 2011 г., 2012-2014 гг.) и Минвуза (гранты 2001-2002 гг.), ФЦП «Мировой океан» (1998-2002 гг.), АВЦП Минобрнауки "Развитие научного потенциала высшей школы", Мероприятие 2.1.1 (2010-2011 гг.), ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России», Мероприятие 1.2.1 (2010-2012 гг., ГК П728 от 20 мая 2010), Мероприятие 1.1 (2010-2012 гг., ГК № 14.740.11.0201 от 15.09.2010).

Апробация работы. Основные результаты, составившие содержание данной работы, докладывались на российских и международных конференциях, в том числе на научно-технической конференции МГИ АН УССР. (Севастополь, 1987), IV Всесоюзной конференции по географии океана (Калининград, 1989), 8 Всесоюзной конференции по промысловой океанографии (Ленинград, 1990), семинаре «Математическое моделирование и информационные технологии в исследованиях биоресурсов мирового океана» (Владивосток, 2004), Всероссийских Открытых конференциях «Современные проблемы

дистанционного зондирования Земли из космоса» ИКИ РАН (Москва, 2008; 2009; 2010; 2011; 2012, 2013), Первой всероссийской конференции по прикладной океанографии (ГОИН, 2010), Сахалинской региональной научно-технической конференции «Мореходство и морские науки» (2009; 2011; 2012), конференции «Геодинамические процессы и природные катастрофы в Дальневосточном регионе», посвященной 65-летию ИМГиГ ДВО РАН (Южно-Сахалинск, 2011), II Международной научно-практической конференция «Геосистемы: факторы развития, рациональное природопользование, методы управления (Туапсе, 2011), XIII международной конференции по промысловой океанологии» (Калининград, 2005), XI Всероссийской конференция по проблемам рыбопромыслового прогнозирования (ПИНРО, Мурманск, 2012), Международных школах-семинарах ИКИ РАН: «Спутниковые методы и системы исследования Земли» (Таруса, 2012, 2013, 2014), Съездах РГО (Кронштадт, 2005; Санкт-Петербург, 2010), всероссийской конференции «Применение космических технологий для развития арктических регионов» (Архангельск, 2013), а также международных конференциях PORSEC (2002; 2005, 2008; 2010; Kochi, Kerala, India, 2012), PICES (2004; 2005; 2006; 2010; Khabarovsk, Russia, 2011), PEACE (2006; 2008; 2010), Pacific-Asian Marginal Seas (PAMS - 2011, 2013), 31 International Symposia on Remote Sensing of Environment (Санкт-Петербург, 2005), 4th Coastal Altimetry Workshop (Porto, Lisbon, 2010), BIT's Marine Tech Summit (Dalian, China, 2010), 1st Annual Congress of Marine Biotechnology (WCMB-2011) (Dalian, China, 2011), Международной конференции «Потоки и структуры в жидкостях » (Владивосток. 2011, Санкт-Петербург, 2013), Ocean Sciences Meeting (Salt Lake City, Utah, USA, 2012), EGU (Вена, Австрия, 2012), 12 International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM (Bulgaria, 2012), 20 YEARS OF PROGRESS IN RADAR ALTIMETRY SYMPOSIUM (Venice, Italy, 2012), Fall Meeting, AGU (San Francisco, California, USA, 2012), Дистанционное зондирование окружающей среды: научные и прикладные исследования в Азиатско-Тихоокеанском регионе»

(RSAP2013). В общей сложности по теме диссертации сделано более 50 докладов на конференциях и симпозиумах.

Методологические и методические аспекты решаемой проблемы докладывались на научных семинарах лаборатории региональной океанологии Научно-исследовательского института географии СПбГУ, ежегодных Итоговых сессиях Санкт-Петербургской секции Ученого совета ФГБУ «ГОИН». Материалы диссертации представлены в научно-технических отчетах по проектам РФФИ, Минвуза, ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России», АВЦП Минобрнауки "Развитие научного потенциала высшей школы".

Личный вклад автора. Положения, выносимые на защиту, и полученные в них результаты, в основном содержатся в авторских монографии и статьях, опубликованных в журналах из списка ВАК. Кроме того, в монографиях и статьях, написанных в соавторстве, в тексте диссертации приводятся результаты, полученные автором лично. В публикациях, выполненных в соавторстве, автору принадлежат формулировка целей и задач, сбор необходимой натурной информации и выбор методов её обработки и анализа, физическая интерпретация и систематизация результатов анализа, а также подготовка публикаций. Автором разработаны модели, описывающие изменчивость уровня океана в синоптическом диапазоне частот, проведено оценивание параметров градиентно-вихревых волн и выявление закономерностей их изменчивости в СЗТО, разработаны модели стояче-поступательных градиентно-вихревых волн Тихого океана, модели переноса и трансформации океанографических и биотических характеристик градиентно-вихревыми волнами в океане, проведено исследование нелинейных механизмов переноса температурных свойств и пассивной примеси в СЗТО. Автор является руководителем текущего проекта РФФИ, а в течение многих лет являлась ответственным исполнителем 7 научных проектов РФФИ, двух проектов ФЦП «Кадры» и большинства научно-исследовательских проектов, выполнявшихся в лаборатории региональной океанологии СПбГУ.

Публикации. Представленные в работе результаты и выводы в полном объеме опубликованы в ведущих отечественных и зарубежных рецензируемых научных изданиях. По теме диссертации опубликованы 6 монографий и 52 статьи, из которых 31 в журналах из списка ВАК, 4 публикации в списке WoS.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, 4-х глав, заключения, приложения и списка использованных источников из 434 наименований. В ней содержится 330 страниц, включая 16 таблиц и 85 рисунков.

Благодарности. Автор выражает глубокую признательность своему научному консультанту, д.г.н., профессору СПбГУ В.Р. Фуксу за ценные советы, терпение и неустанное внимание к работе; к.г.н., доценту СПбГУ Д.К. Старицыну за поддержку и стимулирование к выполнению исследований; братьям к.г.н. А.В. и к.г.н. В.В. Колдуновым, а также к.г.н. Р.И. Маю (СПбГУ) за помощь в работе с данными; д.г.н., профессору РГГМУ В.Н. Малинину за мотивацию и многостороннюю помощь; к.ф.-м.н. А.И. Гинзбург (ИО РАН) за полезные замечания при подготовке рукописи; к.ф.-м.н. С.А. Лебедеву (Геофизический центр РАН) за профессиональное обсуждение работы. Автор благодарит соавторов своих публикаций за плодотворное сотрудничество и помощь, а также д.г.н., профессора СПбГУ В.В. Дмитриева, д.ф.-м.н. Г.В. Шевченко (ИМГиГ ДВО РАН), д.г.н. Е.А. Захарчука (СПбГОИН им. Н.Н.Зубова), к.г.н. В.Б. Лобанова (ТОИ РАН), к.г.н. Г.А. Власову (ТОИ РАН), д.ф.-м.н. И.А. Репину (ИФА им. А.М. Обухова РАН), к.г.н. И.Л. Башмачникова (Институт океанографии, Лиссабон, Португалия), Ph.D. Д.Л. Волкова (University of Miami/ NOAA — Atlantic Oceanographic and Meteorological Laboratory) за внимание к работе и полезные замечания. Автор признателен друзьям и коллегам в российских и зарубежных научных центрах за плодотворное сотрудничество и моральную поддержку.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулированы цель и задачи исследований, отмечаются научная новизна и практическая значимость результатов, перечисляются основные положения, выносимые на защиту, их новизна и практическая значимость, обосновывается актуальность проблемы.

Первая глава посвящена описанию данных и обзору методов, используемых в диссертационной работе.

В параграфе 1.1 дано краткое описание метода спутниковой альтиметрии, представлено описание баз данных, используемых в работе. Вводятся основные понятия метода спутниковой альтиметрии. Даются определения абсолютной и относительной динамической топографии.

В параграфе 1.2 перечислены основные методы исследования, а также обсуждаются результаты спектрального и вейвлет-анализа колебаний уровня в реперных мареографных пунктах.

В параграфе 1.3 дан краткий обзор результатов вейвлет-анализа динамической топографии поверхности моря в отдельных пунктах акватории СЗТО. Выделены масштабы основных энергонесущих колебаний в изменчивости абсолютной и относительной динамической топографии в СЗТО. Проводится исследование эволюции компонент разного масштаба изменчивости уровня в отдельных пунктах СЗТО.

В параграфе 1.4 рассматриваются вопросы классификации и методы анализа пространственно-временной изменчивости уровня и течений. Показано, что вейвлет-анализ, являющийся обобщением спектрального анализа, наиболее приспособлен для изучения структуры неоднородных и нестационарных океанологических процессов, позволяющий, в частности, исследовать информацию об эволюции относительного вклада компонент разного масштаба во времени. Показано, что при помощи вейвлет-анализа можно зафиксировать наличие нелинейных потоков энергии и их перераспределение во времени по различным масштабам: от крупномасштабных движений к мелкомасштабным,

связанных с нелинейной генерацией турбулентности, обусловленной динамической неустойчивостью крупномасштабных движений, а также определить наличие явлений с «отрицательной вязкостью».

Во второй главе исследуются физические механизмы низкочастотной изменчивости уровня СЗТО.

В параграфе 2.1 низкочастотная изменчивость колебаний уровня океана интерпретируется как распространение градиентно-вихревых волн в океане. Рассмотрены основные виды градиентно-вихревых волн и анализируются исторические экспериментальные наблюдения этих волн в различных районах Мирового океана, включая СЗТО. Дисперсионные соотношения даны для основных видов градиентно-вихревых волн; для свободных баротропных волн Россби дисперсионные соотношения модифицированы с учетом доплеровского взаимодействия волн с течениями. Показано, что при развитии топографических волн на течении происходит не только доплеровское изменение частоты и фазовой скорости, но и существенная трансформация параметров волн за счет взаимодействия топографических волн с течением. Для района Курильской гряды здесь рассматривается такое взаимодействие шельфовых волн со средним течением Ойясио, природа которого, с одной стороны, обусловлена общей глобальной циркуляцией вод северо-западной части Тихого океана, а с другой — стоком охотоморских вод из проливов Фриза и Буссоль. По-видимому, именно свободные шельфовые волны ответственны за большую часть наблюдаемой низкочастотной изменчивости течения Ойясио. Указанные результаты изложены в публикациях автора [1-4, 7, 9, 14, 18, 30].

В параграфе 2.2 на основе спутниковой альтиметрической информации рассматриваются результаты выделения волн Россби в СЗТО и топографических волн, распространяющихся вдоль Курильского шельфа. По альтиметрическим измерениям уровня океана получены оценки эмпирических характеристик (длина, период и фазовая скорость) распространяющихся на запад волн Россби в СЗТО.

Массив данных был использован для построения зональных и меридиональных изоплет значений аномалий уровня океана для дальнейшего выявления особенностей пространственно-временной изменчивости волн Россби. Построено 6 зональных (вдоль 30, 35, 40, 45, 50 и 55° с.ш.) и 6 меридиональных (вдоль 145, 150, 155, 160, 165, 170° в.д.) изоплет уровня за период с 1992 по 2010 гг. На зональных изоплотах обращает на себя внимание выраженный волновой характер изменчивости, которая представлена последовательностью гребней и впадин. Перепады уровня океана в волнах составляют от 20 до 60 см, в то время как меридиональные временные разрезы выявляют в большинстве случаев лишь сезонный ход: летом – высокое стояние уровня, зимой – низкое. Доминируют, таким образом, стерические эффекты, волновые движения здесь не выделяются.

В дальнейшем из исходных данных был удален сезонный ход (вычитались среднемноголетние среднемесячные значения), волновая структура на зональных изоплотах стала более четкой (рис. 1), в то время как на меридиональных изоплотах картина существенно не изменилась. Для каждой из анализируемых зональных изоплет выделены гребни волн и получены соответствующие эмпирические характеристики – длина и период волн, представленные в таблице 1.

Для выделения топографических волн Россби в районе шельфа вдоль Курило-Камчатского желоба из исходного массива данных отобраны временные ряды в 46 точках, расположенных вдоль шельфа по прямой, параллельной Курильской гряде, между пунктами с координатами 42° с.ш. 143° в.д. и 52° с.ш. 158° в.д., и также построены изоплеты уровня океана по данным, из которых также предварительно удален сезонный ход. На изоплотах аномалий уровня океана в районе шельфа вдоль Курило-Камчатского желоба выделены топографические волны Россби, распространяющиеся вдоль шельфа в юго-западном направлении с фазовой скоростью 1,2 см/с. Характерными значениями частот являются $0,9 \cdot 10^{-6}$; $0,6 \cdot 10^{-6}$ и $0,4 \cdot 10^{-6}$ 1/с, соответствующие периодам 81, 122 и 162 суток. Длины волн находятся в интервале между 79 и 181 км. Указанные результаты изложены в публикациях автора [1-4, 7, 30].

Таблица 1.

Характеристики волн Россби по спутниковым зональным альтиметрическим
изоплетам уровня в СЗТО

30° с.ш.		35° с.ш.		40° с.ш.		45° с.ш.		50° с.ш.		55° с.ш.	
Длина волны <i>L</i> , км	Период <i>T</i> ,сут	Длина волны <i>L</i> , км	Период <i>T</i> ,сут	Длина волны <i>L</i> , км	Период <i>T</i> ,сут	Длина волны <i>L</i> , км	Период <i>T</i> ,сут	Длина волны <i>L</i> , км	Период <i>T</i> ,сут	Длина волны <i>L</i> , км	Период <i>T</i> ,сут
620	110	905	284	522	162	385	284	109	110	143	122
425	73	862	243	522	162	370	243	315	219	103	81
425	75	905	284	427	122	385	284	576	365	103	81
680	110	905	284	617	284	385	284	360	292	168	162
890	146	905	284	474	203	385	288	274	183	172	162
540	73	774	162	332	162	294	162	360	292	113	122
540	77	949	284	617	162	389	284	159	110	103	81
480	73	949	284	522	243	395	284	245	219	103	84
720	115	774	243	522	162	364	243	576	365	168	166
720	110	862	243	530	162	322	243	360	292	168	162

В параграфе 2.3 обсуждается кинематика стояче-поступательных волн в море и океане. Существует достаточно много фактов, свидетельствующих о том, что низкочастотные возмущения типа волн Россби или более общего типа градиентно-вихревых волн в морях и океанах имеют характер стояче-поступательных волн. Это противоречит сложившимся феноменологическим представлениям о низкочастотной волновой динамике, которые опираются на утверждения о чисто поступательном типе этих волновых движений. Однако многие исследования, основанные на анализе эмпирических данных, часто не укладываются в рамки описания поступательного характера градиентно-вихревых волн, в то время как описание их с позиции стояче-поступательных волн позволяет объяснить, например, скачкообразное изменение фазы при перемещении неоднородностей в поле уровня.

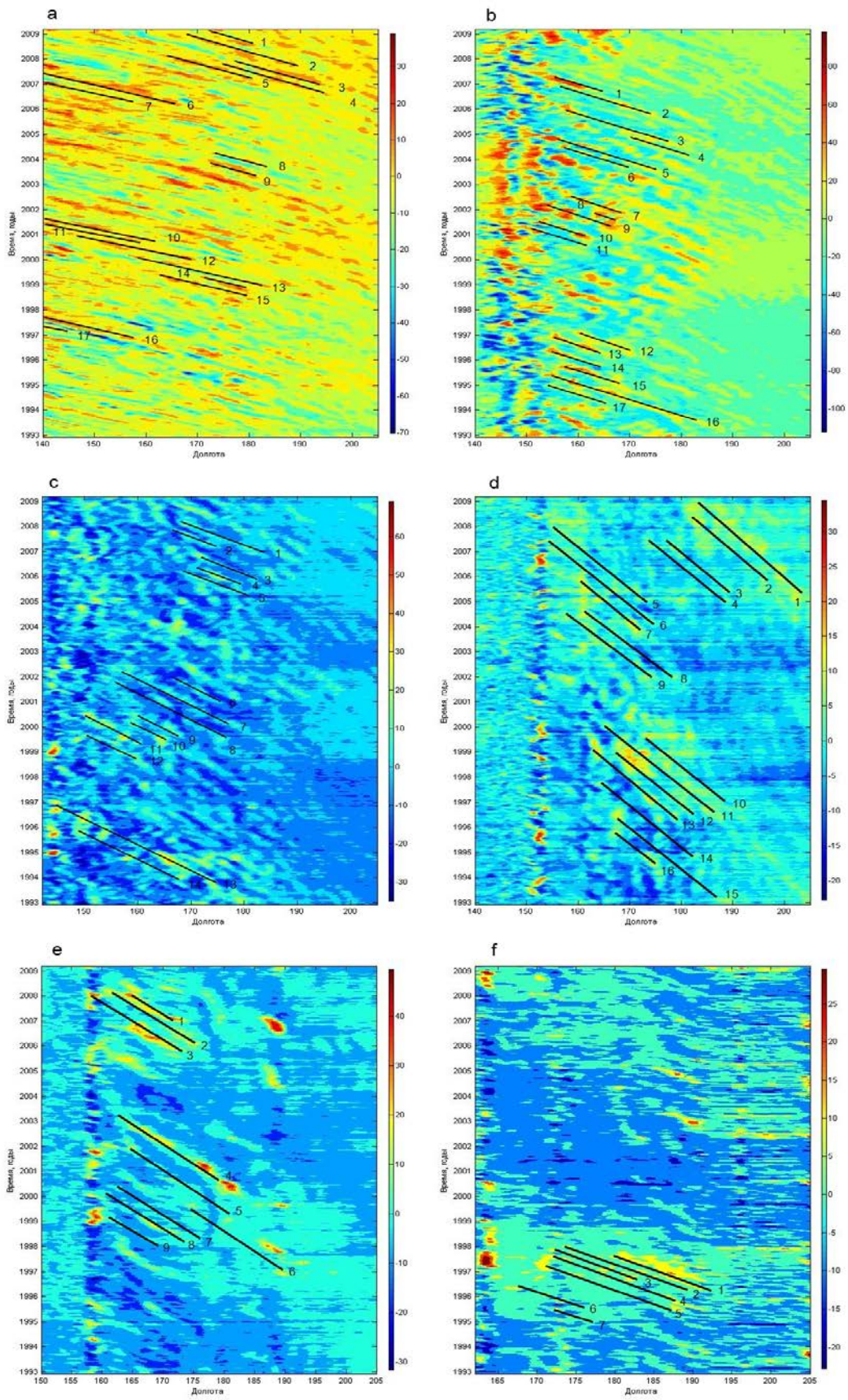


Рис. 1. Изоплеты уровня моря (см) на 30 (a), 35 (b), 40 (c), 45 (d), 50 (e) и 55° с.ш. (f) с выделенными перемещениями гребней волн.

В стояче-поступательной волне волновое поле представляет систему стационарных и нестационарных узловых линий стоячих колебаний, между которыми перемещается прогрессивная волна. Около этих узловых точек происходит скачкообразное изменение фазы колебаний уровня на противоположную, что позволяет интерпретировать эти волновые движения как стояче-поступательные волны. Свидетельством реальности такой волновой динамики могут быть часто наблюдаемые в поле волн узловые линии со скачкообразными изменениями начальных фаз, регистрируемые как в морях, так и в открытом океане.

Такой вывод можно также получить, в частности, из анализа изоплет колебаний уровня на зональных и меридиональных альтиметрических разрезах, где обнаруживается наличие узловых линий и точек, в которых наблюдается «стояние уровня» (возвышение уровня не отличается от нуля). Для СЗТО рассмотрены примеры зональных изоплет аномалий уровня с выделенными гребнями распространяющихся волн. В табл. 2 представлены средние эмпирические характеристики стояче-поступательных волн – длина, период, оценки расстояния между узлами и фазовая скорость распространяющихся между узлами волн. Средние длины волн достигают почти 900 км, периоды изменяются от 95 до 259 сут, а оценки расстояния между узлами стояче-поступательных волн изменяются в широком диапазоне масштабов от 250 до 1800 км. Фазовая скорость, рассчитанная по средним значениям, уменьшается к северу от 7.4 до 1.3 см/с, что соответствует теоретическим оценкам. Для волн различных длин и периодов фазовая скорость остается постоянной для каждой широты, следовательно, наблюдаемые на изоплотах волны Россби Северо-западной части Тихого океана не имеют дисперсии.

В некотором смысле подобные волновые движения получаются в гидродинамической теории волн Россби в замкнутых бассейнах, которая для баротропных волн Россби в замкнутом бассейне изложена в монографиях Дж. Педлоски (1984) и П. Ле Блона и Л. Майсека (1981) в приближении теории мелкой

воды. Общая теория низкочастотных в особенности, градиентно-вихревых волн в ограниченных бассейнах сравнительно небольшой протяженности еще недостаточно развита. Численные оценки собственных колебаний относятся, главным образом, к баротропным инерционно-гравитационным волнам и не затрагивают диапазон низкочастотных волн. Дж. Педлоски показывает, что моды колебаний в бассейнах произвольных геометрических форм имеют одну и ту же общую структуру – распространяющиеся на запад несущие волны, амплитудно-модулированные огибающей в виде стоячей волны. В диссертации указывается, что подобная модель стояче-поступательной волны может быть записана в виде: $\xi = A \cos(mx) \cos(ly) \cos(\sigma t - kx - ny)$. Здесь t – время, x и y – переменные прямоугольной системы координат, σ – частота, k и n – зональное и меридиональное волновые числа, m и l – параметры модуляции, являющиеся величинами, которые обратно пропорциональны пространственным размерам ячейки, A – амплитуда стояче-поступательной волны.

Таблица 2

Средние длины волн, периоды, оценки расстояния между узлами и фазовая скорость распространяющихся между узлами стояче-поступательных волн Россби в зависимости от широты

Широта, ° с.ш.	30	35	40	45	50	55
Средняя длина волны (км)	604	879	508	367	333	134
Средний период (сут)	95	259	182	259	245	121
Оценки расстояния между узлами (км)	450-2000	450-2200	250-1800	350-1800	200-800	200-800
Фазовая скорость между узлами (см/с)	7.4	3.9	3.2	1.6	1.5	1.3

Исходя из предположения, что в волнах данного типа сохраняется баланс сил, то есть уклоны уровня уравниваются отклоняющей силой вращения

Земли (геострофическое приближение), составляющие геострофической скорости течения U и V рассчитывались по следующим формулам:

$$\begin{cases} U = -\frac{g}{f} A \cos mx \cdot (-l \cdot \sin(l y) \cos(\sigma t - k x - n y) + n \cdot \cos(l y) \sin(\sigma t - k x - n y)), \\ V = \frac{g}{f} A \cos ly \cdot (-m \cdot \sin(mx) \cos(\sigma t - k x - n y) + k \cdot \cos(mx) \sin(\sigma t - k x - n y)) \end{cases}$$

Здесь g – ускорение свободного падения, f – параметр Кориолиса. Для понимания кинематики волн Россби рассмотрены несколько простых моделей: поступательная волна; зональная стояче-поступательная волна; зональная поступательная волна, гармонически модулированная по амплитуде в меридиональном направлении; стояче-поступательная волна. Модель стояче-поступательных волн Россби является наиболее подходящей, так как позволяет описать кинематику волн Россби в морях и океанах: движения в циркуляционных ячейках, реверсивные движения частиц в узловых линиях и отсутствие колебаний в узловых точках [33].

В параграфе 2.4 исследуется адвекция хлорофилла волнами Россби. Предлагается модель, опирающаяся на исследования последних лет, в которых показывается, что волны Россби обнаруживаются не только по альтиметрическим наблюдениям, но также и по спутниковым наблюдениям за температурой поверхности и наблюдениям за цветом океана – данными о концентрации хлорофилла-а (Killworth и др., 2004).

Математическая модель переноса, диффузии и биотической трансформации концентрации хлорофилла θ может быть записана в следующем виде:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + u \frac{\partial \theta}{\partial x} + v \frac{\partial \theta}{\partial y} = A \Delta \theta + a_1 \theta + a_2 \theta^2 .$$

Здесь x, y – декартовы координаты, t – время A – коэффициент горизонтальной турбулентной диффузии, u, v – соответственно проекции скоростей течения на координатные оси, a_1 – коэффициент роста биомассы, a_2 – коэффициент внутривидовой конкуренции. Предполагая, что поле течений и концентрации хлорофилла представляют собой суммы некоторого усредненного

невозмущенного состояния \bar{u} , \bar{v} , $\bar{\theta}$ и возмущений u' , v' , θ' относительно этого среднего состояния, можно получить:

$$\frac{\partial \theta'}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \theta'}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \theta'}{\partial y} + u' \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x} + v' \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial y} = 0.$$

В этом уравнении первое слагаемое – временная изменчивость возмущений хлорофилла, второе и третье слагаемые – перенос средним зональным и меридиональным течениями градиентов поля возмущений этой характеристики, четвертое и пятое слагаемые – перенос зональным и меридиональным флуктуационными течениями градиентов средних значений характеристики. Для распространяющихся на запад волн Россби на зональном потоке решение может быть записано в следующем виде:

$$\theta(t, x, y) = \begin{cases} -A(y) \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial y} e^{i(\sigma t - kx)} + \Phi(\bar{u} t - x), & \sigma - \bar{u} k \neq 0, \\ i(\sigma - \bar{u} k) \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial y} t e^{i(\sigma t - kx)} + \Phi(\bar{u} t - x), & \sigma - \bar{u} k = 0, \end{cases}$$

Для волн Россби, распространяющихся в западном направлении и проявляющихся в течениях, можно положить $\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} = 0$, то есть зональная составляющая скорости изменяется только в меридиональном направлении, а для меридиональной составляющей принять ту же волновую структуру:

$v' = A(y) \cdot e^{i(\sigma t - kx)}$, где $A(x, y, t)$ – амплитуда. Тогда с учетом уравнения неразрывности выражение для уровня океана имеет вид:

$$\xi(t, x, y) = -\int H(x, y) \frac{\partial A(y)}{\partial y} \cdot e^{i(\sigma t - kx)} dt = -\frac{H(x, y)}{i\sigma} \frac{\partial A(y)}{\partial y} \cdot e^{i(\sigma t - kx)}, \text{ где вещественная часть}$$

равна:

$$\text{Re } \xi(t, x, y) = -\frac{H(x, y)}{\sigma} \frac{\partial A(y)}{\partial y} \cdot \sin(\sigma t - kx).$$

Из последней формулы следует, что регистрируемое альтиметрами периодическое изменение уровня $\xi(t, x, y)$ происходит с теми же частотой и волновым числом, как и изменение меридиональной составляющей скорости

$v'(t, x, y)$. Следовательно, характеристики перемещающихся волн Россби, получаемые из анализа изоплет, являются и характеристиками меридиональной составляющей скорости течения и, соответственно, характеристиками волновых возмущений в поле хлорофилла, что объясняет во многом сходство зональных изоплет полей хлорофилла и аномалий уровня океана [26].

В параграфе 2.5 устанавливается связь низкочастотной изменчивости адвекции тепла и уровня в СЗТО. Уравнение распространения тепла в океане, проинтегрированное для верхнего квазиоднородного слоя, рассматривается в виде:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + u \frac{\partial \theta}{\partial x} + v \frac{\partial \theta}{\partial y} = A \Delta \theta + \frac{q}{h}.$$

Здесь θ – температура воды в верхнем квазиоднородном слое, u и v составляющие скорости течения на параллель и меридиан, A – коэффициент горизонтальной турбулентной теплопроводности; q – поток тепла через поверхность океана; h – толщина верхнего квазиоднородного слоя. Каждый член рассматриваемого уравнения вносит весомый вклад в уравнение распространения тепла в океане, и суммарный вклад определяет изменчивость $\frac{\partial \theta}{\partial t}$.

В низкочастотном диапазоне изменчивости температурных полей перенос тепла в океане при помощи волн Россби является доминирующим механизмом, а соответствующие слагаемые дают основной вклад в уравнении распространения тепла в океане, проинтегрированного для верхнего квазиоднородного слоя. На основе упрощенной математической модели показано, что характеристики распространяющихся на запад волн Россби являются также характеристиками меридиональной составляющей скорости течения и характеристиками волновых возмущений в поле температуры. Этот факт позволяет отождествлять оценки волновых возмущений в поле температуры с оценкой соответствующих волновых возмущений в поле скорости течения или возвышения уровня.

Рассматриваемая низкочастотная изменчивость уровня океана существенно нестационарна во времени. На основании сделанных математических выводов можно предполагать, что подобная нестационарность в низкочастотном диапазоне

изменчивости имеет место и для температурных процессов. Сравнение вейвлет-коэффициентов, характеризующих интенсивность колебаний уровня для пунктов, расположенных непосредственно в струе Курошио и вне ее, показало, что на течении колебания уровня интенсифицируются, а амплитуда вейвлет-коэффициентов многократно превышает таковые в пунктах, расположенных вне струи. Характеристики волн Россби, которые можно оценить на основе спутниковых альтиметрических наблюдений за уровнем океана, например, из анализа изоплет, в низкочастотном диапазоне изменчивости могут служить оценками временных масштабов для температурных полей. Сделанный вывод позволяет оценить масштабы низкочастотной изменчивости температуры в СЗТО. Методами Фурье и вейвлет-анализа проанализированы временные ряды уровня океана в различных пунктах акватории. Выделены квазидвух-трехлетние, квазишестилетние циклы, которые через адвективный механизм в волнах Россби характеризуют также и низкочастотную изменчивость температуры воды в акватории [31].

В проблеме синоптической изменчивости океанологических полей дискуссионным остается вопрос о различии и сравнительном энергетическом вкладе синоптических вихрей и волн Россби. Очевидным кажется основное существенное отличие синоптических вихрей от низкочастотных волн: вихри при своем движении переносят водную массу и течения в них близки к круговым; в волне же перемещается лишь форма, а частицы жидкости совершают движения по сильно вытянутым в меридиональном направлении эллипсоидным орбитам.

Для оценки кинематических характеристик вихревых и волновых движений с целью интерпретации экспериментальных данных *в параграфе 2.6* рассмотрены две модели вертикального смещения уровня в вихрях и волнах. Смещение уровня в волновой модели представим в виде зональной волны: $\xi = Ae^{-n|y|} \cos(kx - \sigma t)$, здесь A – амплитуда волны; k – волновое число; σ – частота волны; n – параметр затухания, выбранный так, чтобы на границе области захвата волны (ширина 200 км) составляющие скорости уменьшались в два раза. Частота рассчитывалась

нами по дисперсионному соотношению для зональных бездивергентных волн Россби: $\sigma = -\beta/k$.

Вертикальное смещение уровня в вихре представим в виде колоколообразной функции $\xi = Ae^{-a(x-x_0)^2 - b(y-y_0)^2}$ (A – амплитуда; a и b – параметры ”колокола”). Фазовая скорость зональной волны и скорость перемещения вихря задавались равными 2 см/с. Длина волны принималась равной 200 км.

Поля скоростей течения в вихре и волне существенно различны. В волне доминируют поперечные колебания. Векторы скоростей равномерно изменяют направление и величину, совершая полный цикл. При удалении от главной оси роза векторов скоростей пропорционально уменьшается. В вихре же образуется антициклонический круговорот со скоростью течения в центре, равной нулю, с максимальными скоростями на расстоянии 50 км от центра вихря и уменьшением скоростей далее к его периферии. Роза векторов скорости течений в вихре несимметрична. На главной оси зональные составляющие скорости вообще отсутствуют, а при удалении к периферии роза векторов скоростей вытягивается в зональном направлении. При этом изменение направлений скоростей ограничено 180° . На основе наблюдений за течениями, например с помощью автономных буйковых станций, по характеру пространственно-временной изменчивости можно с достаточной определенностью сделать заключение о доминировании вихревых или волновых движений [15].

Предложенные модели применялись для задачи о видоизменении температурного поля при прохождении синоптического вихря или распространяющейся на запад волны Россби. Показано, что при прохождении волны происходит деформация начального поля температуры: изотермы прогибаются к северу и югу в зонах наибольших меридиональных составляющих скорости течения, принимая меридиональное направление в зоне минимальных скоростей, где горизонтальные градиенты температуры достигают наибольших значений. В вихре же изотермы закручиваются, образуя диполь с ядрами

максимальной адвекции тепла в зоне максимальных скоростей течения. Вся система вращается и перемещается относительно начала координат при поступательном движении центра вихря. Эта информация может быть полезной при анализе последовательности ИК-снимков. Анализ пространственных и временных изменений динамических и термодинамических характеристик может дать в ряде случаев достаточно определенные ответы о природе – вихревой или волновой – наблюдаемых явлений. [2-4, 5, 15].

Третья глава дает представительное пространственное описание нестационарности и статистической неоднородности абсолютной и относительной динамической топографии поверхности океана с различными масштабами осреднения.

В параграфе 3.1 дается описание трендов уровня моря в реперных мареографных пунктах СЗТО, а также рассматриваются обобщенные тренды для северной части Тихого океана архива данных *JASL* [5, 6, 25].

В параграфе 3.2 рассматривается пространственное распределение коэффициентов линейных и квадратичных трендов, построенных по альтиметрическим данным. На рис. 2 в качестве примера приведено распределение коэффициентов линейного тренда. Показано, что в СЗТО в наблюдаемый промежуток времени преобладала тенденция роста уровня океана, причем наибольшая скорость роста тренда уровня отмечалась в западной части потока Курисио и в зоне действия Алеутского течения. Участки с отрицательными значениями старшего коэффициента линейного тренда расположены, главным образом, на северных перифериях этих потоков. Их формирование, вероятно, связано с наличием локальных зон дивергенции. Для СЗТО построены карты пространственного распределения параметров линейного и квадратичного трендов [6].

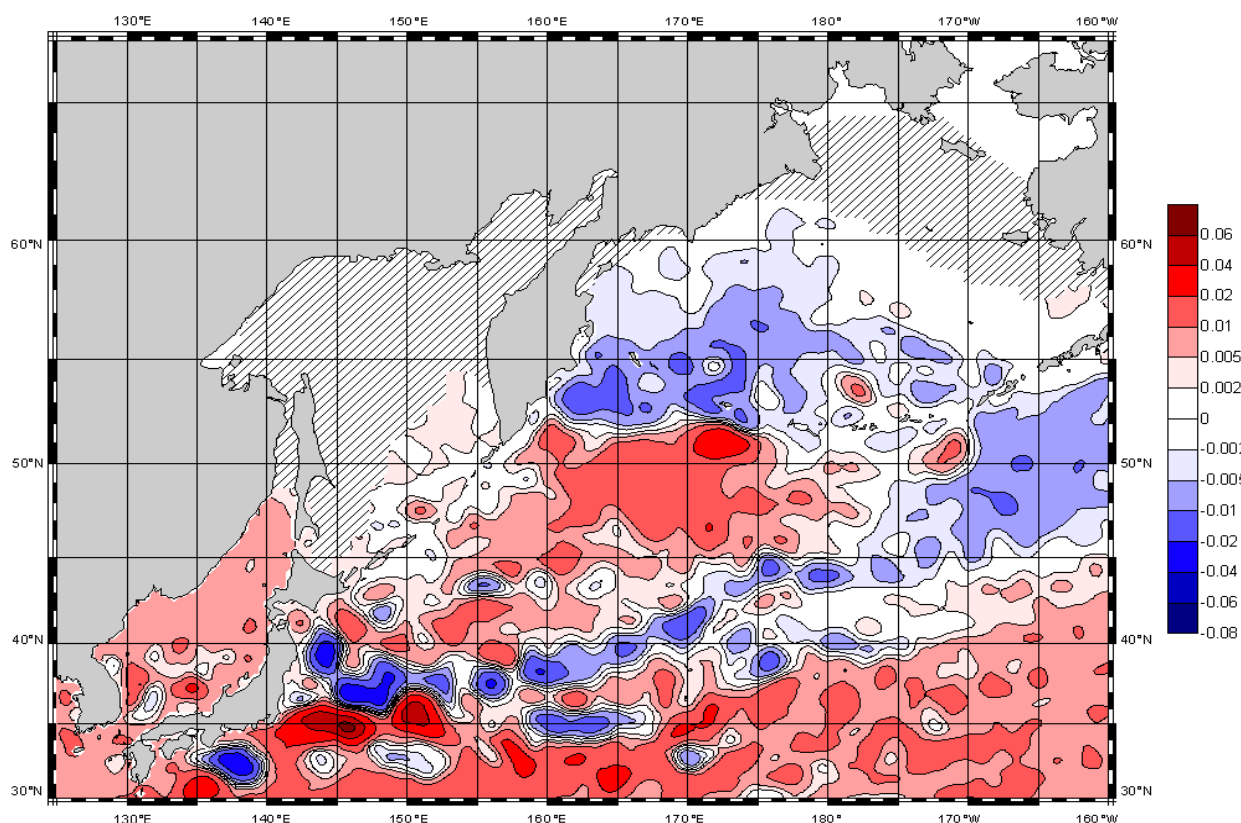


Рис. 2. Распределение оценки коэффициента b (см/нед.) линейного тренда уровня в СЗТО.

В параграфе 3.3 рассматривается повторяемость штормовых нагонов по данным *JASL*, показывается, что вопреки распространенному мнению при потеплении климата и росте среднего уровня в СЗТО повторяемость превышений уровня в целом не увеличивается [28].

В параграфе 3.4 даются оценки пространственного распределения полей статистических характеристик альтиметрических измерений уровня СЗТО: пространственные распределения математического ожидания, среднеквадратического отклонения, коэффициента вариации. Указанные распределения статистических характеристик рассматриваются для СЗТО с различными масштабами осреднения. Анализируются пространственные распределения средних значений этих характеристик, их межгодовая и сезонная изменчивость. Представительное статистическое описание, проведенное на основе спутниковой альтиметрической информации, доказывает существенную

нестационарность и статистическую неоднородность синоптической, сезонной и межгодовой изменчивости уровня в СЗТО.

В параграфе 3.5 анализируется изменчивость полей дивергенции полных потоков, рассчитанных по скорости изменения уровня $\frac{\partial \xi}{\partial t}$. Как и ранее, используются три масштаба осреднения: за период наблюдений 1992-2007 гг., среднегодовые значения и среднемесячное осреднение альтиметрических измерений уровня океана. Для интересующих нас масштабов времени, пренебрегая пресным балансом, из уравнения неразрывности массы, проинтегрированного от поверхности моря до дна $z = H(x, y)$, получим

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} = -\operatorname{div} \bar{V} H - \int_0^H \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} dz$$

где \bar{V} - средняя по вертикали скорость течения, H - глубина моря, $\bar{V}H$ имеет смысл полного потока. Первое слагаемое в правой части этого уравнения имеет смысл скорости за счет динамического изменения уровня, а второе слагаемое характеризует скорость стерического изменения уровня моря. В условиях, когда стерические эффекты малы,

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} = -\operatorname{div} \bar{V} H .$$

При положительном значении дивергенции: $\operatorname{div} \bar{V} H > 0$, уровень моря понижается $\frac{\partial \xi}{\partial t} < 0$ и формируется зона, в которой происходит опускание вод на глубину (даунвеллинг). При положительном значении дивергенции (конвергенции полных потоков): $\operatorname{div} \bar{V} H < 0$ уровень моря повышается и формируется зона, где происходит подъем к поверхности вод с глубины (апвеллинг). В тех областях, в которых дивергенция равна нулю, уровень не изменяется [6].

В параграфе 3.6 рассмотрена синоптическая изменчивость уровня и течений в СЗТО по данным спутниковых измерений. Применяются стандартные статистические методы исследования и методы вейвлет-анализа. Выделяются

основные энергонесущие максимумы в различных пунктах акватории. В каждой узловой точке квадрата от 30 до 50° с.ш. и от 140 до 160° в.д. были рассчитаны вектора скоростей течений. Для выявления закономерностей структуры и динамики течений использовался векторно-алгебраический метод анализа скоростей течений (Белышев и др., 1983). Рассчитан линейный инвариант тензора дисперсии течений, характеризующий общую интенсивность их изменчивости. Для сравнения рассмотрена синоптическая изменчивость скоростей течений, полученных в эксперименте «Мегаполигон». Показано, что изменчивость поля скоростей течений на акватории «Мегаполигона» обусловлена не столько фронтальными вихрями, сколько низкочастотными волнами типа волн Россби. Полученный вывод подтверждается и результатами спектрального анализа скоростей течений, полученных на буйковых станциях [1-5, 10, 16, 18].

Стерические колебания уровня также влияют на изменчивость сезонного хода уровня океана в СЗТО, определяют многие особенности в синоптическом и межгодовом диапазонах изменчивости и влияют на климатические тренды. В параграфе 3.7 дан обзор существующих методических подходов к оценке стерических колебаний уровня. Приводятся расчеты скорости изменения стерического изменения уровня для Курильского района Тихого океана на основе гидродинамических уравнений движения и уравнения неразрывности массы. В расчетах использовался массив GDEM данных о температуре и солености на стандартных горизонтах в узлах регулярной сетки, осредненных по месяцам. Для 24 пунктов северо-западной части Тихого океана получены значения колебаний стерического уровня и скоростей их изменения, найдены коэффициенты парной и взаимной корреляции с температурой поверхности моря и соответствующие сдвиги. Показано, что температура поверхности воды является хорошим предиктором для прогноза стерических колебаний уровня, в том числе для оперативного прогноза стерического уровня по ИК-съемкам с учетом запаздывания колебаний стерического уровня относительно изменений температуры поверхности воды [3-5, 20, 22].

В параграфе 3.8 рассмотрены механизм и интерпретация годовых и полугодовых колебаний уровня океана, которые вносят существенный вклад в сезонную изменчивость уровня СЗТО [17].

В четвертой главе рассмотрены геострофические течения, рассчитанные по абсолютной и относительной динамической топографии океана при различных масштабах осреднения исходных данных.

В параграфе 4.1 анализируются среднемноголетние течения, рассчитанные по абсолютной и относительной динамической топографии поверхности моря. Оценки геострофических течений могут быть получены из уравнений движения в предположении о балансе сил гидродинамического давления и силы Кориолиса в пренебрежении силами инерции, фрикционными и дрейфовыми составляющими. Исследуется изменчивость этих течений: рассчитаны полуоси эллипса дисперсии течений (величины полуосей) среднемноголетних течений и коэффициент вариации среднемноголетних течений. Для районов основных течений и океанских круговоротов длины полуосей эллипсов дисперсия значительно больше, чем для других областей. В районах, где отмечаются интенсивные квазистационарные вихри, направление течений и направление большой оси эллипса среднеквадратических отклонений совпадают, т.е. пространственная изменчивость эллипсов среднеквадратических отклонений сильно зависит от пространственной структуры квазистационарных вихрей.

В параграфе 4.2 дается представительное описание среднегодовых течений, рассчитанных по абсолютной и относительной динамической топографии СЗТО. Анализируется межгодовая изменчивость геострофических течений за период с 1992 по 2007 гг. Для каждого года рассчитаны эллипсы среднеквадратических отклонений течений и коэффициент вариации.

В параграфе 4.3 рассмотрен многолетний сезонный ход геострофической циркуляции – среднемесячные течения, рассчитанные по абсолютной и относительной динамической топографии поверхности моря. Отмечается

сезонная изменчивость потока Куроисио, который четко выделяется вблизи берегов Японии: здесь скорости течений достигают 95 см/с. Далее, отклоняясь вправо от берегов Японии, поток Куроисио в разные месяцы значительно различается как шириной струи, так и расположением меандров. В Продолжении Куроисио, достигающем в отдельные месяцы меридиана 180° в.д., интенсивность течения также изменяется, и по-разному образуются разветвления, вихри, а зоны высоких значений скоростей перемещаются с запада на восток или в обратном направлении. Северо-восточная ветвь Куроисио, отделяясь от основного потока в районе 37° с.ш., 144° в.д., также проявляется на всех картах, сохраняется и разветвление ее на два потока и затем последующее слияние в единый поток, как и на карте среднемноголетней абсолютной геострофической циркуляции. Ойясио, Северо-Курильское и Камчатское течения наиболее интенсивны зимой, скорости достигают 20-25 см/с. К марту интенсивность уменьшается, что отражается на картах уменьшением зон высоких скоростей течения. В мае скорости течения не превышают 15 см/с. Существенно изменяется в различные сезоны и Алеутское течение. Оно также наиболее интенсивно в зимний период, когда скорости течения достигают 30-40 см/с. В зимние месяцы интенсифицируются также течения Японского и Охотского морей, в частности, Цусимское и Приморское течения.

В заключении кратко обобщены основные результаты работы, в частности, следующие.

На примере СЗТО в работе обобщаются основные методы обработки и интерпретации спутниковой альтиметрической информации, которые позволяют на качественно новом уровне исследовать крупномасштабную низкочастотную изменчивость уровня океана и ее физические механизмы.

Доказанные закономерности крупномасштабной изменчивости уровня по данным спутниковых альтиметрических измерений свидетельствует о выраженной нестационарности и статистической неоднородности синоптической, сезонной и межгодовой изменчивости уровня в СЗТО. В диссертации дается

представительное описание пространственного распределения статистических характеристик изменчивости уровня СЗТО, которое генерализовано в виде карт математического ожидания, среднеквадратического отклонения, коэффициента вариации, полученных при различных масштабах осреднения, а также линейных и квадратичных трендов изменения уровня в СЗТО. Приводятся оценки сравнительного вклада в изменчивость уровня СЗТО межгодовых, сезонных и синоптических колебаний и проводится исследование эволюции компонент разного масштаба изменчивости уровня в отдельных пунктах СЗТО.

Показано, что при помощи вейвлет-анализа можно исследовать нелинейные потоки энергии и их перераспределение по различным масштабам.

В СЗТО дивергенция и конвергенция уровня достигают своих экстремальных значений в зоне основных геострофических течений данного региона, прежде всего в струе Куроисио и его рингах, а также Курильском течении, течении Ойясио и Алеутском течении. Области дивергенции (понижение уровня) в зоне Куроисио расположены преимущественно южнее 35° с.ш., в то время как области конвергенции (рост уровня) расположены большей частью на 35° параллели, либо севернее ее. Абсолютные значения экстремумов уменьшаются в восточном направлении в соответствии с тенденцией к ослаблению потока Куроисио и становятся практически незначимыми восточнее 175° з.д. Северо-восточная ветвь Куроисио выражена слабо. Выделяются обширные области повышенных значений дивергенции и конвергенции в районе Алеутского течения, причем области конвергенции примыкают к Алеутской гряде, а южнее расположены дивергенции. На участке Камчатского, Северо-Курильского течения и Ойясио расположены небольшие по площади области дивергенции потоков.

Показано, что изменчивость поля скоростей течений на акватории "Мегаполигона" обусловлена не столько фронтальными вихрями, сколько низкочастотными волновыми возмущениями.

На основе спутниковой альтиметрической информации для СЗТО получены эмпирические оценки параметров волн Россби. Средние длины волн находятся в

промежутке от 134 до 879 км, периоды изменяются от 95 до 259 сут, а фазовая скорость уменьшается к северу от 7.4 см/с (на 30° с.ш.) до 1.3 см/с (на 55° с.ш.).

Показано, что в океане доминируют не поступательные, а стояче-поступательные градиентно-вихревые волны типа волн Россби, дано описание кинематики баротропных стояче-поступательных волн Россби. Эти волны выделяются при анализе спутниковых альтиметрических карт в виде системы узловых линий, где уровень океана не меняется, а фаза колебаний уровня скачкообразно меняется на противоположную. Узловые линии образуют систему ячеек, поступательные волны типа волн Россби распространяются между узлами этих ячеек.

На основе упрощенной математической модели показано, что в низкочастотном диапазоне изменчивости характеристики распространяющихся на запад волн Россби являются также и характеристиками волновых возмущений в поле температуры. Выделены квазидвух-трехлетние, квазишестилетние и 10-летние циклы, которые характеризуют также и низкочастотную изменчивость температуры воды в СЗТО.

Установлено, что главной особенностью градиентно-вихревых волн в СЗТО является их стояче-поступательный характер, проявляющийся на спутниковых альтиметрических картах в виде устойчивой сетки узловых линий, поступательные волны типа волн Россби распространяются внутри этих ячеек.

Дано теоретическое обоснование адвективного механизма проявления волн Россби в полях хлорофилла. При анализе спутниковой информации в некоторых случаях это дает основание рассматривать пассивную примесь в качестве индикатора планетарных волн. Когда градиенты в среднем зональном поле течений значительно меньше, чем градиенты меридиональных возмущений, идет перенос пульсационным полем средних градиентов характеристик.

Список публикаций по теме диссертации

Монографии:

1. ***Белоненко Т.В.***, Фукс В.Р., Мичурин А.Н., А.А.Бобков, Д.К.Старицын,

Стучевский М.А., Рудаков Ю.А., Самко Е.В., Ребенкова О.А., Григоркина Р.Г. Истоки Ойясио. Под ред. В.Р.Фукса, А.Н.Мичурина. Санкт-Петербург. Изд-во «Полис». 1997. 247 с.

2. **Белоненко Т.В.**, Захарчук Е.А., Фукс В.Р. Градиентно-вихревые волны в океане. СПб.: Издательство С.-Петербургского ун-та, 2004. 215 с.

3. **Белоненко Т.В.** Северо-западная часть Тихого океана. Исследование изменчивости уровня океана в системе вод Куроисио - Ойясио на основе спутниковой альтиметрической информации. LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. 2010. 228 с.

4. **Belonenko T.V.**, Foux V.R., Zakharchuk E.A. "Gradient-vorticity waves in the World ocean". Монография. LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. 2010. 408 с.

5. **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.

6. **Белоненко Т.В.**, Колдунов А.В., Колдунов В.В., Май Р.И., Рубченя А.В., Старицын Д.К., Фукс В.Р. Атлас изменчивости уровня Северо-западной части Тихого океана. Санкт-Петербург. Издательство СММО-ПРЕСС. 2011. 304 с.

Статьи в журналах из списка ВАК:

7. **Белоненко Т.В.**, Фукс В.Р. Дисперсионные соотношения шельфовых и планетарных волн в океане// Вестник ЛГУ. Сер.7. Вып.3 (№ 21). 1987. С.107-110.

8. **Белоненко Т.В.** Шельфовые волны на постоянном течении// Вестник ЛГУ. Сер.7. Вып. 4 (№ 28). 1988. С. 101-104.

9. **Белоненко Т.В.** Передаточная функция анемобарического воздействия на низкочастотные волновые движения в океане // Вестник ЛГУ. Сер.7. Вып. 1 (№ 7). 1988. С. 98-101.

10. **Белоненко Т.В.** О возможности нерезонансного возбуждения в океане крупномасштабных волновых движений // Вестник ЛГУ. Сер.7. Вып.1 (№ 7). 1990.

С. 74-83.

11. **Белоненко Т.В.**, Старицын Д.К. Крупномасштабные волновые возмущения в поле температуры поверхности океана // Вестник ЛГУ. Сер.7. Вып.3 (№ 21). 1990 С. 93-97.
12. **Белоненко Т.В.**, Лавренов И.В., Шариков Ю.Д. Пространственная неоднородность поля ветрового волнения как индикатор скоростей течений в океане // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. Т.28. № 2. 1992. С. 185-195.
13. **Белоненко Т.В.** Пространственно-временные спектры в поле температуры поверхности океана // Вестник СПбГУ. Сер.7. Вып.2 (№14). 1996. С. 74-84.
14. **Белоненко Т.В.**, Фукс В.Р. Передаточная функция динамической системы атмосфера-океан в диапазоне градиентно-вихревых волн // Вестник СПбГУ. Сер.7. Вып.2 (№14). 1998. С. 97-101.
15. **Белоненко Т.В.**, Захарчук Е.А., Фукс В.Р. Волны или вихри? // Вестник СПбГУ. Сер.7. Вып.3 (№21). 1998. С. 37-44.
16. **Белоненко Т.В.**, Радченко А.А., Фукс В.Р. Опыт оценки низкочастотной изменчивости поля скорости течения северо-западной части Тихого океана по альтиметрическим данным // Вестник СПбГУ. Сер. 7. Вып. 2 (№ 15). 2001. С. 123-129.
17. **Белоненко Т.В.**, Фукс В.Р. Годовые и полугодовые возмущения уровня северо-западной части Тихого океана // Метеорология и гидрология. № 8. 2001. С. 69-77.
18. **Белоненко Т.В.** Градиентно-вихревые волны в северо-западной части Тихого океана // Вестник СПбГУ. Сер 7. Вып. 3 (№ 23). 2001. С. 93-98.
19. **Белоненко Т.В.**, Колдунов А.В. Взаимосвязь колебаний уровня и температуры воды в северо-западной части Тихого океана // Известия ТИНРО. Т. 140. 2005. С. 273-280.
20. **Белоненко Т.В.**, Колдунов А.В. Стерические колебания уровня в Курильском районе Тихого океана // Вестник СПбГУ. Сер. 7. Вып. 3. 2006. С. 81-88.

21. **Белоненко Т.В.**, Колдунов В.В. Межгодовая изменчивость альтиметрических измерений уровня океана на восточно-Сахалинском шельфе // Вестник СПбГУ. Сер. 7. Вып. 2. 2007. С. 128-135.
22. **Белоненко Т.В.**, Колдунов А.В. Стерические изменения уровня в Северо-западной части Тихого океана при различных климатических сценариях // Изв. РГО. Т. 141. № 1. 2009. С. 29-33.
23. **Белоненко Т.В.**, Колдунов А.В. Исследование спутниковой информации о первичной продукции в Азорском регионе при помощи вейвлет-анализа // Вестник СПбГУ. Сер. 7. Вып. 2. 2010. С. 109-116.
24. **Белоненко Т.В.**, Май Р.И., Старицын Д.К. Геострофические течения северо-западной части Тихого океана по альтиметрическим данным. Изв. РГО. 2010. Т.142. № 3. С. 26-36.
25. **Белоненко Т.В.**, Колдунов В.В. К оценке трендов и штормовых нагонов в колебаниях уровня северной части Тихого океана // Общество, среда, развитие. № 4 (17). 2010. С. 232-236.
26. **Белоненко Т.В.**, Колдунов А.В., Фукс В.Р. Адвекция хлорофилла волнами Россби // Вестн. С.-Петербург. Ун-та. Сер.7. Вып. 4. 2011. С. 106-109.
27. **Белоненко Т.В.**, Колдунов В.В., Фукс В.Р. О стояче-поступательных волнах Россби в море и океане // Вестн. С.-Петербург. Ун-та. Сер.7. Вып. 2. 2012. С. 91-103.
28. **Белоненко Т.В.**, Колдунов В.В. Об изменчивости уровня океана и повторяемости штормовых нагонов по данным мареографных постов северо-западной части Тихого океана // Метеорология и гидрология. № 4. 2012. С. 45-53.
29. **Белоненко Т.В.**, Блошкина Е.В. Температура поверхности Японского моря по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т.9. №1. 2012. С. 199-205.
30. **Белоненко Т.В.** Наблюдения волн Россби в северо-западной части Тихого океана // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т.9. № 3. 2012. С. 209-215.

31. **Белоненко Т.В.** Связь низкочастотной изменчивости адвекции тепла и уровня в Северо-западной части Тихого океана // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т.9. № 5. 2012. С. 260-269.
32. Denis L. Volkov, **Tatyana V. Belonenko**, Victor R. Foux. Puzzling over the dynamics of the Lofoten Basin - a sub-Arctic hot spot of ocean variability. GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS. Vol. 40, Issue 4, 2013. P. 738–743. doi:10.1002/grl.50126.
33. **Белоненко Т.В.**, Колдунов В.В., Фукс В.Р. Кинематика стояче-поступательных волн Россби в море и океане // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. Т. 6. № 1. 2013. С. 23-31.
34. Bashmachnikov I., **Belonenko T.V.**, Koldunov A.V. Intra-annual and interannual non-stationary cycles of chlorophyll concentration in the North-East Atlantic // Remote Sensing of Environment. Vol. 137. 2013. P. 55–68. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2013.05.025>.
35. Старицын Д.К., Фукс В.Р., **Белоненко Т.В.** Зависимость изменчивости физических и биотических процессов в океане от скорости вращения Земли // Вестн. С.-Петербург. Ун-та. Сер.7. Вып. 2. 2013.С. 128-133.
36. **Белоненко Т.В.**, Блошкина Е.В., Махотин М.С. Динамико-стохастическая модель температуры поверхности Японского моря по данным спутниковых измерений. Вестн. С.-Петербург. Ун-та. 2013. Сер.7. Вып. 3. С. 104-114.
37. **Белоненко Т.В.** Спутниковая альтиметрия Северо-западной части Тихого океана. Известия РГПУ им. А.И.Герцена. № 163. 2013. С. 120-128.

Прочие:

38. **Белоненко Т.В.**, Фукс В.Р. Нестационарные фронтальные зоны в океане, вызванные волновой адвекцией // В сб. «Физическая океанология и проблемы биологической продуктивности». 1992. С. 5-22.
39. **Belonenko T.V.**, Foux V.R. Experience of Estimation of Low-Frequency Variability Fields of Currents Velocity at the Northwest Part of the Pacific Ocean from Altimetric Data. PORSEC 2002 BALI Proceedings. 2002. P. 281-286.

40. **Белоненко Т.В.**, Фукс В.Р., Шилов И.О. Опыт применения вейвлет-анализа для исследования изменчивости океанологических процессов в Курильском районе // В сб. «Теория и практика эколого-географических исследований». Санкт-Петербург. Издательство «ТИН». 2005. С.150-164.
41. **Белоненко Т.В.**, Фукс В.Р., Шилов И.О. Вейвлет-анализ межгодовой изменчивости уровня // Доклады XII съезда РГО (Кронштадт). Санкт-Петербург. 2005. С. 91-96.
42. **Белоненко Т.В.**, Фукс В.Р., Шилов И.О. Опыт применения вейвлет-анализа для исследования изменчивости океанологических условий промысла (на примере уровня океана) // В сб. «Материалы XIII международной конференции по промысловой океанологии». Калининград, 2005. С.34-37.
43. **Белоненко Т.В.** Вейвлет-анализ индекса Тихоокеанской декадной осцилляции и температурных индексов Эль-Ниньо // Вопросы промысловой океанографии. Вып. 2. Москва. 2005. С. 189-205.
44. **Белоненко Т.В.**, Фукс В.Р. Проблемы использования спутниковой информации о концентрации хлорофилла для оценки биотических условий промысла нагульной рыбы // Вопросы промысловой океанографии. «Вопросы промысловой океанологии». Вып. 3. Москва. 2006. С. 241-263.
45. **Белоненко Т.В.** Нестационарность биотических циклов первичной продукции в Азорском регионе Атлантики. «Вопросы промысловой океанологии». Вып.5. № 2. 2008. С. 185-207.
46. Башмачников И.Л., **Белоненко Т.В.**, Колдунов А.В. Северо-Атлантическое колебание и его влияние на формирование биотических циклов в Азорском регионе // Вопросы промысловой океанологии. Вып. 6. № 2. Москва. 2009. С. 48-70.
47. **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. Под ред. В.Н. Храмушина. Южно-

Сахалинск. СахГУ. 2010. С. 105-119.

48. **Белоненко Т.В.**, Захарчук Е.А., Колдунов А.В., Смирнов К.Г., Старицын Д.К., Тихонова Н.А, Фукс В.Р. Опыт использования спутниковой информации для оценки и прогноза биологической и промысловой продуктивности различных районов Мирового океана // Вопросы промысловой океанологии. Вып. 7. № 1. Москва. 2010. С. 206-226.

49. **Белоненко Т.В.**, Колдунов В.В. Изменчивость уровня северной части Тихого океана // Вопросы промысловой океанологии. Вып. 7. № 2. Москва. 2010. С. 136-156.

50. **Белоненко Т.В.**, Фукс В.Р. Баротропные стояче-поступательные волны Россби // В сб. "Потоки и структуры в жидкостях: физика геосфер". Владивосток. Издательство ДВГУ. 2011. С. 255-259.

51. **Белоненко Т.В.**, Шевченко Г.В. Методика оценки характеристик штормовых нагонов в различных районах океана // Мореходство и морские науки. Избранные доклады Третьей Сахалинской региональной морской научно-технической конференции. Южно-Сахалинск. 2011. С. 142-155.

52. **Белоненко Т.В.**, Колдунов В.В., Май Р.И. Тренд в изменении уровня северо-западной части Тихого океана // Вопросы промысловой океанологии. Вып. 8. № 1. 2011. С. 204-223.

53. **Belonenko T.**, Foux V. What are they: eddies or waves? International Multidisciplinary Scientific GeoConference. SGEM 2012. Conference Proceedings. Volume II. P. 661-668.

54. **Belonenko T.**, Foux V. Kinematics of the standing-progressive waves of Rossby in the sea and ocean. // Proceedings Pan Ocean Remote Sensing Conference (PORSEC), Section «Satellite-based research on Oceanic Planetary Waves: Recent advances and open questions». Kochi, Kerala, India. 2012. P. 602-610.

55. **Belonenko T.V.**, Foux V.R., Koldunov V.V. Barotropic standing-progressive Rossby waves // Fluxes and structure in fluids. Physics of Geospheres. Selected Papers. 2012. P. 18-22.

56. **Белоненко Т.В.**, Колдунов В.В. Анализ пространственно-временной изменчивости годовых и полугодовых колебаний уровня северо-восточной части Атлантического океана по данным спутниковых альтиметрических измерений // В сб. «Материалы XI Всероссийской конференции по проблемам рыбопромыслового прогнозирования, посвященной 150-летию со дня рождения Н.М.Книповича». Мурманск: Издательство ПИНРО. 2012. С. 32-41.
57. Фукс В.Р., **Белоненко Т.В.** Адвекция в поле стояче-поступательных градиентно-вихревых волн. // Современные проблемы географии и геоэкологии. Санкт-Петербург. 2012. С. 338-346.
58. **Белоненко Т.В.**, Фукс В.Р. Опыт картирования характеристик уровня северо-западной части Тихого океана на основе спутниковой информации. // Мореходство и морские науки. Избранные доклады Четвертой Сахалинской региональной морской научно-технической конференции. Южно-Сахалинск. 2012. С. 166-181.

Список цитируемой литературы

- Белоненко Т.В., Захарчук Е.А., Колдунов А.В., Смирнов К.Г., Старицын Д.К., Тихонова Н.А., Фукс В.Р.* Опыт использования спутниковой информации для оценки и прогноза биологической и промысловой продуктивности различных районов Мирового океана // Вопросы промысловой океанологии. Вып. 7. № 1. Москва. 2010. С. 206-226.
- Бельшев А.П., Клеванцов Ю.П., Рожков В.А.* Вероятностный анализ морских течений. Л. 1983. Дальневосточные моря. Кн. 1. Океанологические исследования. Москва. Наука. Под ред. В.А. Акуличева. 2007. 660 с.
- Малинин В.Н.* Уровень океана: настоящее и будущее. Санкт-Петербург. Издательство РГГМУ. 2012. 260 с.
- Костяной А.Г., Лаврова О.Ю., Митягина М.И.* Дистанционное зондирование океанов и морей. Земля и Вселенная, 2011, N 5, С. 33-44.
- Лаврова О.Ю., Костяной А.Г., Лебедев С.А., Митягина М.И., Гинзбург А.И., Шеремет Н.А.* Комплексный спутниковый мониторинг морей России М.: ИКИ РАН, 2011. 480 с.
- Ле Блон П., Майсек Л.* Волны в океане. В 2-х томах. Пер.с англ. под ред В.А. Городцова, А.И.Леонтьева. М. Издательство «Мир». Т.1, 2. 1981. 853 с.
- Педлоски Дж.* Геофизическая гидродинамика. В 2-х томах. Москва. «Мир». 1984. с.811.

Старицын Д.К., Филатов В.Н., Фукс В.Р. Опыт использования спутниковой альтиметрической информации для оценки океанологических условий промысла сайры. // В сб. Рациональное природопользование и управление морскими биоресурсами. Владивосток. 2003.

Старицын Д.К., Филатов В.Н., Фукс В.Р. Основы использования спутниковой альтиметрической информации для оценки океанологических условий промысла сайры. Известия ТИНРО, 2004. Т. 137. С. 398-408.

Старицын Д.К., Фукс В.Р., Колдунов А.В. Дивергенции течений и формирования зон повышенной биологической продуктивности в Японском море // Вестн. С.-Петерб. ун-та. Сер. 7. Вып. 4. 2010. С. 58–73.

Старицын Д.К., Фукс В.Р. Опыт прогноза условий образования скоплений сайры в Южно-Курильском промысловом районе // Вопросы промысловой океанографии. Москва. Вып.4. №5. 2008. С. 170-187.

Church J.A., White N.J. Sea-Level Rise from the Late 19th to the Early 21st Century // *Surv. Geophys.* 2011. DOI 10.1007/s10712-011-9119-1.

Killworth, P. D., Cipollini, P., Uz, B. M., & Blundell, J. R. Physical and biological mechanisms for planetary waves observed in satellite-derived chlorophyll // *Journal of Geophysics Research.* 109. 2004. C07002.