

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ ФГУ «ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ОКЕАНОГРАФИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»

На правах рукописи

УДК 551.326.14: 551.465.71 (268.52)

Тихонова Наталья Александровна

**ДИНАМИКА ВОД И ПЕРЕНОС СУБСТАНЦИИ В БАЛТИЙСКОМ МОРЕ В  
СИНОПТИЧЕСКОМ ДИАПАЗОНЕ МАСШТАБОВ**

Специальность 25.00.28 – океанология

**АФТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата географических наук

Санкт-Петербург - 2011

Работа выполнена в Санкт-Петербургском отделении ФГУ «Государственный океанографический институт» (СПО ФГУ «ГОИН») Росгидромета

Научный руководитель:  
доктор географических наук,  
профессор

**Фукс Виктор Робертович**

Официальные оппоненты:

доктор географических наук,  
профессор

**Алексеев Генрих Васильевич**

кандидат географических наук,

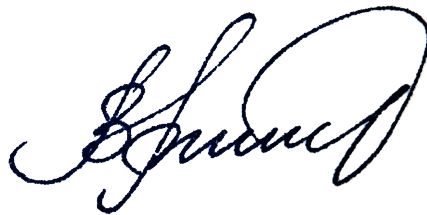
**Волков Владимир Александрович**

Ведущая организация: **Южный научный центр Российской академии наук  
(ЮНЦ РАН)**

Защита состоится «09» июня 2011 г. в *15 час. 30 мин.* На заседании диссертационного совета Д212.197.02 в Российском государственном гидрометеорологическом университете по адресу : 195196, Санкт-Петербург, Малоохтинский проспект, 98, актовый зал

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского государственного гидрометеорологического университета

Автореферат разослан «    » апреля 2011 г.



Ученый секретарь  
Диссертационного совета,  
Кандидат географических наук

**В.Н. Воробьев**



## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Под синоптической изменчивостью в океанологии принято понимать неоднородности в океанологических полях, имеющие характерные временные масштабы от нескольких суток до месяцев и пространственные - от десятков до тысяч километров (Монин А.С., Каменкович В.М.). В Балтийском море синоптические возмущения в полях океанологических характеристик остаются недостаточно изученными, хотя все полученные на сегодняшний день результаты показывают, что связанные с ними процессы вносят значительный вклад в динамику вод большинства регионов Балтийского моря. Несмотря на то, что исследованию этих процессов в Балтийском море уделялось определенное внимание, многие вопросы, связанные с изучением динамики вод и переноса субстанции в синоптическом диапазоне пространственно-временных масштабов остаются все еще открытыми. Недостаточно изучены колебания уровня синоптического масштаба. При исследовании течений синоптического масштаба в большинстве случаев отсутствует их волновая интерпретация. Не оценены пространственные масштабы возмущений синоптического масштаба. Не оценен сравнительный вклад ветровых течений, синоптических вихрей и низкочастотных волн в формирование океанологических полей Балтийского моря. Не проведено сравнение теоретических и эмпирических дисперсионных соотношений различных типов низкочастотных волн. Не исследованы механизмы генерации возмущений уровня моря и течений в диапазоне синоптической изменчивости.

В последнее время резко возрос и качественно изменился поток гидрометеорологической информации, что позволяет провести исследования океанологических процессов синоптического масштаба в Балтийском море на совершенно новом, более представительном уровне. Прежде всего, в последние годы стали доступны для широкого круга пользователей спутниковые альтиметрические данные об изменчивости уровня моря. Эти данные являются более подробными и в пространстве и во времени по сравнению с традиционной океанографической информацией (судовые съемки и разрезы, полигоны буйковых станций, береговые наблюдения за уровнем моря), что позволяет перейти от изучения изменчивости уровня Балтийского моря в отдельных, главным образом береговых пунктах, к исследованию ансамблей полей уровня. Кроме того, спутниковые альтиметрические измерения дают возможность рассчитывать по уклонам уровня моря поля течений. Все это открывает уникальные возможности для организации синоптического океанологического мониторинга.

Также качественно изменилась и метеорологическая информация. В настоящее время, в рамках международного проекта по реанализу метеорологических данных, на основе усвоения натуральных измерений в гидродинамических моделях для региона Балтийского моря стали доступны для широкого пользования более подробные поля ветра и атмосферного давления. Эти метеорологические данные позволяют более представительным образом провести численные эксперименты для исследования механизмов формирования и генерации возмущений синоптического масштаба в океанологических полях за счет атмосферных процессов.

В конце 90-х годов прошлого столетия из космоса стали производиться измерения концентрации хлорофилла «а» в океанах и морях. Хлорофилл – один из самых важных компонентов живой растительной клетки, участвующий в поглощении световой энергии и в синтезе органического вещества. Поэтому определение

содержания хлорофилла в клетках фитопланктона в качестве меры «потенциального фотосинтеза» может иметь большое значение при определении величины органической продукции в океанах и морях.

Хлорофилл «а» является пигментом первостепенного значения в фотосинтезе морских водорослей. Энергия света, поглощенная им, непосредственно используется в фотохимической реакции.

Методы определения хлорофилла в морской воде за последние годы претерпели многочисленные видоизменения и подверглись улучшению. Качественный прорыв в этом направлении произошел, когда задачу оценки хлорофилла в океанах и морях стали решать на основе спутниковых методов дистанционного зондирования, позволяющих, в отличие от эпизодических судовых измерений оценить пространственно-временную изменчивость полей концентрации хлорофилла «а» в синоптическом диапазоне масштабов.

Можно отметить, что ранее в исследованиях Балтийского моря основное внимание уделялось анализу сезонной и межгодовой изменчивости гидрохимических и гидробиологических параметров (Проект «Балтика», 1984; Проект «Моря», 1992), в то время как пространственно-временная изменчивость субстанции в синоптическом диапазоне масштабов оставались за рамками исследований. Это связано в первую очередь с тем, что, до недавнего времени наблюдения за температурой, соленостью, гидрохимическими и биотическими характеристиками проводились в основном только в рамках судовых экспедиций в отдельных регионах моря. Анализ современных данных спутникового мониторинга океана, позволяет значительно расширить наши знания о синоптической изменчивости гидродинамических и биотических полей.

В последнее время также стали доступны данные многолетних измерений температуры и солености воды на стационарных станциях в открытой части Балтийского моря и сетевых прибрежных станциях Росгидромета, позволяющие на более представительном уровне исследовать особенности синоптической изменчивости этих характеристик.

До недавнего времени гидродинамическое моделирование изменчивости полей океанологических характеристик в синоптическом диапазоне масштабов носило односторонний характер. Приоритет отдавался численному моделированию ветровых, термохалинных течений и стонно-нагонных колебаний уровня моря. За рамками численных экспериментов оставались: собственные низкочастотные колебания Балтийского моря, баротропная и бароклинная неустойчивость течений, и генерация синоптических вихрей; исследование динамики различных видов низкочастотных волн и механизмов их генерации. Поэтому в данной работе существенно расширен круг численных экспериментов по изучению возмущений синоптического масштаба в океанологических полях.

С решением поставленных проблем и связана актуальность работы.

**Цель и задачи работы.** Основная цель диссертационной работы – исследование пространственно-временной структуры и механизмов формирования полей океанологических характеристик Балтийского моря в синоптическом диапазоне масштабов. Для достижения цели решаются следующие задачи:

1. Формирование представительной базы данных контактных и спутниковых измерений Балтийского моря для изучения синоптической изменчивости океанологических характеристик.

2. Оценка пространственно-временной изменчивости статистических характеристик различных гидрологических процессов в синоптическом диапазоне масштабов.
3. Выделение низкочастотных волн в полях уровня и течений, и оценка их характеристик.
4. Оценка статистических связей синоптических колебаний уровня и течений с анемобарическими силами.
5. Идентификация полученных эмпирических характеристик низкочастотных волн путем их сравнения с теоретическими дисперсионными соотношениями различных видов градиентно-вихревых волн.
6. Оценка сравнительного вклада различных процессов и факторов в формирование динамических и термохалинных полей на основе численных экспериментов на гидродинамической модели.
7. Оценка сравнительного вклада адвекции, турбулентной диффузии и биотической трансформации в формирование полей хлорофилла «а».
8. Описание особенностей пространственно-временной изменчивости и механизмов формирования динамических, термохалинных и биотических полей в синоптическом диапазоне масштабов.

**Материалы и методы.** В работе были использованы срочные и ежечасные данные измерений уровня, температуры воды и солености, полученные на прибрежных гидрометеорологических станциях государственной сети Росгидромета, Балтийского моря. Данные многолетних наблюдений за течениями, на автономной буйковой станции в центральной Балтике. Данные вдольтрековых значений уровня и ансамбли полей, полученные на основе спутниковых альтиметрических измерений. Данные об изменчивости полей концентраций хлорофилла «а» в узлах регулярной сетки полученные с помощью спектрорадиометра SeaWiFS, установленного на спутнике Seastar. Данные реанализа метеорологических полей (ncер/ncар), доступные в сети интернет.

Для выполнения всех поставленных задач использовались следующие методы статистического анализа случайных процессов: дисперсионный анализ нестационарных скалярных и векторных случайных процессов; метод Фурье-анализа; гармонический анализ приливов по методу наименьших квадратов; корреляционный и взаимно-корреляционный анализы стационарных и нестационарных скалярных и векторных процессов; спектральный и взаимно-спектральный анализы стационарных и нестационарных скалярных процессов; векторно-алгебраический метод анализа случайных процессов; вейвлет-анализ; многомерный регрессионный анализ; идентификация волновых возмущений в полях уровня и течений проводилась путем сравнения их эмпирических характеристик с теоретическими дисперсионными соотношениями различных видов градиентно-вихревых волн и волн Кельвина; оценки сравнительных вкладов различных процессов и факторов в формирование динамических и термохалинных полей Балтийского моря проводились на основе численного гидродинамического моделирования.

**Научная новизна работы** состоит в следующем:

1. Впервые на основе дисперсионного анализа температуры воды, солености, уровня и течений, выполненного с учетом нестационарности процессов оценен сравнительный количественный вклад колебаний синоптического масштаба в суммарную дисперсию по сравнению с колебаниями других временных масштабов для различных регионов Балтийского моря.

2. Впервые показано, что в формирование Невских наводнений существенный вклад вносят колебания уровня синоптического масштаба.
3. На основе взаимно-корреляционного и взаимно-спектрального анализа случайных скалярных и векторных процессов впервые выявлена существенная нестационарность связи между течениями синоптического масштаба в центральной Балтике и различными метеорологическими характеристиками.
4. Впервые на основе численных экспериментов на гидродинамической модели Балтийского моря, выполненных при различных упрощающих сценариях, оценен сравнительный вклад различных процессов в формирование синоптических полей уровня, течений, температуры и солености воды Балтийского моря.
5. В работе впервые на основе экспериментальных данных и результатов численного гидродинамического моделирования оценены и описаны эмпирические характеристики низкочастотных волн в поле уровня и течений и проведено их сравнение с теоретическими дисперсионными соотношениями градиентно-вихревых волн в Балтийском море.
6. На основе разработанной динамико-стохастической модели пространственно-временной изменчивости полей концентрации хлорофилла «а» в Балтийском море оценен сравнительный вклад горизонтальной адвекции, турбулентной диффузии и биотических факторов в формирование полей хлорофилла

**На защиту выносятся:**

1. Закономерности пространственно-временной изменчивости полей динамических и термохалинных характеристик синоптического масштаба в Балтийском море, и оценка особенностей механизмов их формирования под действием анемобарических сил.
2. Волновая интерпретация синоптической изменчивости полей океанологических характеристик Балтийского моря, основанная на результатах статистического анализа и сравнении эмпирических и теоретических дисперсионных соотношений низкочастотных волн.
3. Оценки сравнительного вклада различных процессов в синоптическую изменчивость динамических и термохалинных полей, полученные с помощью численных экспериментов на гидродинамической модели.
4. Оценки сравнительного вклада адвекции, турбулентной диффузии и биотической трансформации в формирование полей хлорофилла «а» в Балтийском море на основе спутниковой информации.

**Практическая значимость работы.** Результаты работы вошли в материалы отчетов по темам Научно –исследовательских и опытно-конструкторских работ Росгидромета, таким как: Целевая научно-техническая программа «Научные исследования и разработки в области гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды», подпрограмма «Морские исследования в Арктике, на морях России, континентальном шельфе»; Федеральная целевая программа «Мировой Океан» (в рамках подпрограммы 2 «Создание единой системы информации об обстановке в Мировом Океане»); Федеральная целевая программа «Мировой Океан» (в рамках подпрограммы 1 «Исследование природы Мирового Океана»); Федеральная целевая программа "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009-2013 гг, и в международном проекте НАТО «Flood Risk Analysis for the Gulf of Finland and Saint Petersburg»;

Результаты работы можно использовать при прогнозировании Невских наводнений, при разработке гидродинамических и экологических моделей оценки и прогноза

изменчивости природной среды Балтийского моря, для развития системы мониторинга шельфовых морей России.

**Апробация работы.** Результаты работы докладывались и обсуждались на российских и международных конференциях и рабочих встречах: 7-я Международная конференция и выставка «Акватерра». Санкт-Петербург. 2004г; 7<sup>th</sup> HIROMB-Scientific Workshop. Helsinki. 2004; VI международный экологический форум «День Балтийского моря». Санкт-Петербург. 2005г; VII международный экологический форум «День Балтийского моря». Санкт-Петербург. 2006г; International Workshop “Extreme water levels in the Eastern Baltic”. St.Petersburg, Russia, 2007; А также на итоговых сессиях Ученого совета СПО ГУ «ГОИН». Результаты работы вошли в отчеты по проектам РФФИ и обсуждались на семинарах СПбГУ.

**Публикации.** Научные результаты работы опубликованы в : 3 монографиях, в 7 периодических изданиях, в том числе в 3 изданиях по перечню ВАК, а также материалах российских и международных конференций.

**Структура работы.** Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения и списка использованной литературы. Текст изложен на 212 страницах и включает в себя 10 таблиц, 118 рисунков. Список литературы содержит 72 наименования, из которых 17 – на иностранных языках.

#### **Содержание работы**

**Во введении** обосновывается актуальность темы, формулируется цель и задачи исследования.

**Первая глава** посвящена обзору сложившихся представлений о динамике вод и переносе субстанции в Балтийском море.

Прямые наблюдения океанологических характеристик Балтийского моря показывают, что в диапазоне синоптической изменчивости помимо колебаний с периодами от 3 до 7 суток, которые большинство исследователей связывает с локальным воздействием анемобарических сил на воды моря, отчетливо выделяются выраженные и довольно интенсивные возмущения с периодами от 10 до 90 суток, которые до настоящего времени практически не изучались.

Эмпирические спектры колебаний уровня моря указывают на наличие в области низких частот энергонесущих максимумов на периодах 10 - 50 суток, которые не могут быть объяснены только локальными анемобарическими эффектами.

В спектрах колебаний течений, рассчитанных на основе длительных измерений на плавмаяхках, работавших в разных точках моря, отмечаются пики спектральной плотности на периодах 20 и 30 суток. В Датских проливах выделяются интенсивные колебания с периодичностью от недель до нескольких месяцев, скорости среднесуточных течений в которых варьируют от 50 до 120 см/с. Причем, столь сильные возмущения поверхностных течений в проливах отмечались и в летний период при отсутствии ветра, или очень слабом ветре. Природу этих колебаний авторы пытались связать с уклонами уровня, которые образуются за счет водообмена в системе Северного и Балтийского морей.

На графиках многолетних измерений солености на стационарной станции Darss Sill в юго-западной части Балтийского моря кроме сравнительно короткопериодных затоков соленых североморских вод продолжительностью несколько суток выделяются их внедрения с цикличностью около 20 – 60 суток, которые в отдельные годы доминируют, однако, процессы, определяющие эти затоки, не идентифицированы.



Приведенные результаты свидетельствуют, что процессы синоптического масштаба с периодами от недель до месяцев вносят существенный вклад в гидродинамику вод Балтийского моря и в перераспределение тепла, солей и изменчивость гидрохимических и гидробиологических характеристик его вод. Однако в литературе отсутствуют целенаправленные попытки идентификации, изучения природы и механизмов генерации этих колебаний океанологических характеристик Балтийского моря.

По поводу механизма генерации возмущений синоптического масштаба в океанологических полях высказывались различные предположения, связанные с динамической неустойчивостью внутренних инерционных волн; динамической неустойчивостью меандров фронтальных зон и динамической неустойчивостью потоков, вызванных особенностями подводной топографии. При этом, по непонятным причинам не рассматривались механизмы возникновения мезомасштабных вихрей, связанные с градиентно-вихревыми волнами типа топографических волн, в частности, шельфовых волн, волн Россби и сдвиговых волн.

Во **второй главе** описываются особенности пространственно-временной изменчивости статистических характеристик динамических и термохалинных параметров.

В **разделе 2.1** проведен статистический анализ колебаний уровня в береговых пунктах Балтийского моря, который показал наличие выраженной межгодовой и сезонной модуляции синоптических колебаний, которые в отдельные периоды времени вносят доминирующий вклад в изменчивость уровня моря. Основные энергонесущие максимумы в спектрах колебаний уровня синоптического масштаба приходятся на периоды 16, 20, 31, 60 и 80 суток. Взаимно-спектральный анализ колебаний уровня в соседних пунктах выявил высокие оценки когерентности в синоптическом диапазоне частот.

**Раздел 2.2** посвящен оценке вклада синоптических колебаний уровня в формирование невских наводнений по сравнению с колебаниями других временных масштабов. Сравнение показало (рисунок 1), что наименьший вклад в формирование Невских наводнений оказывают долгопериодные и короткопериодные приливы. Превышения уровня над нулевым значением за счет приливов в сумме не превышают 13 см. Вклад многолетних и сезонных колебаний может быть как положительный, так и отрицательный и достигать 40 см. Наибольший вклад в формирование уровня вносят колебания синоптического масштаба и мезомасштабные колебания. Максимальные превышения уровня у синоптических колебаний могут достигать 137 см, а мезомасштабных 144 см. Соотношение вкладов колебаний разных временных масштабов в различные наводненческие ситуации может сильно меняться. Вклады мезомасштабных колебаний в зависимости от наводненческой ситуации меняются от 15% до 73%, у синоптических колебаний от 10% до 69 %, у сезонных и многолетних от 0 до 26%. Суммарный вклад приливов не превышает 7%. В 36 % случаев наибольший вклад в формирование невский наводнений вносят колебания уровня синоптического масштаба.



Рисунок 1 – Колебания разных временных масштабов в п. Горный за период 1978-2004

В разделе 2.3 был проведен статистический анализ уровня в открытых районах моря по спутниковым альтиметрическим измерениям. На рисунке 2 показано изменение уровня вдоль подспутниковых треков, на которых оценивались пространственные масштабы колебаний уровня моря. Изменения уровня моря вдоль треков выявляют сочетание двух видов колебаний – коротких и длинных. Пространственные масштабы коротких колебаний изменяются приблизительно от 12 – 14 до 50 – 100 км и чаще всего эти колебания имеют величины 3 – 10 см. Однако в редких случаях величины этих колебаний достигают значений 20 – 25 см. Длинные возмущения уровня моря проявляются чаще всего в виде линейных и нелинейных трендов. Это говорит о том, что пространственные масштабы длинных колебаний близки или сравнимы с размерами самого Балтийского моря. Перепады уровня в трендах в большинстве случаев небольшие и достигают величин от нескольких до 10 см. Но в отдельных случаях они достигают 15 – 20 и даже 50 см.

Проведенный спектральный анализ вдольтрековых значений уровня моря, показал наличие пиков спектральной плотности на пространственных масштабах 39 - 84 км.

В разделе 2.4 был проведен векторно-алгебраический анализ скорости течений, измеренных на автономной буйковой станции в центральной части Балтийского моря. Он показал, что в синоптических колебаниях скорости течений выражена сезонная и межгодовая модуляция, а также двухмодовая структура течений с разностью между модами по направлению, близкой к 180 градусам, что свойственно волновому процессу. Наибольшая дисперсия синоптических течений наблюдается в основном в осенне-зимний период. Результаты нестационарного спектрального анализа показали, что наибольшие значения спектральной плотности синоптических колебаний течений отмечаются в осенне-зимние месяцы с основными энергонесущими максимумами на периодах 5, 10, 30 – 50 суток.

Раздел 2.5 посвящен статистическому анализу колебаний температуры и солености воды в различных районах Балтийского моря. Основной вклад в изменчивость температуры воды вносят сезонные колебания, размах которых достигает 25-30°C, колебания синоптического масштаба соизмеримы с сезонными и их величины составляют 8-12°C.

Проведенный сравнительный анализ вкладов колебаний солености разных временных масштабов в суммарную изменчивость показал (рисунок 3), что в восточной части Финского залива синоптические колебания солености по величине сравнимы с многолетними и сезонными и изменяются в пределах 1-1.5 ‰. В южной части Балтики колебания солености синоптического масштаба в поверхностных слоях сравнимы, а в отдельные периоды даже преобладают по величине над сезонными и, в среднем, их размах достигает 1‰. С увеличением глубины амплитуда синоптических и сезонных колебаний существенно возрастает, достигая 6-8 ‰.

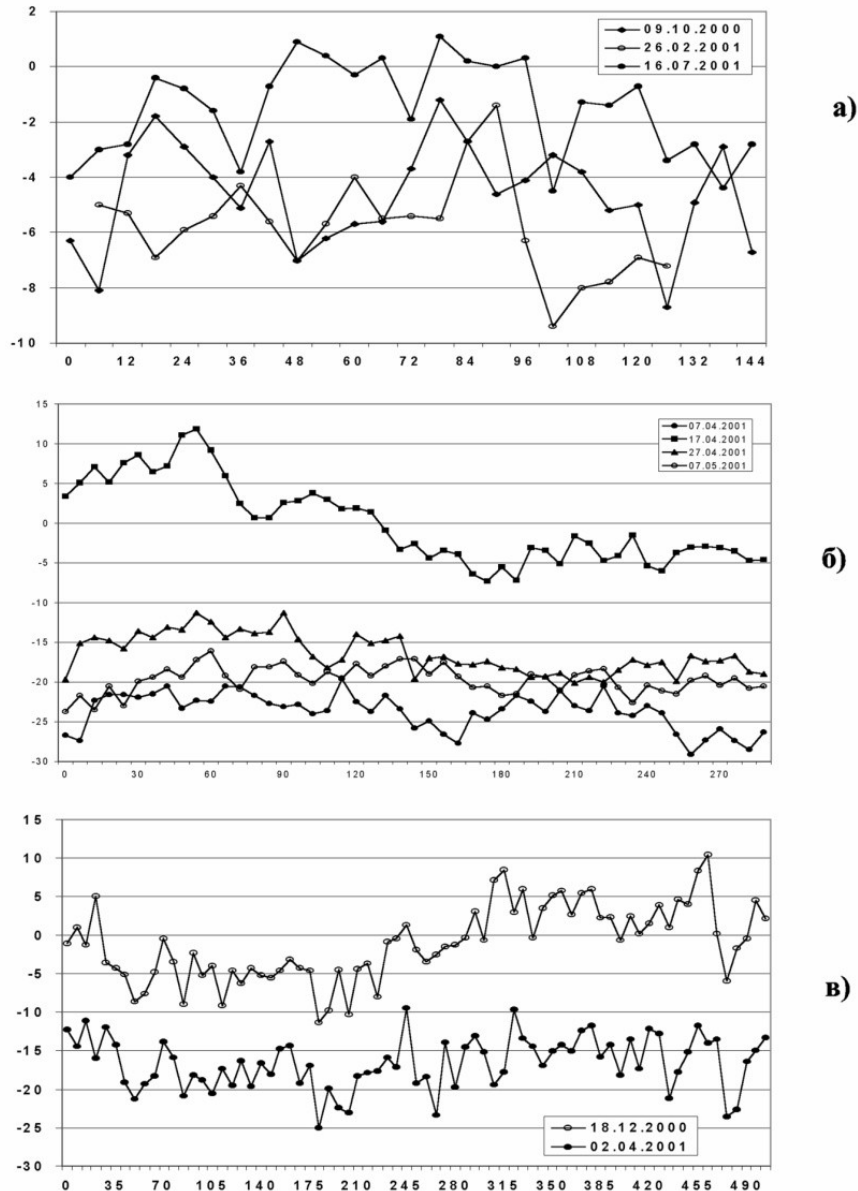


Рисунок 2 – Изменения во времени колебаний уровня на одном и том же Торех/Poseidon подспутниковом треке с последовательностью 10 суток (трек №I - а), (трек №II - б) и ERS-2 подспутниковом треке с последовательностью 35 суток (трек №IV - в).

В частотно-временных спектрах синоптических колебаний температуры воды в пунктах Выборг и Озерки отчетливо выражены энергонесущие максимумы на периодах 40 суток, а в спектрах колебаний солености – на периодах 12-20, 30, 45 и 90 суток.

В юго-западной части Балтики наибольшая интенсивность колебаний температуры воды в синоптическом диапазоне масштабов отмечается летом и осенью с пиками спектральной плотности на периодах 10-13 и 40 суток. А у синоптических колебаний солености здесь наибольшая дисперсия наблюдается в основном с апреля по октябрь на частотах, соответствующих периодам 13, 20 и 40 суток.



Рисунок 3 – Колебания разных временных масштабов для п. Выборг за период 1985-2007гг.

В главе 3 проводится волновая интерпретация синоптической изменчивости океанологических характеристик.

**Раздел 3.1** посвящен оценке характеристик низкочастотных волн в океанологических полях.

Результаты Фурье-анализа показали, что в ряде случаев в центральной и восточной части Польского побережья фаза синоптических колебаний уровня практически не изменяется в пространстве. Это свидетельствует о том, что колебания уровня моря на рассматриваемых периодах имеют преимущественно стоячий характер. Однако, в некоторых случаях, на отдельных участках побережья наблюдается заметное изменение фазы колебаний в пространстве, свидетельствующее о том, что синоптические колебания уровня Балтийского моря здесь распространяются в виде поступательных волн. По рассчитанной разности фаз и известным расстояниям между станциями, были оценены фазовые скорости и длины поступательных волн. Результаты таких расчетов показали, что низкочастотные волны распространяются как с западной, так и в восточной составляющей фазовой скорости. Оценки фазовой скорости волн в диапазоне периодов 4.5 – 55 суток изменяются от 0,3 м/с до 4,3 м/с, а длин волн – от 1120 до 2488 км.

Частотно-направленный спектральный анализ полей уровня, полученных на основе спутниковой альтиметрической информации выявил, эти волновые возмущения имеют пространственные масштабы приблизительно от 250 до 2940 км, временные – от 2 до 92 суток и распространяются в разных направлениях в виде прогрессивных волн со скоростями 7 – 640 см/с.

**Раздел 3.2** В предыдущих главах с помощью статистического анализа контактных измерений уровня в береговых пунктах и спутниковых альтиметрических измерений уровня были оценены различные характеристики низкочастотных волновых возмущений в Балтийском море. Эти оценки показали, что в синоптическом диапазоне пространственно-временных масштабов волны распространяются в разных направлениях со скоростями от 20 до 422 см/с и имеют длины от 20 до 2940 км. Для идентификации волн было проведено сравнение их эмпирических характеристик с теоретическими дисперсионными соотношениями различных типов низкочастотных волн.

Сравнение показало, что эмпирические оценки западнонаправленных волн, полученные на основе статистического анализа колебаний уровня в береговых пунктах Польского побережья и восточной части Финского залива, в диапазоне периодов от 13 до 70 суток, хорошо ложатся на теоретические дисперсионные кривые баротропных волн Россби. Однако теоретические дисперсионные кривые для баротропных топографических волн здесь лежат значительно ниже области эмпирических оценок.

Эмпирические характеристики низкочастотных волн, рассчитанные на основе вдольтрековых альтиметрических измерений уровня, лежат вне области, пересекаемой теоретическими дисперсионными кривыми баротропных топографических и волн Россби.

Теоретические дисперсионные кривые для баротропных топографических волн лежат значительно ниже области эмпирических оценок, рассчитанных на основе частотно-направленного спектрального анализа спутниковых альтиметрических полей

уровня Балтийского моря в то время как дисперсионные кривые баротропных волн Россби пересекают область экспериментальных значений. Причем, пространственные масштабы бассейна существенно влияют на положение теоретических дисперсионных кривых баротропных волн Россби.

Сравнение теоретических дисперсионных соотношений бароклинных топографических и волн Россби с эмпирическими характеристиками синоптических возмущений уровня контактных и спутниковых альтиметрических измерений показало, что эмпирические оценки низкочастотных волн, сделанные на основе статистического анализа колебаний уровня в береговых пунктах Польского побережья и восточной части Финского залива лежат значительно ниже теоретических оценок бароклинных волн Россби, а теоретические дисперсионные кривые для бароклинных топографических волн пересекают область эмпирических оценок.

Эмпирические характеристики низкочастотных волн, рассчитанные на основе вдольтрековых альтиметрических измерений уровня, лежат значительно ниже и правее области, пересекаемой теоретическими дисперсионными кривыми бароклинных волн Россби, а теоретические дисперсионные кривые топографических волн близки к области эмпирических оценок только для условий сравнительно низкого уровня стратификации.

Характеристики низкочастотных волн, полученные по результатам частотно-направленного спектрального анализа спутниковых альтиметрических полей уровня Балтийского моря, хорошо согласуются с теоретическими дисперсионными соотношениями бароклинных волн Россби только при больших значениях бароклинного радиуса деформации Россби и пространственных масштабах бассейна, а при слабой стратификации дисперсионные кривые бароклинных топографических волн пересекают область экспериментальных значений.

Таким образом, сравнение эмпирических и теоретических дисперсионных соотношений низкочастотных волн показывает, что волнообразные возмущения в полях уровня Балтийского моря с периодами от суток до месяцев идентифицируются как баротропные и бароклинные волны Россби и бароклинные топографические волны.

В главе 4 для исследования механизмов формирования динамических полей Балтийского моря синоптического масштаба проводится оценка статистических связей между метеорологическими характеристиками и колебаниями уровня и течений.

В разделе 4.1 результаты взаимно-корреляционного анализа колебаний уровня в восточной части Финского залива с различными метеорологическими характеристиками показали (таблица 1), что в синоптическом диапазоне масштабов наибольшие коэффициенты корреляции, достигающие 0.8, отмечаются между уровнем и тангенциальным напряжением ветра и горизонтальным градиентом давления, и связь при этом синхронна. Корреляция между дивергенцией и ротором ветра с синоптическими колебаниями уровня во всех случаях невысокая. Данный анализ показывает, что низкочастотные волновые возмущения уровня и течений синоптического масштаба, в основном, являются вынужденными градиентно-вихревыми волнами. Предполагается, что эти волны генерируются за счет резонанса между анемобарическими силами в перемещающихся циклонах и антициклонах и собственными колебаниями Балтийского моря, идентифицируемыми нами как свободные топографические волны.

Таблица 1 Результаты взаимно-корреляционного анализа синоптических колебаний уровня во время наводнений с различными метеорологическими характеристиками

<b>Синоптические колебания</b>				
<b>Дата наводнения</b>	<b>L x Grad(P)</b>	<b>L x <math>\tau(w)</math></b>	<b>L x div(w)</b>	<b>L x rot(w)</b>
<b>25.11.82</b>	0.75 (0)	0.65 (0)	-0.31 (0)	0.31 (42)
<b>17.12.82</b>	0.69 (0)	0.59 (0)	0.38 (32)	0.35 (42)
<b>03.11.83</b>	0.79 (0)	0.75 (0)	0.34 (0)	0.40 (0)
<b>01.01.84</b>	0.59 (0)	0.53 (0)	-0.45 (0)	0.47 (13)
<b>26.10.85</b>	0.78 (0)	0.76 (0)	0.39 (23)	0.31 (15)
<b>02.12.86</b>	0.71 (0)	0.67 (0)	0.58 (42)	-0.48 (0)
<b>22.02.90</b>	0.69 (0)	0.54 (0)	-0.29 (1)	0.46 (0)
<b>11.01.91</b>	0.65 (0)	0.57 (0)	0.53 (0)	0.55 (0)
<b>23.01.93</b>	0.58 (-57)	0.52 (-57)	0.51 (0)	0.39 (0)

**Раздел 4.2** посвящен взаимно-корреляционному и взаимно-спектральному анализу синоптических колебаний течений в центральной Балтике с различными метеорологическими характеристиками. Результаты взаимно-корреляционного анализа между синоптическими колебаниями течений и анемобарическими силами (рисунок 4) показали, что высокий уровень статистической связи между ротором, дивергенцией ветра и течениями происходят в весенне-летний период при запаздывании течений относительно метеорологических характеристик на 2, 4, 8-10 суток.

Связь между горизонтальным градиентом давления и течениями, а также между тангенциальным напряжением ветра и течениями в основном низкая (0.2-0.4) и только в отдельные периоды времени максимальные коэффициенты корреляции могут достигать значения 0.6-0.8.

Анализ срочных синоптических карт для периода высокой корреляции течений и анемобарических сил показал, что в эти периоды регион Балтийского моря находился в зоне повышенных градиентов атмосферного давления между стационарирующимися циклонами и антициклонами. Такие метеорологические условия должны благоприятно сказываться на генерации интенсивных бароградиентных и ветровых течений. Однако результаты дисперсионного анализа течений, проведенного с учетом нестационарности процесса, показывают что в эти периоды синоптические течения имели наименьшую дисперсию, что ставит под сомнение механизм генерации интенсивных течений синоптического масштаба за счет локального воздействия ветра и горизонтального градиента давления и не объясняет выявленные особенности временной изменчивости течений синоптического масштаба в центральной Балтике.

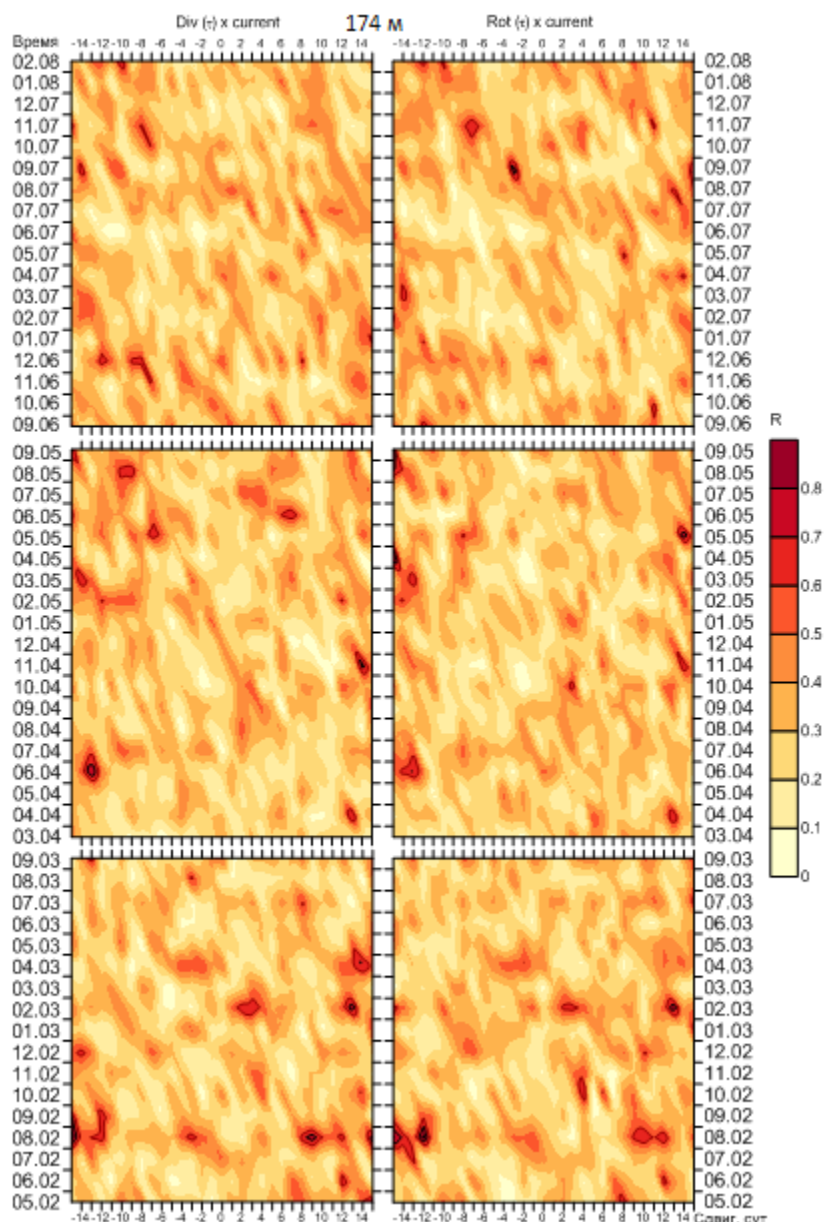


Рисунок 4 – Взаимно-корреляционный анализ между синоптическими колебаниями скорости течений и дивергенцией ветра (слева), ротором ветра (справа).

Проведенный взаимно-спектральный анализ между течениями и метеорологическими характеристиками выявил, что на отдельных периодах (3.5 , 4.6 и 7 суток) отмечается высокая когерентность между течениями и горизонтальным градиентом давления и тангенциальным напряжением ветра. Численные эксперименты на гидродинамической модели показали, что в данном районе именно на этих периодах отмечаются пики спектральной плотности в спектрах собственных колебаниях Балтийского моря. Проведенное сравнение характеристик собственных колебаний течений с теоретическими дисперсионными соотношениями различных видов низкочастотных волн, позволило их идентифицировать как свободные топографические волны. В связи с этим делается предположение, что в синоптическом диапазоне пространственно-временных масштабов наиболее интенсивные течения в открытой Балтике генерируются за счет резонанса между аномобарическими силами в перемещающихся циклонах и антициклонах и



собственными колебаниями Балтийского моря, идентифицируемыми как свободные топографические волны.

В главе 5 на основе численного гидродинамического моделирования проводится оценка сравнительных вкладов различных процессов и факторов в формирование динамических и термохалинных полей.

В разделе 5.1. дается описание трехмерной, бароклинной, гидродинамической модели Балтийского моря, разработанной в СПО ФГУ «ГОИН» О.А. Андреевым, А.В. Соколовым. Обосновывается постановка численных экспериментов.

Первый численный эксперимент был посвящен оценке вклада совместного эффекта сферичности и вращения Земли ( $\beta$  – эффект) на формирование океанологических полей в синоптическом масштабе. Для этого производилось сравнение полей уровня, течений и их вероятностных характеристик, полученных при решении полной задачи на  $\beta$  – плоскости (с учетом бароклинности, рельефа дна, реальных метеорологических условий) и  $f$  – плоскости (постоянное значение параметра Кориолиса).

Во второй серии численных экспериментов исследовался вклад вращения Земли на динамику вод и термохалинные процессы Балтийского моря в синоптическом диапазоне масштабов. Для этого, в начале, рассчитывались поля уровня и течений путем решения полной задачи на  $\beta$  – плоскости. Затем расчет полей уровня и течений производился при условии равенства нулю параметра Кориолиса ( $f = 0$ ).

Влияние донной топографии на формирование океанологических полей Балтийского моря в синоптическом диапазоне пространственно-временных масштабов оценивалось в третьем численном эксперименте. Производилось сравнение полей уровня, течений, температуры воды и солёности и их вероятностных характеристик, полученных при решении полной задачи с подобными оценками, сделанными при условии постоянной глубины моря ( $H = const$ ).

В четвертом численном эксперименте путем сравнения результатов статистического анализа баротропной и бароклинной задач оценивалось влияние стратификации на динамику вод Балтийского моря.

**Раздел 5.2.** Результаты экспериментов на гидродинамической модели показали, что в среднем  $\beta$ -эффект вносит незначительное влияние (1-6%) на динамику вод Балтийского моря и его термохалинные характеристики, однако на отдельных временных периодах, в определенных районах моря влияние этого эффекта может достигать значительных величин. В этих случаях за счет  $\beta$ -эффекта формируются импульсные возмущения в поле течений, идентифицируемые нами, как солитоны Россби или быстро затухающая мода бароклинных поступательно-стоячих волн Россби, свойственная замкнутым бассейнам.

**Раздел 5.3.** Влияние вращения Земли не вносит существенных качественных изменений в картину пространственной изменчивости дисперсии уровня моря и течений, однако, при этом, количественные изменения оценок их дисперсии – значительны, и составляют в основном 10-90%, в отдельных регионах моря они меняются в 3 – 4 раза. Для термохалинных процессов эти изменения составляют 10-30%.

**Раздел 5.4** Наличие рельефа дна приводит к диссипации энергии синоптических колебаний течений и уровня в результате чего их дисперсия уменьшается в 1.5-2 раза в большинстве районов моря за исключением северной части центральной Балтики и проливов Большой и Малый Бельт. Увеличение дисперсии в данных районах при наличии донной топографии свидетельствует о том, что здесь возможна генерация топографических волн и вихрей. Дисперсия термохалинных характеристик при



исключении рельефа дна в основном уменьшается на 20-50% в большинстве регионов моря.

**Раздел 5.5.** Исключение стратификации приводит к уменьшению дисперсии уровня до 90% во всех районах моря, кроме Датских проливов и незначительному увеличению дисперсии течений во всех районах Балтийского моря, в среднем не превышая 5-20%. Эти результаты свидетельствуют о генерации бароклинных мод низкочастотных волн и синоптических вихрей, которые влияют на увеличение дисперсии уровня.

**Глава 6** посвящена оценке сравнительного вклада адвекции, диффузии и биотической трансформации в формирование полей хлорофилла «а».

В **разделе 6.1.** предлагается теоретическое описание пространственно-временной изменчивости концентраций хлорофилла в виде уравнения переноса, диффузии и трансформации вещества (1).

$$\frac{\partial P}{\partial t} + w_q \frac{\partial P}{\partial z} + A \frac{\partial P}{\partial x} + a \frac{\partial P}{\partial y} - b P = \dots$$

(1)

Где,  $t$ -время,  $x, y, z$  – декартовы координаты, ось  $OZ$  направлена вертикально вниз,  $P$  – концентрация хлорофилла,  $w_q$  – скорость гравитационного осаждения,  $k$ - коэффициент вертикальной турбулентной диффузии,  $A$ - коэффициент горизонтальной турбулентной диффузии,  $a$  – коэффициент скорости продуцирования хлорофилла за счет фотосинтеза,  $b$  – коэффициент ограничивающий скорость роста концентраций хлорофилла за счет внутривидовой конкуренции.

**Раздел 6.2.** При интегрировании уравнения (1) до нижнего горизонта фотического слоя оно принимает следующий вид:

$$\frac{\partial P}{\partial t} + w_q \frac{\partial P}{\partial z} + A \frac{\partial P}{\partial x} + a \frac{\partial P}{\partial y} - b P = \dots$$

(2)

Для анализа пространственно-временной изменчивости концентраций хлорофилла «а» дифференциальное уравнение (2) с учетом локальных изменений во времени значений скорости течений было разрешено относительно скорости изменения хлорофилла и проинтерпретировано, как уравнения множественной регрессии (3):

$$\frac{\partial P}{\partial t} + w_q \frac{\partial P}{\partial z} + A \frac{\partial P}{\partial x} + a \frac{\partial P}{\partial y} - b P = \dots$$

(3)

Где,  $a_1$  – средняя скорость изменения концентрации хлорофилла,  $a_{2,3}$  – оценка зональной и меридиональной составляющей адвекции хлорофилла,  $a_4$  – коэффициент горизонтальной турбулентной диффузии,  $a_5$ - коэффициент скорости продуцирования хлорофилла за счет фотосинтеза,  $a_6$  – коэффициент, ограничивающий скорость роста концентрации хлорофилла за счет внутривидовой конкуренции,  $\varepsilon$  - случайный остаток,  $u, v$ – зональная и меридиональная составляющие течений рассчитанных по спутниковым, альтиметрическим уклонами уровня.

В **разделе 6.3** приводятся результаты динамико-стохастического анализа хлорофилла «а». Они показывают, что в среднем для моря, наибольший вклад в изменение концентрации хлорофилла оказывает биотический фактор  $a_6$ , ограничивающий скорость роста концентрации хлорофилла за счет внутривидовой конкуренции. На втором месте по значимости, в среднем для моря, выступает другой биотический фактор ( $a_5$ ), связанный со скоростью продуцирования хлорофилла за счет

фотосинтеза. Вклад абиотических факторов в среднем для Балтийского моря несколько меньше. Однако, в зависимости от района и года, вклады динамических и биотических факторов в формирование полей хлорофилла Балтийского моря меняются в широких пределах, и в отдельных районах моря наибольший вклад в формирование полей хлорофилла вносят абиотические процессы (адвекция и турбулентная диффузия).

Высокие значения коэффициентов множественной регрессии во многих районах моря свидетельствует об адекватности модели натурным процессам и о том, что предлагаемая динамико-стохастическая модель достоверно описывает пространственно-временную изменчивость концентраций хлорофилла и может быть реализована, как прогностическая.

В **заключении** сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы:

В представленной работе решена научная проблема, имеющая важное прикладное значение – исследованы недостаточно изученные колебания динамических, термохалинных и биотических характеристик в Балтийском море в синоптическом диапазоне масштабов. Впервые для этих целей была использована спутниковая альтиметрическая информация об изменчивости полей уровня и спутниковые данные SeaWiFS о изменчивости хлорофилла «а». Основные результаты исследования сводятся к следующему:

1. Синоптические колебания уровня вносят существенный, а в отдельные сезоны определяющий вклад в суммарную дисперсию уровня по сравнению с колебаниями других временных масштабов. Выявлено, что в 36% случаях в формирование Невских наводнений значительный вклад вносят колебания синоптического масштаба. В спектрах колебаний уровня синоптического масштаба основные энергонесущие максимумы приходятся на периоды от 13-20 до 60-80 суток. Пространственные масштабы возмущения уровня варьируют от 10-15 и 50-100 км до масштабов, сравнимых с размерами всего Балтийского моря.
2. В колебаниях течений синоптического масштаба наибольшая спектральная плотность приходится на периоды от 3.5 до 50 суток.
3. В изменчивости температуры и солености воды на сети прибрежных станций Росгидромета и на станциях в открытой части моря синоптические колебания в поле этих характеристик сравнимы с сезонными колебаниями, а в отдельных случаях преобладают (соленость) по величине над ними. Основные энергонесущие максимумы синоптических возмущений температуры и солености воды приходятся здесь на периоды 40, 20, 13 и 5 суток.
4. В изменчивости уровня и течений выявлена волновая природа синоптических колебаний. Оценки характеристик волн показали, что они распространяются в различных направлениях с характерными фазовыми скоростями от десятков до сотен см/с и длинами от десятков до тысяч километров.
5. Выделенные эмпирическим путем волны идентифицируются как баротропные и бароклинные топографические волны Россби, которые вносят значительный вклад в формирование неоднородностей синоптического масштаба в полях температуры и солености через процессы волновой адвекции и турбулентной диффузии.
6. Уровень статистической связи между волновыми возмущениями в поле течений синоптического масштаба и различными метеорологическими характеристиками значительно меняется во времени от очень низких значений до

значимых оценок когерентности на отдельных – энергонесущих частотах. Делается вывод, что в синоптическом диапазоне пространственно- временных масштабов наиболее интенсивные течения генерируются за счет резонанса между анемобарическими силами в перемещающихся циклонах и антициклонах и собственными колебаниями Балтийского моря, идентифицируемыми нами как свободные топографические волны.

7. Волны Невских наводнений не всегда идентифицируются как длинные гравитационные волны. В ряде случаев их характеристики хорошо согласуются с теоретическими дисперсионными соотношениями вынужденных бароклинных топографических волн.
8. На формирование полей уровня, течений, температуры воды и солёности в Балтийском море значительное влияние оказывают эффекты вращения и сферичности Земли, донной топографии и стратификации вод.
9. Наибольший вклад в изменение концентрации хлорофилла «а» в среднем для моря оказывает биотический фактор, ограничивающий скорость роста концентрации хлорофилла за счет внутривидовой конкуренции, на втором месте по значимости выступает другой биотический фактор, связанный со скоростью продуцирования хлорофилла за счет фотосинтеза. Вклад абиотических факторов в среднем для моря несколько меньше, однако в зависимости от района вклады динамических и биотических факторов в формирование полей хлорофилла меняются в широких пределах и в некоторых случаях наибольший вклад в формирование синоптических неоднородностей в поле хлорофилла вносят абиотические процессы, связанные с адвекцией и турбулентной диффузией.

#### **Список публикаций по теме диссертации**

##### ***Статьи в изданиях, входящих в перечень ВАК***

1. Захарчук Е. А., Тихонова Н. А., Фукс В. Р. Свободные низкочастотные волны в Балтийском море. Метеорология и гидрология. №11, 2004, с. 53-64.
2. Захарчук Е. А., Клеванцов Ю. П., Тихонова Н. А. Пространственно-временная структура и идентификация синоптических возмущений уровня Балтийского моря по данным спутниковых альтиметрических измерений. Метеорология и гидрология. №6, 2006.
3. Захарчук Е.А., Тихонова Н.А. Влияние адвекции количества движения на динамику вод Балтийского моря. Метеорология и гидрология. // Метеорология и гидрология. 2008. № 4. С. 60-69

##### ***Монографии***

4. Динамика вод Балтийского моря в синоптическом диапазоне пространственно-временных масштабов (авторы: А.К. Гусев, Е.А. Захарчук, Н.Е. Иванов, Ю.П. Клеванцов, В.А. Рожков, Н.А. Тихонова, В.Р. Фукс. Под редакцией Е.А. Захарчука. Санкт-Петербург. Гидрометеоиздат. 2007 г. 351 с.
5. Захарчук Е.А., Тихонова Н.А. Интенсивность колебаний уровня в береговых пунктах Баренцева и Балтийского морей в диапазонах различных временных масштабов. В книге «Комплексные исследования процессов, характеристик и ресурсов российских морей Северо-Европейского бассейна». Выпуск 1. Российская академия наук. Министерство образования и науки Российской Федерации. Апатиты. 2004 г, с. 325 – 335.
6. Гусев А.К., Захарчук Е.А., Клеванцов Ю.П., Смирнов К.Г., Тихонова Н.А. Крупномасштабная изменчивость полей океанографических характеристик Балтийского моря по данным спутниковых измерений. В монографии

«Комплексные исследования процессов, характеристик и ресурсов российских морей Северо-Европейского бассейна». Вып. 2, Апатиты, 2007.

***Статьи, не входящие в перечень ВАК***

7. Гусев А.К., Захарчук Е.А., Тихонова Н.А. Спутниковые альтиметрические исследования океана. Труды ГОИН, вып.209, СПб, Гидрометеиздат, 2005, С.316-369.
8. Гусев А.К., Давидан И.Н., Захарчук Е.А., Клеванцов Ю.П., Тихонова Н.А. Синоптическая изменчивость уровня и течений Балтийского моря по данным контактных океанографических и спутниковых альтиметрических измерений Труды ГОИНа №210., Москва, 2007.
9. Захарчук Е.А., Тихонова Н.А. Собственные низкочастотные колебания Балтийского моря. Труды ГОИНа №210., Москва, 2007.
10. Белоненко Т.Б., 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, ВНИРО. 2010. С.206-225

***Материалы конференций***

11. Захарчук Е.А., Гусев А.К., Май Р.И., Тихонова Н.А. О возможности оперативной оценки синоптической изменчивости океанологических полей Баренцева моря на основе спутниковых альтиметрических измерений. 7-я Международная конференция и выставка «Акватерра». . Сборник материалов по конференции. 15-17 июня 2004. Санкт-Петербург 2004. С. 164-170. г.
12. Е.А. Захарчук, А.К. Гусев, К.Г. Смирнов, Н.А. Тихонова, В.Р. Фукс. Сравнительный вклад динамических и биотических процессов в пространственно-временную изменчивость полей хлорофилла в Балтийском море. Сборник тезисов VIII Международного экологического форума «День Балтийского моря». СПб. ООО «Издательство «Диалог». 2007.
13. Н.А. Тихонова, Е.А. Захарчук. Оценка вкладов колебаний разных временных масштабов в формирование Невских наводнений //Тезисы научной конференции «175 лет Гидрометслужбе России – научные проблемы и пути их решения». Москва. 2009.
14. Е. А. Захарчук, Н. А. Тихонова, А. К. Гусев. Изменчивость океанологических характеристик в юго-восточной части Балтийского моря в период весеннего шторма 2007 г.//Сборник тезисов IX Международного экологического форума «День Балтийского моря». СПб. ООО «Издательство «Диалог». 2008