

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ ГЕОГРАФИИ И ГЕОЭКОЛОГИИ
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ГОСУДАРСТВЕННОГО ОКЕАНОГРАФИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

На правах рукописи

УДК 551.465

Кох Андрей Олегович

МНОГОМЕРНЫЙ СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ

Специальность 25.00.28 - «Океанология»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Санкт-Петербург-2004

Работа выполнена на кафедре океанологии факультета географии и геоэкологии Санкт-Петербургского государственного университета (СПбГУ) и в Санкт-Петербургском отделении Государственного океанографического института (СПО ГОИН)

Научный руководитель:

Рожков Валентин Алексеевич, доктор физико-математических наук, профессор, заслуженный деятель науки.

Официальные оппоненты:

Викторов Сергей Васильевич, доктор географических наук;

Терзиев Федор Семенович, кандидат географических наук.

Ведущая организация:

Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации - Мировой центр данных (ВНИИГМИ МЦД)

Защита состоится « 2 » декабря 2004 г.

в « 15 » часов на заседании специализированного совета К327.007.01 в Государственном океанографическом институте по адресу 119034, г. Москва, Кропоткинский пер., 6;
тел/факс 246-72-88, e-mail: adm@soi.msk.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Государственного океанографического института

Автореферат разослан « 1 » ноября 2004 г

Ученый секретарь
специализированного совета
кандидат географических наук

Н.В. Жохова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В подпрограмме «Создание единой системы информации об обстановке в Мировом океане» (ЕСИМО) Федеральной целевой программы «Мировой океан» запланирована подготовка с 1999 по 2007 гг. серии гидрометеорологических электронных режимно-справочных пособий (ЭРСП) нового поколения, включая подготовку справочника по режиму Балтийского моря.

Концепция создания такого справочника (Васильев, Воронцов, Рожков, 1996; Бухановский, Давидан, Иванов, Рожков, 2002) учитывает результаты исследований в 1985-1995 гг., выполненных по проекту «Моря СССР» под руководством Терзиева Ф.С. и по проекту «Балтика» под руководством Давидана И.Н. В соответствии с этой концепцией можно выделить работы в области информационного, математического и географического направлений. Данная работа выполнена в географическом направлении с учетом информационных технологий и математических методов, принятых в ЕСИМО. В проекте «Моря СССР» за информационную базу (ИБ) приняты массивы временных рядов, полученных на основе измерений на прибрежных и островных гидрометстанциях, а также сформированных из данных экспедиционных наблюдений на станциях ВУ (Baltic Year – международный Год Балтики) и попутных судовых наблюдений. В проекте «Балтика» за ИБ приняты как данные наблюдений, так и модельные расчеты по трехмерной гидродинамической модели.

Спецификой ЭРСП является использование не только накопленных натуральных данных, но и результатов модельных расчетов, во-первых, полей метеорологических характеристик, созданных по моделям реанализа с усвоением натуральных данных, во-вторых, полей океанологических характеристик, рассчитанных по метеорологическим полям, а также расширение арсенала методов их статистического анализа с учетом специфики гидрометеорологических процессов и полей.

Цель работы – дать статистическое описание характеристик гидрометеорологического режима Балтийского моря по натурным данным и модельным расчетам, пользуясь методами многомерного статистического анализа (МСА), и предложить способы представления обобщенной информации в электронном справочнике.

В названии работы подчеркивается специфика достижения поставленной цели – создание справочника ЭРСП, исходя из гидрометеорологической информации, представленной ансамблями полей, на основе многомерного статистического анализа синоптической изменчивости и межэлементной связности этих ансамблей.

Для достижения цели работы были поставлены следующие задачи:

- 1 Пользуясь результатами реанализа полей атмосферного давления, результатами расчетов по гидродинамической модели и данными натуральных наблюдений, создать информационную базу для подготовки разделов компьютерного справочника Балтийского моря по режиму атмосферного давления, режиму уровня и термohалинной структуре вод.

№ 13 р. хр.
Библиотека

2. Выбрать вероятностные характеристики для описания режима Балтийского моря, исходя из характерных особенностей гидрометеорологических полей и специфики исходных данных, и обосновать выбор методов их статистического оценивания.
3. Адаптировать имеющийся и создать пакет прикладных программ (ППП) для обработки используемых данных.
4. Выполнить МСА полей атмосферного давления, уровенной поверхности и вертикально-неоднородных полей гидролого-гидрохимических характеристик с целью их типизации.
5. Представить полученные результаты анализа в компактной и наглядной форме для помещения их в электронный справочник по режиму Балтийского моря.

Научная новизна:

- По двум многолетним массивам реанализа данных атмосферного давления [глобальному (США) и региональному (Швеция)] дано статистическое описание полей атмосферного давления в области северо-запада Европы (Скандинавский полуостров, Балтийское море).
- С помощью гидродинамического моделирования создан ансамбль полей уровня Балтийского моря в узлах регулярной сеточной области в *синоптические* сроки за 16 лет (1979-1994 гг.), выполнено систематическое описание режима уровня для всей акватории Балтийского моря в терминах статистических характеристик синоптической изменчивости и ее сезонной и межгодовой модуляции.
- На основе статистических взаимосвязей основных гидролого-гидрохимических параметров дана классификация вод Балтийского моря. Предложенная классификация (Т, S, ρ, O₂) отражает географические особенности районов моря и базируется на статистическом анализе связанного четырехпараметрического неоднородного по вертикали и по горизонтали и нестационарного по сезонам поля.
- Предложены разделы компьютерного гидрометеорологического справочника Балтийского моря по режиму атмосферного давления, режиму уровня и термохалинной структуре вод. Представленная информация в картографической и графической форме является качественно новой.

На защиту выносятся следующие положения работы:

1. Определены возможности применения методов многомерного статистического анализа (МСА) к гидрометеорологическим полям Балтийского моря с учетом их нестационарности и неоднородности.
2. Применение аппарата МСА позволило выявить закономерности изменчивости, пространственно-временной и межэлементной связности океанологических и метеорологических полей Балтийского моря.
3. Создан атлас вероятностных характеристик полей атмосферного давления, уровня и гидролого-гидрохимических элементов на основе применения МСА к результатам гидродинамического моделирования, спутниковой альтиметрической информации и данным натурных наблюдений.

Практическая значимость работы. В результате исследований оценена пространственно-временная изменчивость положения уровенной поверхности в открытых частях акватории Балтийского моря, дополняющая результаты прибрежных наблюдений. Эта информация необходима для осуществления хозяйственно-экономической деятельности на берегах Балтики, функционирования шельфовых сооружений и мореплавания. Предложенная классификация вод Балтийского моря на основе статистической взаимосвязи гидролого-гидрохимических характеристик будет учтена при организации и осуществлении экологического мониторинга моря в рамках подпрограммы ЕСИМО. Составлены разделы электронного справочника по атмосферному давлению, уровню, термохалинному режиму при выполнении проекта 4 подпрограммы ЕСИМО ФЦП «Мировой океан» для размещения его в сети Интернет.

Личный вклад автора. Автором рассчитан массив полей уровня Балтийского моря на основе реанализа метеопараметров для многолетнего интервала в узлах регулярной сетки в синоптические сроки. Создана ИБ в виде системы полей и временных рядов для подготовки разделов гидрометеорологического компьютерного справочника Балтийского моря по режиму уровня, атмосферного давления и термохалинной структуры вод. Автором разработан ППП для статистического анализа ансамбля гидрометеорологических полей с учетом специфики исходных данных. Проведен статистический анализ ансамбля океанологических и метеорологических полей Балтийского моря и предложена географическая интерпретация полученных результатов. Создан проект атласа вероятностных характеристик режима атмосферного давления, уровня и гидролого-гидрохимических элементов вод Балтийского моря, подготовленный на основе данных натурных (контактных и неконтактных) измерений и гидродинамического моделирования.

Апробация работы. Основные положения и отдельные результаты работы обсуждались: на конференции молодых ученых «Гидродинамические методы прогноза погоды и исследования климата» в Санкт-Петербурге в 2001 г.; на постоянно действующем семинаре «Методы анализа и расчетов океанографических процессов» при океанографической комиссии Русского географического общества в Санкт-Петербурге в 2001 г.; на международной конференции балтийских океанографов (Baltic Sea Science Congress) в Стокгольме, Швеция, в 2001 г.; на конференции по результатам исследований в области гидрометеорологии и мониторинга загрязнения природной среды в государствах – участниках СНГ, посвященной 10-летию образования Межгосударственного совета по гидрометеорологии, в Санкт-Петербурге в 2002 г.; на постоянно действующей сессии результатов работы молодых специалистов при СПО ГОИН в Санкт-Петербурге в 2003 г.; на международном семинаре по Океанографии среди аспирантов (Summer School for PhD students on Oceanography) в Виго, Испания, в 2003 г.; на 5-ой Российской научно-технической конференции «Современное состояние и проблемы навигации и океанографии» в Санкт-Петербурге в 2004 г.; на международном симпозиуме по

Балтийскому морю (USA-Baltic International Symposium) в Клайпеде, Литва, в 2004 г; на конференции «Challenger Conference for Marine Science MS2004» в Ливерпуле, Великобритания, в 2004 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 9 печатных работ., 8 из которых – в соавторстве.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и 3-х приложений. Объем диссертации составляет 140 страниц, включая 31 рисунок, 19 таблиц и 3 приложения. Список литературы составляет 85 наименований, в том числе 29 на иностранных языках. Приложения, которые представляют собой рекомендуемый автором вариант справочных материалов, включенных в электронный режимный справочник, содержат 32 рисунка.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обсуждаются проблема диссертации, актуальность ее темы, ставятся задачи работы. Дается краткий обзор выполненных работ по проблеме диссертации.

В **первой главе** обсуждается возможность использования информации, полученной методом реанализа, и аппарата МСА для характеристики режима атмосферного давления над исследуемой территорией. Дается статистическое описание пространственно-временной изменчивости поля атмосферного давления.

В справочнике по гидрометеорологическому режиму Балтийского моря (Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. III. Балтийское море., 1992 г.) в качестве исходных данных использовались результаты попутных судовых наблюдений и измерений давления на гидрометеорологических станциях и постах, представляющих собой разрозненные в пространстве точки, т.е. не было дано описания полей атмосферного давления. С развитием компьютерных технологий появилась возможность рассчитывать поля метеорологических характеристик с помощью глобальных моделей, учитывающих физические закономерности атмосферы и позволяющие проводить усвоение (реанализ) натуральных данных. В результате усилий в данном направлении американскими и шведскими учеными были созданы многолетние ансамбли полей метеорологических параметров в синоптические сроки в узлах регулярной сетки.

За основу статистического обобщения принята область шире, чем Балтийское море, с учетом специфики пространственного распределения атмосферного давления и размеров барических образований (циклонов, антициклонов). Массив полей реанализа, подготовленный в Шведском метеорологическом и гидрологическом институте (SMHI) относится к области северо-запада Европейского континента, ограниченной с запада и востока меридианами $7,5^\circ$ и $39,5^\circ$, а с юга и севера – параллелями $49,5^\circ$ и $71,5^\circ$, соответственно. Пространственное разрешение этой информации – $1^\circ \times 1^\circ$, временной шаг – 3 ч. Проект реализован для промежутка времени с 1979 г. по

наши дни, однако в работе использовались данные с 1979 по 1994 гг., доступ к которым свободен.

Массив полей американского реанализа (NCEP/NCAR), реализованный для всего северного полушария с 1948 г. по настоящее время, является общепризнанным, однако эта информация обладает меньшим пространственным и временным разрешением.

В работе было проведено сопоставление статистических характеристик поля давления обоих массивов. При сравнении полей средних месячных значений давления и оценок его среднеквадратического отклонения было выявлено, что при хорошей качественной и количественной согласованности характеристик полей (схожи как направление и абсолютное значение градиента, так и величины средних и отклонений давления в точках поля) образы пространственного распределения по шведским данным детальнее аналогичных, воссозданных по американским данным. Более того, характеристики межгодовой и внутригодовой изменчивости приземного атмосферного давления по данным реанализа вполне хорошо согласуются с соответствующими характеристиками, рассчитанными по данным натуральных измерений. Полученные результаты позволяют использовать информацию SMHI как оптимальную для статистического анализа режима давления региона Балтийского моря, а также для гидродинамических расчетов уровня поверхности Балтики.

В качестве вероятностных характеристик, описывающих закономерности пространственно-временной изменчивости полей атмосферного давления, в первую очередь были приняты оценки математического ожидания $m(p, t)$ и среднеквадратического отклонения $\sigma(p, t)$ в приближении периодически коррелированных случайных процессов (ПКСП) (Драган, Рожков, Яворский, 1987 г.). Из рисунка 1 видна пространственная неоднородность по градиентам полей этих характеристик и перестройка поля атмосферного давления при переходе от зимы к лету. В зимний период поле давления характеризуется повышенными градиентами ($\approx 1,13$ гПа/100 км), ориентированными, в общем, на север, что связано с углублением Исландского минимума в этот период. Летом в северной части области сколько-нибудь выраженных градиентов не наблюдается, что связано с ослаблением Исландского минимума, а в южной части градиент поля давления, обусловленный влиянием Азорского максимума, составляет примерно 0,6 гПа и имеет северо-восточное направление. Пространственное распределение оценок стандартных отклонений противоположно распределению средних оценок, т.е. градиенты имеют преобладающую южную составляющую, что объясняется повышенной изменчивостью в областях с пониженным давлением. СКО давления зимой в 2,5-3 раза больше, чем летом, что связано с общим повышением циклоничности в данном регионе в холодное время года. Учитывая пространственную неоднородность и изменчивость полей давления во времени, был проведен анализ собственных функций ковариационной матрицы давления $K(p, p, t, \tau)$

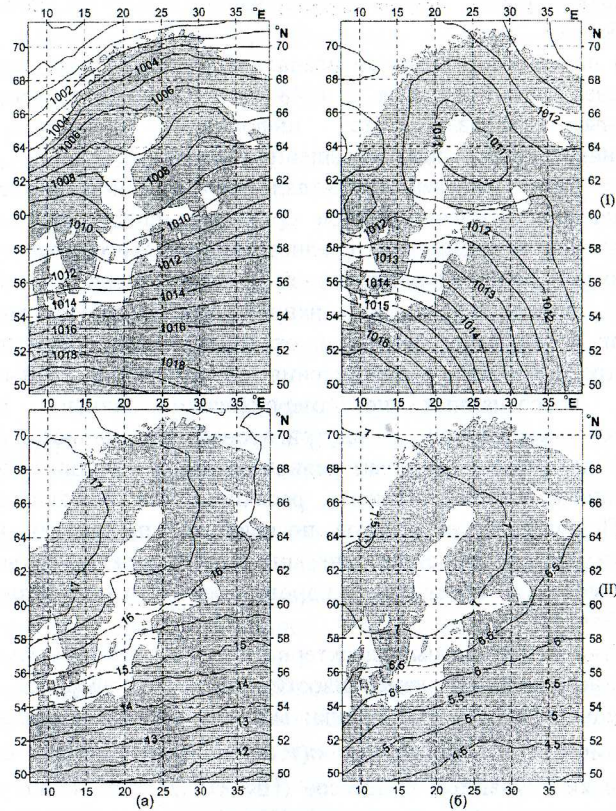


Рисунок 1 – Поля средних (I) и СКО (II) приземного атмосферного давления [гПа] для января (а) и июля (б)

или полей естественных ортогональных функций (ЕОФ). Карты ЕОФ, представленные на рисунке 2, характеризуют сложность корреляционной зависимости атмосферного давления от пространственных координат r и времени t . Они дополняют те закономерности, которые были выявлены при анализе полей $m(\bullet)$ и $\sigma(\bullet)$. Пространственное распределение первых трех ЕОФ объясняют в среднем 90% изменчивости поля атмосферного давления. На основе результатов ПКСП-анализа (с помощью как когерентного – по одноименным месяцам t временного ряда $m(t)$, $\sigma(t)$, так и компонентного методов – через коэффициенты a_k , b_k разложения $m(t)$, $\sigma(t)$ в ряд Фурье) показано, что годовая ритмика полей атмосферного давления выражается в их пространственном приспособлении к смене сезонов.

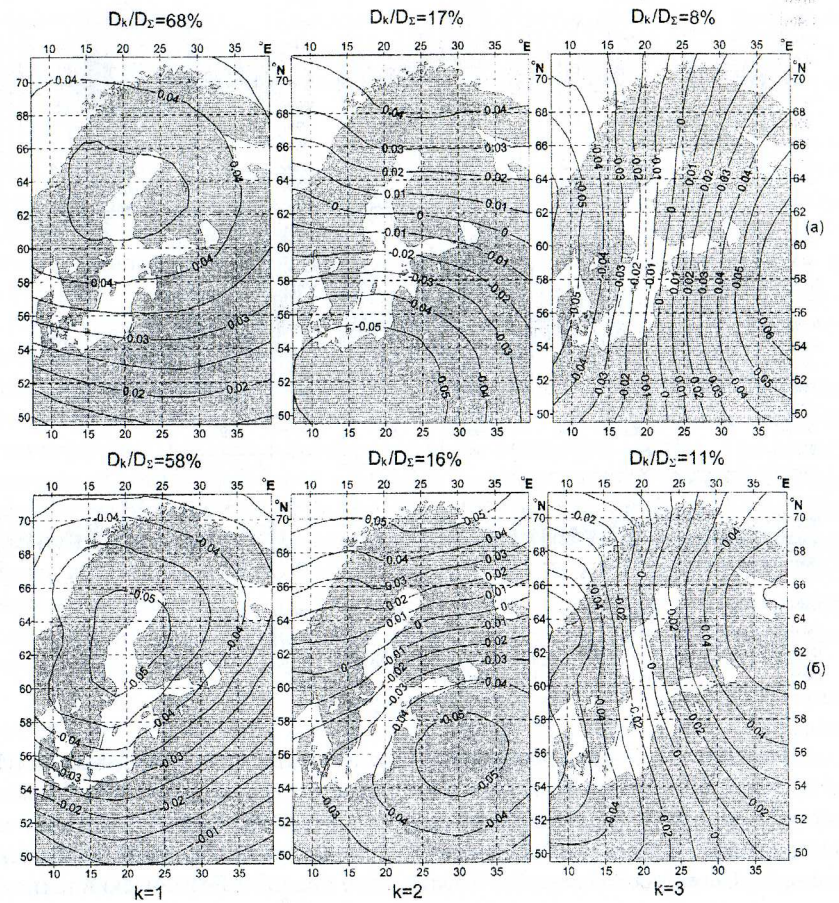


Рисунок 2 – Первые три естественные ортогональные функции ϕ_k полей атмосферного давления по среднемесячным данным, (а) – январь, (б) – июль.

Помимо сезонной изменчивости поле атмосферного давления подвержено межгодовой и синоптической изменчивости, о степени которой можно судить по значениям интерквартильного расстояния и размаха. Из рисунка 3 видно, что синоптическая изменчивость является преобладающей, особенно в зимние месяцы, когда наблюдается повышенная динамика барических образований. Пространственно-временная синоптическая изменчивость во внетропических областях связана с движением барических образований (циклонов и антициклонов, параметризуемых через форму, площадь, координаты центра, скорость движения), интерпретируемых как крупномасштабная турбулентность. Ее статистическое описание требует учета сезонной модуляции: в осенне-зимний сезон она усиливается, в весенне-летний – ослабевает.

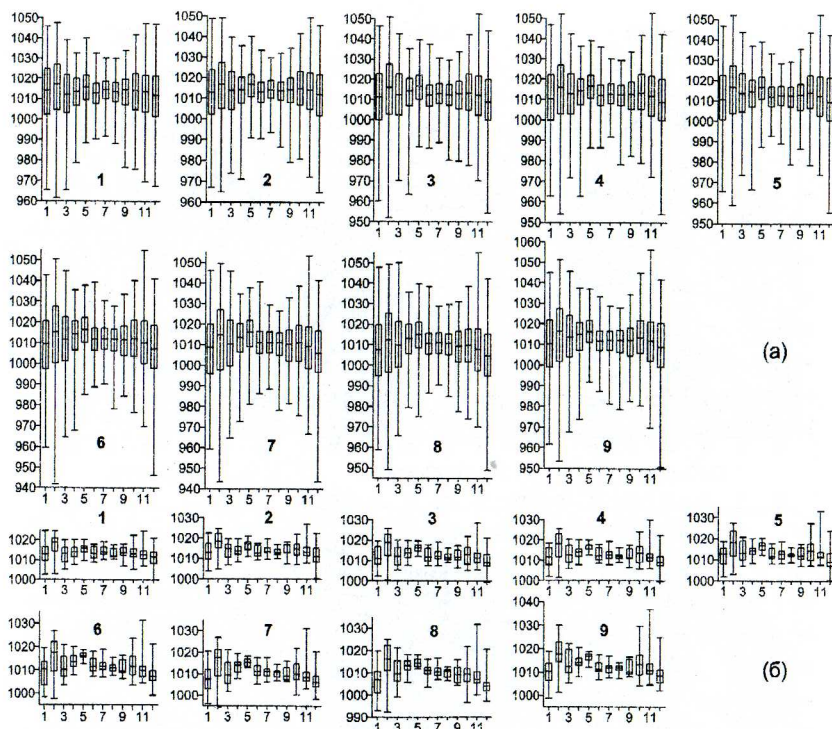


Рисунок 3 – Оценки порядковых статистик атмосферного давления [гПа] по срочным (а) и среднemesячным (б) данным для каждого месяца в 9 районах Балтийского моря: 1 – Датские проливы, 2 – Южная Балтика, 3 – Западная часть Центральной Балтики, 4 – Восточная часть Центральной Балтики, 5 – Рижский залив, 6 – Северная Балтика, 7 – Ботническое море, 8 – Ботнический залив, 9 – Финский залив.

Во **второй главе** рассматривается возможность использования результатов гидродинамического моделирования для описания режима уровня Балтийского моря. Проводится статистический анализ и районирование полей уровня Балтики.

Результаты статистического анализа обширной базы данных временных рядов измерений уровня на гидрометстанциях и постах были обобщены и систематизированы в диапазоне сезонной и межгодовой изменчивости в гидрометеорологическом справочнике по режиму Балтийского моря (Гидрометеорология..., 1992 г.). Особенностью предложенного в этой работе обобщения является то, что открытая часть моря охарактеризована путем интерполяции результатов обработки прибрежных и островных данных.

В настоящей работе основное внимание уделено открытой части моря в диапазоне синоцической изменчивости с учетом годовой ритмики. Исходными данными послужили результаты расчетов уровня в узлах регулярной сетки,

покрывающей все море, за продолжительный отрезок времени. С появлением новой информации по реанализу полей метеорологических элементов, которая служит основой для гидродинамического моделирования, стало возможным создать ансамбль полей уровня моря.

В работе используется трехмерная бароклинная гидродинамическая модель, созданная О.А. Андреевым и А.В. Соколовым и опубликованная в серии статей и монографии по проекту «Балтика» (Проблемы исследования и математического моделирования экосистемы Балтийского моря, 1997). Принятие данной модели Рос.Гидромет'ом в качестве прогностической для мониторинга невыхских наводнений, а также то, что модель прошла многократные проверки при воспроизведении полей уровня для различных барических ситуаций, обусловило использование ее в настоящей работе. В модели принята прямоугольная сетка координат, что существенно сокращает время расчетов. Начальными условиями являются сток рек, средние поля ветра и температуры воздуха, температуры и солёности воды. Граничными условиями являются свободное излучение гравитационных волн на границе с Северным морем и условие непротекания на твердых границах. Колебания свободной поверхности рассчитываются в двумерном модуле, реализующем систему уравнений теории «мелкой воды» (Вольцингер, Пясковский, 1977), значения интегральных скоростей течений поступают из трехмерного модуля. Пространственное разрешение сеточной области составляет 5×5 морских миль, интервал дискретности расчетов – 2 ч.

С целью определения приемлемости модели для расчета режимных характеристик колебаний уровня моря нами был осуществлен комплекс верификационных процедур путем сопоставления статистических характеристик.

Расхождение в средних оценках уровня моря, полученное при сравнении модельных и натурных данных, имеет причину в том, что модель рассчитывает поле уровня вне привязки его к берегам, подверженным долговременным вертикальным изменениям. Тем не менее, разность значений уровня между пунктами примерно совпадает по обоим массивам, поэтому для приведения уровня к нивелирному полигону необходимо ввести поправки, постоянные для каждого берегового пункта. Расхождения в оценках СКО, на наш взгляд, связаны с низким пространственным разрешением ($1^\circ \times 1^\circ$) метеорологической информации, что не позволяет учитывать локальные завихрения и пульсации ветра. Помимо этого на дисперсию колебаний уровня могут влиять локальные морфологические и орографические условия, определяющие параметры турбулентной вязкости, заданные в модели константами. Так же, как и в случае со средними значениями, поправки в СКО можно считать постоянными для каждого пункта.

В работе используются также данные спутниковых альтиметрических измерений уровня моря, которые предоставлены агентством AVISO (Франция), а помощь в их систематизации и обработке была оказана А.К. Гусевым.

В холодное время года акватория Балтийского моря (в первую очередь Ботнический и Финский заливы) частично покрыта льдом. Припайные льды,

оказывающие наибольшее влияние на колебания уровня, в среднем наблюдаются с декабря по май. При построении карт статистических характеристик уровня моря учитывались средние границы припайных льдов (Climatological Ice Atlas, 1982), рассчитанные за интервал, близкий по ледовым условиям к интервалу гидродинамических расчетов уровня.

Анализ распределения оценок односточных моментов математического ожидания $m_{\zeta}(\bullet)$ и среднеквадратического отклонения $\sigma_{\zeta}(\bullet)$ показал, что поле уровня неоднородно и подвержено изменчивости (рисунок 4). Сезонная перестройка при переходе от лета к зиме проявляется как в усложнении

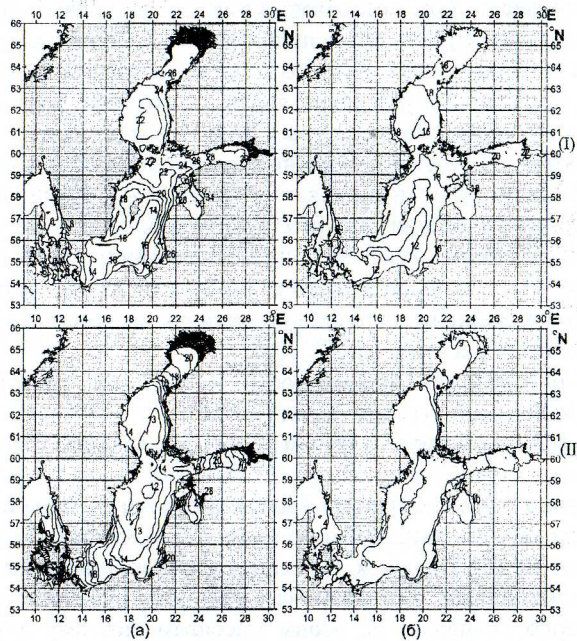


Рисунок 4 – Поля средних (I) и среднеквадратических отклонений (II) уровня [см] для января (а) и июля (б) по данным гидродинамического моделирования. Участки акватории, занятые ледяным покровом, показаны затемнением.

топографии уровенной поверхности, так и в интенсификации колебаний уровня, максимальная дисперсия которых приходится на заливы, а минимальная – на открытые части моря. Среднее поле уровня для января носит все основные черты среднегодового поля, но в зимнее время они наиболее выражены. Перепад по оси моря составляет 42 см. В центре открытой части моря наблюдается понижение уровенной поверхности, от которого к западному и восточному берегам идет повышение уровня, причем градиент у восточного берега значительно выше, чем у западного, и достигает 10 см/100 км. Такая структура объясняется циклоническим типом циркуляции вод в центральной части моря с интенсификацией течений у восточного берега. В летний период

картина поля уровня менее контрастна из-за ослабления циклонической деятельности: перепад по оси моря составляет 20 см, значение градиента не превышает 3 см/100 км. В летний период, помимо общего ослабления градиентов поля уровня, различия в их значении между отдельными районами моря практически исчезают. Карты ЕОФ, построенные для января, изменчивость в котором максимальна (рисунок 5), характеризуют сложность корреляционной зависимости уровня от пространственных координат r и времени t . Из пространственного распределения первой ЕОФ видно, что наибольшей связностью поля уровня обладают в центральной части моря. Для

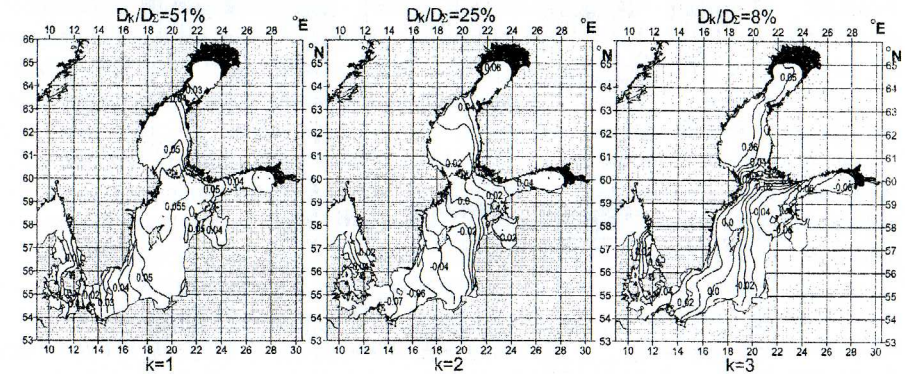


Рисунок 5 – Первые три естественные ортогональные функции ϕ_k полей уровня, январь. Участки акватории, занятые ледяным покровом, показаны затемнением.

второй ЕОФ степень связности повышается в заливах и проливах. Первые три ЕОФ объясняют 84% изменчивости поля уровня.

Согласно картам односточных и двухточечных моментов, построенных для каждого месяца, море было разделено на 9 квазиоднородных районов: Датские проливы, Южная Балтика, Западная часть Центральной Балтики, Восточная часть Центральной Балтики, Рижский залив, Северная Балтика, Ботническое море, Ботнический залив, Финский залив. В каждом из районов были выбраны точки, характер изменчивости уровня в которых может быть распространен на весь район. Квантильный анализ колебаний уровня, выполненный для каждой из точек, позволил сделать вывод о наличии межгодовой модуляции синоптической изменчивости полей уровня. На рисунке 6 представлены квантильные диаграммы, построенные по данным как моделирования, так и альтиметрических спутниковых измерений. По различиям значений размаха R и интерквартильного расстояния Q , рассчитанных по срочным и среднемесячным данным, можно заключить о преобладании синоптической изменчивости уровня. Значения Q по спутниковым данным примерно вдвое превышают соответствующие значения по модельным данным, что объясняется способностью альтиметра улавливать локальные колебания уровня, не воспроизводимые моделью из-за низкого

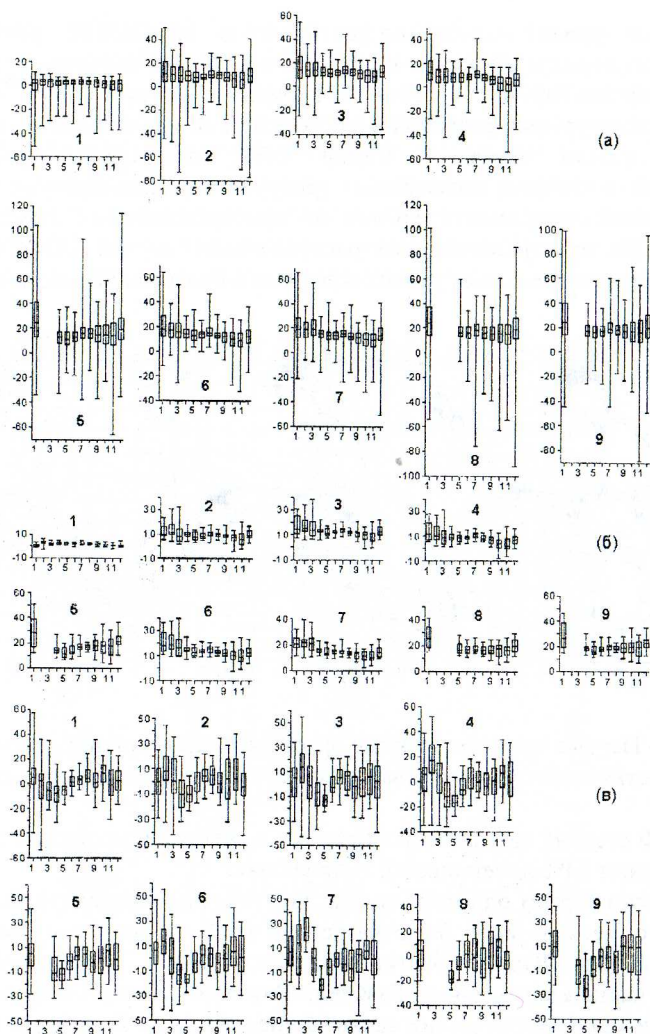


Рисунок 6 – Оценки порядковых статистик уровня [см] по срочным (а) и среднемесячным (б) модельным и по спутниковым (в) данным для каждого месяца в 9 районах Балтийского моря. Обозначения районов на рис.3.

разрешения метеорологической информации. Значения R по спутниковым данным вдвое ниже размаха по модельным данным, что обусловлено интервалом дискретности спутниковых данных – 7 суток – не позволяющем фиксировать большую часть колебаний уровня, вызванных динамикой циклонов. Корреляционный и спектральный анализ рядов уровня в Южной Балтике по данным контактных, спутниковых измерений и модельных расчетов

показал границы применимости каждого типа информации для выявления изменчивости разных диапазонов.

В **третьей главе** дается описание вертикальной термохалинной структуры вод Балтийского моря, метод статистического T,S-анализа обобщается на три переменные (T,S,O₂), приводится классификация вод моря по этим параметрам.

В гидрометеорологическом справочнике Балтийского моря (Гидрометеорология..., 1994) дана классификация вод на основе вертикальных одномерных распределений гидролого-гидрохимических элементов и обсуждается трансформация вертикальной структуры в диапазонах сезонной и межгодовой изменчивости. Эта классификация выделяет верхний квазиоднородный слой (ВКС) и глубинный слой, также выделяется промежуточный или переходный слой, в котором океанографические характеристики имеют большие вертикальные градиенты. Такое расслоение, так же, как и пространственные различия вертикальной структуры, обусловлены «разнесенностью» в пространстве областей поступления вод с различными физико-химическими свойствами – Датских проливов на юго-западе и стока рек на севере и северо-востоке моря. Также было выявлено существование хорошо выраженного годового хода температуры, плотности и кислорода в верхнем слое и слабо выраженного годового хода солености.

Одним из наиболее распространенных методов выделения водных масс является T,S-анализ, применяемый в зависимости от глубины z, времени t или расстояния l между станциями, но связь между T и S – статистическая, построенная на основе совместных наблюдений. Например, зависимости T=T(z) и S=S(z) при каждом фиксированном z могут быть записаны в виде T=T(S), т.е. этот метод позволяет, в частности, обосновать наличие регрессионной и корреляционной зависимости между значениями T и S. Аналогичным образом могут быть интерпретированы зависимости между T и O, O и ρ, и т.п. Совместное распределение двух элементов исследуется с помощью диаграмм рассеяния, когда зависимость рассматривается по одной из осей (z,t,l), а две другие фиксируются. На основе анализа диаграмм, выполненных в разных техниках, выявлены особенности совместного распределения пар элементов T, S, ρ, O₂ по вертикали, по оси открытой Балтики и в течение года. Совпадение статистических T,S-диаграмм и диаграмм, построенных по средним значениям, приводит к выводу о наличии нелинейной функциональной зависимости элементов. К примеру, в совместном распределении температуры и концентрации растворенного кислорода в течение года выделяется петля т.н. кислородного гистерезиса, обусловленная запаздыванием выравнивающего действия газообмена с атмосферой по отношению к сезонным изменениям растворимости кислорода, вызванным годовым ходом температуры.

Для представления совместного распределения параметров непосредственно в трехмерном пространстве (z,t,l) была применена техника старплов, когда многомерная случайная величина $\Xi(T,S,O_2)$ изображается в виде многолучевой звезды, где лучи – средние значения, а косинусы углов между ними характеризуют корреляционную связь элементов (рис.7). Из

рисунка видно характерное расслоение водных масс по вертикали, в целом соответствующее экспертной одномерной классификации. Для всех четырех станций хорошо заметен ВКС (образ I, рис.7,е); в нем соленность практически не зависит от температуры, а кислород – имеет слабую обратную связь. Несмотря

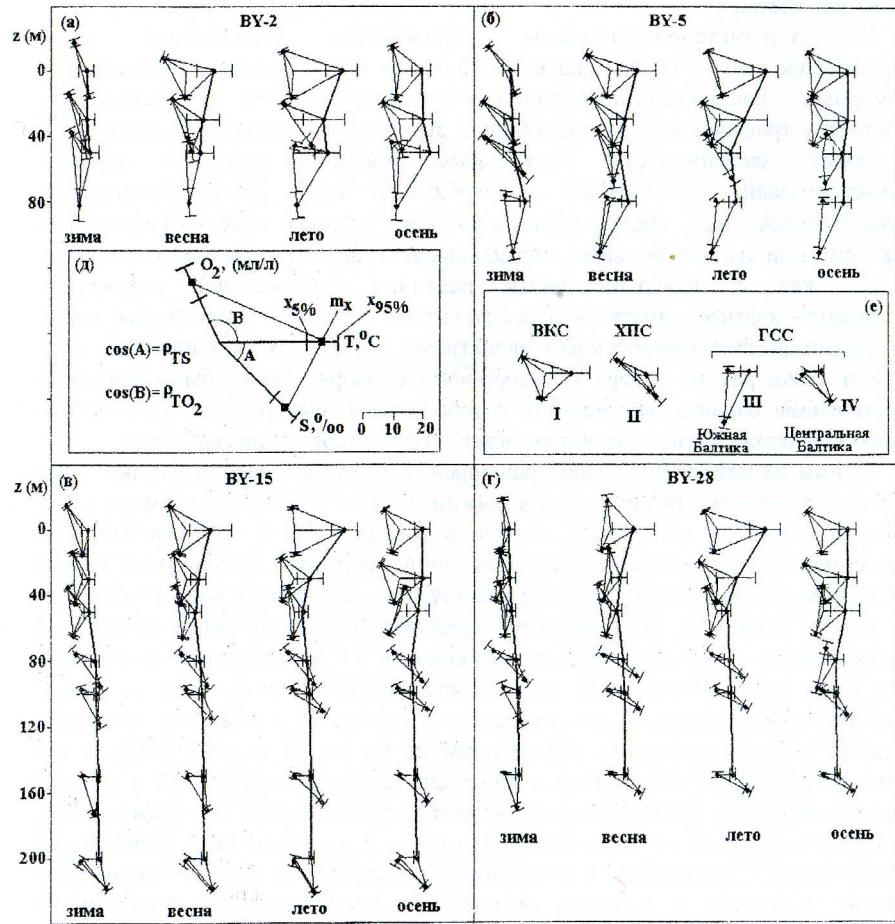


Рисунок 7 – Графическое представление пространственно-временной изменчивости водных масс Балтийского моря.

(а)–BY2, (б)–BY5, (в)–BY15, (г)–BY28, (д) – легенда, (е) – характерные образы однородных слоев (зима – февраль-март, весна – апрель-май, лето – август-сентябрь, осень – октябрь-ноябрь).

на пространственную разнесенность станций, годовой ход мощности ВКС на них примерно одинаков. Ядро холодного промежуточного слоя (ХПС) (образ II,

рис.7,е), в свою очередь, характеризуется наличием положительной связи между температурой и соленностью, обусловленной одинаковыми тенденциями изменения этих параметров с глубиной, и отрицательной – между температурой и концентрацией растворенного кислорода, что имеет ясную физическую интерпретацию. Геометрия образа практически не подвержена годовому ходу и пространственной разнесенности – эти факторы влияют лишь на мощность и глубину слоя. Геометрические образы, соответствующие глубинному соленому слою (ГСС) существенно отличаются от ВКС и ХПС и зависят от пространственного положения и глубины станции. Для Южной Балтики характерен образ III (рис.7,е), со слабой зависимостью соленности и кислорода от температуры, благодаря существенному влиянию водообмена с Северным морем. Для Центральной и Северной Балтики картина меняется: в силу затрудненного водообмена абсолютное значение концентрации растворенного кислорода мало, а соленность и температура значимо коррелированы (образ IV, рис.7,е). Таким образом, можно разделить ГСС на два кластера, исходя из пространственного положения.

Рис.7 позволяет выделить три независимых типа водных масс (и два подтипа ГСС) и охарактеризовать степень взаимосвязи параметров (T,S,O) внутри каждого из них.

Совместный анализ данных сезонных съемок элементов (T,S, ρ ,O) на четырех станциях I_p Балтийского моря на стандартных горизонтах z_i , по месяцам t_k приводит к рассмотрению системы случайных величин ζ_{ikp} размерностью 8832 элемента; их корреляционная матрица будет иметь около $39 \cdot 10^6$ независимых элементов. Поскольку анализ и интерпретация такой информации весьма трудоемки, для ее сжатия применено разложение вертикального поля

$$\zeta(z,t) = \sum_{k=1}^n a_k(t) \varphi_k(z)$$

по ортогональному базису $\varphi_k(z)$ в фиксированный момент времени t . Реализация случайной функции $\zeta(z,t)$ представляет собой вертикальный профиль $\zeta(z)$, который заменяется набором случайных величин a_k , т.е. модель упрощается. В качестве аппроксимирующих функций $\varphi_k(z)$ были приняты полиномы П.Л. Чебышева, ортогональные на конечной системе точек z_j . Коэффициенты a_k определяют вклад каждой из степенных функций $\varphi_k(z)$ в аппроксимацию вертикального профиля $\zeta(z)$. Для описания временной изменчивости коэффициентов $a_k(t)$ с учетом их годовой ритмики они были рассмотрены в ПКСП-приближении и представлены в компонентной форме:

$$a_k(t) = \sum_s b_{ks} \exp(i\omega_s t),$$

где b_{ks} — случайные величины. Таким образом, случайный профиль $\zeta(z,t)$ может быть представлен как разложение по биортогональному базису $\{\varphi_k(z), \psi_s(t)\}$:

$$\zeta(z,t) = \sum_k a_k(t) \varphi_k(z) = \sum_k \sum_s b_{ks} \varphi_k(z) \psi_s(t) = \sum_s \eta_s(z) \psi_s(t).$$

Это выражение позволяет осуществить переход от вертикально-неоднородного пространственно-временного поля $\zeta(z,t)$ к системе случайных величин $\{b_{ks}\}$ для каждой из переменных T, S, ρ, O . Коэффициенты разложения b_{ks} и соответствующие им вероятностные характеристики могут рассматриваться как система признаков, характеризующих черты сходства-различия водных масс, а также — как параметры вероятностной модели для синтеза системы вертикально-неоднородных нестационарных случайных полей.

Чтобы ответить на вопрос о существенности выявленных особенностей вертикального распределения и годового хода параметров водной структуры для различных станций, применяется аппарат дискриминантного анализа (ДА). В качестве дискриминантных переменных были приняты коэффициенты биортогонального разложения b_{ks} . По ним были рассчитаны канонические дискриминантные функции (КДФ) f_{pm} , для p станций за m лет. Дисперсионный анализ КДФ показал, что наибольшими дискриминирующими способностями обладают первые две КДФ (вклад около 94%). На рис. 8 приведены в плоскости

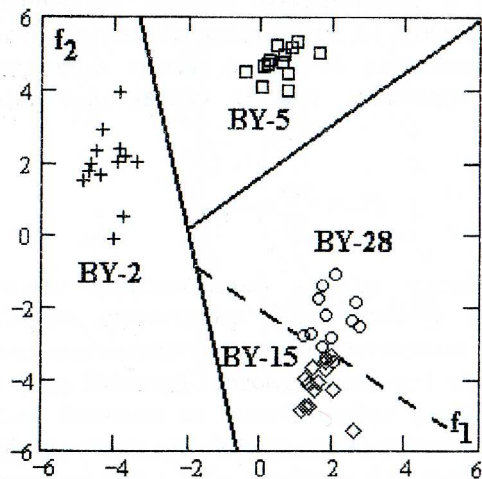


Рисунок 8 — Значения первых двух канонических дискриминантных функций f_{pm} на четырех станциях ВУ Балтийского моря.

КДФ (f_1, f_2) результаты расчетов по четырем станциям Балтийского моря. Из рисунка видно, что однозначно выделяются классы наблюдений, соответствующие станциям ВУ-2 и ВУ-5. Следует отметить, что станции ВУ-

15 и ВУ-28 плохо различимы. Это имеет очевидную режимно-климатическую интерпретацию, поскольку крупномасштабные процессы в Готландском бассейне обуславливают всю изменчивость водных масс в Центральной и Северной Балтике (Северная и Ландсортская впадины).

Также в 3 главе рассматривается вопрос синоптической изменчивости вертикальной термической структуры вод на примере станции ВУ-5, расположенной в Борнхольмской впадине. Использованы данные эпизодических измерений температуры воды за многолетний промежуток и данные многосуточных станций, осуществленных в 1980-1985 гг. сотрудниками СПО ГОИН и ААНИИ с борта НИС «Рудольф Самойлович». Закономерности изменчивости рассматривались в верхнем гомогенном слое как наиболее восприимчивом к влиянию атмосферы. Вероятностный анализ данных измерений обоих массивов показал, что наибольшие изменения термическая структура вод претерпевает в синоптическом диапазоне. Показано, что энталпия является оптимальным параметром ВКС для разделения различных масштабов изменчивости температуры воды.

В **заключении** излагаются основные выводы диссертации:

1. Для описания гидрометеорологического режима Балтийского моря необходимо использовать не только натурные данные в виде системы временных рядов, но и данные в виде системы полей, полученной на основе реанализа метеорологической информации и модельных океанологических расчетов.
2. Характерной особенностью гидрометеорологических процессов и полей является их пространственная, временная и межэлементная связность. Из-за многомерности вероятностных характеристик для их оценивания требуется применять методы многомерного статистического анализа: а) разложение полей атмосферного давления и уровня на естественные ортогональные функции позволило оценить качественно и количественно их собственную пространственно-временную структуру; б) классификация водных масс Балтийского моря методом многомерного шкалирования по температуре, солености и кислороду (T, S, O) на основе их совместного распределения учитывает статистическую взаимосвязь параметров; в) дискриминантный анализ водных масс позволяет утверждать о различии режима (T, S, O) в трех характерных районах Балтийского моря: Арконской впадине, Южной Балтике (Борнхольмская впадина), Центральной и Северной Балтике (Готландская, Северная, Ландсортская впадины).
3. Закономерности пространственно-временной изменчивости гидрометеорологических полей проявляются через перестройку ареалов вероятностных характеристик временной изменчивости. Показано, что неоднородность полей атмосферного давления и уровня обусловлена пространственным различием синоптической изменчивости и ее сезонной модуляции, выражающейся в перераспределении градиентов средних и стандартных отклонений по районам и сезонам. Пространственное различие и сезонная модуляция синоптической изменчивости

определяются совместным влиянием центров действия атмосферы: их пульсацией и миграцией в течение года.

4. В работе показано, что для атмосферного давления и уровня моря когерентный метод оценивания вероятностных характеристик периодически коррелируемых случайных полей предпочтителен перед компонентным. Вертикальная неоднородность термохалинной структуры и связанных с ней гидрохимических показателей приводит к необходимости сочетания компонентного и когерентного подходов.
5. Синоптическая изменчивость гидрометеорологических полей проявляется в форме возмущений, математической моделью которых может служить импульсное случайное поле. Эти импульсы для поля атмосферного давления имеют вид движущихся барических образований – циклонов, антициклонов; для поля уровня моря – вид штормовых нагонов, сейш, волн Россби.
6. Использование новых видов информации – атмосферный реанализ, данные гидродинамического моделирования, спутниковая альтиметрия – приводит к необходимости их сопоставления как между собой, так и с традиционными натурными данными. Показано, что данные модельных расчетов приемлемы для оценки колебаний уровня в диапазоне изменчивости от синоптического до межгодового, а результаты спутниковых альтиметрических измерений позволяют оценить колебания уровня с периодом более 20 суток и выявить локальные аномалии уровня поверхности, не воспроизводимые с помощью гидродинамического моделирования.

В **приложении**, состоящем из трех частей, приводится проект атласа режима атмосферного давления, уровня и термохалинных характеристик вод Балтийского моря, подготовленный на основе данных натурных контактных и неконтактных измерений и гидродинамического моделирования. В атласе представлены карты оценок одноточечных и двухточечных моментов полей атмосферного давления и уровня моря для каждого месяца, а также биplotты совместного распределения температуры, солености, плотности морской воды и концентрации растворенного кислорода по трем координатным осям: вертикальной, горизонтальной и временной. Информация, представленная в атласе, дополняет наши знания о гидрометеорологическом режиме Балтийского моря, она может быть использована при организации и проведении экологического и гидрометеорологического мониторинга Балтики, метеорологических и гидрологических прогнозах. Используемые методы могут быть распространены на большее количество элементов режима. Материалы атласа будут включены в компьютерный справочник по режиму Балтийского моря, создаваемый в рамках программы ЕСИМО.

Список работ, опубликованных по теме диссертации.

1. Statistical analysis of Baltic Sea waters. – Abstract Vol. of Baltic Sea Science Congress, 22nd Conference of the Baltic Oceanographers, 25-29 November 2001, Stockholm, Sweden. p. 132. (co-authors A. Boukhanovsky, I. Davidan, V. Rozhkov, O. Savchuk, I. Shpaer).
2. Статистический анализ водных масс Балтийского Моря. – Труды ГОИН, вып. 208, СПб.: Гидрометеиздат, 2002 г., с. 96-126 (соавторы Бухановский А.В., Рожков В.А., Савчук О.П., Шпаер И.С.).
3. Колебания уровня Балтийского моря. – Труды ГОИН, вып. 210, СПб.: Гидрометеиздат, 2004 г., в печати (соавторы Гусев А.К., Рожков В.А.).
4. Дискриминантный анализ вод Балтийского моря. – Труды конференции молодых ученых «Гидродинамические методы прогноза погоды и исследования климата», Санкт-Петербург, 19-21.06.2001 г. СПб.: Гидрометеиздат, 2002 г. с. 280-285 (соавтор Бухановский А.В.).
5. Исследования структуры и динамики Балтийского моря. – Тезисы докладов научной конференции по результатам исследований в области гидрометеорологии и мониторинга загрязнения природной среды в государствах – участниках СНГ, посвященной 10-летию образования Межгосударственного совета по гидрометеорологии, 23-26 апреля 2002г. Санкт-Петербург. Секция 2. СПб.: Гидрометеиздат, 2002 г., с. 180-181 (соавторы Смирнова А.И., Чернышева Е.С.).
6. Оценка синоптической изменчивости вертикальной термохалинной структуры Балтийского моря по данным натурных измерений. – Тезисы Пятой Российской научно-технической конференции «Современное состояние и проблемы навигации и океанографии» («НО-2004»), Санкт-Петербург, Россия, 10-12 марта 2004 г., с. 82-83 (соавтор Гусев А.К.).
7. Computer Handbook on Hydro-Meteorological Regime of The Baltic Sea. – Proceedings of USA-Baltic International Symposium “Advances in Marine Environmental Research, Monitoring & Technologies”, Klaipeda, Lithuania, 15-17 June 2004, pp. 87-94 (co-author V. Rozhkov).
8. Model Information as a Base for Creating Sea-Regime Handbooks. – Abstract Vol. of Challenger Conference for Marine Science: 2004, Liverpool, UK, 13-17 September 2004, p.164.
9. Assessment the Synoptic Variability of Vertical Thermal Structure in Baltic Sea Waters on the Base of in-situ Measurements. – Abstract Vol. of AGU Fall Meeting 2004, San Francisco, CA, USA, 13-17 December 2004, accepted (co-authors Ju. Klevantsov, V. Rozhkov).