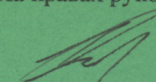


На правах рукописи



Есюкова Елена Евгеньевна

**ПРОСТРАНСТВЕННАЯ СТРУКТУРА
И ВНУТРИГODOВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ
ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ВОДООБМЕНА
В БАЛТИЙСКОМ МОРЕ**

Специальность 25.00.28 – океанология

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Калининград – 2009

Работа выполнена в Атлантическом отделении Института океанологии им. П.П. Ширшова Российской Академии Наук, г. Калининград

Научный
руководитель:

кандидат технических наук
Ирина Петровна Чубаренко

Официальные
оппоненты:

доктор географических наук
Павел Петрович Чернышков

кандидат географических наук
Елена Сергеевна Троицкая

Ведущая организация:

Российский государственный
гидрометеорологический
университет

Защита состоится " 17 " июня 2009 г. в 15 часов 00 мин.
на заседании диссертационного совета Д 212.084.02 при ФГОУ ВПО «Рос-
сийский государственный университет имени Иммануила Канта» по адре-
су: 236040, г. Калининград, ул. Университетская, 2, ауд. 206.
e-mail: ecogeography@rambler.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГОУ ВПО
«Российский государственный университет имени Иммануила Канта»
(ул. Университетская, 2).

Автореферат разослан " 15 " мая 2009 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Г.М. Баринава

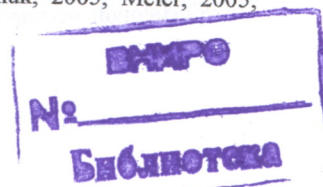
Актуальность темы исследования

Одна из важнейших задач океанологии - исследование термохалинных полей и полей течений в крупных природных водоёмах, оценка величины водообмена внутри бассейна и между отдельными его частями. Особенно актуальной является её решение для такого интенсивно используемого и экологически уязвимого бассейна как Балтийское море. Исследование водообмена между его открытыми и прибрежными акваториями и внутри них важно как для оценок интенсивности обновления и очищения прибрежных вод, так и нагрузки на открытые морские акватории. Современное развитие Балтийского моря как элемента географической среды определяется принадлежностью его бассейна к числу наиболее густонаселённых и высокоразвитых районов мира с высокой концентрацией промышленности и интенсивным сельским хозяйством, что делает исследование внутренних связей бассейна актуальными для вопросов сохранения экосистемы моря в условиях дальнейшего экономического развития.

Общая характеристика

Начало предшествующих исследований гидрологического режима Балтийского моря было положено еще в 18 веке (например, работы Гиарке (1702 г.), Мушенбрука (1754 г.)). Первые крупные гидрологические экспедиции относятся к 19 веку: Гебель (экспедиции 1842, 1844 гг.), Струве (1852, 1854 гг.), Макаров (1899 г.), Экман и Петтерссон (1892, 1893 гг.) и др. В начале 20 века Кнудсен (1908 г.), Виттинг (1905 г.), Герке (1909, 1910 гг.), Якобсен (1908 г.), Спетманн (1913 г.) исследовали годовые вариации температуры и солёности вод Балтики. Общая картина циркуляции вод была выяснена к началу 20 века (Witting, 1908; Witting, 1912; Бильдельринг, Рудовиц, 1923; Palmén, 1930), а расчеты термохалинных течений в верхнем слое Балтийского моря выполнены рядом авторов во второй его половине (Соскин, 1963; Асток, 1965; Svansson, 1959; Hela, 1973; Kowalik, Taranowska, 1974; и др.).

К вопросу оценки водообмена между отдельными бассейнами Балтийского моря исследователи обратились в 20 веке (Witting, 1912; Jakobsen, 1925, 1936; и др.). К настоящему времени известен целый ряд работ (Wyrki, 1953; Соскин и др., 1963; Соскин, 1963; Svansson, 1975; Jacobsen, Neilsen, 1976; Брозин и др., 1977; Neilsen, 1979; The Belt Project, 1980; Альтшулер, 1982; и др.), касающихся оценок межбассейнового водообмена. Они, в частности, показали, что только натурных данных для изучения этого вопроса недостаточно, и современные численные модели являются эффективным дополнительным инструментом для исследований как межбассейнового, так и внутрибассейнового обмена (Сустанов, 1983; Lehmann et al., 2002; Andrejev et al., 2004; Savchuk, 2005; Meier, 2005; Myrberg, Andrejev, 2006; и др.).



Балтийское море имеет значительную меридиональную протяженность, сложный рельеф дна, представленный последовательностью порогов и впадин, очень длинную и изрезанную береговую линию, многочисленные острова, заливы, проливы (Геология Балтийского моря, 1976; Осадкообразование в Балтийском море, 1981; Блажчишин, 1998; Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР, 1992; Emelyanov, 1995, 2002). Сложная геоморфология дна моря затрудняет водообмен между бассейнами. Формирование общей циркуляции вод Балтийского моря определяется несколькими факторами: водообменом с Северным морем, речным стоком, атмосферной циркуляцией и метеорологическими параметрами, анизотропией процессов обмена и перемешивания (Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР, 1992; Проект «Балтика», 1983, 1984; Залогин, Косарев, 1999). Особенности вертикального перемешивания в Балтийском море изучались в ряде работ, например (Stigebrant, 1987; Озмидов, 1993; Озмидов, 1994; Пака, 1996; Журбас, Пака, 1997; и др.). Отмечалось (Озмидов, 1994), что горизонтальный обмен, который включает адвекцию и горизонтальную составляющую турбулентной диффузии, несоизмеримо мощнее вертикального. Горизонтальный водообмен является одним из ключевых факторов формирования термохалинной структуры вод Балтики. Течения, как доминирующий механизм водообмена, переноса вещества и энергии, играют важную роль в формировании гидрологического и гидрохимического режимов моря. При этом материалы проведенных за более чем столетний период наблюдений весьма разнородны как по видам и формам представления, так и по продолжительности, дискретности измерений и качеству (Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР, 1992; Janssen et al., 1999; Siegel, Gerth, 2007; Sea and Coast, 1992; <http://www.iowarnemuende.de/>; и др.). Несмотря на их важность, количественные характеристики горизонтального обмена и/или перемешивания изучены в настоящее время недостаточно, а величины объёмного расхода через границы внутри бассейнов ещё практически неизвестны.

Данная работа посвящена исследованию пространственной структуры и внутригодовой изменчивости горизонтального водообмена в Балтийском море при среднемноголетних внешних условиях методом численного моделирования.

Цель исследования: оценить величину, выявить пространственную структуру и внутригодовую изменчивость горизонтального водообмена внутри суббассейнов Балтийского моря в течение годового цикла при среднемноголетних внешних условиях.

Задачи:

1. Разработать численную модель динамики вод Балтийского моря на базе трёхмерной негидростатической численной модели MIKE3-FlowModel

(DHI Water & Environment, <http://www.dhi.dk>): (i) насытить данными (поле глубин; среднемноголетние данные по температуре воздуха над поверхностью моря; солёности и температуре вод; солёности и температуре на открытой границе (северная часть пролива Каттегат); облачности; стоку рек; ветру над акваторией Балтийского моря в течение года по среднемноголетним данным); (ii) провести калибровку и (iii) верификацию модели, сравнивая результаты моделирования с опубликованными среднемноголетними данными (Janssen et al., 1999; Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР, 1992; Sea and Coast, 1992; <http://www.balticuniv.uu.se/>; Siegel, Gerth, 2007; Добровольский, Залогин, 1982; Проект «Балтика», 1983).

2. Рассчитать величины горизонтального объёмного расхода через комплекс вертикальных сечений, расположенных согласно геоморфологическим особенностям дна моря.
3. Выявить пространственную структуру и исследовать внутригодовую изменчивость горизонтального переноса вод; выполнить районирование морской акватории по величинам горизонтального объёмного расхода.
4. Оценить величины горизонтального объёмного расхода вод через границы между исключительными экономическими зонами государств Балтийского моря, а также время их обновления.

На защиту выносятся

1. Оригинальная реализация численной модели динамики вод Балтийского моря, созданная на базе трёхмерной гидродинамической негидростатической модели MIKE3-FlowModel (DHI Water & Environment, <http://www.dhi.dk>).
2. **Районирование** Балтийского моря по величине горизонтального объёмного расхода вод (через единицу длины сечения).
3. А также следующие **положения:**
 - 3.1. Наиболее интенсивный горизонтальный перенос вод наблюдается в районах расположения впадин и желобов в собственно Балтийском море, со среднегодовыми величинами расхода до 0.046 (км³/год)/м. Абсолютные среднегодовые расходы через вертикальные сечения поперек желобов и впадин, захватывающие области между точками максимальных значений градиентов уклона дна по обе стороны, в 2-3 раза превышают среднегодовой сток рек в Балтийское море. Внутригодовые вариации по различным сечениям в открытой части моря, составляют в среднем 20-60% от соответствующих среднегодовых значений.
 - 3.2. Вдольбереговой транспорт в прибрежной зоне (от берега до свала глубин) составляет 30-40% от максимальных расходов в открытой части. В Юго-Восточной Балтике формируется также горизонтальный об-

мен между прибрежной и открытой зоной моря, который на порядок слабее вдольберегового потока и имеет максимум осенью и весной.

3.3. Время обновления вод адвекцией в исключительных экономических зонах государств Балтийского моря находится в диапазоне от 2 месяцев (Литва, Германия) до 2 лет (Финляндия); для вод Калининградской области - около 3 месяцев.

3.4. Наибольший адвективный перенос вод через границу экономических зон соседствующих государств наблюдается из Польши в Россию (Калининградская область) - около 1600 км³/год, что позволяет позиционировать Калининградскую область как наиболее активную транзитную зону в Балтийском море.

Научная новизна полученных результатов

1. Впервые осуществлено районирование акватории Балтийского моря по величине горизонтального расхода вод.
2. Впервые даны оценки масштаба горизонтального переноса вод и величины времени обновления вод в суббассейнах и исключительных экономических зонах Балтийского моря на единой основе - через величину горизонтального расхода вод через границы.

Достоверность полученных результатов

Достоверность исследования обеспечена соответствием с натурными данными (Janssen et al., 1999; Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР, 1992; Sea and Coast, 1992; Siegel, Gerth, 2007; <http://www.balticuniv.uu.se/>) и результатами, полученными другими исследователями (Myrberg et al., 2006; Meier, 2005; Andrejev et al., 2004; Savchuk, 2005; Astok et al., 1999; и др.).

Практическая значимость работы

1. Предложенное районирование по величине горизонтального обмена важно для задач пространственного планирования морских акваторий.
2. Практически важны для экологических приложений результаты оценки масштабов объёмного расхода через границы исключительных экономических зон государств в Балтийском море, масштабов водообмена шельфа с открытой морской акваторией, времён обновления вод внутри суббассейнов.
3. Практическую значимость представляет численная модель динамики вод Балтийского моря, насыщенная натурными данными, откалиброванная и верифицированная.

Личный вклад автора

Автором лично подобраны и проанализированы натурные данные, адаптирована для расчетов гидродинамических характеристик Балтийского моря численная модель MIKE3-FlowModel, проведена калибровка и верификация модели путём сравнения результатов моделирования со средне-

многолетними данными по многим источникам. Предложена и разработана методика выбора вертикальных сечений согласно геоморфологическим особенностям дна моря. Проведены численные эксперименты по расчету водообмена через комплекс 70 вертикальных сечений. Анализ результатов численных экспериментов выполнен совместно с научным руководителем.

Апробация работы

Основные результаты и положения, изложенные в диссертационной работе, докладывались и обсуждались на 12 международных, российских и региональных конференциях: VI Международном совещании по проекту создания оперативной океанологической модели Балтийского моря высокого разрешения (8-10 сентября 2003, СПб); Международной конференции «Инновации в науке и образовании» (20-22 октября 2004, КГТУ, Калининград); Конгрессе Балтийских океанографов (Институт исследований Балтийского моря, Варнемюнде-Росток, 19-22 марта, Германия, 2007); IV Международной конференции в Музее мирового океана (24-26 октября 2007, Калининград); X Международной конференции «Методы и средства исследования океана» (Институт океанологии РАН, Москва, 21-23 ноября, 2007); Международной конференции 42 ECSA (16-22 сентября 2007, Калининград-Светлогорск); V Международной научной конференции «Инновации в науке и образовании - 2007» (22-25 октября 2007, КГТУ, Калининград); EGU2008 (16-22 апреля 2008, Вена, Австрия); Международной конференции «Комплексное управление, индикаторы развития, пространственное планирование и мониторинг прибрежных регионов юго-восточной Балтики» (26-30 марта 2008, Калининград); Международной конференции (школа-семинар) «Динамика прибрежной зоны бесприливных морей» (30 июня - 4 июля 2008, Балтийск Калининградской области); VI Международной научной конференции «Инновации в науке и образовании - 2008» (21-23 октября 2008, КГТУ, Калининград); EGU2009 (19-24 апреля 2009, Вена, Австрия).

Результаты работы неоднократно обсуждались на семинарах Лаборатории прибрежных систем АО ИО РАН, на семинаре по океанологии и геоэкологии кафедры географии океана факультета географии и геоэкологии РГУ им. И.Канта.

Исследования проводились в рамках выполнения научных программ по грантам РФФИ (07-05-00850, 06-05-64138, 08-05-01023).

Публикации. Всего по материалам исследования опубликовано 19 научных работ, в том числе 2 статьи в журналах из списка ВАК.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы из 195 наименований. Работа содержит 156 страниц текста, 82 рисунка и 15 таблиц.

Благодарности. Автор глубоко благодарен своему научному руководителю, ведущему научному сотруднику АО ИО РАН, ктн И.П.Чубаренко за постановку задачи, поддержку и постоянное внимание к работе. Особую благодарность автор выражает дф-мн, проф. В.А.Гриценко – за постоянное содействие и ценные советы. Автор искренне благодарит за помощь, полезные советы и комментарии в процессе работы над диссертацией зав. лаб. прибрежных систем АО ИО РАН кф-мн Б.В.Чубаренко. Благодарна коллегам за заинтересованные обсуждения и полезные рекомендации: дгн В.Ф.Дубравину, кф-мн Н.Н.Голенко, ктн А.Н.Бабакову, кф-мн Н.Ю.Демченко, сотрудникам из лаборатории прибрежных систем АО ИОРАН за всестороннюю помощь и поддержку в работе, коллегам географического факультета РГУ им. Канта за участие в обсуждении и полезные замечания.

С глубокой благодарностью отмечаю роль своего первого научного руководителя дф-мн, проф. В.Н.Анучина, без которого я не могла бы состояться как океанолог.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Предмет исследования – пространственная структура и внутригодовая изменчивость горизонтального водообмена в Балтийском море. Во **Введении** представлена общая характеристика работы, сформулированы цели исследования, обоснована актуальность и практическая значимость решаемой научной задачи, кратко изложено содержание диссертации, приведены основные положения, выносимые на защиту. Далее изложение материала построено следующим образом.

Глава 1 посвящена обзору и анализу публикаций по современному состоянию исследований Балтийского моря. В разделе 1.1 приводится краткое физико-географическое описание Балтийского моря и его гидрологического режима. Раздел 1.2 представляет собой обзор работ по межбассейновому обмену в Балтике. Анализ публикаций последних лет свидетельствует, что основное внимание исследователей было сосредоточено на изучении особенностей циркуляции вод Балтийского моря (Meier, Kauker, 2004; Meier et al., 2004; Döös et al., 2004; Hagen, Feistel, 2007; и др.). Часть работ посвящена численному моделированию мезомасштабной циркуляции: распространению затоковых североморских вод (Журбас, Пака, 1997; Журбас и др., 1999; Zhurbas, Paka, 1999; Журбас, Пака, 2001; Zhurbas et al., 2003; Meier et al., 2006; Kuzmina et al., 2005.; Пака, Голенко, 2004; Гриценко, Юрова, 1997; и др.), мезомасштабных вихрей (Kuzmina et al., 2005; Кузьмина и др., 2008; Журбас, Пака, 1997; Журбас и др., 2002). Численное моделирование водо-, тепло- и солеобмена между бассейнами Балтийского

моря (Lehmann et al, 2002; Andrejev et al., 2004; Meier, 2005; Savchuk, 2005; Myrberg, Andrejev, 2006; и др.) позволило оценить зависимость их потоков от вариаций режимобразующих факторов (речного стока, ветрового режима и т.д.). В разделе 1.3 приведен обзор численных моделей, применяющихся в исследованиях Балтийского моря. Рассматриваются задачи, решаемые методами численного моделирования (Stigebrandt, 1987; Omstedt et al., 2000; Schrum, 2001; Lehmann et al., 2002; Stigebrandt, Gustafsson, 2003; Коротенко, 2003; Jankowski, 2003; Meier, 2003; Meier, Kauker, 2003; Gustafsson, 2004; Andrejev et al., 2004; Zhurbas et al., 2004; Döös et al., 2004; Meier, 2005; Oldakowski et al., 2005; Jędrasik, 2005; Rudolph, Lehmann, 2006; Meier et al., 2006; и др.). **Раздел 1.4** посвящен обзору экологических проблем Балтийского моря (Роотс, Пустельников, 1992; Блажчишин, Краснов, 1998; Емельянов и др., 1999; Литвин, Нарожная, 1999; Израэль и др., 1999; Матишов и др., 2000; Геоэкология шельфа и берегов морей России, 2001; Краснов, 2002; Емельянов, Кравцов, 2002; Орлёнок и др., 2002; Орлёнок, Рябова, 2003; Коротенко, 2003; Пака, 2004; Емельянов и др., 2005; Roose, Roots, 2005; Пака и др., 2007; Plus, 2007; Bartnicki, 2007; Knuuttila, 2007; и др.).

Несмотря на многочисленность исследований Балтийского моря, информация о количественных характеристиках водообмена внутри бассейнов в настоящее время практически отсутствует, хотя является важной и с точки зрения фундаментальных вопросов общей динамики вод, и для широкого спектра практических приложений.

В **главе 2** излагаются этапы создания численной модели динамики вод Балтийского моря на основе трёхмерной негидростатической численной модели MIKE3-FlowModel (DHI Water & Environment, <http://www.dhi.dk>): усвоение натуральных данных, настройка внутренних параметров модели и её верификация путём сравнения с независимыми рядами натуральных данных и исследованиями других авторов.

В разделе 2.1 описывается профессиональная лицензионная трёхмерная гидродинамическая численная модель MIKE3-FlowModel. Семейство моделей MIKE – лицензионное программное обеспечение, разрабатываемое Датским Гидравлическим институтом и институтом Качества Воды (DHI Water & Environment; <http://www.dhi.dk/>) для моделирования гидродинамических, гидрохимических, гидробиологических, эвтрофикационных и других процессов в эстуариях, заливах, озёрах, прибрежных зонах, морях и океанах. Гидродинамический модуль (HD) является основным модулем MIKE3; он позволяет рассчитать трёхмерные течения на реальной батиметрии, учитывая наиболее важные внешние воздействия – переменные во времени и пространстве метеорологические условия (ветер, температуру воздуха, облачность, влажность, прозрачность атмосферы), приливы, сток

рек, теплообмен с атмосферой (с учётом суточного хода солнечной радиации в зависимости от широты), трение о дно, вращение Земли. Математической основой MIKE3 являются уравнение сохранения массы, уравнение Навье-Стокса (с осреднением по Рейнольдсу) в трёх измерениях, включая эффекты турбулентности, уравнения сохранения для солёности и температуры, уравнение состояния морской воды. Для параметризации турбулентности была выбрана модель Смагоринского (Smagorinsky, 1963). Решение получается на прямоугольной регулярной сетке; толщина слоёв по вертикали также постоянна.

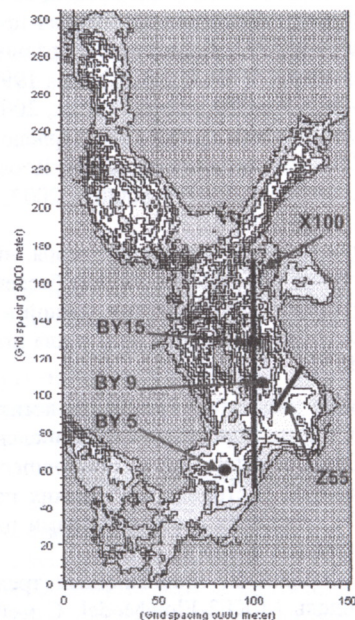


Рис.1 а) Область моделирования и батиметрия модельного бассейна на прямоугольной регулярной сетке 152×306 ячеек ($5 \text{ км} \times 5 \text{ км}$). Показано положение разрезов и контрольных профилей BY15, BY5, BY9, X100, Z55, использовавшихся для настройки модели.

В разделе 2.2 приведена характеристика натуральных данных, положенных в основу моделирования. За основу информации о батиметрии взяты данные <http://www.io-warnemuende.de>. Расчёты проводились на регулярной прямоугольной сетке 152×306 ячеек по горизонтали ($5 \text{ км} \times 5 \text{ км}$) (рис.1), 92 слоя по вертикали (шаг 4 м); шаг по времени, определяемый условием близости к единице числа Куранта, составляет 90

с. Пространственный шаг сетки выбран исходя из опыта моделирования HIROMB (<http://www.smhi.se>) и рекомендаций Межправительственной Панели Изменения Климата (International Panel of Climate Change (<http://www.ipcc.ch>)). В качестве начальных трёхмерных полей температуры и солёности использовались данные на февраль (Janssen et al., 1999) (помесячные среднееголетние данные за период 1900-1996 гг.). Поля заданы пространственной интерполяцией по 30 профилям T и S на весь модельный бассейн. На открытой границе, помещённой в Северном Каттегате, поле солёности и температуры T, S (x, z, t) задаётся по среднемесячным

данным (Janssen et al., 1999). В процессе моделирования, температура воздуха над поверхностью моря задаётся пространственной интерполяцией по 30 точкам, в которых значения меняются ежемесячно в течение года в соответствии со среднееголетними данными (Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР, 1992). Для поля ветра (единого для всей Балтики) использованы данные ежедневных измерений за 2007 г. на станции Висбю (о. Готланд (<http://rp5.ru/>)). Облачность задана по среднемесячным данным (Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР, 1992); речной сток распределён по 21 источнику с изменениями согласно среднегодовому ходу (помесячно) (Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР, 1992, Sea and Coast, 1992). Длительность модельного расчёта составляла 2 года; для второго года использовались те же – ежемесячные среднееголетние – внешние условия; время установления модели составляет около 2 месяцев (первого года моделирования); анализ водообмена основан на данных второго года моделирования.

В разделе 2.3 описывается процесс настройки модели с использованием следующих натуральных данных (рис.1): вертикальные профили температуры и солёности вод в центре (BY15) и южной части Готландской впадины (BY9), в Борнхольмской впадине (BY5); горизонтальные профили температуры и солёности на поверхности в открытой части моря (X100), горизонтальные профили температуры воды на поверхности над шельфом восточной части центральной Балтики (Z55). Внутренними параметрами модели, с помощью которых проводилась калибровка, являются безразмерные коэффициенты горизонтального и вертикального турбулентного обмена (формулировка Смагоринского (Smagorinsky, 1963)) и коэффициент трения о дно; проводилось тестирование на чувствительность решения к величине коэффициента трения ветра и вариациям облачности. Результаты моделирования с разными коэффициентами горизонтального турбулентного обмена (0.44-2.64) на июнь показаны на рис.2: представлены вертикальная структура температуры воды в центре Готландской впадины (BY15) и горизонтальные профили температуры поверхности вод в открытой части Балтийского моря (X100). По результатам сравнения со среднееголетними данными (Janssen et al., 1999), модель наилучшим образом воспроизводит глубину залегания холодного промежуточного слоя и падение температуры воды с юга на север при коэффициенте горизонтального турбулентного обмена 1.76. Детальный сравнительный анализ показал, что модель в целом хорошо воспроизводит ход полей температуры и солёности; наилучшее совпадение со среднееголетними данными наблюдается в Центральной и Юго-Восточной части Балтики; удовлетворительное совпадение – в Южной и Северной частях Балтики.

Аналогичный процесс калибровки по величине коэффициента вертикального турбулентного обмена привёл к величине 0.264, трение о дно – 0.05. Коэффициент трения ветра – 0.0016.

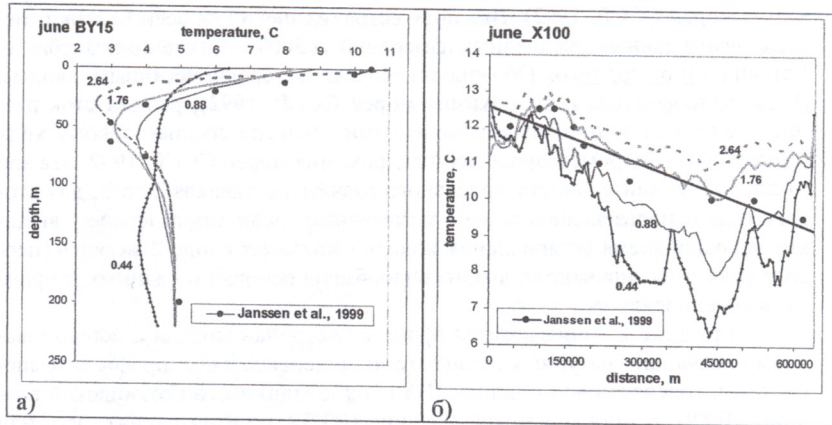


Рис.2. Калибровка модели: результаты моделирования с разными коэффициентами горизонтального турбулентного обмена: а) вертикальные профили температуры воды в Готландской впадине (BY15); б) горизонтальные профили температуры поверхности вод в открытой части Балтики (X100). Среднеголетние данные (Janssen et al., 1999) обозначены точками.

В разделе 2.4 описывается процесс и результаты верификации модели. Рассматривается **сезонная динамика вертикальных профилей** температуры воды в Готландской и Борнхольмской впадине. Сравнение с натурными данными (Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР, 1992) показало, что в вертикальной термической структуре вод во впадинах хорошо прослеживается верхний квазиоднородный или прогретый слой, холодный промежуточный слой, глубинная более тёплая вода. В таблице 1 приведены данные по глубине залегания ядра ХПС в Готландской впадине. Модель хорошо воспроизводит динамику вертикального профиля температуры воды, глубину залегания ядра ХПС и его заглубление со временем. Проводится анализ **среднемесячных полей температуры** воды на поверхности. На рис.3 приведены графики температуры воды на горизонтальном разрезе вдоль оси Балтийского моря (рис.3а) – среднемесячной для октября (рис.3б) и среднегодовой (рис.3в) – модельный расчёт в сравнении с диапазоном изменения за 1990-2004 гг. (Siegel, Gerth, 2007). Проведено сравнение годового хода среднемесячной температуры поверхности

воды для Арконской и Готландской впадины. Показано, что модель даёт немного заниженные величины (на 1.0-2.5°C) для летнего и осеннего сезона, по сравнению с данными за период 1990-2004 гг. (Siegel, Gerth, 2007), но они находятся в хорошем соответствии с результатами численных экспериментов (Omstedt et al., 2000) для Готландской впадины (BY15).

Таблица 1 – Глубина залегания ядра ХПС в Готландской впадине по натурным и модельным данным

сезон	Глубина залегания ядра ХПС, м	
	(Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР, 1992)	Модель
весна	40-50	20-40
лето	50-60	40-60
осень	60	70-80

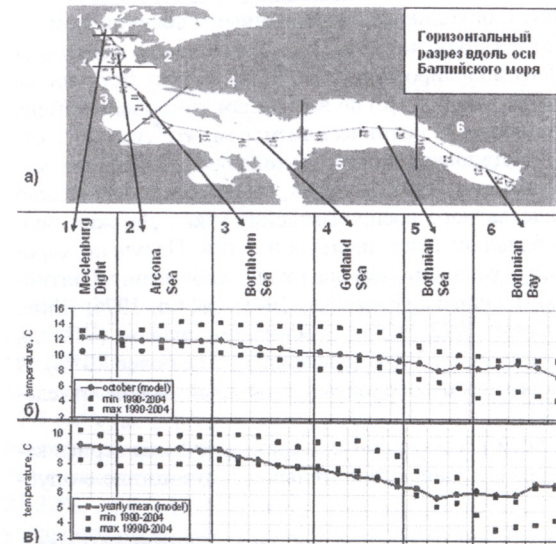


Рис.3. Положение поперечного разреза через центральные бассейны Балтийского моря. Температура воды на поверхности: б) среднемесячная для октября; в) среднегодовая. Модельный расчёт (непрерывная кривая) в сравнении с диапазоном изменения за 1990-2004 гг. (Siegel, Gerth, 2007) (отдельные крупные тёмные точки).

Далее анализируются **среднемесячные поля солёности** воды на поверхности. В модели не учитывается ледовая обстановка, поэтому расчётные значения солёности в северных районах Балтики несколько отличаются от среднеголетних (Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР, 1992) (на ~0.2 psu). В модели наблюдается небольшое отклонение от широтного распределения изохалин, но в целом картина соответствует сред-

немногочисленному распределению солености и качественно совпадает с результатами численных экспериментов (Eilola, Stigebrandt, 1998; Lehmann et al., 2002).

Проводится сравнительный анализ системы общей **поверхностной циркуляции вод** в Балтийском море по различным данным. В целом, в рассчитанном движении вод прослеживается общее циклоническое направление в верхнем однородном слое, отмечавшееся многими исследователями (Добровольский, Залогин, 1982; Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР, 1992; Sea and Coast, 1992; и др.). Циркуляция имеет достаточно сложную пространственную структуру. Модельный расчет для Ботнического залива дает картину движения вод, которая находится в хорошем согласии с результатами численного эксперимента (Myrberg, Andrejev, 2006), для Финского залива – в удовлетворительном согласии с результатами численного эксперимента (Andrejev et al., 2004). Для собственно Балтийского моря результаты расчета дали картину, качественно близкую к результатам, представленным (<http://www.balticuniv.uu.se/>).

Проведено сравнение с опубликованными данными величин **компонент водного баланса отдельных частей моря**. Наибольшие расхождения результатов численного моделирования с данными других источников (Sea and Coast, 1992; Savchuk, 2005; и др.) по величинам компонент обмена установлены между Боттенвиком и Ботническим морем, что связано с отсутствием учёта ледовой обстановки; между Балтийским и Северным морем (Соскин, 1963; Sea and Coast, 1992; Savchuk, 2005; и др.), что можно связать со сложностью адекватного воспроизведения узких Датских проливов при относительно большом шаге численной сетки. Получено хорошее соответствие величин компонент обмена между собственно Балтийским морем и Ботническим заливом (Fonselius, 1971; Dahlin, 1976; Ehlin, Ambjörn, 1978; Sea and Coast, 1992; и др.), с Финским заливом (Witting, 1912; Savchuk, 2005; Andrejev et al., 2004) (расхождение не более 20 %). В общем, модель удовлетворительно воспроизводит водный баланс отдельных частей моря.

Таким образом, по всем рассмотренным характеристикам верификация модели показала хорошее и удовлетворительное соответствие с опубликованными данными.

Глава 3 посвящена анализу режима водообмена в Балтийском море. В разделе 3.1 рассматривается метод расчёта расхода воды через произвольно заданное вертикальное сечение. Чтобы исследовать структуру, характер и величину горизонтального водообмена внутри бассейна, анализировались временные серии (с шагом 90 с в течение года) величин горизонтального объёмного расхода через вертикальные сечения (по отдельности в прямом и обратном направлении), располагавшиеся в различных районах

моря. Эти сечения захватывали всю глубину водоёма (от поверхности до дна, без деления на слои), начинаясь и заканчиваясь в произвольных, задаваемых из физических соображений точках. Основным критерием выбора границ сечений было соответствие геоморфологическим особенностям поля глубин Балтийского моря. На рис.4 в качестве примера показаны сечения (1) от береговой линии до некоторой произвольной глубины H , (2) между точками с максимальным градиентом уклона дна по обе стороны глубоководной впадины, (3) сечение в произвольном месте водоёма. За время расчёта, через всё поперечное сечение *по нормали* к нему проходит интегральный объёмный расход вод Q ($\text{м}^3/\text{с}$). Поскольку форма Балтийского моря значительно вытянута по меридиану, оказалось удобным характеризовать обмен в меридиональном (в целом) и в широтном (в целом) направлении, что охватывает диапазон направлений вдоль и поперёк основной оси моря, соответственно (рис. 5).

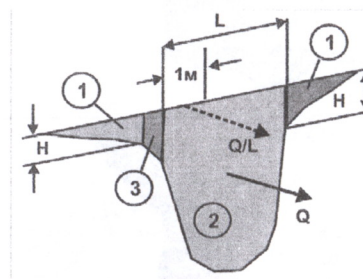


Рис.4. Примеры вертикальных сечений: 1) от берега до глубины H ; 2) над впадинами; 3) в произвольном месте. Вычисляются объёмный расход вод (Q , $\text{м}^3/\text{с}$) и удельный объёмный расход вод (Q/L , $(\text{м}^3/\text{с})/\text{м}$).

В разделе 3.2 проводится районирование Балтийского моря по величинам горизонтального расхода вод на единицу длины сечения (удельный расход), в процентном отношении к единице нормировки. За единицу нормировки (или 100%) принят максимальный среднегодовой удельный расход, отмеченный в Слупском жёлобе: 0.046 ($\text{км}^3/\text{год})/\text{м}$), что соответствует ~ 1.4 ($\text{м}^3/\text{с})/\text{м}$. В общей картине выделено 7 районов с различной интенсивностью горизонтального обмена: район №1 - с удельным расходом 75-100 % от максимального; № 2 – 55-74%; № 3 – 45-54%; № 4 – 31-44%; № 5 – 21-30%; № 6 – 11-20%; и № 7 – меньше 10%. Результаты анализа величин удельного расхода вод за год через 70 вертикальных сечений, проведенных в различных районах моря согласно особенностям геоморфологической структуры, показан на рис.5: верхние рисунки (а, б) характеризуют перенос (преимущественно) меридиональном направлении, нижние (в, г) – в (преимущественно) широтном; диапазон направлений нормалей к соответствующим сечениям указан в поле каждого рисунка. Наиболее интенсивный горизонтальный перенос вод наблюдается в районах расположения

впадин и желобов в собственно Балтийском море, с наибольшими среднегодовыми величинами расхода до $0.046 \text{ (км}^3/\text{год)/м}$ (или $\sim 1.4 \text{ (м}^3/\text{с)/м}$).

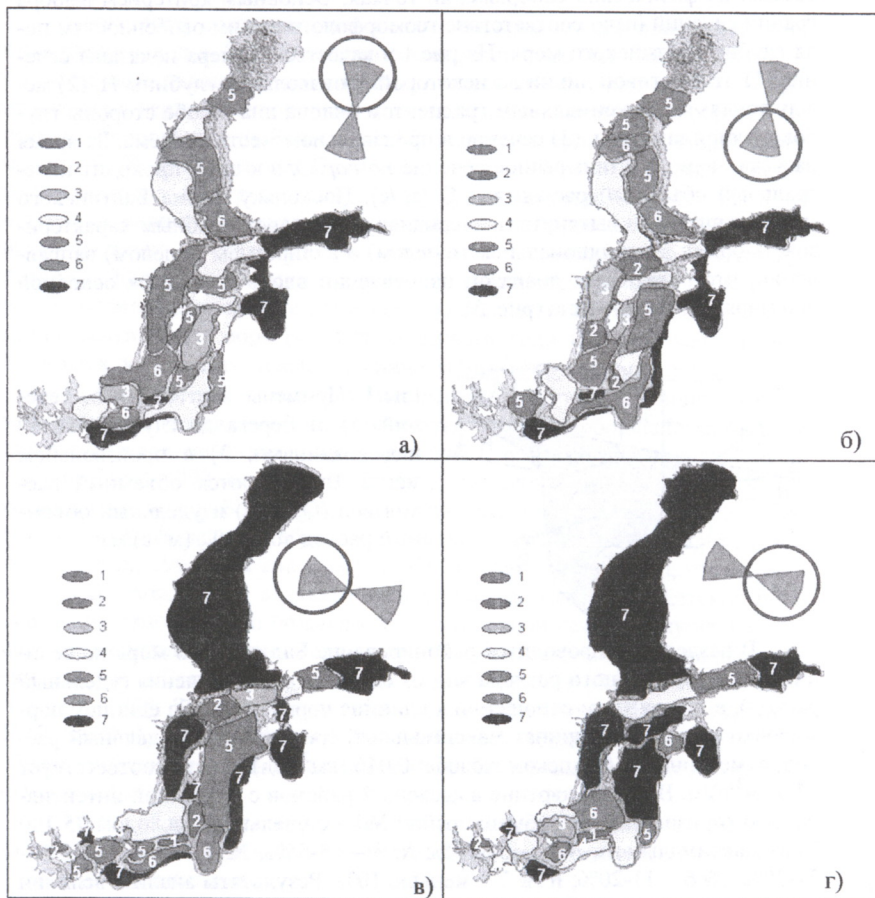


Рис.5. Районирование Балтики по интенсивности расходов, в процентном отношении к максимальному расходу на единицу длины - в Слупском жёлобе $0.046 \text{ (км}^3/\text{год)/м}$.

В абсолютных величинах, в наиболее глубоких местах – над желобами и основными впадинами моря, выделяющимися как области между линиями

максимального градиента глубин по обе стороны – расходы составляют $600\text{--}1500 \text{ (км}^3/\text{год)}$, что в разы превышает среднегодовой сток рек в Балтику ($\sim 450 \text{ км}^3/\text{год}$); вдольбереговой транспорт (через сечения от берега до свала глубин) имеет порядок $200\text{--}800 \text{ (км}^3/\text{год)}$.

Комплекс сечений от берега до берега и вдоль осей основных впадин позволил выявить основные черты общего переноса вод в центральной части Балтики. В частности получено (рис. 6), что суммарно поперёк Готландского бассейна транспорт составляет около $1000\text{--}1300 \text{ (км}^3/\text{год)}$, Борнхольмского – $1000\text{--}1200 \text{ (км}^3/\text{год)}$, транспорт с востока на запад над Готландской впадиной составляет $1400 \text{ км}^3/\text{год}$, через Среднюю банку – $1210 \text{ км}^3/\text{год}$. Все эти величины существенно превышают среднегодовой сток рек и обмен в Северном морем. Обмен в поперечном (по отношению к главной оси моря) направлении не менее активен, чем в продольном (рис.6).

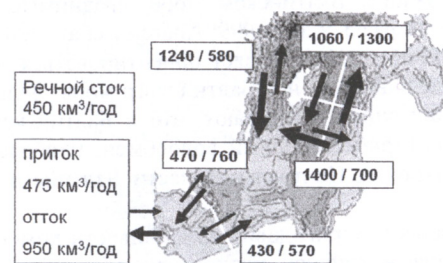


Рис.6. Компоненты переноса вод в центральной части Балтийского моря ($\text{км}^3/\text{год}$).

Проведена оценка времени обновления вод в различных частях моря через величину горизонтального расхода, которое рассчитывается по формуле

$$\tau = V/Q_+$$

где τ – время обновления вод адвекцией (год);
 V – объём вод суббассейна (км^3);
 Q_+ – адвекционный приток вод в суббассейн ($\text{км}^3/\text{год}$).

На рис.7 схематично представлены составляющие водообмена: Q_+ – адвективный приток вод; Q_- – адвективный отток вод; Q_r – речной сток вод в суббассейн. При вычислении времени обновления используется только компонента Q_+ , т.к. для суббассейнов в модели корректно выполняется водный баланс ($Q_+ + Q_r - Q_- = \Delta Q$), что следует из оценки численных значений составляющих (ΔQ - невязка из-за возможного изменения уровня воды - составляет 5-7 %).

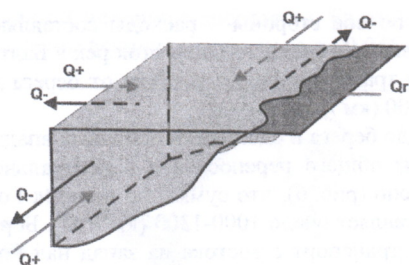


Рис.7. Составляющие водообмена для суббассейна: Q_+ – адвективный приток вод в суббассейн; Q_- – адвективный отток вод; Q_r – речной сток.

Рассчитаны площади, средние глубины, объёмы вод суббассейнов, проведен

сравнительный анализ полученных величин с данными других источников (Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР, 1992; Атлас океанов, 1980; Залогин, Косарев, 1999; Проект "Балтика", 1983).

Расчёты на базе МИКЕЗ дают величины времени обновления вод в Ботническом заливе, Финском заливе, Балтийском море, сравнимые с оценками других исследователей (Израэль и др., 1999; Andrejev et al., 2004; Meier, 2005; Myrberg, Andrejev, 2006), что позволяет ориентироваться на полученные значения $\tau_{\text{обв}}$ для отдельных районов Балтийского моря. Величины времени обновления вод адвекцией указывают, что в Балтийском море происходит интенсивный внутриводобменный водообмен, наиболее активный в Южной, Юго-Восточной и Центральной части Балтийского моря.

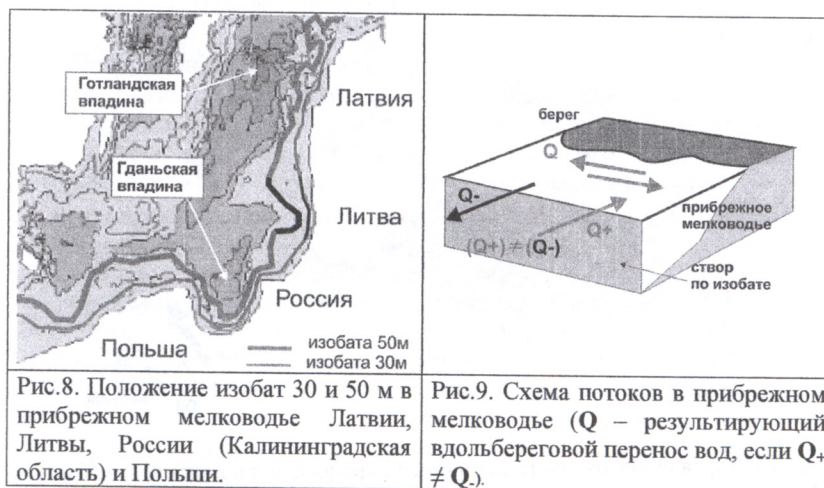
В разделе 3.3 проведен анализ внутриводобменности компонент горизонтального водообмена в районах впадин, желобов, банок, склонов. Расчёты показали, что величина водообмена сильно зависит от сезона, стока рек, ветрового режима: наиболее активный обмен характерен для весны (апрель) и осенне-зимнего периода (с октября по январь). По различным сечениям в открытой части моря, амплитуда внутриводобменных вариаций составляет в среднем 20-60% от соответствующих среднегодовых значений.

В разделе 3.4 анализируются величины компонент горизонтального водообмена в районах внешней части прибрежного мелководья (от 30 м до 50 м) в Восточной и Юго-Восточной Балтике. На рис.8 показаны границы, вдоль которых рассчитывался расход вод в прибрежном мелководье четырех прибалтийских стран. Створы ставились как вдоль берега (по изобате 30 м и 50 м), так и вдоль склона. На рис.9 изображены компоненты водообмена (к берегу Q_+ и от берега Q_-) и схема возникновения вдольберегового потока (Q).

Расчёты показали, что поперёк изобаты 30 м наибольшие удельные объёмные расходы и от берега, и к берегу соответствуют району прибрежного мелководья Литвы, и превышают расходы для районов Польши, Рос-

сии (Калининградская область) и Латвии – в 2-3 раза; результирующий вдольбереговой расход вод почти в 500 раз слабее максимального среднегодового удельного расхода для Балтики ($0.046 \text{ км}^3/\text{год}/\text{м}$). Для створов по изобате 50 м ситуация меняется: наибольшие удельные расходы от берега соответствуют району прибрежного мелководья Латвии, и превышают расходы для районов Польши, России (Калининградская область) и Литвы – в 1.3-2.0 раза; к берегу наибольшие удельные расходы соответствуют району России (Калининградская область), и превышают удельные расходы для районов Польши, Литвы и Латвии в 1.7-4.5 раза. Результирующий вдольбереговой расход вод $Q=Q_+-Q_-$ у российских берегов (от берега до изобаты 50 м) – порядка 10% от максимального удельного расхода в Балтийском море ($0.0035 \text{ км}^3/\text{год}/\text{м}$).

Проводится анализ внутриводобменности удельных расходов в районах прибрежного мелководья в Восточной и Юго-Восточной Балтике (рис.8). Уменьшение расходов от берега (Q/L) происходит в летний период. Для прибрежной зоны России (Калининградская область) проведено сравнение расходов через створы по изобатам 30 м и 50 м. Значения удельных расходов от берега Q/L поперёк изобаты 50 м в среднем (в течение года) в 5 раз больше расходов поперёк изобаты 30 м; замечен сезонный ход удельных расходов с максимумами весной и осенью.



Глава 4 посвящена переносу вод через границы исключительных экономических зон (ИЭЗ) государств в Балтийском море. В разделе 4.1

превосходит) среднегодовой речной сток в Балтику. Наибольший результирующий расход вод через границы исключительных экономических зон соседствующих государств наблюдается из ИЭЗ Польши в ИЭЗ России (Калининградская область) – около 1600 км³/год. Перенос вод в Балтийском море наиболее интенсивно происходит в Юго-Восточной и Центральной Балтике. В результирующем трансграничном переносе вод в этих районах прослеживается общее циклоническое направление. Наиболее интенсивен процесс обновления вод в исключительных экономических зонах Литвы и Германии – около 2 месяцев, а в России (Калининградская область) – около 3 месяцев.

Список публикаций по теме диссертации

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Есюкова Е.Е., Чубаренко И.П. Перенос примеси в результате сезонной горизонтальной конвекции над шельфом (опыт численного моделирования) // Вестник РГУ им. И. Канта. – 2009. – Вып. 1. – С. 46–55.
2. Чубаренко И.П., Есюкова Е.Е. Каскадинг в прибрежной зоне озера при суточных колебаниях условий теплообмена // Естественные и технические науки. – 2008. – № 4. – С. 206–212.

Прочие публикации:

3. Chubarenko I., K.Hutter, E. Esiukova. Impact of the ice formation on seasonal salinity increase in the Vistula // Труды VI Межд. сов. по проекту создания оперативной океанологической модели Балтийского моря высокого разрешения. – СПб., 2004. – С. 58–68.
4. Чубаренко И.П., Есюкова Е.Е. Морфометрические характеристики Вислинской лагуны в зависимости от высоты стояния уровня воды // Инновации в науке и образовании – 2004: мат. II Межд. науч. конф. – Калининград, 2004. – С.74–75.
5. Chubarenko I., E. Esiukova, V. Koutitonsky. Simulation of horizontal convection induced by surface cooling over sea slope // Vol. of abstr. of Baltic Sea Science Congress. – Rostock, 2007. – Part II. – P.26.
6. Esiukova. E. E., I. P. Chubarenko. Simulation of horizontal convection induced by surface cooling over sea slope // Estuarine ecosystems: structure, function and management: abstr. vol. of 42 ECSA Int. Conf. – Kaliningrad-Svetlogorsk, 2007. – P. 33–34.
7. Есюкова Е. Е., Чубаренко И.П. Моделирование распространения примеси в результате сезонной горизонтальной конвекции над прибрежным склоном // Современные методы и средства океанологических исследований: тез. X Межд. науч.-техн. конф. – Москва, 2007. – С. 75–77.

8. Есюкова Е. Е., Чубаренко И.П. Моделирование сезонного горизонтального водообмена над прибрежным склоном // Инновации в науке и образовании – 2007: тез. V Межд. науч. конф. – Калининград, 2007. – Ч. 1. – С. 327–329.
9. Есюкова Е. Е., Чубаренко И.П. Выхолаживание над прибрежным склоном: результаты численного моделирования // Физические проблемы экологии (экологическая физика); под ред. В. И. Трухина и др. – 2007. – № 14. – С. 143–152.
10. Чубаренко Б. В, Есюкова Е. Е. Вероятные сценарии отклика на изменения климата в Юго-Восточной Балтике // Физические проблемы экологии (экологическая физика); под ред. В. И. Трухина и др. – 2008. – № 15. – С. 382–392.
11. Есюкова Е. Е., Чубаренко И.П. Результаты численного моделирования перемешивания и транспорта над прибрежным склоном при сезонном выхолаживании с поверхности // Известия КГТУ. – 2008. – № 13. – С. 51–54.
12. Есюкова Е. Е., Чубаренко И.П. MIKE3-FlowModel для моделирования Балтийского моря // Уч. зап. Рус. геогр. общ. (Калининградское отд.). – 2008. – Т. 7. – Ч. 1. – С. АН1–АН3.
13. Chubarenko I., E. Esiukova, K. Hutter. Littoral-pelagial water exchange due to differential coastal cooling convection // EGU General Assambly 2008: Geoph. Res. Abstr. – 2008. – V. 10. – EGU2008-A-01264.
14. Есюкова Е. Е. Численная модель MIKE3-FlowModel для моделирования Балтийского моря // Инновации в науке и образовании – 2008: тез. VI Межд. науч. конф. – Калининград, 2008. – Ч. 1. – С. 196–198.
15. Чубаренко И.П., Есюкова Е.Е. Численное моделирование каскадинга в прибрежной зоне при суточных колебаниях условий теплообмена // Инновации в науке и образовании – 2008: тез. VI Межд. науч. конф. – Калининград, 2008. – Ч. 1. – С. 217–219.
16. Chubarenko B., E. Esiukova, I. Chubarenko. Expected climate changes in the south-east Baltic // Dynamics of coastal zone of non-tidal seas: abstr. Int. Conf. – Baltiysk, 2008. – P. 181.
17. Чубаренко Б. В., Есюкова Е. Е., Чубаренко И.П. Прогнозируемые условия изменения климата в регионе Юго-Восточной Балтики // Динамика прибрежной зоны бесприливных морей: мат. Межд. конф. (школа-семинар) – Балтийск, Калинингр. обл., 2008. – С. 181–185.
18. Esiukova E. E, I. P. Chubarenko. Horizontal water exchange within the Baltic Sea: results of numerical modeling // The environmental and socioeconomic response in the southern Baltic region: abstr. Int. Conf. on Climate Change. – Szczecin, 2009. – P.74-75.

19. Esiukova E. E., N. Demchenko. The mesoscale and seasonal variability of the intrabasin water exchange in the Baltic Sea // EGU General Assambly 2009: Geoph. Res. Abstr. – 2009. – V. 11. – EGU2009-684.

Есюкова Елена Евгеньевна

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ СТРУКТУРА И ВНУТРИГODOVАЯ
ИЗМЕНЧИВОСТЬ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ВОДООБМЕНА В
БАЛТИЙСКОМ МОРЕ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Подписано в печать 08.05.2009 г.

Бумага для множительных аппаратов. Формат 60×90 1/16
Гарнитура «таймс». Ризограф. Усл. печ. л. 1.5. Уч.-изд. л. 1.2.
Тираж 100 экз. Заказ 116

Издательство Российского государственного университета им. И.Канта
236041, г. Калининград, ул. А.Невского, 14