



Платов Геннадий Алексеевич

**Численное исследование гидродинамических процессов
в крайних морях и в шельфовой зоне**

25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

8 СЕН 2011

Новосибирск – 2011

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Институте вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения РАН

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Ривин Гдалий Симонович

доктор физико-математических наук
Семенов Евгений Васильевич

доктор физико-математических наук
Черных Геннадий Георгиевич

Ведущая организация: Государственное учреждение Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Российской Федерации (Росгидромет)

Защита состоится 5 октября 2011 г. в 15-00 часов на заседании диссертационного совета Д 003.061.01 при Учреждении академии наук Институте вычислительной математики и математической геофизики СО РАН по адресу: 630090, г. Новосибирск, пр. академика Лаврентьева, д.6.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Учреждения академии наук Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН

Автореферат разослан 19 августа 2011г

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физ.-мат. наук



Рогозинский С. В.

Общая характеристика работы

Актуальность исследования

Изучение окраинных морей и шельфовой зоны океанов имеет большое значение в современном мире по нескольким причинам как практического, так и теоретического характера. С практической точки зрения эта часть Мирового океана является главным поставщиком морепродуктов, важной частью транспортных морских путей, все более важным источником ископаемого сырья и местом массового сезонного отдыха людей. Поэтому исследования в этой области способствуют решению таких практических задач, как

1. изучение условий рыбного промысла, путей миграции промысловых видов,
2. изучение условий промышленной добычи ископаемого сырья и топлива,
3. оценка угрозы и последствий экологических катастроф, связанных с авариями транспортных судов и на добывающих платформах,
4. оценка угрозы и последствий природных катаклизмов – цунами, ураганы, наводнения и т.д.

С теоретической же точки зрения исследование окраинных морей и шельфа интересно в плане изучения целого ряда гидродинамических процессов и явлений, присущих этим объектам, среди которых можно выделить: элементы ветровой циркуляции, береговые захваченные волны, струйные течения, апвеллинг и даунвеллинг, сезонные колебания (муссоны), речной сток, образование и таяние льда. Кроме того, зона окраинных морей и шельфа является промежуточной и разделяет два ярко выраженных типа климата: континентальный и морской, и является важным звеном, обеспечивающим их взаимодействие. Особое внимание к шельфу Мирового океана уделяется еще и из-за того, что благодаря процессам, протекающим в шельфовых районах, происходит формирование промежуточных и глубинных вод океана, основных составляющих глобального круговорота, а значит, эти районы играют значительную роль в определении климатических тенденций на планете.

Целями диссертационной работы являются:

1. Изучение процессов, связанных с взаимодействием шельфовой зоны и окраинных морей с открытым океаном, включая формирование промежуточных и придонных вод, волновое взаимодействие, струйные и пограничные течения, глобальный свердруповский перенос.
2. Изучение элементов шельфовой динамики: ветровая циркуляция, струйные течения, апвеллинг и даунвеллинг, береговые захваченные волны, сезонные колебания (муссоны), речной сток, льдообразование и таяние льдов, ветровая полынья.
3. Построение и апробация параметризаций шельфовых процессов для модели крупномасштабной циркуляции океана.
4. Создание региональной модели шельфовой зоны для ее использования в качестве вложенной в крупномасштабную модель океана.

На защиту выносятся:

1. Результаты численного исследования физических механизмов, способствующих формированию промежуточных вод Японского моря и их дальнейшему распространению по акватории, полученные с помощью численной модели циркуляции Японского моря с использованием данных климатического распределения полей температуры и солёности GDEM
2. Результаты изучения отклика системы глубокого океана и шельфовой зоны на прохождение береговой захваченной волны вблизи особенностей береговой линии и рельефа дна.
3. Результаты изучения особенностей приливных движений в районе Большого австралийского залива и малых заливов Южной Австралии и их влияния на характер шельфовой циркуляции в этом регионе.
4. Метод коррекции градиентов давления, позволяющий существенно уменьшить ошибки в определении скоростей шельфовых и склоновых течений в сигма-координатных моделях.
5. Результаты исследования механизмов и особенностей среднетлетней динамики Большого австралийского залива, формирующейся под воздействием преобладающих ветров, способствующих развитию прибрежного апвеллинга.
6. Новый способ учета распространяющихся вдоль побережья береговых захваченных волн для регионального моделирования шельфовой зоны океана.
7. Построенная система вложенных моделей с использованием крупномасштабной совместной модели океана и льда и региональной модели Баренцева и Карского морей, позволившая получить более детальную картину формирования промежуточных и придонных вод и более подробно описать распространение Атлантических вод вдоль шельфового склона европейского сектора Арктики.

Достоверность и обоснованность результатов

Используемые в ходе проводимых исследований подходы основаны на физических законах динамики и термодинамики жидкости во вращающейся системе. Численное моделирование, являющееся необходимым инструментом в изучении процессов и явлений в окраинных морях и шельфовой зоне, базируется на применении известных методов вычислительной математики в соответствии с требованиями выполнения условий аппроксимации и устойчивости численных алгоритмов.

Излагаемые в диссертации результаты находятся в согласии с многочисленными исследованиями, проводимыми в аналогичных областях знания, или являются развитием известных подходов.

Сравнение полученных результатов с данными прямых наблюдений или с результатами анализа таких данных подтверждает адекватность и достоверность результатов численного моделирования. Для сравнительного анализа использовались следующие наборы данных:

1. Набор данных GDEM (Generalized Digital Environmental Model),
2. Национальные таблицы приливов Австралии (Australian National Tide Tables),
3. Климатические данные Левитуса и Боера и PHC,
4. Атлас региональных морей CSIRO (CARS),
5. Данные измерения скорости течения на муринговых платформах A, B, E, F, G и S южной Австралии 1980-1989 г.,
6. Данные возвышения уровенной поверхности и температуры поверхности в австралийских портах – NTF (National Tidal Facility),
7. Данные спутникового альтиметра TOPEX/JASON и ТПО по снимкам AVHRR (ночные и дневные).

Совместная модель циркуляции вод Арктики и Северной Атлантики и льда, разработанная с участием автора диссертации и использованная для исследования окраинных арктических морей, принимает участие в международном проекте сравнения численных моделей океана и льда Арктического бассейна AOMIP (Arctic Ocean Model Intercomparison Project).

Научная повизна

В представляемой работе изучалось два муссонных района. Один из них расположен в районе Большого австралийского залива, где действие сезонных ветров таково, что во время зимы (южного полушария) формируется ситуация, связанная с прибрежным даунвеллингом, летом же формируется противоположная картина с формированием апвеллинга в районе полуострова Эйр, острова Кенгуру и вблизи побережья Роб. Второй район, представленный к рассмотрению, это залив Петра Великого в Японском море, где под действием зимних ветров происходит выхолаживание верхнего слоя с последующей глубокой конвекцией и опусканием плотной воды вдоль материкового склона. В результате этих процессов происходит формирование промежуточных и донных вод Японского моря.

При анализе результатов численного исследования физических механизмов с использованием данных климатического распределения полей температуры и солёности была получена картина формирования и распространения промежуточных вод Японского моря, состоящая из этапа накопления и опускания до соответствующих глубин вод этого типа в районе залива Петра Великого и этапа распространения этих вод в южном направлении в сторону бассейнов Улунг и Ямато, а также на восток в рамках ячейки северного круговорота. В плане верификации результатов численного моделирования, продемонстрирована способность численной модели правильно воспроизводить положение точки отрыва пограничного течения без применения изопокической вязкости и без параметризации топографических вихрей, а благодаря более тонкому локальному применению повышенной вязкости горизонтального потока.

В настоящей работе изучено влияние глобального свердруповского переноса в формировании течения Флиндерса на шельфовом склоне Южной Австралии и показана его тесная взаимосвязь с динамикой австралийского

шельфа, проведена оценка роли приливов в формировании шельфовой динамики в районе Большого австралийского залива, а так же с помощью численного моделирования получена картина основных осцилляций в этом районе.

Для проведения серии экспериментов с береговыми захваченными волнами (БЗВ) создана и апробирована идеализированная модель распространения БЗВ в шельфовой зоне и в примыкающей части открытого океана, позволявшая подробно исследовать влияние особенностей топографии шельфа и береговой линии на обменные процессы между шельфом и открытым океаном при прохождении БЗВ. Благодаря разности скоростей для разных волновых чисел с помощью расщепления волнового пакета по скорости удалось выделить собственные функции БЗВ, соответствующие наиболее быстрой части спектра.

На основе решения уравнения распространения БЗВ предложен способ учета влияния БЗВ, образованной за пределами области моделирования, с помощью задания граничных условий на той части границы области, через которую возможно распространение таких волн. При этом фильтрованная временная изменчивость возвышения уровня поверхности, полученная в результате наблюдений на береговых станциях, используется для модуляции первой моды БЗВ.

Для улучшения описания шельфовых течений был развит новый подход для вычисления корректора горизонтального градиента давления, применимый для моделей океана с вертикальной координатой, трансформированной в соответствии с топографией дна. Подход основан на вертикальной интерполяции самого градиента давления, а не плотности, что в случае слоя скачка становится непригодным. Проведенные тестовые эксперименты показали, что разработанный метод дает более надежные результаты по сравнению с некоторыми другими применяемыми методами.

В данной работе с помощью численного моделирования удалось восстановить картину циркуляции арктических вод. Исследования подтвердили взаимосвязь между характером дрейфа льда и индексом Северо-Атлантической осцилляции атмосферы. Кроме того, на основе результатов моделирования удалось установить наиболее активные районы формирования ветровой полыньи в районе Баренцева и Карского морей.

Была создана и апробирована система вложенных моделей с использованием крупномасштабной совместной модели океана и льда и региональной модели Баренцева и Карского морей. Для обеспечения взаимодействия крупномасштабной и региональной модели был предложен подход, основанный на использовании схемы релаксации второго порядка применительно к полям температуры, солености и компонентам горизонтальной скорости течения.

Для параметризации процесса перемещения плотных придонных вод, образующихся на шельфе Баренцева и Карского морей, в направлении локального наклона дна был предложен к применению метод вытеснения. С помощью этого метода удалось достичь более реалистичной картины формирования промежуточных и придонных вод Северного Ледовитого океана.

Научная и практическая значимость работы

1. На основе диагностических расчетов получена схема циркуляции промежуточных вод Японского моря, которая может быть использована при анализе качественного состава и структуры вод этого региона и развития системы мониторинга.

2. Результаты работы, посвященной изучению режима циркуляции и апвеллинга Большого австралийского залива, использовались в 30 публикациях других авторов, причем работа оказалась востребована среди исследователей биологии и зоологии этого района океана для получения более полной картины гидродинамических процессов.

3. Совместная модель циркуляции вод Арктики и северной Атлантики и льда, разработанная с участием автора диссертации и использованная для исследования окраинных арктических морей, является составной частью международного проекта сравнения численных моделей океана и льда Арктического бассейна АОМIP (Arctic Ocean Model Intercomparison Project). Результаты исследования используются в этом проекте для усовершенствования численных моделей Северного Ледовитого океана.

В ходе работы использовались современные подходы для численного решения задачи моделирования окраинных морей и шельфовой зоны океана. Некоторые подходы для параметризации шельфовых процессов предложены в самой работе и являются новыми. В их числе коррекция численных ошибок в определении горизонтального градиента давления в сигма-координатных моделях, учет удаленного ветрового воздействия с помощью предложенного способа формулировки граничных условий для региональной модели, параметризация процесса движения ядер плотной воды вдоль наклонного дна шельфа. Это составляет практическую и методологическую значимость диссертации.

Основные исследования, проводимые по теме диссертации, выполнялись в соответствии с целями и задачами национальных и международных программ, в том числе ФЦП «Мировой океан» и «Всемирной программы исследования климата».

Диссертационная работа выполнялась в соответствии с планами научно-исследовательских работ Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, а также в соответствии с проектами Российской Академии Наук (проект ОМН РАН 1.3.9) и Президиума РАН (проекты 14.3 и 17.3.6).

Работа поддерживалась грантами Российского фонда фундаментальных исследований (96-05-65953-а, 99-05-64684-а, 03-05-96828-р2003югра_а, 05-05-64990-а, 08-05-00457-а, 08-05-00708-а, 09-05-13526-офи_ц, 11-05-01075-а), грантом Австралийского исследовательского совета (ARC) A39700800, а также финансировалась согласно программе "A Study on the Monitoring of the Global Ocean Variability with ARGO Program" Метеорологическим исследовательским институтом Корейской метеорологической администрации. Часть работ осуществлялись в рамках международного сотрудничества с Матема-

тической школой Университета Нового Южного Уэльса (Австралия, Сидней) и с Чунгнамским национальным университетом (Республика Корея, Тэджон).

Апробация работы

Основные результаты, вошедшие в диссертационную работу, были представлены на российских и международных конференциях и совещаниях:

1. EGU General Assembly 2011, Vienna, Austria;
2. AOMIP Workshop, October 2010, Woods Hole, MA (USA);
3. ENVIROMIS -2010, 5 - 11 июля 2010, Томск, Россия;
4. EGU General Assembly 2010, Vienna, Austria;
5. AOMIP Workshop, October 2009, Woods Hole, MA (USA);
6. CITES 2009, Красноярск, 5 - 15 июля 2009 г.;
7. ГЕО-Сибирь-2009, Новосибирск;
8. PICES 17-th Annual Meeting. Oct. 24 - Nov. 2 2008, Dalian, China;
9. ENVIROMIS -2008, 28 июня -5 июля 2008, Томск, Россия;
10. SCAR/IASC IPY Open Science Conference. St. Petersburg, Russia, July 8 - 11;
11. International Symposium NWP-2008 20-26 July;
12. ММГ-2008, 13-15 октября 2008 г., Академгородок, Новосибирск;
13. PICES 16-th Annual Meeting. Oct. 26 - Nov. 5 2007, Victoria, BC, Canada;
14. 5-th Korean-Russian Symp., 16 November 2007;
15. SEARCH for DAMOCLES Workshop, 29 - 31 October 2007, Paris;
16. CITES"2007, Intern. Conf., 14 - 25 July 2007, Tomsk;
17. 5-th Intern. Symp. "Mathematical modeling of dynamic processes in Atmosphere, Ocean, and Solid Earth" 3-5 July, 2006, Новосибирск;
18. 9-th Workshop AOMIP, Canada, Montreal, June 6-7, 2005;
19. PICES XIV, Vladivostok, October 2005 г.;
20. GLOBEC Symposium on Climate Variability and Sub-Arctic Marine Ecosystems, Canada, Victoria, May 2005;
21. Международный научный конгресс "ГЕО-Сибирь", Новосибирск, 25-29 апреля 2005 г.;
22. 4-th WMO Data Assimilation Symposium, Prague, April 2005;
23. USA/Australia Bilateral Workshop, Port Lincoln, Australia, 1998;
24. Princeton Ocean Model Users Meeting, Miami, EUA, 1998.

Результаты работы обсуждались также на семинарах в Университете Нового Южного Уэльса (г. Сидней, Австралия), в Чунгнамском национальном университете (г. Тэджон, Республика Корея). В полном объеме диссертация докладывалась на семинарах ИВМ РАН, ААНИИ и ИВМиМГ СО РАН.

Личный вклад автора

Диссертационная работа является итогом исследований, проводимых автором с 1997 года в Университете Нового Южного Уэльса (Австралия, Сидней), Чунгнамском национальном университете (Республика Корея, Тэджон) и Институте вычислительной математики и математической геофизики СО РАН (Новосибирск). Некоторые работы проводились накануне этого периода

в Вычислительном Центре СОАН СССР в соавторстве с Лыковым В.Н. и Кузиным В.И. и могут быть рассмотрены, как предварительные [14,15,16,22]. Роль автора в них была не выше 30% и, в основном, сводилась к проведению численных экспериментов и к адаптации параметризаций верхнего однородного слоя океана в крупномасштабную модель ВЦ СО АН СССР.

Непосредственное начало работы над темой представляемой диссертации было положено в сотрудничестве с Дж. Миддлтоном, известным специалистом в области шельфовой и волновой динамики. Предметом сотрудничества являлось изучение динамики течений шельфа Большого австралийского залива и малых заливов Южной Австралии в условиях сезонного преобладания ветров, способствующих апвеллингу. Роль автора заключалась в реализации численных экспериментов, представлении и анализе результатов и планировании последующих исследований. В серии препринтов этого периода [19,20,21] часть работ, посвященных коррекции градиентов давления в сигма-координатных моделях [19], проводилась почти самостоятельно (90%), в работе, связанной с изучением роли приливов, - при ведущем участии автора (60%), в работе посвященной изучению склоновой циркуляции вблизи Бассова пролива, - при участии автора в проведении численных экспериментов и анализе результатов (30%). Результатом совместной работы явилась публикация [13], степень участия автора в которой по языковым причинам можно оценить лишь на 40%. Материалы этого периода сотрудничества составляют основу третьей главы диссертации и части второй главы, посвященной приливам и градиентным течениям.

Последующая работа проводилась в рамках сотрудничества Института вычислительной математики СО РАН и Чунгнамского национального университета (Южная Корея), предметом которого было исследование среднеклиматической картины циркуляции Японского моря. Несколько препринтов, изданных на корейском языке в данной работе не приводятся. Интерес автора в данном случае был связан с изучением формирования и распространения промежуточных вод Японского моря. Результаты были представлены на ряде конференций, в том числе [17], и опубликованы в печати [8] при ведущем участии автора диссертации (80%). Материалы этих исследований легли в основу первой главы диссертации.

Последний этап работы, связанный с исследованием циркуляции вод, льда и примесей в Северном Ледовитом океане и окраинных морях проводился в Институте вычислительной математики и математической геофизики СО РАН совместно с Голубевой Е.Н. и Кузиным В.И. и отражен в ряде совместных публикаций [1, 4, 5, 9, 11, 12], роль автора в которых оценивается на уровне 40-50% и заключается в адаптации модели льда CICE 3.14 к применению в рамках совместной модели и в анализе физической картины результатов, получаемых в ходе численных экспериментов. Выпущен также ряд публикаций в составе большого коллектива авторов [6, 7], в том числе в рамках международного сотрудничества по проекту АОМIP [10]. Наибольший интерес автора вызван процессами в шельфовых зонах и окраинных морях арктического региона, в частности вопрос формирования и распростра-

нения вдоль шельфа вод повышенной плотности и пополнение запаса промежуточных и глубинных вод Северного Ледовитого океана. Последняя серия публикаций, посвященная этим вопросам [2, 3] осуществлена автором самостоятельно и их материалы составили основу четвертой главы диссертации.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, двух приложений, списков авторских публикаций, используемой литературы и принятых сокращений. Общий объем составляет 290 страниц, включая 124 рисунка и 14 таблиц. Список литературы содержит 273 наименования.

Основное содержание работы

Введение

Во введении к диссертации обосновывается актуальность, формулируются основные цели исследования, приводится краткий обзор современного состояния исследований по теме диссертации, перечисляются основные механизмы взаимодействия шельфовой зоны и окраинных морей с открытым океаном.

Глава 1

Первая серия исследований и численных экспериментов направлена на изучение проблемы формирования в шельфовой зоне промежуточных и глубинных типов вод на примере бассейна Японского моря. Японское море содержит в себе основные черты океанической циркуляции, обладая при этом миниатюрными размерами. Это позволяет более подробно с высоким пространственным разрешением исследовать многие проблемы, присущие океаническим системам.

Во введении главы (раздел 1.1) рассмотрены основные особенности циркуляции Японского моря, известные по данным наблюдений и по результатам многочисленных исследований, на основании которых в качестве вопросов для более детального изучения высвечены следующие:

1. Сезонные вариации, вызванные изменчивостью поля ветра и межсезонной изменчивостью расходов проливов, соединяющих Японское море с Тихим океаном;
2. Формирование пояса солёности, его происхождение и динамика;
3. Промежуточные воды Японского моря, их динамика и зависимость от сезонных вариаций.

Предварительный анализ водных масс Японского моря проведен в *разделе 1.2* на основе полей климатических данных GDEM по температуре и солёности воды. Эти данные представляют собой двенадцать трехмерных массивов, осредненных по месяцам, как для температуры, так и для солёности,

первоначальным источником которых является архив MOODS, включающий более 7 миллионов наблюдений.

Согласно этим данным, основную часть водных масс Японского моря составляют глубинные воды, имеющие почти однородную структуру с температурой ниже 1°C. Верхняя часть этих вод наиболее подвержена сезонным изменениям. Помимо поверхностных вод, непосредственно контактирующих с атмосферным воздухом, выделяются также промежуточные воды с пониженной и повышенной соленостью.

Характеристика промежуточных вод пониженной солености ПВЯМ (промежуточные воды Японского моря) рассмотрена в *разделе 1.3*. Их температура находится в диапазоне 0,6-1,6°C и соленость ниже 34,06‰. Построив распределение толщины слоя вод этого типа по данным GDEM, можно определить их локализацию в разные периоды года. На основе такого анализа было установлено, что областью формирования ПВЯМ является окрестность залива Петра Великого, где под действием сезонной конвекции образуется слой вод, соответствующих характеристикам ПВЯМ от поверхности до 600 м. С сентября по март воды этого типа отмечаются в бассейне Ямато, образуя непрерывный пояс, вытянутый в юго-восточном направлении от залива Петра Великого до Японского побережья. С февраля по май формируется аналогичный пояс в южном направлении в сторону бассейна Улунг. Летом формируется пояс, расположенный вдоль субполярного фронта и ориентированный в восточном направлении от залива Петра Великого до острова Хоккайдо. Таким образом, помимо южного направления, впервые обнаружено в работах Судо (1986) и Сендзю и Судо (1993), можно выделить еще юго-восточное и восточное. На вертикальных сечениях видно, что в сторону бассейна Ямато распространение происходит в слое около 500 м, а в восточном направлении эти воды распространяются в приповерхностном слое.

Однако факт распространения не может быть установлен только с помощью данных по температуре и солености. Для выявления динамики движения вод была построена численная модель Японского моря, описанная в *разделе 1.4*. В качестве основы использовалась z-уровневая версия численной модели динамики океана, разработанная в Институте вычислительной математики и математической геофизики СО РАН. Основные принципы построения модели описаны в работах Кузина (1985), Голубевой и др. (1992), Кузина и др. (1997) и Голубевой (2001). Модель записана в сферической системе координат с использованием приближений гидростатики, Буссинеска и «твердой крышки». Система уравнений движения решается на основе выделения бароклинной и баротропной составляющей. Система уравнений для баротропной компоненты приводится к уравнению на функцию тока. Трехмерные уравнения для бароклинных компонент скорости, а также уравнения переноса тепла и соли последовательно расщепляются по пространственным переменным.

В качестве метода дискретизации используется метод конечных элементов с кусочно-линейными пробными функциями. Для аппроксимации временного слагаемого используется метод концентрации масс («lumping»). Для

подавления двухшаговой волны, присущей схемам метода конечных элементов, при аппроксимации адвективных слагаемых используются схемы типа направленных разностей с дозированной схемной вязкостью. Параметризация конвективного перемешивания производится на основе использования критерия Ричардсона.

Горизонтальное разрешение модели составляет около 5 км, шаг по времени 1 час. Горизонтальная вязкость параметризуется по Смагоринскому с минимальным значением коэффициента вязкости равным $5 \text{ м}^2/\text{с}$.

Одним из основных внешних воздействий являються проливы, соединяющие Японское море с Тихим океаном. Временная изменчивость расходов в этих проливах определяется в виде:

$$\text{Tr}(t) = \overline{\text{Tr}} + \delta \text{Tr} \cdot \cos\left(\frac{2\pi(t - t_0)}{t_{\text{год}}}\right),$$

где Tr – результирующий расход, $\overline{\text{Tr}}$ – его среднегодовое значение, δTr – амплитуда его сезонной изменчивости, t_0 – время максимального расхода, $t_{\text{год}}$ – временная протяженность одного года. Параметры расходов взяты согласно данным Исобе (1994) и представлены в таблице:

Пролив	$\overline{\text{Tr}}$, Св	δTr , Св	t_0 , день
Корейский пролив (запад)	1.28	0.65	315
Корейский пролив (восток)	0.72	0.30	135
Сангарский пролив	-1.26	0.10	330

Корейский пролив разделен на восточную и западную протоки, расход Татарского пролива считается нулевым, а расход пролива Лаперуза вычисляется из условия нулевого значения суммарного расхода.

Поле напряжения трения ветра на поверхности (данные На и Сео (1998)) имеет ярко выраженный муссонный характер с максимальными ветрами в зимнее время, дующими с континента в юго-восточном направлении, и на порядок меньшими летними ветрами. Наиболее сильный зимний ветер имеет место вблизи топографического минимума в окрестности Владивостока. В среднем, завихренность поля ветра к северу от субполярного фронта положительна, а к югу от него отрицательна. Максимальная циклоническая завихренность имеет место к юго-востоку от залива Петра Великого. Потоки тепла и соли в модели определяются в результате действия процедуры усвоения данных GDEM, суть которой состоит в том, что верхние 500 м испытывают релаксацию в сторону предписанных значений T^* , взятых с упреждением по времени τ , согласно

$$\left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)_{\text{релакс}} = \frac{1}{\tau} (T^*(t + \tau) - T),$$

где характерное время релаксации бралось, согласно Холланд и Маланотте-Риццоли (1989), равным 37 дням, а временная изменчивость T^* бралась как

результат усиления изменчивости данных GDEM с коэффициентом усиления $r = 1.25$:

$$T^*(t) = \overline{T_{\text{GDEM}}} + r(T_{\text{GDEM}}(t) - \overline{T_{\text{GDEM}}}).$$

В тех случаях, когда параметризация Смагоринского приводила к большим значениям коэффициента вязкости, производилась дополнительная локальная фильтрация результирующих полей решения по пространству по схеме Шапиро.

Интегрирование модели осуществлялось в два этапа. Первый этап заключался в установлении полей скорости течений при заданном временном ходе температуры и солёности из GDEM. Продолжительность этого периода определялась получением устойчивого сезонного хода. Для формирования квазистационарного сезонного хода достаточно 2 года интегрирования модели. На втором этапе температура и солёность также становятся прогностическими переменными с учетом описанной выше релаксации в верхнем 500-метровом слое.

Результаты второго этапа описаны в *разделе 1.5*. Общая картина циркуляции Японского моря состоит из северной и южной ячеек циркуляции, разделенных между собой субполярным фронтом. Северная ячейка включает в себя Лиманское и Северо-корейское течения, южная – Восточно-корейское и Прибрежное течения. Учет сезонных особенностей поля ветра и расходов течений через проливы приводит к различиям в интенсивности циркуляции вод. Зимняя циркуляция более интенсивна, чем летняя. Так, зимой расход Восточно-корейского течения составляет 6 Св против 4 Св в летнее время. Кроме того, в зимнее время субполярный фронт наиболее ярко выражен и содержит множество меандров и мезомасштабных вихрей в районе отрыва Восточно-корейского течения и в районе Сангарского пролива.

Увеличение расхода через Корейский пролив в период с мая по ноябрь, притом, что расход Сангарского пролива остается примерно постоянным, приводит к тому, что часть Цусимских вод, достигнув вместе с течением субполярного фронта побережья Японии, устремляется на север в сторону пролива Лаперуза и формирует северную ветвь Цусимских вод (СВЦВ). Таким образом, Цусимские воды оказываются вовлеченными в северный круговорот. В октябре СВЦВ достигает широты 47°N , что приводит к повышению солёности в этом регионе. Этот факт, полученный в результате моделирования, подтверждается измерениями, проводимыми на буйковых станциях (поплавках) ARGO. Дальнейшая траектория движения вод СВЦВ проходит вдоль границы шельфа Приморья в юго-западном направлении под действием экмановской составляющей локального ветра. Кроме того, с приближением зимы развивается вдольбереговая компонента поля ветра, приводящая к развитию даунвеллинга. В результате, более холодные и распресненные шельфовые воды и воды Лиманского течения подтекают под воды СВЦВ, и, вследствие возникающей конвективной неустойчивости, перемешиваются с ними. Это приводит к тому, что более теплые и соленые Цусимские воды охлаждаются и теряют свою солёность, опускаясь при этом на глубины до 200м.

В ноябре-декабре количество Цусимских вод, вовлеченных в северный круговорот, оказывается достаточным для формирования пояса соленой воды расположенного на расстоянии около 100 км вдоль приморского побережья России. Ближе к берегу расположен пояс холодных и распресненных вод Лиманского течения, а на расстоянии более 200 км расположен пояс вод промежуточной солености, распространяющихся с северной частью течения субполярного фронта на восток.

Согласно результатам расчета, за зиму в районе залива Петра Великого запас воды с характеристиками, соответствующими ПВЯМ, возрастает на 12 тыс. км³, в то время как через границу этой области (в основном с востока) поступает лишь 2.3 тыс. км³. Таким образом, около 10 тыс. км³ промежуточных вод формируется в этом районе из компонент, отличающихся по характеристикам от ПВЯМ. Таковыми являются воды двух поясов солености, перемещающиеся в направлении залива: воды СВЦВ и воды Лиманского течения. Поступление этих вод в окрестность залива Петра Великого, сопровождающееся усилением зимней конвекции, приводит к формированию здесь вод с характеристиками ПВЯМ. Сильный субполярный фронт, а также циклонический круговорот, развивающийся к востоку от места вторжения континентальных воздушных масс через топографический проем в районе Владивостока, приводят к тому, что воды типа ПВЯМ удерживаются в этом районе, а вследствие зимней конвекции толщина слоя этих вод увеличивается. Таким образом, происходит аккумуляция ПВЯМ. Весной, с ослаблением удерживающих факторов, эти воды начинают свое распространение в нескольких направлениях. В феврале-марте начинается их вторжение на глубине 200-300 м в сторону бассейна Улунг. Летом часть этих вод, расположенная ближе к поверхности, захватывается течением субполярного фронта и переносится на восток в рамках ячейки северного круговорота. Самая же глубокая часть этих вод в слое 300-600 м, медленно перемещается вдоль изобат поднятия Ямато и к осени оказывается смещенной на юго-восток в сторону бассейна Ямато.

В последнем *разделе 1.6* главы формулируются выводы, основанные на результатах моделирования и анализа данных.

Таким образом, в результате численного моделирования получено подтверждение образования соленостного пояса вдоль российского побережья и формирования промежуточных вод в районе залива Петра Великого. Процесс формирования промежуточных вод Японского моря можно подразделить на два характерных этапа. Первый заключается в накоплении значительного запаса воды со свойствами близкими к типу промежуточных вод в окрестности залива Петра Великого и в проникновении этих вод в промежуточные слои вследствие развития глубокой конвекции в период зимнего муссона. На втором этапе, при одновременном ослаблении субполярного фронта, происходит дальнейшее распространение сформированных вод на юг в направлении бассейнов Улунг и Ямато, а также их рециркуляция в рамках северного круговорота.

Глава 2

Во второй главе диссертации изучаются особенности формирования шельфовой циркуляции в условиях достаточно широкого шельфа под действием муссонного ветра, способствующего развитию прибрежного апвеллинга. В ходе целого ряда предварительных тестов выявлялись: а) особенности распространения береговых захваченных волн (БЗВ) в случае различного рода неоднородностей береговой линии или рельефа самого шельфа; б) характерные особенности распространения приливных волн в регионе малых островов Южной Австралии; в) градиентные течения вдоль границы шельфовой зоны.

В *разделе 2.1* рассматривается роль береговых захваченных волн в формировании циркуляции на материковом склоне. В начале этого раздела интегрируются уравнения мелкой воды при условии однородного вдоль береговой линии рельефа и под действием вариаций атмосферного давления с масштабами, намного превосходящими ширину шельфовой зоны. Следуя рассуждениям Гилла и Шуманна (1974) выводится уравнение для функции тока ψ в виде

$$\frac{\partial^2}{\partial y \partial t} \left(\frac{1}{H} \frac{\partial \psi}{\partial y} \right) - \frac{f}{H^2} \frac{dH}{dy} \frac{\partial \psi}{\partial x} = \frac{dH}{dy} \frac{\tau_x}{\rho_0 H^2}$$

с граничными условиями $\psi(y=0) = 0$ и $\psi'(y=\infty) = 0$, где x, y – пространственные координаты вдоль берега и перпендикулярно к нему ($y=0$ соответствует береговой линии), $H = H(y)$ – глубина бассейна, f – параметр Кориолиса, τ_x / ρ_0 – удельное напряжение трения ветра вдоль оси X . Решение соответствующего однородного уравнения можно получить методом разделения переменных $\psi(x, y, t) = \phi(x, t)F(y)$, где $F(y)$ – является собственной функцией оператора

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d}{dy} \left(\frac{1}{H} \frac{dF}{dy} \right) + \frac{f}{cH^2} \frac{dH}{dy} F = 0 \\ F(0) = 0 \\ F'(\infty) = 0 \end{array} \right.$$

с собственным числом $\lambda = c^{-1}$. При этом $\phi(x, t)$ подчиняется волновому уравнению

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + c \frac{\partial \phi}{\partial x} = 0,$$

а c является скоростью распространения волны. Таким образом, решение неоднородного уравнения может быть представлено в виде ряда $\psi(x, y, t) = \sum_n \phi_n(x, t)F_n(y)$. Так как большая часть энергии БЗВ содержится в первой моде, решение с некоторой точностью может быть приближено первым слагаемым суммы $\psi(x, y, t) = \phi_1(x, t)F_1(y)$. Это означает, что если колебания береговой волны $\phi_0(t)$ известно в некоторой точке $(x_0, 0)$, расположенной на берегу, то отклонения вдоль всей оси Y могут быть представлены в виде

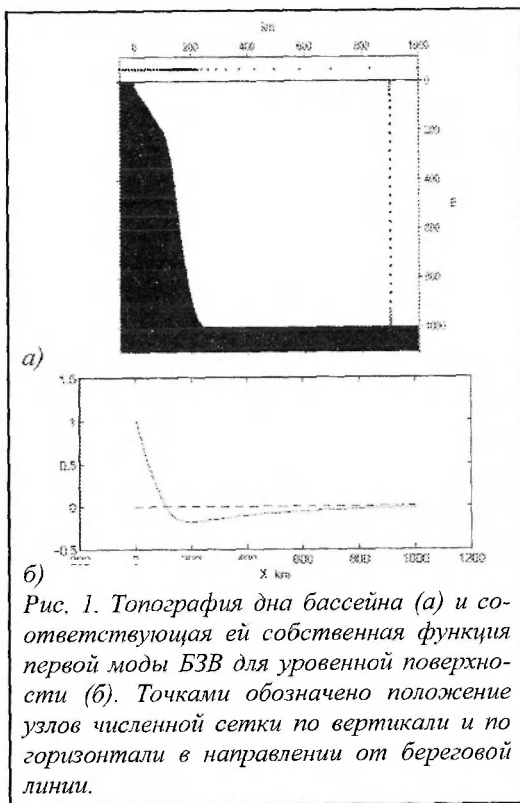


Рис. 1. Топография дна бассейна (а) и соответствующая ей собственная функция первой моды БЗВ для урвненной поверхности (б). Точками обозначено положение узлов численной сетки по вертикали и по горизонтали в направлении от береговой линии.

$$\psi_0(y, t) = \phi_0(t)F_1(y). \quad (1)$$

Это соотношение может быть использовано для задания граничного условия для БЗВ.

Если, взяв некоторую численную модель, допускающую распространение поверхностных волн, задать некоторый ветровой импульс, то в качестве решения возникает цуг береговых волн. Наиболее быстрая и энергоемкая часть цуга соответствует распространению первой моды БЗВ. Следуя этой идее, на основе Принстонской океанической модели была выделена первая мода БЗВ, соответствующая определенному рельефу дна $H = H(y)$ (см. рис. 1).

При задании граничного условия со стороны распространения береговой волны в виде (1) был проведен целый ряд численных экспериментов,

связанных с набеганием волны на различные неоднородности береговой линии и рельефа. При прохождении БЗВ через некоторый участок шельфа происходит ряд энергетических переходов между кинетической и потенциальной формами энергии волны. При этом кинетическая энергия может перераспределяться между шельфом и глубоководной частью, потенциальная энергия также имеет две компоненты, связанные с изменением урвненной поверхности и с подъемом глубинных и опусканием шельфовых вод. В случае однородного распределения большая часть энергии БЗВ является кинетической. Если участок береговой линии является невозмущенным и начальный уровень потенциальной энергии принять за нулевой, то после прохождения волны потенциальная энергия возвращается к нулевому уровню. Однако, как оказалось, в случае возмущений в виде «утеса» и «каньона» (рис. 2а,б) сохраняется остаточное возмущение потенциальной энергии внутренних перемещений. В частности, на шельфе формируются долгоживущие аномалии поднятой с глубины в результате прохождения БЗВ плотной воды (рис. 2в,г).

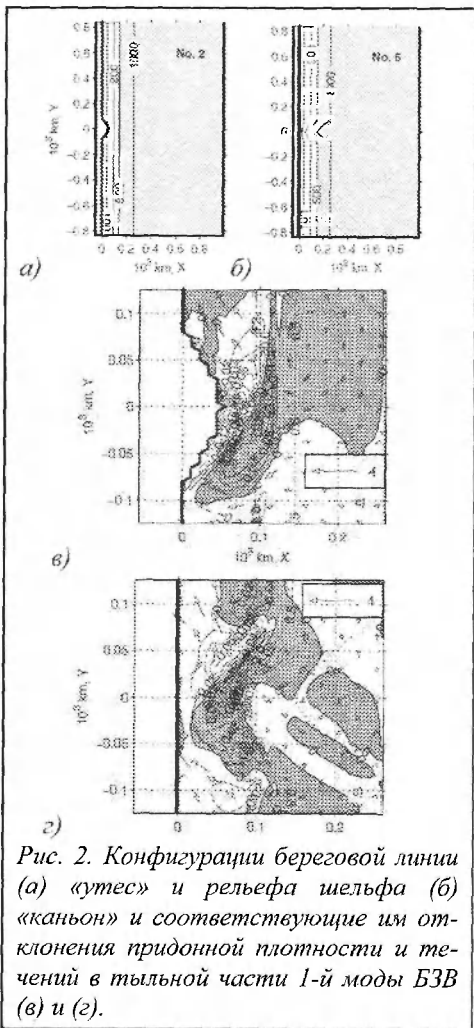


Рис. 2. Конфигурации береговой линии (а) «утес» и рельефа шельфа (б) «каньон» и соответствующие им отклонения придонной плотности и течений в тыльной части 1-й моды БЗВ (в) и (г).

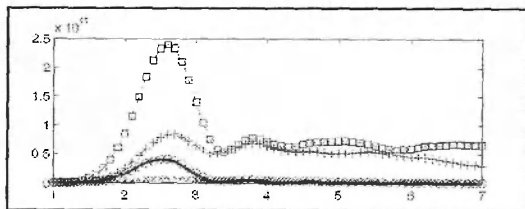


Рис. 3. Изменения внутренней потенциальной энергии при прохождении БЗВ: «+» и «□» соответствуют конфигурациям «утес» и «каньон».

В этих случаях начальное возмущение потенциальной энергии (рис. 3), связанное с прохождением волны, в несколько раз превосходит начальное возмущение в случае отсутствия геометрических неоднородностей (сплошная линия) и даже остаточное возмущение остается на уровне начального в случае их отсутствия.

То есть, при определенной конфигурации береговой линии и рельефа распространяющаяся волна способна реализовать часть своей энергии на формирование аномалий плотности на шельфе путем подъема промежуточных вод из примыкающих к шельфовой зоне районов открытого океана. Естественно, что при этом часть шельфовых вод формирует противоположные аномалии в открытом океане.

Таким образом, береговые захваченные волны являются переносчиком ветровой энергии из районов действия ветра в другие прибрежные районы, где она может реализоваться посредством формирования аномалий плотности в другие виды движения.

Другой особенностью является то, что при прохождении волны происходит перемещение вод в направлении выпуклости изобат, что вызывает со-

ответствующее поднятие или опускание вод с возникновением аномалий плотности, которые не исчезают после прохождения волны.

В *разделе 2.2* изучается отклик баротропной циркуляции на воздействия приливных волн M_2 , S_2 , K_1 и O_1 в районе малых заливов Южной Австралии. Учет приливных движений в циркуляционных моделях может проявляться через придонное трение, которое вычисляется согласно

$$\tau_{\text{дно}} = C_D \sqrt{\|\mathbf{u}\|^2 + \|\mathbf{u}_n\|^2} \cdot \mathbf{u},$$

где \mathbf{u} – скорость регулярных течений, а \mathbf{u}_n – приливных.

Принстонская океаническая модель, конфигурированная для окрестности южного берега Австралии, включающей Большой австралийский залив, малые заливы Южной Австралии и Бассов пролив. Для возбуждения указанных волн использовалась модель Эгберта и др. (1994), основанная на ассимиляции спутниковых наблюдений уровня. Такие данные дают хорошую точность для глубокого океана (более 1000 м) и малоприспособны для шельфа. Таким образом, циркуляционная модель играет роль экстраполянта имеющихся данных в окраинной и шельфовой зоне. Показано, что, если данные Эгберта и др. (1994) использовать везде в области численного решения модели, где глубина превосходит 1000 м, то результаты в шельфовой зоне оказываются более реалистичными по сравнению с тем, когда эти данные задаются только как граничные условия. Сравнение этих двух подходов проводилось по амплитуде и фазе приливных волн в основных портах южного берега Австралии, где проводятся регулярные измерения.

В диссертации показано, что фаза и усиление амплитуды волны для района заливов Южной Австралии, в основном, правильно описываются моделью для четырёх главных компонент приливов (M_2 , S_2 , K_1 и O_1) и являются продуктом четверть-волнового резонанса. Установлено, что придонное трение может являться причиной задержки волны при её движении вдоль залива Спенсер на 4-6 часов. В районе материкового шельфа к западу от заливов изменчивость уровневой поверхности получилась относительно малой. Тем не менее, к югу от острова Кенгуру и близ Роб составляющие K_1 и O_1 проявляют изменчивость течения порядка 5-8 см/с на глубинах от 100 до 1000 метров. Оба района являются районами сильного апвеллинга, что требует дальнейшего изучения влияния приливных движений на это явление.

Наиболее пригодным инструментом при моделировании шельфовой динамики являются сигма-координатные модели. Системы координат, следующие топологии дна, позволяют добиться лучшего разрешения при описании верхнего и нижнего пограничных слоёв одновременно. К сожалению, одним из наиболее существенных недостатков данного подхода является плохая аппроксимация горизонтальных градиентов в районах с резким изменением глубины океана, например, на крутых шельфовых склонах. Развитие точных и эффективных численных методов можно разделить на четыре направления: методы вертикальной интерполяции (возврат к z -системе координат), выделение горизонтально-однородной составляющей, более высокий порядок аппроксимации численных схем и сохранение интегральных характеристик. В

разделе 2.3 представлен алгоритм, относящийся к первому направлению. Для нахождения градиента давления в точке, с помощью вертикальной интерполяции в соседних по горизонтали узлах находится давление на глубине этой точки, после чего градиент вычисляется по разностной схеме. Особенностью предложенного метода является то, что вблизи склона вместо интерполяции давления применяется интерполяция его градиента, что позволяет добиться более правильного описания течений при наличии вертикального скачка плотности.

Этот алгоритм использовался в дальнейшем при исследовании динамики южно-австралийского шельфа и шельфовых морей Арктики.

Глава 3

В *разделе 3.1* представляются результаты применения высокоразрешающей численной модели, использовавшейся для изучения физики и циркуляции вод на шельфе южной Австралии под воздействием средне-летнего ветра. Положительная завихренность среднего ветра приводит к глубоководному экваториальному свердруповскому переносу, течению Флиндерса и апвеллингу постоянного термоклина. Завихренность поля ветра приводит также к формированию топографического переноса в направлении от берега вдоль широкого склона залива, который компенсируется течением вдоль восточного берега залива, и, в конечном счете, приводит к формированию антициклонического круговорота внутри залива (Herzfeld, Tomczak, 1999). Как видно из

рисунка 4, обе эти черты циркуляции успешно воспроизводятся в ходе численного моделирования. При натекании глобального свердруповского переноса на материковый склон происходит подъем изопикн и формируется максимум уральной поверхности, отмеченный на рисунке буквами «А.Н.». Опускание изопикн в верхнем 400 м слое на границе шельфа является последствием зимнего даунвеллинга и подробно изучено Миддлтоном и Сирано (2002). В результате конвергенции глобального переноса с топографическим происходит формирование узкой направленной на восток струи, вследствие чего формируется углубление уральной поверхности в виде желоба, следующего вдоль границы шельфовой зоны. Изучение совместного эффекта бароклинности и рельефа (СЭБИР) показало, что топографический перенос уменьшается

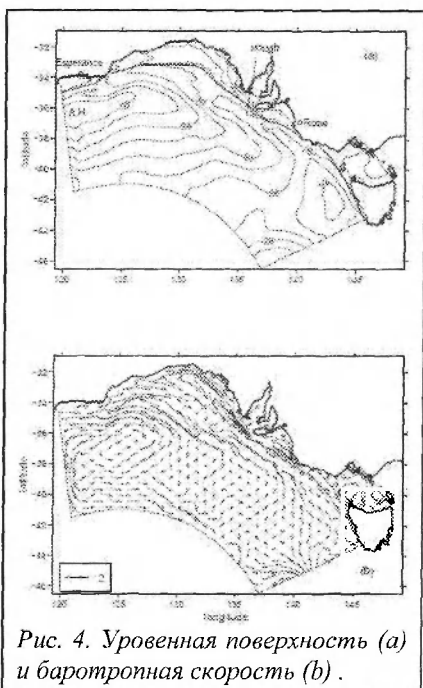


Рис. 4. Уральной поверхность (а) и баротропная скорость (b).

благодаря этому эффекту примерно на треть.

Целью эксперимента, рассмотренного в *разделе 3.2*, является воспроизведение картины апвеллинга у берегов Южной Австралии, но, в отличие от предыдущего раздела, не как результат воздействия среднеклиматического форсинга, а в результате применения реального форсинга, полученного с помощью данных реанализа локальной прогностической системы Австралии (LAPS). Применение граничного условия (1), позволяющего учесть удаленное ветровое воздействие на формирование БЗВ региона, способствовало улучшению качества восстановления волновой динамики, показав минимальные различия уровней поверхности в сравнении с данными измерений в основных портах южного берега Австралии. Анализ движения глубинных вод в ходе развития апвеллинга показывает (рис. 5), что наиболее активное выдвигание холодных вод из-за границ шельфа происходит к западу от острова Кенгуру и вместе с придонными течениями продолжается далее на северо-восток в сторону малых заливов Южной Австралии и на северо-запад в сторону Большого австралийского залива. В целом отмечается, что использование реального форсинга, позволило получить более развитый апвеллинг по сравнению с климатическим форсингом, что указывает на необходимость привлечения высокочастотной изменчивости атмосферного воздействия.

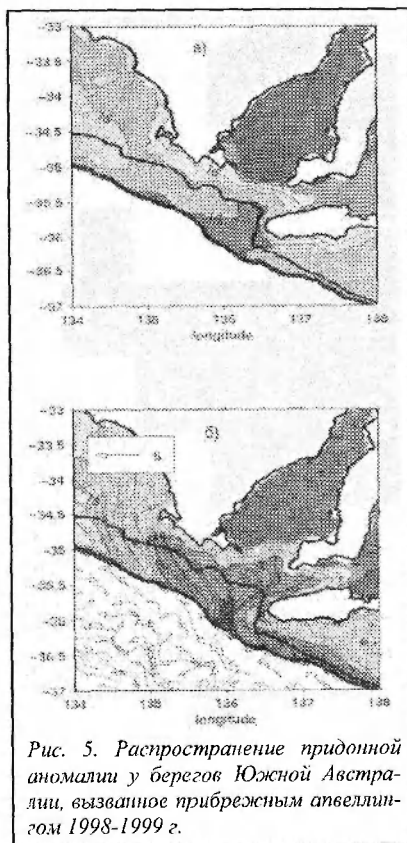


Рис. 5. Распространение придонной аномалии у берегов Южной Австралии, вызванное прибрежным апвеллингом 1998-1999 г.

Глава 4

На последнем этапе представляемых исследований рассматривается роль шельфовой динамики в процессе формирования общей циркуляции водных масс в Арктическом бассейне. Во вводной части главы отмечается, что Арктика является неотъемлемым звеном глобальной системы океанической циркуляции (конвейерного пояса) и играет роль глобальной тепловой машины. Через пролив Фрама и через Баренцево море сюда поступают теплые воды с повышенной соленостью из Северной Атлантики, которые в арктических условиях охлаждаются и распресняются. В результате, воды, поступающие из Арктики, отличаются высокой плотностью и низкой температурой. Воды с такими свойствами испытывают дальнейшую трансформацию в северных морях Ат-

лантики (Гренландское, Норвежское и Лабрадорские моря, море Баффина) и в результате составляют основу глубинных масс всего Мирового океана, а Арктика и Северная Атлантика выступают в роли фабрики по их производству. Изменения условий функционирования такой тепловой машины могут иметь большие долгопериодные последствия для всей системы глобальной циркуляции океанов, и такие последствия, в первую очередь, проявят себя (а по некоторым свидетельствам уже проявляются) через ослабление системы меридиональной циркуляции Атлантического океана.

В *разделе 4.1* подробно описывается конфигурация крупномасштабной модели циркуляции океана и льда для Северного Ледовитого океана и Северной Атлантики. Совместная модель состоит из двух ключевых блоков: модель общей циркуляции океана, являющаяся результатом коллективных усилий сотрудников ИВМиМГ СОРАН, включая и автора диссертации, и модель динамики льда, разработанная в Национальной лаборатории Лос Аламоса (США) и любезно предоставленная научному сообществу для исследовательских целей. В разделе описана также сетка и конфигурация области моделирования, начальные условия (данные РНС) и параметры атмосферного воздействия (данные реанализа CORE 1.0).

В *разделе 4.2* представлены некоторые результаты, полученные с использованием совместной модели, касающиеся картины формирования и циркуляции арктических льдов. Рассматриваются вопросы чувствительности термохалинной структуры арктических вод к процессам перемешивания на поверхности океана. Подчеркивается, что ледовая картина существенно зависит от характера атмосферной циркуляции. На рисунке 6 представлено типичное распределение толщины и скорости дрейфа арктического льда в периоды положительного и отрицательного значения индекса атмосферной

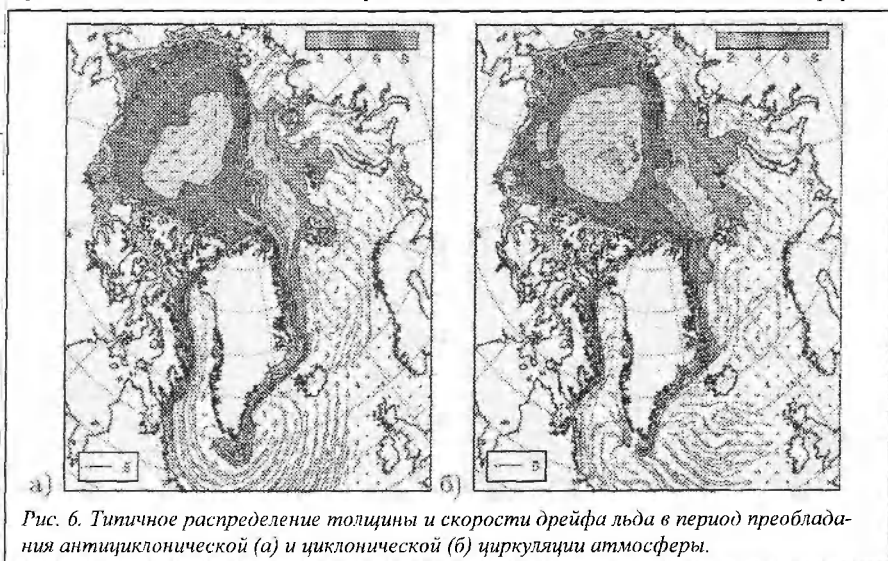


Рис. 6. Типичное распределение толщины и скорости дрейфа льда в период преобладания антициклонической (а) и циклонической (б) циркуляции атмосферы.

циркуляции (NAO или AO).

Вопросам моделирования шельфовой зоны Северного Ледовитого океана и арктических морей посвящен *раздел 4.3*, где наибольшее внимание уделяется вопросам формирования и распространения ядер плотной воды в придонном слое, например, при развитии ветровой полыньи. Согласно имеющимся представлениям о механизмах формирования арктической плотной воды, шельф является именно тем местом, где такое формирование происходит. Один из механизмов состоит в том, что Атлантические воды, попадая в мелководные шельфовые моря, значительно теряют здесь свой теплозапас, оставаясь при этом достаточно солеными. Тем самым, их плотность увеличивается, и, спускаясь по континентальному склону, эти воды пополняют запасы промежуточных и глубинных вод Арктики. Наиболее продуктивным, с точки зрения этого механизма, должно быть Баренцево море. Его максимальная глубина всего лишь около 300 м, оно почти не испытывает влияния речного стока, способствующего распреснению вод и уменьшению их плотности, а самое важное, что значительная часть этого моря не покрыта льдом и поэтому взаимодействие открытой поверхности с атмосферой здесь наиболее интенсивно. Второй механизм формирования холодных и плотных придонных вод связан с активным льдообразованием. В процессе формирования молодого льда происходят значительные потери теплозапаса верхнего слоя океана и вытеснение соли из вновь сформированного льда. Оба этих фактора приводят к возрастанию плотности воды на поверхности и к ее конвективно-заглублению.

Исключительность шельфа в этом механизме выражается в том, что именно на шельфе благодаря близости береговой линии при определенных ветрах происходит образование полыньи. Под действием ветра и суровых континентальных воздушных масс интенсифицируется процесс формирования ледовой шуги, сформировавшись, она тут же под действием ветра отнесется к краю полыньи, а на ее месте образуется новая. Таким образом, полынья, образовавшаяся у берега материка или острова, является местом интенсивной генерации льда и плотная вода, образующаяся при этом, пополняет запасы глубинных вод. Наибольшая активность льдообразования в полыньях отмечается на северных окраинах Сибири, побережья Чукотки и Аляски и связано это с местной розой ветров и близостью азиатского полюса холода.

Исследование этих районов Арктики с помощью численного моделирования предусматривает учет целого ряда физических процессов, присущих арктическому шельфу. Во-первых, это термодинамика льда и снежного покрова. Эта проблема сама по себе чрезвычайно сложна, так как при ее решении требуется учитывать процессы льдообразования и таяния, нормальных и сдвиговых упругих деформаций, торошения, трансформации снежного покрова в ледовый и т.д.. Кроме того, спецификой этого района является большая ширина шельфа. Это значит, что в отличие от многих других шельфовых районов, в данном случае ширина шельфа во много раз превосходит радиус деформации Россби. Это особенным образом проявляется на характере шельфовой динамики, характере распространения топографических и бере-

говых захваченных волн, развитии прибрежного и склонового апвеллинга и даунвеллинга. Особого рассмотрения требуют приливные волны. Существуют убедительные свидетельства того, что прохождение приливных волн способствует снятию внутренних напряжений в толще пакового льда, образованию трещин, через которые увеличивается тепловлагообмен с атмосферой. Еще одной немаловажной особенностью арктического шельфа является обилие полноводных рек. Их роль в термодинамике до сих пор до конца неясна, а, кроме того, это еще и важное звено в глобальном круговороте пресной воды.

В результате ряда идеализированных тестов показано, что крупномасштабная модель не в состоянии адекватно воспроизводить динамику придонных аномалий плотной воды, поэтому необходимо введение соответствующих параметризаций этого движения. В частности, предложен к применению метод вытеснения. Его суть заключается в том, что в случае, когда более плотная вода расположена выше по склону, чем менее плотная, происходит подтекание снизу более плотной воды с вытеснением наверх менее плотной, которая, в свою очередь, заполняет вакансию, возникающую из-за уменьшения столба плотной воды. При условии применения предложенной параметризации, согласно тестовым расчетам, крупномасштабная модель способна более адекватно воспроизводить процесс пополнения запасов промежуточных и глубинных вод.

Для более подробного описания шельфовых процессов создана система вложенных моделей, состоящая из совместной крупномасштабной модели, описанной вначале этой главы, и шельфовой модели, развитой ранее в главе 3 и являющейся моделью промежуточного уровня разрешения (допускающая вихри). Взаимодействие двух моделей осуществляется на уровне начальных и граничных условий, а также на уровне взаимного усвоения распределений температуры, солености и горизонтальной скорости с помощью слагаемых релаксации второго порядка. Например, в уравнении сохранения тепла для расчета температуры эти слагаемые выглядят следующим образом:

$$\left. \frac{\partial T_0}{\partial t} \right|_{relax} = A_0 \Delta (T_0 - \bar{T}),$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial t} \right|_{relax} = A \Delta (T - \bar{T}_0),$$

где T_0 , T – соответственно температуры крупномасштабного и локального распределения, A_0 , A – коэффициенты горизонтальной диффузии температуры. Согласно этим выражениям, в рамках крупномасштабной модели только отклонение температуры T_0 от осредненной по боксу температуры вложенной модели \bar{T} испытывает диффузионное сглаживание и, наоборот, в рамках вложенной модели только отклонение ее температуры T от значения интерполянта температуры крупномасштабной модели \bar{T}_0 подвержено действию оператора Лапласа. Если бы обе модели решались на одной сетке (т.е.

$T = T$ и $\vec{v}_0 = T_0$), то в отсутствии других слагаемых уравнения теплопроводности предельное решение сводилось бы к тому, что в любой момент времени

$$T = \frac{AT_0 + A_0T}{A + A_0} = const$$

и $T \rightarrow T_0$ при $t \rightarrow \infty$

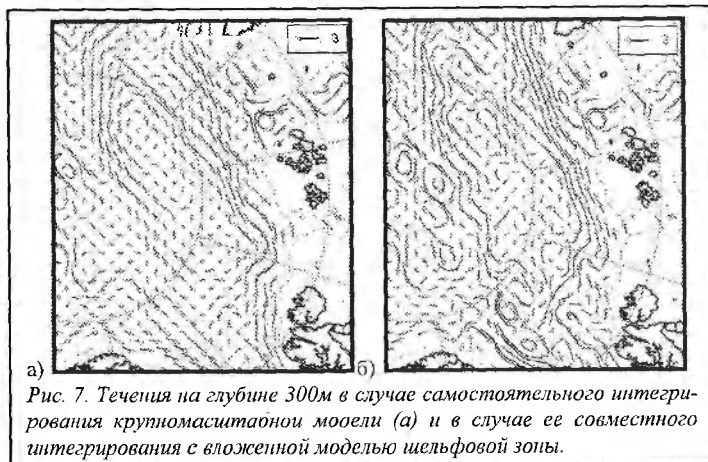


Рис. 7. Течения на глубине 300 м в случае самостоятельного интегрирования крупномасштабной модели (а) и в случае ее совместного интегрирования с вложенной моделью шельфовой зоны.

В результате удалось добиться большего уровня детализации шельфовых и вдольшельфовых течений, причем не только в рамках вложенной модели, но и в результате уточненного решения крупномасштабной модели. Например, в случае течения на глубине 300 м вдоль границы шельфовой зоны

(рис. 7) это привело к концентрации течения в слое атлантических вод и его ускорению.



Рис. 8. Схема движения придонной плотной воды, образовавшейся на шельфе Карского и Баренцева морей, полученная в результате численного моделирования с применением метода вытеснения.

Благодаря использованию параметризации движения плотной придонной воды (метода вытеснения) удалось достичь более реальной картины распространения этих вод, схематичное изображение их движения представлено на рисунке 8. Из этого рисунка видно, что желоб (гроз) Святой Анны, расположенный на границе Карского и Баренцева моря и к востоку от Земли Франца-Иосифа, является естественным проводником аномально плотных вод, формирующихся вблизи островов Новой Земли. Анализ серии экспериментов Голубевой и Платова (2007) показывает, что этот источник плотной воды действует практически ежегодно с наибольшей эф-

фективностью в период с января по май.

В следующем *разделе 4.4* анализируется результат применения метода вытеснения, введенного ранее, непосредственно в совместной модели океана и льда Северного Ледовитого океана и северной Атлантики. Благодаря использованию данного метода удалось уменьшить модельный расход объема промежуточных и глубинных вод с 5.5 Св до 4 Св, однако это не решает проблему. Таким образом, предложенный метод вытеснения оказался эффективным при работе с моделями промежуточного уровня разрешения, подобным вложенной модели Карского и Баренцева морей. Для крупномасштабных моделей его применение способно лишь несколько уменьшить отрицательный тренд объема промежуточных и глубинных вод. Решением проблемы может быть увеличение уровня разрешения крупномасштабной модели до уровня моделей промежуточного уровня (допускающих вихри).

В приложениях I и II приводятся описания математических постановок моделей общей циркуляции океана и его регионов ИВМиМГ СО РАН и модели прибрежной циркуляции Принстонского университета (POM).

С полным текстом диссертации можно ознакомиться с 1 июля 2011 г. на сайте <http://ocean.sccc.ru/~plat/dissertation.html>

Основные результаты диссертационной работы

- 1. Впервые с помощью численного моделирования и анализа данных выявлены физические механизмы формирования и пути дальнейшего распространения по всей акватории промежуточных вод Японского моря. Подтверждена гипотеза формирования промежуточных вод в районе залива Петра Великого. Подтверждено образование соленостного пояса вдоль российского побережья.*

Показано, что процесс формирования промежуточной воды Японского моря можно подразделить на два характерных этапа. Первый заключается в накоплении значительного запаса воды со свойствами, близкими к типу промежуточных вод, в окрестности залива Петра Великого и в проникновении этих вод в промежуточные слои вследствие развития глубокой конвекции в период зимнего муссона. Второй этап развивается при одновременном ослаблении субполярного фронта и зимнего муссона, что приводит к распространению сформированных вод в направлении бассейнов Улунг и Ямато, а также к их рециркуляции в рамках северного круговорота.

- 2. Исследованы процессы, связанные с динамикой шельфовой зоны: береговые захваченные волны, приливы и градиентные течения на границе шельфа и открытого океана. В частности*

- 2.1. Впервые с помощью математической и численной модели был исследован отклик системы глубокого океана и шельфовой зоны на прохождение береговой волны вблизи особенностей береговой линии и рельефа дна. Именно здесь происходит подъем и опускание разнородных водных масс, что вызывает формирование остаточных аномалий, непосредственно не принадлежащих береговой волне.*

2.2. В результате изучения особенностей приливных движений в районе Большого австралийского залива и малых заливов Южной Австралии и их влияния на характер шельфовой циркуляции в этом регионе впервые с помощью численного моделирования установлен резонансный характер приливных колебаний в этих заливах, а также выяснилось, что учет придонного трения может являться причиной задержки приливной волны при её движении вдоль залива Спенсер на 4-6 часов. Сравнение результатов, полученных после применения форсинга граничных условий (ФГУ) и форсинга глубокого океана (ФГО), предложенного в данной работе, показывает, что последний предоставляет более надежные оценки изменений уровня поверхности.

2.3. В ходе изучения роли ошибки в определении градиентов давления в сигма-координатных моделях выработаны рекомендации при формировании сеточной области модели, получен и проверен в ходе численных экспериментов новый метод коррекции градиентов давления, позволяющий существенно уменьшить ошибки в определении скоростей шельфовых и склоновых течений.

3. В ходе численных экспериментов выявлены механизмы и особенности среднелетней динамики Большого австралийского залива, формирующейся под воздействием сезонного преобладания ветров, способствующих развитию прибрежного апвеллинга, предложен новый способ учета распространяющихся вдоль побережья береговых захваченных волн.

Положительная завихренность среднего ветра приводит к глубоководному экваториальному свердрупсовскому переносу, течению Флиндерса и апвеллингу постоянного термоклина. Формируется олбанский максимум. Завихренность поля ветра приводит также к формированию топографического свердрупсовского переноса, который компенсируется вдольбереговым течением и, в конечном счете, приводит к формированию антициклонического круговорота внутри БАЗ. Впервые показано, что относительно легкая вода, расположенная вблизи шельфа и в верхнем 400-метровом слое, сформированная и сохранившаяся после глубокого зимнего даунвеллинга, вызывает наклон уровня поверхности с возвышением в направлении к берегу, что приводит к формированию минимума уровня поверхности вдоль границы шельфовой зоны и вызывает направленное на восток течение. Подтверждением наличия такого минимума уровня поверхности служит картина динамических высот, полученная на основе данных CARS.

Предложенный способ учета распространяющихся вдоль побережья береговых захваченных волн был апробирован в ходе моделирования летнего апвеллинга 1998–1999 г и позволил достичь более точного учета колебаний уровня в диапазоне 1–3 дней.

4. Создана и апробирована система вложенных моделей, адаптированная для моделирования арктического шельфа России, включаю-

щая крупномасштабную модель северной части Атлантического океана и Северного Ледовитого океана с учетом льда и региональную модель окраинных арктических морей и шельфовой зоны. Разработана новая параметризация, позволяющая в рамках крупномасштабной модели учитывать неопиcываемые моделью перемещения плотных придонных вод вдоль локального наклона дна.

С помощью системы вложенных моделей с учетом разработанной параметризации проведено исследование динамики шельфовой зоны Северного Ледовитого океана в районе Баренцева и Карского морей, выявлены основные механизмы, ответственные за формирование промежуточных и глубинных вод в условиях развивающейся ветровой пльньи.

Публикации по теме диссертации

Монографии:

1. Кузин В. И., Голубева Е. Н., Платов Г.А. Моделирование гидрофизических характеристик системы Северный Ледовитый океан – Северная Атлантика. Коллективная монография «Фундаментальные исследования океанов и морей», ред. Н. П. Лавров, М, «Наука», Книга 1, 2006, с. 166-190.

Публикации в журналах из списка ВАК

2. Платов Г. А. Численное моделирование формирования глубинных вод Северного Ледовитого океана. Часть I: Идеализированные тесты // Известия РАН, Серия ФАО, 2011, т. 47, № 3, с. 393–408.
3. Платов Г. А. Численное моделирование формирования глубинных вод Северного Ледовитого океана. Часть II: Результаты региональных и глобальных расчетов // Известия РАН, Серия ФАО, 2011, т. 47, № 3, с. 409–425.
4. Кузин В. И., Платов Г. А., Голубева Е. Н. Влияние межгодовой изменчивости стока сибирских рек на перераспределение потоков пресной воды в Северном Ледовитом океане и в северной Атлантике // Известия РАН, Серия ФАО, 2010, т. 46, № 6, с. 831–845.
5. Голубева Е. Н., Платов Г. А. Численное моделирование отклика Арктической системы океан-лед на вариации атмосферной циркуляции 1948-2007 гг. // Известия РАН, серия ФАО, 2009, т. 45, №1, с. 145-160.
6. Крупчатников В. Н., Кузин В. И., Голубева Е. Н., Мартынова Ю. В., Платов Г. А., Крылова А. И. Исследование гидрологии и динамики растительности климатической системы Северной Евразии и Арктического бассейна // Известия РАН, серия ФАО, 2009, т. 45, №1, с.123-144.

7. Кузин В. И., Крупчатников В. Н., Фоменко А. А., Голубева Е. Н., Мартынова Ю. В., Платов Г. А. Исследование динамики климатической системы Северной Евразии и Арктического бассейна // Сиб. журн. вычисл. матем., 2009, т. 12, №3, с. 289-295.
8. Платов Г.А., Голубева Е. Н. Изучение промежуточных вод Японского моря на основе численного моделирования с использованием данных климатического распределения температуры и солености GDEM // Известия РАН, серия ФАО, 2008, т. 44, №3, с. 392 -- 412.
9. Golubeva E. N., and G. A. Platov, On improving the simulation of Atlantic water circulation in the Arctic Ocean // J. Geophys. Res., 2007, v. 112, C04S05, doi:10.1029/2006JC003734.
10. Holloway G., F. Dupont, E. Golubeva, S. Häkkinen, E. Hunke, M. Jin, M. Karcher, F. Kauker, M. Maltrud, M. A. M. Maqueda, W. Maslowski, G. Platov, D. Stark, M. Steele, T. Suzuki, J. Wang, and J. Zhang, Water properties and circulation in Arctic Ocean models // J. Geophys. Res., 2007, v. 112, C04S03, doi:10.1029/2006JC003642.
11. Kuzin V. I., E. N. Golubeva, and G. A. Platov, Numerical simulation of impurity and fresh water propagation in the Arctic-North Atlantic system // Russ. J. Numer. Anal. Math. Modeling, 2006, v. 21, No. 1, p. 321-343.
12. Голубева Е. Н., Платов Г. А. Исследование изменчивости системы океан-лед Северного Ледовитого океана // География и природные ресурсы, 2004, №3, с. 283-287.
13. Middleton, J. F., and G. Platov, The mean summertime circulation along Australia's southern shelves: a numerical study // J. Phys. Oceanogr., 2003, v.33, No.11, p. 2270-2287.
14. Кузин В.И., Голубева Е.Н., Платов Г.А., Нелезин А.Д., Манько А.Н. Диагностические расчеты для двух состояний Куроисио // Известия РАН, серия ФАО, 1999, т.35, №2, стр. 259-268.
15. Голубева Е. Н., Иванов Ю. А., Кузин В. И., Платов Г. А. Численное моделирование циркуляции Мирового океана с учетом верхнего квазиоднородного слоя // Океанология, 1992, т. 32, вып. 3, с. 395-405.
16. Lykossov V.N., Platov G.A. A numerical model of interaction between atmospheric and oceanic boundary layers // Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling, 1992, v.7, No. 5, p.419-440.

Публикации в трудах международных конференций

17. Platov, G.A., and E.N. Golubeva, The Japan Sea circulation modelling with data assimilation and analysis of deep water structure // In: Proceedings of the International Conference "Mathematical Methods in Geophysics". Part 2. 2003, Novosibirsk: Inst of Comp. Math. And Math. Geoph. Publ.

18. Голубева Е. Н., Платов Г. А. Роль океанической динамики в распространении загрязнения в Арктическом бассейне // Труды международной конференции "Enviromis". Россия, Томск: Изд. ГУ «Томский ЦНТИ», т. 1, 2002, с. 169-173.

Прочие публикации

19. Middleton J. F., Platov G., Hydrodynamic model of the Great Australian Bight. // In: Trophodynamics of the GAB: Assessing the need for an ecological allocation in the SA Pilchard fishery, Eds. T. Ward, S. D. Goldsworthy, B. C. Page. SARDI FRDC Report 2003/072, Adelaide, 2005, p. 51-99.
20. Platov, G.A., and J. F. F. Middleton, Notes on Pressure Gradient Correction // NCC Bulletin/Series Num. Model. Atmos. Ocean and Environment Studies. Novosibirsk: NCC Publisher, 2001, Iss. 7, p. 43-58.
21. Platov, G., and J. F. Middleton, A barotropic model of tides along Australia's southern shelves // Applied mathematics report, 2000, No.00/22, School of Math., University of New South Wales, Sydney, Australia.
22. Middleton, J. F., G. Platov, Slope circulation set-up near a strait: An idealised study // Applied mathematics report, 2000, No.00/21, School of Math., University of New South Wales, Sydney, Australia.
23. Golubeva, E. N., and G. A. Platov, A numerical modeling of the global ocean meridional thermohaline circulation // NCC Bulletin/Series Num. Model. Atmos. Ocean and Environment Studies. Novosibirsk: NCC Publisher, 1996, Iss. 4, p. 21-29.

Подписано в печать 11.08.2011 г. Формат 60 × 84 / 16.
Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ 17844.

Отпечатано в типографии ЗАО «Кант».
г. Новосибирск, ул. Путевая, 18. тел. (383) 351-06-19
