

На правах рукописи

Зеленько Александр Андреевич

Оперативная океанология: моделирование, мониторинг
и прогнозирование гидрофизических полей Мирового океана

25.00.29 — Физика атмосферы и гидросферы

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
доктора физико-математических наук

Москва — 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении "Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации" (ФГБУ "Гидрометцентр России").

Официальные оппоненты:

Гулев Сергей Константинович, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, руководитель лаборатории, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук (ИО РАН).

Дианский Николай Ардадьевич, доктор физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова" (МГУ им. М.В. Ломоносова).

Залесный Владимир Борисович, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука Российской академии наук (ИВМ РАН).

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки "Морской гидрофизический институт РАН" (МГИ РАН).

Защита состоится **12 декабря 2018 г.** в 14 часов 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 327.003.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении "Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации" (ФГБУ "Гидрометцентр России") по адресу: г. Москва 123242, Большой Предтеченский переулок, д. 11-13.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения "Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации" и на сайте центра: https://meteoinfo.ru/images/misc/sovets/zelenko/disser_zelenko.pdf

Автореферат разослан « ____ » _____ 2018 г.

Ученый секретарь диссертационного совета, кандидат физ.-мат. наук



Шатунова М.В..

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и степень разработанности темы исследования.

На рубеже веков, с началом нового тысячелетия, в области изучения океана окончательно установилось новое направление — "оперативная океанология", предметом которой является получение диагностических и прогностических оценок состояния океана в режиме, близком к реальному времени. Становление этой отрасли океанологии является естественным продолжением фактографического периода описательной океанографии и последующего периода теоретических и экспериментальных исследований разнообразных процессов в Мировом океане.

Первые, датируемые началом 1980-х годов, оперативные информационные системы для морского гидрометеорологического обслуживания оперировали характеристиками, традиционно относящимися к предмету морской метеорологии. Это, в первую очередь, параметры состояния приводного слоя атмосферы (атмосферное давление, скорость ветра, температура и влажность воздуха) и характеристики поверхности океана (температура воды, элементы ветрового волнения, в редких случаях — солёность у поверхности океана). Однако во многих случаях требуются также сведения об эволюции полей основных гидрофизических характеристик не только у поверхности, но и в толще Мирового океана. Информация о текущем и прогнозируемом состоянии вод морей и океанов необходима для обеспечения практических запросов со стороны разных отраслей морской деятельности: навигация, рыболовство и марикультура, строительство и эксплуатация морских сооружений, добыча и транспортировка минеральных ресурсов, рекреация и т.д. Пользователям такой информации требуются сведения о волнении, уровне моря, поверхностных и подповерхностных течениях, температурном режиме, плотностной структуре морских вод, состоянии ледового покрова и других характеристиках. Изменчивость со временем состояния вод океана на временных масштабах от нескольких суток до нескольких недель часто называют также океанской погодой, подразумевая тем самым необходимость её прогнозирования. Подготовка диагностической и прогностической информации о меняющемся состоянии морской среды составляет основную задачу оперативной океанологии.

Необходимые условия для начала работ в этом направлении сложились к началу века, а 2000-е годы стали периодом бурного развития оперативной океанологии. В нескольких странах образованы специализированные национальные центры, инициированы и выполняются международные проекты, направленные на скоординированное решение наиболее

важных и крупных задач оперативной океанологии, проводятся масштабные международные конференции. Отмечается резкий рост публикаций, относящихся к оперативной океанологии.

Активизация работ, связанных с оперативной океанологией, происходит и в научных учреждениях Российской Федерации. Относящиеся к этому направлению исследования ведутся, главным образом, в Российской академии наук (РАН) и научных учреждениях Росгидромета. Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука (ИВМ РАН) и Институт океанологии им. П.П. Ширшова (ИО РАН) проводят работы по развитию и созданию новых моделей общей циркуляции океана, разработке перспективных процедур и алгоритмов анализа данных наблюдений (ансамблевая оптимальная интерполяция, фильтры Калмана, трехмерный и четырехмерный вариационный анализ) [Марчук и др., 2013; Залесный и др., 2016; Ибраев и др., 2012; Кауркин и др., 2016; Лебедев, 2016]. В Морском гидрофизическом институте (МГИ РАН) развивается информационная система диагноза и прогноза эволюции основных гидрофизических полей Черного моря на 5 суток, действующая в оперативном режиме [Коротяев и др., 2016]. В круг основных задач Росгидромета входит мониторинг текущего состояния океанов и морей и прогнозирование его развития на разных интервалах времени. Поэтому здесь сосредоточены работы по созданию и поддержанию соответствующих оперативных систем для океанов и морей [Зеленько и др., 2010б; 2015; 2016а; Григорьев и др., 2016; Дианский и др., 2014].

В становлении оперативной океанологии решающую роль сыграло беспрецедентное развитие наблюдений в океане. Но наблюдательная система, хотя и является основой оперативных приложений, сама по себе недостаточна для решения стоящих перед оперативной океанологией задач. По аналогии с метеорологическими приложениями основным инструментом оперативного анализа и прогноза крупномасштабных (а сейчас и других, вплоть до мезомасштабных) океанологических полей служат численные модели, основанные на решении задачи с начальными условиями для уравнений термогидродинамики океана. Круг решаемых к настоящему времени задач оперативной оценки текущего и ожидаемого состояния морской среды и, соответственно, состав конечной информационной продукции определяется уровнем взаимного развития составляющих главной триады оперативной океанологии "наблюдения — модели — продукция". Эта триада определяет состав исследований в данной работе и, в значительной степени, — её структуру.

Цель и задачи работы. Целью работы является исследование и разработка методов мониторинга крупномасштабной изменчивости общей циркуляции океана, а также создание оперативной информационно-вычислительной системы прогноза параметров ветрового волнения в океане и морях России. Общая направленность этих работ — развитие научно-методических и технологических средств оперативной океанологии для систем мониторинга и прогнозирования основных гидрофизических полей Мирового океана. Регулярная информация, производимая такого рода системами, имеет важное хозяйственное значение и необходима для многих отраслей морской деятельности.

Для достижения поставленной цели решались следующие взаимосвязанные задачи:

- анализ основных особенностей наблюдательных систем океана с точки зрения получения исходных данных для оперативного мониторинга изменчивости основных гидрофизических полей в диапазоне океанических и синоптических масштабов (порядка бароклинового радиуса деформации Россби и выше);

- разработка модели общей циркуляции океана (МОЦО) на основе так называемой полной гидродинамической системы уравнений движения и переноса тепла и солей в Мировом океане, предназначенной как для исследований процессов крупномасштабной изменчивости океана, так и для её применения в качестве составной части оперативных систем мониторинга и прогнозирования состояния основных гидрофизических полей;

- исследование крупномасштабной изменчивости гидрофизических полей в Мировом океане на основе их численного моделирования применительно к процессам глубокой конвекции в условиях открытого океана и циркуляции вод в лагранжевом представлении;

- создание оперативной системы усвоения океанографических данных (СУОД) на основе процедуры трехмерного вариационного анализа контактных и спутниковых наблюдений, обеспечивающей мониторинг текущего состояния океана и получение начальных условий для прогнозирования его развития путем интегрирования МОЦО на интервалах времени порядка 10 суток;

- разработка и внедрение современной системы прогноза параметров ветрового волнения в Мировом океане и морях России для оперативного информационного обслуживания широкого круга пользователей, связанных с морской деятельностью.

Методы исследования. Используемые в работе подходы основываются на применении численных гидротермодинамических моделей для описания океанических процессов совместно с текущими данными наблюдений. Разработанная и представленная в диссертации модель общей циркуляции океана, после прохождения ряда проверочных экспериментов и сопоставлений с экспериментальными данными, применяется для исследования некоторых важных механизмов крупномасштабной изменчивости циркуляции океана.

Реализация гидродинамических моделей в оперативном режиме сопряжена с решением вопросов, связанных с обработкой данных контактных и дистанционных наблюдений и подготовкой соответствующей информационной среды для функционирования таких моделей. Для решения этих вопросов в работе используются современные подходы, подобные методам, применяемым в успешно действующих уже длительное время метеорологических системах.

Построение систематизированной картины состояния вод океанов и морей достигается путем статистического анализа разнородных данных наблюдений с привлечением расчетов по эволюционным гидродинамическим моделям. Эти же модели, как правило, являются и основой прогнозистических приложений. Для получения регулярной информации о текущем состоянии морской среды в работе применяются специальные процедуры, называемые усвоением данных. Суть этих процедур состоит в комбинировании (синтезе) данных наблюдений и результатов расчетов по соответствующей эволюционной модели. Получаемая при этом оценка оказывается более точной, нежели оценки, извлекаемые порознь из наблюдений или из модельных расчетов.

Положения, выносимые на защиту, и их новизна. Основные положения, выносимые на защиту, содержат следующие новые результаты, полученные автором или при его непосредственном участии:

1. Модель общей циркуляции океана (МОЦО), включающая формулировку гидротермодинамической задачи, конечно-разностную аппроксимацию системы уравнений и вычислительную реализацию МОЦО в виде программного комплекса. Модель основана на системе так называемых полных уравнений, выписанных с использованием традиционных приближений для описания крупномасштабной динамики океана (гидростатики, Буссинеска, сферичности Земли и геопотенциальных поверхностей). Вертикальное турбулентное перемешивание в верхних слоях воды, порождаемое действием ветра и поверхностным потоком плавучести, описывается в модели в рамках представлений о существовании верхнего

перемешанного слоя с априорно однородным по вертикали распределением потенциальной температуры, солёности и плотности воды. Разработанная МОЦО предназначена как для исследований процессов крупномасштабной изменчивости океана, так и для её применения в качестве составной части оперативных систем мониторинга и прогнозирования состояния основных гидрофизических полей. На базе этой модели получена значительная часть результатов диссертационной работы.

2. Результаты исследования механизмов развития и изменчивости конвективного перемешивания в открытом океане на суточном, сезонном и межгодовом масштабах времени, полученные на основе численных экспериментов с МОЦО. Объяснение локализации глубокой конвекции открытого океана в Северной Атлантике, которая определяется особым сочетанием необходимых условий (сильный отрицательный поток плавучести на поверхности океана и динамическая предобусловленность термохалинных полей в толще воды). Подтверждаемая экспериментальными данными спорадичность и сильная временная перемежаемость конвективных эпизодов, порождаемых короткопериодными (суточными и синоптическими) вариациями атмосферных воздействий на поверхности океана.

3. Результаты исследования структуры и возможных путей распространения водных масс в циркуляционной системе Южного океана на основе анализа модельных траекторий жидких частиц. Анализ показывает, что картина переносов является существенно трёхмерной, как это следует из расчетов индивидуальных траекторий маркеров. По ходу движения в системе горизонтальной циркуляции частицы воды претерпевают сильные вертикальные смещения, на каждом этапе попадая в другие циркуляционные структуры бароклинного океана. Введение в рассмотрение ансамбля траекторий позволяет дать более общее описание процессов переноса и перемешивания массы и других свойств вод океана в сравнении с расчетами единичных траекторий. Получены свидетельства хаотизации переноса, возникающего в поле нестационарных трехмерных крупномасштабных течений в Южном океане, который служит механизмом вертикального перераспределения массы — результирующее погружение вод из поверхностных слоев и их подъем из глубинных слоев.

4. Первая национальная система усвоения океанографических данных для Мирового океана, действующая в оперативном режиме. Усвоение данных осуществляется по циклической схеме «анализ–прогноз–анализ» в одноэлементном её варианте, в котором последовательно усваивается информация по температуре и солёности воды в толще океана,

уровню моря и сплоченности морского льда. Для температуры и солёности анализ проводится с использованием трехмерной вариационной схемы (3D-Var) в сочетании с методом, в котором учитываются изменения со временем поля первого приближения в пределах окна усвоения данных. Представленные результаты работы системы свидетельствуют о том, что она обеспечивает информативные оценки текущего состояния океана на основе расчетов по модели и с использованием измерений температуры и солёности воды в верхнем 1,5-километровом слое воды, получаемых в режиме близком к реальному времени.

5. Ретроспективный расчет (реанализ) основных гидрофизических полей Мирового океана, выполненный с помощью разработанной системы усвоения данных. Реанализ начинается с 2005 г. и продолжается в режиме пополнения текущими анализами в квазиоперативном режиме. Представленное рассмотрение результатов реанализа, в сопоставлении с независимыми оценками из других источников, показывает его пригодность для мониторинга особенностей межгодовой и сезонной изменчивости основных гидрофизических полей Мирового океана. Данные реанализа, распространяемые через Интернет, предоставляются заинтересованным пользователям для дальнейших исследований.

6. Комплексная система прогнозирования параметров ветрового волнения в Мировом океане и морях России. Прогнозы составляются на основе расчетов по спектральной модели WaveWatch III, на вход которой подается информация о скорости ветра, стратификации приповерхностного слоя воздуха, характеристиках ледового покрова. Помимо расчетного ядра, система включает в себя средства конфигурирования расчетных областей, подготовки входной информации и распространения прогностической продукции в цифровом и графическом виде. Принятый подход с применением базовой модели волнения, которая обеспечивает расчет параметров ветрового волнения, как на глубоководных, так и в мелководных акваториях, а также унификация соответствующей информационной среды, дает ряд преимуществ. В первую очередь – это упрощение и ускорение тиражирования прогностических технологий для разных морей и океанических регионов (в дополнение к уже выпускаемым прогнозам для Мирового океана и морей европейской части России). Оценки точности прогнозов сопоставимы или превосходят результаты других прогностических систем.

Достоверность и апробация результатов. Все опубликованные и представленные в диссертации результаты были получены на общедоступном фактическом материале с использованием стандартных

методов анализа и могут воспроизводиться другими исследователями. Общим, применяемым в работе подходом, является сопоставление получаемых результатов теоретического и прикладного характера с данными имеющихся натурных наблюдений и другими опубликованными результатами.

Материалы диссертации, докладывались на семинарах и заседаниях Ученого совета ФГБУ “Гидрометцентр России”, ФГБУ “Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова”, Indian National Centre for Ocean Information Services (INCOIS), семинаре “Суперкомпьютерное моделирование климатической системы” при МГУ.

Основные результаты работы были представлены на 24 конференциях, из них – 13 международных, в том числе:

“Первая международная научно-техническая конференция по термогидромеханике океана” (2017, Москва);

“Современные информационные технологии в гидрометеорологии и смежных с ней областях” (2017, Обнинск);

"Мировой океан: модели, данные и оперативная океанология" (2016, Севастополь);

“Третья Всероссийская конференция по прикладной океанографии” (2015, Москва);

“Использование средств и ресурсов единой государственной системы информации об обстановке в Мировом океане для информационного обеспечения морской деятельности в Российской Федерации (ЕСИ-МО-2012)” (2012, Обнинск);

“Современное состояние и проблемы навигации и океанографии (НО-2007)” (2007, Санкт-Петербург);

Юбилейная конференция "Россия в Антарктике" (2006, Санкт-Петербург);

International Conference “Fluxes and Structures in Fluids” (2005, Moscow);

“Всемирная конференция по изменению климата” (2003, Москва);

“Oceanic Fronts and Related Phenomena (Konstantin Fedorov Memorial Simposium)” (1998, Saint Petersburg);

“The 1998 Conference of World Ocean Circulation Experiment. Ocean circulation and Climate” (1998, Halifax);

“Joint Assemblies of the International Association of Meteorology and Atmospheric Sciences and International Association for the Physical Sciences of the Oceans” (1997, Melbourne);

“TOGA 95. International Scientific Conference” (1995, Melbourne).

Материалы диссертации полностью изложены в работах, опубликованных соискателем. По теме диссертации опубликовано более 50 печатных работ (без тезисов докладов), из них 20 – в изданиях из перечня ВАК.

Личный вклад соискателя. В диссертационной работе представлены результаты исследований, вклад автора в которых был ключевым на всех этапах от постановки задачи до реализации работы и внедрении результатов в оперативную практику. В представленных результатах, полученных совместно с соавторами, соискателю принадлежит инициативная или равноправная роль в постановке задачи, выполнении численных экспериментов, вспомогательных расчетов и интерпретации результатов.

Практическая значимость работы. Разработанная и представленная в диссертации система усвоения океанографических данных обеспечивает мониторинг текущего состояния океана. Такой мониторинг сопряжен с решением важной хозяйственной задачи, связанной с исследованиями климата и развитием систем прогнозирования основных гидрофизических полей Мирового океана.

Реализованная система прогнозирования параметров ветрового волнения для Мирового океана и морей России является решением важной хозяйственной задачи по обеспечению оперативной информацией широкого круга пользователей, связанных с морской деятельностью. Соответствующие технологии прошли в 2012–2016 гг. ведомственную сертификацию Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам Росгидромета, получили статус основных прогностических методов и используются в оперативной деятельности ФГБУ «Гидрометцентр России», а также являются составной частью Единой государственной системы информации об обстановке в Мировом океане (ЕСИМО).

Благодарности. Автор благодарит научный коллектив Гидрометцентра России за доброжелательную и творческую атмосферу, в которой проводились представленные здесь исследования. Особенная благодарность коллегам, в сотрудничестве с которыми были получены главные результаты: Ю.Д. Реснянскому, Б.С. Струкову, М.Д. Цырульникову, П.И. Свиренко. Автор признателен Р.М. Вильфанду, без поддержки и настойчивости которого эта работа вряд ли бы появилась.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** приводятся сведения о возникновении и становлении направления оперативной океанологии в современных научных исследованиях Мирового океана. Обсуждаются основные проблемы и тенденции развития работ в этом направлении на международном и национальном уровнях. Формулируется цель и основные задачи исследований и даётся информация о структуре диссертационной работы.

Первая глава “Оперативная наблюдательная система океана” посвящена анализу основных составляющих действующей наблюдательной системы в океанах и морях с точки зрения получения исходных данных для оперативного мониторинга изменчивости основных гидрофизических полей.

Глобальность океана как объекта наблюдений (как и глобальность решаемых задач) подразумевают необходимость объединения и координации международных усилий в области оперативных наблюдательных систем. Такая координация в техническом и организационном отношении осуществляется Совместной комиссией по океанографии и морской метеорологии (СКОММ)¹, действующей с 1999 года под эгидой Всемирной метеорологической организации (ВМО) и Межправительственной океанографической комиссии (МОК).

Главу предваряет п. 1.1 с описанием характерных масштабов океанических процессов и связанных с ними вариациями главных гидрофизических полей. Затем, после рассмотрения основных особенностей информационной системы ВМО (п. 1.2), приводится краткое описание отдельных наблюдательных подсистем. Их представление структурируется с естественным разделением наблюдений на контактные, проводимые непосредственно в океане, и дистанционные, осуществляемые главным образом на базе ИСЗ, с принципиальными различиями в измерительных технологиях и способах обработки получаемых результатов измерений.

Первые системы регулярных контактных измерений в океане были связаны с наблюдениями за состоянием приповерхностного слоя атмосферы и приповерхностными океаническими процессами. Рассматриваются четыре главные наблюдательные подсистемы этого типа, информация которых поступает в оперативном или близком к нему режиме (п. 1.3.1):

¹ <http://www.jcomm.info>

- попутные судовые наблюдения, помимо метеорологических параметров, включают определение ТПО, параметров волнения и состояния ледового покрова;
- свободно дрейфующие поверхностные буи (дрифтеры), предназначенные для лагранжевых измерений скорости приповерхностных течений и для регистрации ТПО и атмосферного давления;
- заякоренные волновые буи, на которых измеряются основные параметры поверхностных гравитационных волн, включая спектральные характеристики;
- глобальная сеть прибрежных наблюдений за уровнем моря, частично ориентированная на распространение данных в оперативном режиме.

Перечисленные системы предназначены для слежения за характеристиками, приуроченными к поверхности океана, но для мониторинга и прогнозирования гидрофизических полей требуется регулярная информация о состоянии подповерхностных слоев. За редкими исключениями наблюдения в толще океана проводятся путем использования технологий зондирования по глубине, и результаты измерений представляются в виде вертикальных профилей параметров состояния океана. К наиболее часто измеряемым величинам в оперативном режиме относятся температура и солёность морской воды, гораздо реже проводятся наблюдения скорости течений и некоторых гидрохимических показателей. В настоящее время действуют четыре основные наблюдательные подсистемы контактных профильных наблюдений в Мировом океане, различающиеся по типу наблюдательной платформы: попутные судовые ХВТ-зондирования, заякоренные буи, ныряющие буи Арго и морские животные с прикрепленными измерительными датчиками. В работе рассмотрены (п. 1.3.2) основные характеристики этих подсистем, их сравнительные особенности и роль в приложениях оперативной океанологии.

Исключительную значимость для оперативной океанологии имеет инновационная наблюдательная система профилирующих буев Арго. Общий проект системы и план её развертывания были разработаны в 1998 году совместно научными группами крупных международных программ GODAE и CLIVAR [Roemmich et al, 1998a; Roemmich et al, 1998b]. Считается, что эти документы положили начало системе Арго. С этой системой тесно связан наблюдательный проект по спутниковой альтиметрии, обеспечивающий регулярное поступление глобальной информации о вариаци-

ях уровенной поверхности океана, которые зависят от вертикальных распределений температуры и солёности воды. Взаимосвязь этих дополняющих друг друга наблюдательных подсистем оказалась столь тесной, что даже повлияла на эволюцию названия системы профилирования океана. В связи с тем, что одна из уже действовавших миссий спутниковой альтиметрии носила название Jason, первоначальная аббревиатура ARGO (Array for Real-time Geostrophic Oceanography) под влиянием ассоциаций с древнегреческой мифологией трансформировалась в имя существительное Argo [Roemmich *et al*, 1998a].

Проект Арго предусматривал размещение около 3000 буёв по всем океанам в зоне 60° ю. ш. – 60° с. ш. с разрешением примерно 3°×3°. Массовое размещение буёв началось в 2000 году и достигло планового значения в ноябре 2007 года. В ходе развертывания системы выяснилось, что требуется дополнительное освещение данными прибрежных и примыкающих ко льдам областей, поэтому целевое значение сдвинулось до ~3800 буёв. Время жизни отдельных буёв Арго достигает 4–5 лет, поэтому на постоянной основе ведется запуск новых буёв. Основная часть буёв обеспечивает измерения профилей температуры и солёности воды в слое 0–2000 м с дискретностью по глубине 2–20 м. Точность измерений составляет около 0,002°С для температуры и 0,003 е.п.с. для солёности и может несколько меняться в зависимости от модели буя. Продолжительность рабочего цикла, по истечении которого данные измерений вертикальных профилей температуры и солёности поступают в центры сбора данных через спутниковую систему, составляет 10 суток.

Все современные системы усвоения океанографических данных и сопряженные с ними прогностические системы используют в полном объеме данные Арго. Ряд исследований демонстрирует важность вклада этих наблюдений в количественных терминах [Oke *et al*, 2009]. Помимо применения данных Арго в приложениях оперативной океанологии (для которых система в первую очередь и разрабатывалась), эта информация интенсивно используется в многочисленных исследованиях океанических и климатических процессов. Общее число публикаций, связанных с Арго, превышает три тысячи¹ и начиная с 2013 г. темп их нарастания составляет более 300 в год, то есть можно считать, что практически ежедневно выходит новое исследование.

¹ <http://argo.jcommops.org>

Наглядное представление об информативности систем профильных наблюдений даёт рисунок 1, на котором показана типичная 10-суточная порция данных наблюдений. Такой интервал накопления наблюдений совпадает с шириной окна усвоения информации (глава 4), а также обусловлен типичной продолжительностью цикла поступления измерений от большинства буёв Арго, составляющей те же 10 суток. Сравнение распределения профилей, поставляемых буями Арго (рисунок 1*д*) и другими системами, впечатляет и показывает, какая именно наблюдательная подсистема открывает возможности для мониторинга подповерхностных гидрофизических полей океана. Массовые измерения температуры и солёности морской воды охватывают слой глубиной 2 км (рисунок 1*е*), при этом их инструментальная погрешность достаточна для многих приложений.

Не менее важной для развития оперативной океанологии, чем контактные наблюдения, является спутниковая океанография. Космические наблюдательные системы поставляют массовую оперативную информацию для целого ряда характеристик состояния поверхности океана, отличительные особенности которой состоят в глобальности, синхронности и пространственной детальности наблюдений. В п. 1.4 работы приводятся основные сведения только о тех морских спутниковых системах, которые предоставляют на регулярной основе обработанную наблюдательную информацию, предназначенную для использования в приложениях оперативной океанологии (в настоящее время “сырые” спутниковые данные используются для этих целей в редких случаях).

Рассмотрение структурировано по наблюдаемым параметрам и хронологии появления соответствующих программ и включает краткие сведения о системах наблюдений за следующими поверхностными характеристиками морской поверхности:

- температура поверхности океанов и морей;
- сплоченность морского льда и некоторые другие параметры ледового покрова;
- вариации уровня поверхности (спутниковая альтиметрия);
- параметры ветровых волн.

В настоящее время данные соответствующих спутниковых систем используются в большинстве современных систем усвоения океанографических данных. В одних системах усваиваются трековые данные измерений, в других — поля измеряемых величин, получаемые в результате обобщения информации нескольких ИСЗ.

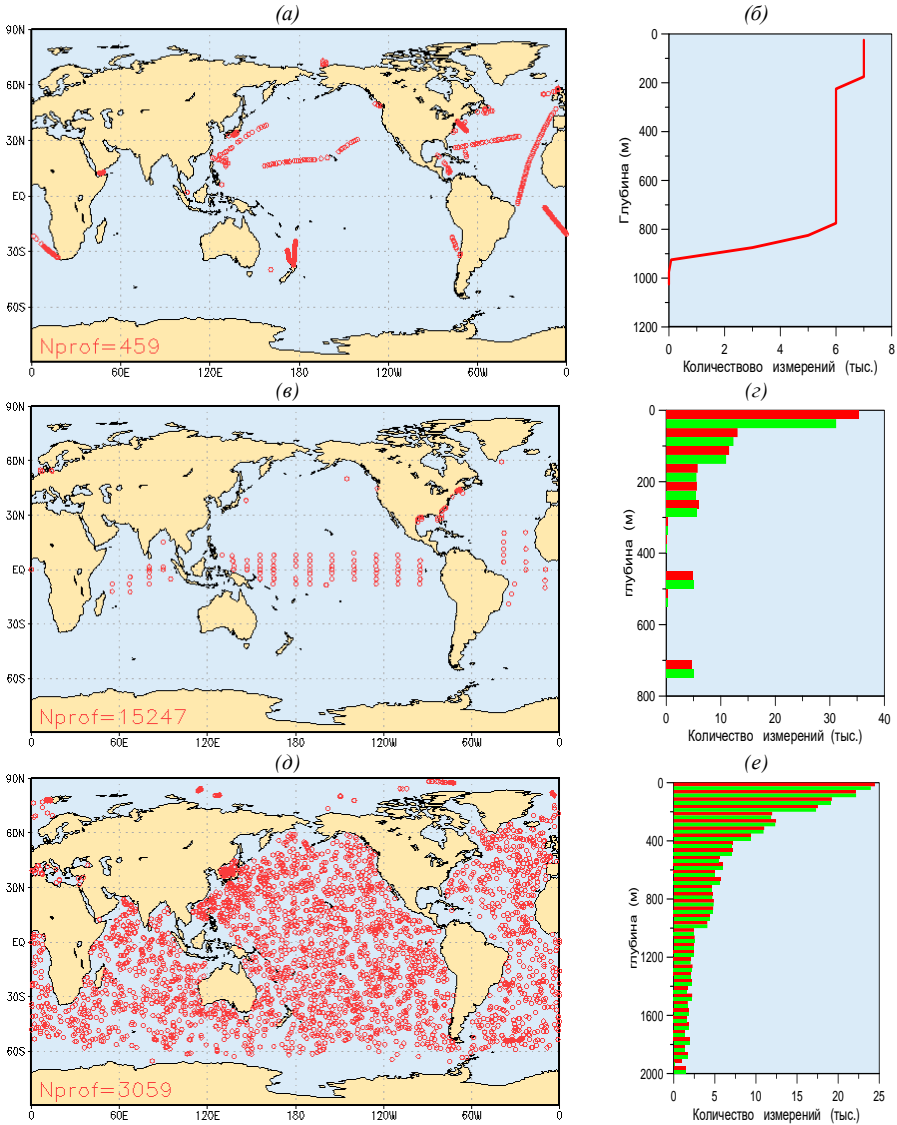


Рисунок 1. Географическое положение профильных измерений температуры и солёности морской воды и распределение измерений по глубине за период 1-10 октября 2009 года для разных наблюдательных подсистем: (а, б) - измерения температуры обрывными зондами ХВТ; (в, г) - данные, поступающие с заякоренных буёв; (д, е) - информация автономных "ныряющих" буёв Арго. На диаграммах (б, г, е) красный цвет соответствует измерениям температуры, зелёный – солёности. [Зеленько и др., 2010б].

Во второй главе “Модели общей циркуляции океана” рассматриваются вопросы, связанные со второй составляющей триады "наблюдения – модели – продукция", определяющей оперативную океанологию. Разработка численных моделей общей циркуляции океана (МОЦО) относится к числу основных задач в исследованиях океана и климатической системы, включающей атмосферу, гидросферу и криосферу. Вопросам построения гидротермодинамических моделей крупномасштабной циркуляции океана посвящено много трудов, среди которых можно отметить ряд монографий [Каменкович, 1973; Гилл, 1986; Марчук и Саркисян, 1988; Kantha and Clayson 2000; Griffies, 2004].

В этой главе вначале (п. 2.1) рассматривается общая формулировка гидродинамической задачи и обсуждаются физические и математические приближения, используемые при её решении. Затем в п. 2.2 приводится описание МОЦО, применяемой далее в работе, в создании и развитии которой автор принимал непосредственное участие. В завершающем главу п. 2.3 даны основные сведения об известной модели европейского консорциума NEMO, также используемой в качестве расчетного ядра в одной из версий системы усвоения океанографических данных.

Модель общей циркуляции океана, разработанная в Гидрометцентре России (МОЦО ГМЦ) в начале 1990-х годов, развивалась и применялась в разных приложениях [Реснянский и Зеленко, 1991a; 1992; 2010; Зеленко и Реснянский, 2007; Зеленко и др., 2010б]. В основе МОЦО лежит система так называемых исходных (иначе полных или примитивных, от англ. primitive) уравнений, записанных в сферической системе координат λ , φ , z (λ – долгота, φ – широта, z – вертикальная координата, направленная вниз):

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + L_a u - \frac{uv \operatorname{tg} \varphi}{a} - f v = & - \frac{1}{\rho_r a \cos \varphi} \frac{\partial p}{\partial \lambda} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \\ & + A_M \left[\nabla^2 u + \frac{(1 - \operatorname{tg}^2 \varphi) u}{a^2} - \frac{2 \sin \varphi}{a^2 \cos^2 \varphi} \frac{\partial v}{\partial \lambda} \right], \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + L_a v + \frac{u^2 \operatorname{tg} \varphi}{a} + f u = & - \frac{1}{\rho_r a \sin \varphi} \frac{\partial p}{\partial \varphi} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \\ & + A_M \left[\nabla^2 v + \frac{(1 - \operatorname{tg}^2 \varphi) v}{a^2} + \frac{2 \sin \varphi}{a^2 \cos^2 \varphi} \frac{\partial u}{\partial \lambda} \right], \end{aligned} \quad (2)$$

$$\partial p / \partial z = g \rho, \quad (3)$$

$$\frac{1}{a \cos \varphi} \frac{\partial u}{\partial \lambda} + \frac{1}{a \cos \varphi} \frac{\partial}{\partial \varphi} (v \cos \varphi) + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + L_a T = \frac{\partial}{\partial z} \left(\kappa \frac{\partial T}{\partial z} \right) + A_H \nabla^2 T, \quad (5)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + L_a S = \frac{\partial}{\partial z} \left(\kappa \frac{\partial S}{\partial z} \right) + A_H \nabla^2 S, \quad (6)$$

$$\rho = \rho(T, S, p). \quad (7)$$

Здесь u, v, w – компоненты скорости по долготе λ , широте φ и глубине z соответственно, t – время; a – средний радиус Земли, p – давление; ρ – плотность морской воды; ρ_r – её отсчетное постоянное значение; f – параметр Кориолиса; g – ускорение свободного падения; T – потенциальная температура воды; S – её солёность; μ и A_M – коэффициенты соответственно вертикальной и горизонтальной турбулентной вязкости; κ и A_H – коэффициенты вертикальной и горизонтальной турбулентной диффузии. Операторы адвекции и горизонтальной диффузии записываются следующим образом:

$$L_a \alpha = \frac{1}{a \cos \varphi} \frac{\partial}{\partial \lambda} (u \alpha) + \frac{1}{a \cos \varphi} \frac{\partial}{\partial \varphi} (v \alpha \cos \varphi) + \frac{\partial}{\partial z} (w \alpha), \quad (8)$$

$$\nabla^2 \alpha = \frac{1}{a^2 \cos^2 \varphi} \frac{\partial^2 \alpha}{\partial \lambda^2} + \frac{1}{a^2 \cos \varphi} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\frac{\partial \alpha}{\partial \varphi} \cos \varphi \right). \quad (9)$$

Искомые переменные — компоненты вектора скорости движения $\mathbf{v} = (u, v, w)$, потенциальная температура воды T , её солёность S , давление p . Плотность и потенциальная плотность (используемая при анализе гидростатической устойчивости) воды рассчитываются из уравнения состояния (7), задаваемого в форме аппроксимации [McDougall et al., 2003].

При записи системы исходных уравнений (1) – (9) сделан ряд приближений, которые с учетом многолетней истории их применения в моделировании атмосферы и океана, часто называют традиционными приближениями:

Сферическая аппроксимация эквипотенциальных поверхностей (геоида), из которой следует применимость сферической системы координат.

Предположение о несжимаемости морской воды, выражаемое уравнением (4), позволяет исключить из рассмотрения акустические волны при моделировании крупномасштабной циркуляции океана.

Гидростатическое приближение — уравнение для вертикальной составляющей импульса сводится к балансу между вертикальным градиентом давления и силой плавучести. При этом вертикальная составляющая скорости w определяется диагностическим образом из уравнения неразрывности (4).

Приближение Буссинеска состоит в замене плотности воды ρ в уравнениях движения на постоянное значение ρ_r повсюду за исключением члена для силы плавучести $-\rho g$.

Приближение “тонкого океана” учитывает различие на три порядка характерной глубины океана и радиуса Земли и предположения о существенном преобладании крупномасштабных горизонтальных движений над вертикальными. На этом основании в уравнениях движения (1) – (2), во-первых, взамен геоцентрического радиус-вектора используется константа a и, во-вторых, отбрасываются все метрические члены и горизонтальные составляющие силы Кориолиса, содержащие множитель w .

Приближение средних переменных подразумевает, что переменные в (1) – (7) имеют смысл средних величин по ансамблю в соответствии с подходом Рейнольдса для описания турбулентных процессов. Турбулентные потоки, определяющие влияние не описываемых используемыми уравнениями мелкомасштабных движений на крупные масштабы, выражаются через средние переменные.

Для коэффициентов вертикальной турбулентной вязкости μ и турбулентной диффузии κ используется двухслойная зависимость от глубины z и времени t :

$$\mu = \begin{cases} \mu_1 & \text{при } z \leq h \\ \mu_2 & \text{при } z > h \end{cases}, \quad \kappa = \begin{cases} \kappa_1 & \text{при } z \leq h \\ \kappa_2 & \text{при } z > h \end{cases}, \quad (10)$$

где $h = h(\lambda, \varphi, t)$ – толщина верхнего перемешанного слоя (ВПС) рассчитывается по интегральной ВПС, встроенной в МОЦО. Эта зависимость учитывает большие различия интенсивности мелкомасштабной турбулентности в пределах ВПС с развитой сплошной турбулентностью, и ниже ВПС, где турбулентность подавляется плотностной стратификацией.

Область, в которой ищутся решения уравнений МОЦО, ограничивается поверхностью океана, $z = -\eta(\lambda, \varphi, t)$, его дном $z = H(\lambda, \varphi)$, твердыми боковыми границами Γ_s , проходящими там, где H становится равным нулю, а также жидкими боковыми границами Γ_f , появляющимися в том случае, если рассматривается лишь часть Мирового океана. В общем случае область расчета является неодносвязной, имея вычленения в виде материков или островов. Граничные условия на поверхности океана наряду с условием “жесткой крышки” ($w|_{z=0} = 0$) включают задание потоков импульса, тепла и пресной воды (осадки минус испарение). На твердых боковых границах для скорости принимаются условия прилипания и отсутствия потоков тепла и соли через границу. На дне океана для скоростей принимаются условия обтекания или квадратичного трения, а для трассеров T, S – отсутствия потоков тепла и соли.

Применение в качестве кинематического условия на поверхности океана приближения “жесткой крышки” позволяет отфильтровать быстрые процессы, не слишком важные для рассматриваемых задач. Но при этом возникает необходимость решения дополнительной эллиптической задачи для вспомогательной переменной (интегральной функция тока) которая, подробно рассматривается в п. 2.2.1 и 2.2.2 диссертации.

Использование уравнений переноса тепла (5) и соли (6) для расчета температуры и солёности воды с постоянными значениями коэффициента турбулентной диффузии κ дает лишь грубую оценку вертикальных распределений этих величин в верхнем слое моря. Роль мелкомасштабных процессов вертикального турбулентного перемешивания, весьма схематично описываемых K -теорией, здесь намного существенней, чем в толще воды. Для более точного описания необходимо отказаться от предположения о существовании простой линейной зависимости турбулентных потоков тепла и соли от соответствующих вертикальных градиентов и определять эти потоки из дополнительных соображений.

В верхнем пограничном слое океана действует ряд турбулентных процессов (сдвиговая неустойчивость течений, термохалинная конвекция, обрушение поверхностных волн) приводящих к интенсификации перемешивания и образованию приповерхностного квазиоднородного по вертикали слоя. Ещё один важный механизм, способствующий перемешиванию верхнего слоя океана, связан с генерацией крупных циркуляционных ячеек (вихрей Лангмюра) за счет взаимодействия дрейфовых течений и ветрового волнения [Зеленько и Радикевич, 1977]. Для условий нейтральной стратификации показано [Зеленько, 1978; 1983], что такие вихри генери-

руют дополнительные потоки импульса, приводящие к заметному выравниванию скоростей течений по глубине. В работе [Belcher et al., 2012] приводятся указания на то, что учет Лангмюровской турбулентности может устранить замеченные систематические смещения в модельных расчетах глубины и температуры верхнего перемешанного слоя (ВПС) в океане.

Действие всех перечисленных процессов перемешивания приводит к выравниванию характеристик в верхнем слое океана и служит основанием для построения так называемых интегральных моделей с постоянными по глубине распределениями температуры и солёности в пределах ВПС. В используемой интегральной модели [Реснянский и Зеленько, 1991a] параметризация турбулентного перемешивания обеспечивает при определенных условиях в ходе углубления ВПС переход от режима проникающей конвекции к режиму непроникающей конвекции. Существование последнего из режимов в классе решений уравнений модели ВПС является необходимым условием для воспроизведения циклических состояний верхнего слоя океана [Реснянский, 1989].

Еще один механизм вертикального обмена, связанный с плотностной конвекцией, которая может развиваться не только в поверхностном слое, но и в толще воды. Этот процесс параметризуется по схеме конвективного приспособления, включающейся всякий раз, как только обнаруживаются статически неустойчивые сочетания значений плотности в соседних слоях воды. Эта схема достаточно адекватно воспроизводит процессы глубокой конвекции в океане на разных временных масштабах [Зеленько и Реснянский, 2007].

Конечноразностная аппроксимация исходных дифференциальных уравнений МОЦО следует общей схеме, предложенной в работах [Bryan, 1969; Semtner, 1974], и строится с использованием так называемого бокс-метода, на основе анализа балансов в элементарных объемах, образуемых смежными узлами сеточной области. Для адвективных членов это приводит к центральным разностям с осреднением некоторых сеточных переменных на шахматной сетке типа В по известной классификации Аракавы. По времени применяется явная схема "чехарды" (с полунеявным описанием отдельных членов уравнений движения — силы Кориолиса и барического градиента), дополненная фильтром Робера [Asselin, 1972] для подавления двухшагового расщепления решения. Для подключения модели ВПС в конечно-разностный аналог циркуляционной модели (1) – (7) разработана специальная схема [Реснянский и Зеленько, 1991a].

Описание программного комплекса МОЦО приводится в п. 2.2.4, а описание используемых в работе конфигураций МОЦО и соответствующие наборы настроечных и алгоритмических параметров представлены в п. 2.2.5. Для верификации первой версии МОЦО был проведен цикл численных экспериментов с упрощенными идеализированными условиями и с воспроизведением ситуаций с известными аналитическими решениями [Реснянский и Зеленко, 1991a; 1992]. Результаты этих предварительных экспериментов подтвердили работоспособность программного комплекса.

В третьей главе “Моделирование крупномасштабной изменчивости океана” представлены результаты исследований крупномасштабной изменчивости основных гидрофизических полей, с использованием МОЦО ГМЦ. Целью исследования, рассматриваемого в п. 3.1, является анализ механизмов развития конвективного перемешивания в открытом океане на разных временных масштабах [Зеленко и Реснянский, 2007].

На большей части акватории Мирового океана плотностная стратификация главного термоклина препятствует прямому обмену свойств морской воды между поверхностными слоями и абиссалью. Такой обмен оказывается возможным только в отдельных ограниченных по площади районах, где имеет место особое сочетание условий, в первую очередь, — слабая вертикальная плотностная стратификация вод океана и интенсивная теплоотдача (сильный отрицательный поток плавучести) на поверхности воды. При наличии всего комплекса условий перемешивание, обычно сосредоточенное в верхних слоях океана, распространяется до больших глубин, обеспечивая формирование глубинных вод, т.е. имеет место так называемая глубокая конвекция. Отличительной особенностью конвективных процессов в их развитии по времени является то, что по своей продолжительности эпизоды интенсивной теплоотдачи могут быть довольно короткими (порядка суток или нескольких суток), а по последствиям их влияние может распространяться, как минимум, на сезонные и более длительные интервалы времени.

Для проведения описываемых в данном параграфе численных экспериментов использовалась глобальная версия МОЦО ГМЦ, расчетной областью в которой является весь Мировой океан, за исключением северной приполярной зоны к северу от $80,3^\circ$ с.ш. Горизонтальное разрешение составляет $2^\circ \times 2^\circ$ в большей части расчетной области с уменьшением шагов по широте пропорционально косинусу широты к северу от 40° с.ш. Вертикальная структура аппроксимирована 32-мя уровнями со сгущением в поверхностных слоях. Подробные сведения о конфигурации модели

приведены в п. 2.2.5 диссертации, а параметризация конвективных процессов по схеме конвективного приспособления обсуждается в п. 2.2.3.2.

Интегрирование МОЦО в численных экспериментах начиналось из состояния покоя с климатическими январскими распределениями температуры и солёности воды, задаваемыми по данным климатического атласа WOA01. В качестве граничных условий на вход модели подавались поля атмосферных воздействий на поверхности океана (потоки тепла, пресной воды и касательное напряжение ветра) с 6-часовой дискретностью по данным реанализа метеорологических полей NCEP [*Kanamitsu et al, 2002*]. Календарная дата, к которой отнесено начало интегрирования, определялась началом последовательности данных по атмосферным воздействиям – 01.01.1979. Продолжительность интегрирования составляет 24 года (1979–2002 гг.).

Диагностика эпизодов конвекции в численных экспериментах осуществлялась посредством так называемой конвективной маски, идентифицирующей ячейки расчетной сетки, в которых имеет место конвективное перемешивание, и фиксирующей максимальную глубину конвекции в каждой ячейке. Наряду с конвективной маской, пространственно-временная изменчивость конвективных процессов характеризуется также толщиной ВПС h , являющейся одной из расчетных переменных модели. На рисунке 2а показаны среднемесячные поля h для пиковых месяцев холодных периодов года — февраля в северном полушарии и августа в южном. Осреднение выполнено для модельных данных за период 1987–2002 гг. Характерная глубина проникновения ветрового перемешивания составляет 50-100 м. Поэтому области со значениями, превышающими эту величину, можно уверенно относить к проявлениям конвективных процессов. Главная особенность, выделяющаяся на рисунке 2а, — это выраженная полушарная асимметрия поля h с локализацией максимальных значений в Северной Атлантике, где выделяются две главные области глубокой конвекции в Мировом океане. Первая область располагается у южной оконечности Гренландии и включает Лабрадорское море и прилегающую с востока акваторию Северной Атлантики (“Лабрадорский регион”), вторая приурочена к Гренландскому и Норвежскому морям (“Гренландский регион”). В модели сопоставимых с ними по протяженности и мощности конвективного слоя областей нет ни в северной части Тихого океана, ни во всем южном полушарии.

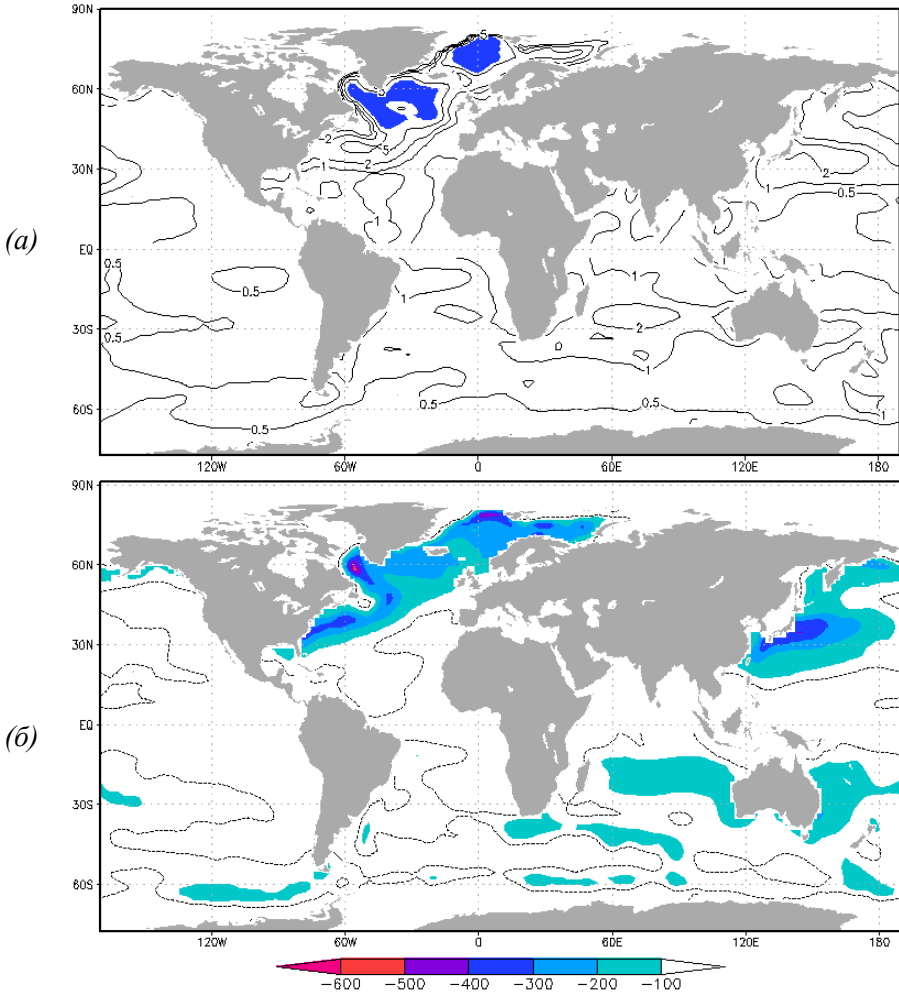


Рисунок 2. Среднемесячные поля для пиковых месяцев зимних сезонов: на картах в северном полушарии – показаны распределения для февраля, в южном полушарии – для августа. Период осреднения 1987–2002 гг.

(а) Расчетная среднемесячная глубина ВПС h . Изолинии глубины h , помеченные в сотнях метров, проведены для значений 50, 100, 200 и 500 м, закрашены области, в которых h превышает 1 км.

(б) Среднемесячная интенсивность теплоотдачи (отрицательный поток тепла, $Вт \cdot м^{-2}$) на поверхности океана по данным реанализа NCEP. Пунктирная изолиния соответствует значению $-50 Вт \cdot м^{-2}$.

Анализ данных численных экспериментов показывает (в согласии с результатами других исследований), что локализация районов глубокой конвекции в океане определяется особым сочетанием необходимых для этого условий:

- слабая плотностная стратификация вод океана;
- интенсивная теплоотдача (отрицательный поток плавучести) на поверхности воды;
- динамическая предобусловленность – крупномасштабная циклоническая циркуляция, с которой связан куполообразный изгиб изопикнических поверхностей, порождаемый поднятием слабо стратифицированных вод из глубинных слоев ближе к поверхности океана.

Комплекс этих условий выполняется для обоих полученных в модели регионов глубокой конвекции. Учет особенностей циркуляции, управляющих подводом слабо стратифицированных водных масс к поверхности, позволяет во многом объяснить межгодовые вариации глубокой конвекции в Северной Атлантике (рисунок 3) и существенные их различия в двух регионах.

Картина короткопериодной изменчивости конвективных процессов, прослеживаемая в модели с использованием конвективной маски, оказывается весьма динамичной во времени. Области реализации конвективной неустойчивости в течение нескольких суток могут смещаться в пространстве в пределах нескольких сеточных ячеек, исчезать и вновь возникать при сохранении крупномасштабной локализации. Очевидно, что спорадичность и сильная временная перемежаемость конвективных эпизодов порождаются короткопериодными (суточными и синоптическими) вариациями атмосферных воздействий на поверхности океана, задававшихся в численных экспериментах с 6-часовой дискретностью.

В целом, получающиеся в модели крупномасштабные особенности короткопериодной, сезонной и межгодовой изменчивости конвективных процессов согласуются с известными немногочисленными экспериментальными данными и теоретическими представлениями.

Следующее исследование с использованием в качестве инструмента МОЦО ГМЦ направлено на изучение процессов адвекции и переноса водных масс. Анализ траекторий, то есть лагранжевых характеристик движения, в настоящее время является весьма активно используемым методом изучения процессов распространения примесей и других свойств воды в океане (например, [Журбас и Ох, 2001; Козлов и Кошель, 2000; Fischer and Schott, 2002; Liu and Yang, 1994]).

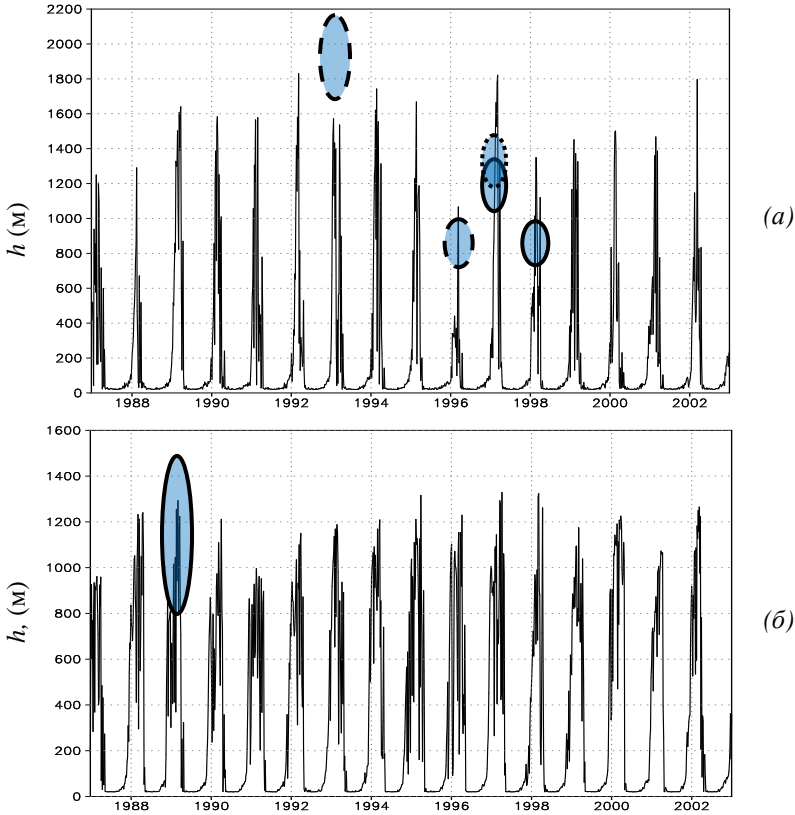


Рисунок 3. Временной ход толщины ВПС (h , м), осредненной по Лабрадорскому (а) и Гренландскому (б) регионам. Овалами с различным обрамлением показаны диапазоны изменения глубины конвективного перемешивания в соответствии с экспериментальными свидетельствами для Лабрадорского моря: [Lab Sea Group, 1998] – штриховые контуры, [Lavender et al, 2002] – сплошные контуры, [Pickart et al, 2002] – точечный контур. Для Гренландского моря использованы данные из [Schott et al, 1993].

В п. 3.2 работы применяется этот же подход для слежения за перемещением жидких частиц с начальным положением на разных горизонтах и в различных географических частях океана [Реснянский и др., 2007]. Перенос частиц осуществляется меняющимся со временем и в пространстве полем скорости течений, получаемым на основе расчетов по МОЦО ГМЦ в указанной выше двухградусной конфигурации. Вводимые в рассмотрение жидкие частицы трактуются как маркеры возможных путей

распространения водных масс. Основным объектом исследования является Южный океан — часть Мирового океана, расположенная к югу от 60° ю. ш. В этой циркумполярной океанической области, которая примыкает к трём океанам и является их связующим звеном, формируются и взаимодействуют важные водные массы.

Картина переносов является существенно трёхмерной как это наглядно показывают индивидуальные расчетные траектории маркеров (рисунок 4). По ходу движения в системе горизонтальной циркуляции частицы воды претерпевают сильные вертикальные смещения, на каждом этапе попадая в другие циркуляционные структуры бароклинного океана.

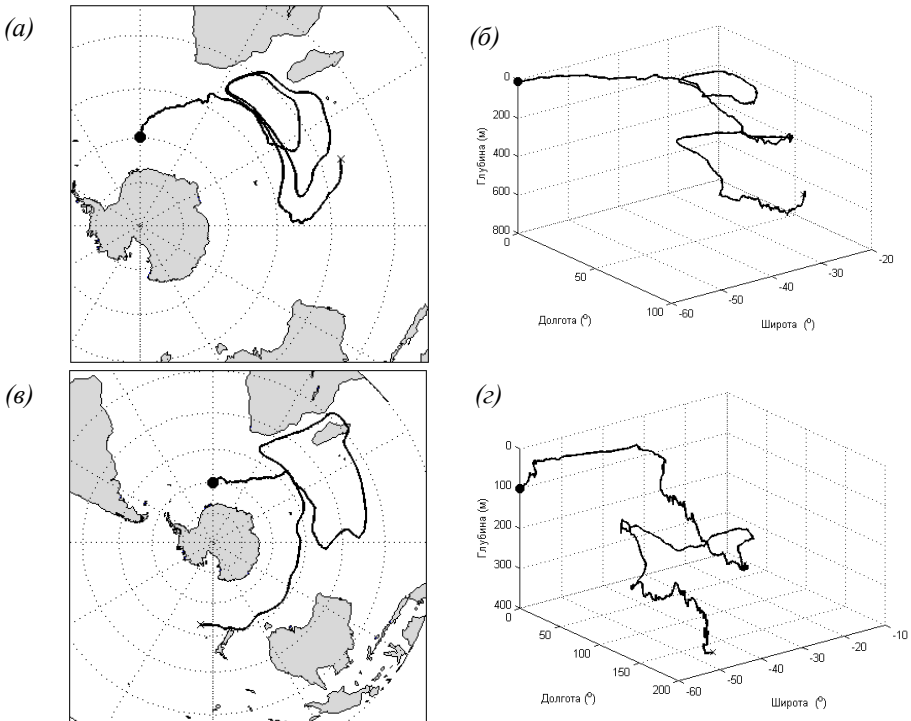


Рисунок 4. Траектории жидких частиц, выпущенных в Атлантическом секторе Южного океана (0° в.д., 60° ю.ш.) на глубинах 10 м (а, б) и 100 м (в, г). Левые панели (а, в) – горизонтальные проекции траекторий; правые панели (б, г) – их трехмерные представления. Продолжительность расчета 24 года. Кругжками (крестиками) показаны начальные (конечные) положения частиц.

Введение в рассмотрение ансамбля траекторий позволяет дать более общее описание процессов переноса и перемешивания массы и других свойств вод океана в сравнении с расчетами единичных траекторий (рисунок 5). Ансамбли формировались из набора начальных положений 100 жидких частиц, компактно распределенных внутри нескольких заданных трёхмерных модельных боксов расчетной сеточной области МОЦО.

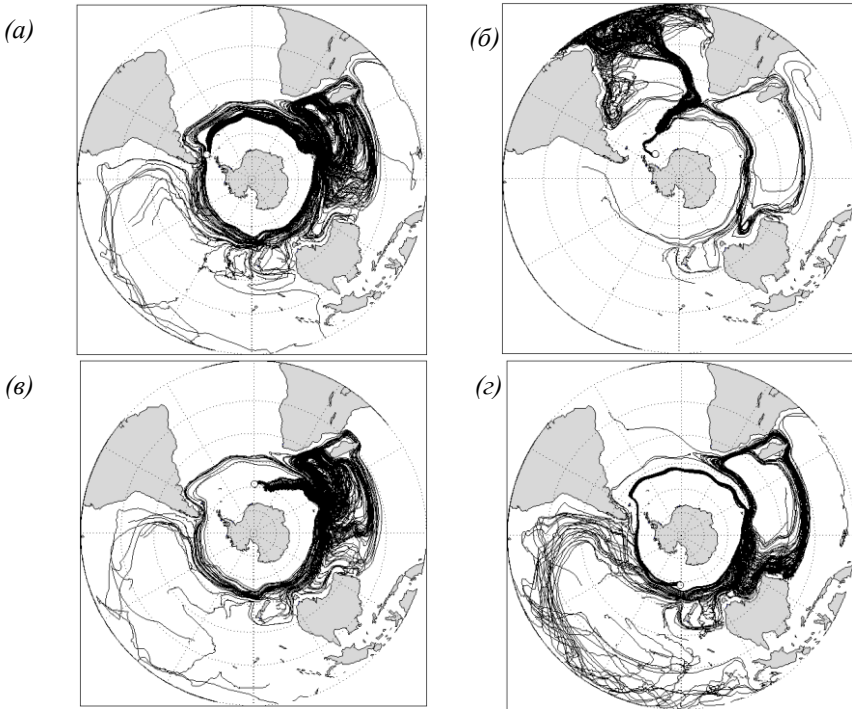


Рисунок 5. Ансамбли горизонтальных проекций траекторий 100 жидких частиц, стартующих из промежуточного слоя (100 м) в четырёх районах Южного океана: *а* – пролив Дрейка (62° з.д., 59° ю.ш.), *б* – море Уэдделла (45° з.д., 70° ю.ш.), *в* – Атлантический сектор Южного океана (0° в.д., 60° ю.ш.), *г* – Тихоокеанский сектор Южного океана (180° в.д., 60° ю.ш.). Продолжительность расчета 24 года (1979–2002). Кружками показаны начальные положения компактных наборов маркеров.

Из анализа результатов расчета ансамблевых траекторий следует, что средние по ансамблю глубины прослеживаемых жидких частиц, как правило, увеличиваются со временем для верхних стартовых горизонтов

(10 м и 100 м) и уменьшаются для глубинного стартового горизонта (1000 м). Это можно рассматривать как свидетельство того, что хаотический перенос, возникающий в поле нестационарных трехмерных крупномасштабных течений в Южном океане, содержит вполне отчетливые указания на действенный механизм вертикального перераспределения массы — результирующее погружение вод из поверхностных слоев и их подъем из глубинных слоев.

В четвертой главе “Система усвоения океанографических данных” рассматривается система для Мирового океана, действующая в оперативном режиме (п. 4.1–4.4). Представлены также результаты ретроспективного расчета (реанализа) основных гидрофизических полей Мирового океана (п. 4.5).

Системы усвоения океанографических данных (СУОД) являются одним из основных компонентов морских информационно-прогностических систем, обеспечивающих решение задач оперативной океанологии. Назначение таких систем – получение оптимальной оценки текущего состояния гидрофизических полей с использованием данных измерений и расчетов по модели общей циркуляции океана. Разработка СУОД ведется во многих мировых океанографических и метеорологических центрах (сводки приводятся в [Зеленько и др., 2010б; Martin et al., 2015]). Судя по публикациям, в Российской Федерации оперативные системы усвоения океанографических данных реализованы только для Мирового океана [Зеленько и др., 2007; 2010б; Zelenko et al., 2008 Зеленько и др., 2016а] и Черного моря [Коротяев и др., 2016].

Суть процедур усвоения данных состоит в комбинировании (совмещении) данных наблюдений и результатов расчетов по гидродинамической модели, которая выступает в роли пространственно-временного интерполятора для областей, слабо освещенных наблюдениями. Оба компонента СУОД – наблюдения и модель – не лишены неточностей. В конечном итоге процедура усвоения данных сводится к построению оптимальной комбинации из этих двух источников информации с учетом статистической структуры ошибок каждого из них. Получаемая при этом оценка оказывается более точной, чем оценки, извлекаемые порознь из наблюдений или из модельных расчетов. Успешность (качество результатов) всякой системы усвоения данных определяется уровнем развития основных составляющих СУОД — наблюдений, модели и анализа. Под анализом здесь, как и в прочих системах обработки данных для использования в численных моделях, понимается процедура получения упорядоченной, приведенной к регулярной сетке, оценки гидрофизических полей по их

предварительно рассчитанному первому приближению и нерегулярным, произвольно расположенным наблюдениям.

В нашем случае для усвоения данных применяется подход с циклической схемой "анализ-прогноз-анализ", который уже длительное время успешно используется в метеорологии, а в последние годы стал широко внедряться и в океанологических системах. Базовыми элементами, которыми оперирует схема, являются поле первого приближения анализируемой величины и отклонение наблюдений от этого поля (так называемые инновации). Задача шага "прогноз" состоит в получении поля первого приближения на основе расчетов по эволюционной гидродинамической модели, стартующей из состояния анализа предшествующего цикла. Затем вычисляются инновации в пространстве наблюдений, которые на шаге "анализ" посредством той или иной объективной процедуры проектируются на пространство модели (получаемые поля отклонений наблюдений на сетке модели называют "инкрементами"). После добавления инкрементов к текущему модельному состоянию осуществляется шаг "прогноз" следующего цикла. В такой циклической схеме на шаге анализа усваиваются как текущие наблюдения (непосредственно, в процедуре анализа), так и прошлые наблюдения (опосредованно, через поле первого приближения).

Основу входной информации для глобальных систем усвоения составляют данные контактных профильных измерений температуры и солёности морской воды в толще океана. Источником оперативных океанографических данных для системы служит сервер, поддерживаемый в рамках проекта USGODAE¹, и предназначенный для сбора информации из многочисленных источников и предоставления всем заинтересованным центрам однотипного набора исходной информации. В качестве характерного примера входной информации СУОД на рисунке 1 показана 10-суточная порция данных наблюдений, поступающих от главных наблюдательных подсистем. Такой интервал накопления наблюдений совпадает с шириной окна усвоения информации в СУОД, а также обусловлен типичной продолжительностью цикла поступления измерений от большинства буёв Арго, составляющей те же 10 суток.

В рассматриваемых системе усвоения океанографических данных, её приложениях и численных экспериментах используются две циркуляционные модели: МОЦО ГМЦ и модельный комплекс НЕМО. Для первой применяется "одноградусная" конфигурация: горизонтальное разрешение

¹ <http://www.usgodae.org>

составляет $1^\circ \times 1^\circ$ в районе экватора с монотонным уменьшением широтных шагов сетки пропорционально косинусу широты по мере приближения к полюсам, т. е. шаги горизонтальной сетки МОЦО меняются в диапазоне примерно от 100 км в районе экватора до 20 км у северной и южной границ области. Расчетной областью является Мировой океан за исключением приполярной зоны к северу от $80,1^\circ$ с. ш. Вся толща океана (от поверхности до 5.5 км) по глубине разбита на 32 слоя, толщина которых увеличивается от поверхности до дна, сообразно типичному распределению вертикальных градиентов температуры и солёности в океане. В широтной зоне, прилегающей к северной границе, также, как и в створе пролива Гибралтар применяется релаксация рассчитываемых в модели температуры и солёности воды к среднемесячным данным климатического атласа WOA01, интерполируемым на каждом временном шаге модели, с коэффициентом релаксации, соответствующим постоянной времени около 20 суток. Модельный рельеф дна построен на основе цифрового массива топографических и батиметрических данных¹ ETOPO5.

Турбулентные потоки тепла, пресной воды и импульса, входящие в граничные условия на поверхности океана и часто называемые атмосферными воздействиями, рассчитываются по интегральным аэродинамическим формулам (англ. bulk formulae) следуя последней версии алгоритма COARE 3.0 [Fairall et al., 2003]. Параметры приводного слоя атмосферы, являющиеся аргументами этих формул, задаются с использованием выходной продукции метеорологических прогностических систем, а температура поверхности океана (ТПО) – по текущим значениям, рассчитываемым в МОЦО. Влияние морского льда на поверхностные потоки учитывается по упрощенной схеме: распределение ледового покрова (его сплошность) задается по наблюдениям.

В рамках циклической схемы усвоения данных интегрирование МОЦО позволяет получить предварительную оценку каждого из анализируемых полей, называемую полем первого приближения, и вычислить вектор инноваций – отклонений наблюдаемых значений от этого поля. Следующей после получения инноваций процедурой в схеме усвоения данных является этап так называемого анализа (ранее часто использовался термин “объективный анализ”).

Применявшаяся в первой версии СУОД двумерная вариационная схема анализа 2D-Var заменена более общей трехмерной вариационной схемой 3D-Var. В этой схеме искомый вектор состояния X^a (в нашем

¹ <https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/etopo5.html>

случае трехмерное поле температуры воды или её солёности) определяется путем минимизации функционала [Lorenc, 1986]:

$$J[X] = \frac{1}{2}(X - X^f)^T B^{-1}(X - X^f) + \frac{1}{2}(X^{obs} - HX)^T R^{-1}(X^{obs} - HX). \quad (11)$$

Здесь X – варьируемый вектор состояния океана (в нашем случае трехмерное поле температуры воды или её солёности) и $J[X^a]$ доставляет минимум $J[X]$; X^f – поле первого приближения; X^{obs} – вектор наблюдений; B – матрица ковариаций ошибок поля первого приближения; R – матрица ковариаций ошибок наблюдений; H – так называемый оператор наблюдений. В общем случае нелинейный оператор H определяет модельный эквивалент наблюдаемой величины в точке наблюдения, который может быть непосредственно сопоставлен с самим наблюдением X^{obs} . В нашем случае оператор наблюдений – это оператор линейной интерполяции анализируемой переменной из модельной сетки на точку наблюдения.

Единственность минимума квадратичного функционала (11) обеспечивается положительностью и невырожденностью ковариационных матриц B и R . Для моделирования пространственных ковариаций поля ошибок первого приближения (матрицы B) используется обобщение на пространственный случай модели авторегрессии и скользящего среднего (АРСС) – ПАРСС [Цирульников и др., 2010]. Конкретная реализация такой модели в применении к нашей задаче построена путем аппроксимации эмпирических ковариаций ошибок поля первого приближения, рассчитанных с использованием результатов усвоения данных с 2D-Var версией анализа на интервале времени с января 2006 по март 2008 гг. и осредненных по всему Мировому океану. Оценки трехмерных эмпирических ковариаций получены с использованием методики из работы [Реснянский и др., 2010]. Ошибки наблюдений считаются некоррелированными и диагональные элементы матрицы R задаются пропорциональными дисперсии ошибок поля первого приближения, зависящей от глубины.

Используется одноэлементная схема анализа, при которой последовательно усваивается информация по температуре и солёности воды, без учета их связей с другими элементами. И хотя базовые составные части системы усвоения — МОЦО и анализ по схеме 3D-Var — отличаются достаточно строгой исходной формулировкой, технологические процедуры

их объединения уже не являются столь однозначными. В работе рассматривается три варианта реализации принятого цикла усвоения $X^f \rightarrow (X^{obs} - HX^f) \rightarrow \delta X^a \rightarrow X^f$ и обосновывается выбор оптимального из них. В частности, показано [Зеленько и др., 2010б], что для исключения больших скачков во временном ходе усваиваемых величин необходимо применять так называемый метод дробных инкрементов [Bloom et al., 1996] по которому поля инкрементов анализа вводятся в модель не одновременно, а добавляются по частям на всем интервале интегрирования МОЦО.

Регулярная информационная продукция СУОД включает ежедневные файлы с полями атмосферных воздействий на поверхности океана, температуры и солёности воды, трёх составляющих вектора скорости течений, толщины ВПС и интегральной функции тока, по которой могут определяться расходы течений в выбранных створах. Набор таких файлов обновляется каждые 10 суток и доступен пользователям через FTP-сервер Гидрометцентра России.

На рисунке 6 представлены обобщенные (по пространству и времени) статистики разностей расчетных полей в конце цикла усвоения с данными независимых, не использовавшихся в процедуре усвоения, наблюдений с буев Арго, как наиболее однородных из всех имеющихся данных. Для сравнения приведены такие же статистики разностей, полученных применительно к климатическим полям атласа WOA01, приведенным по структуре к полям МОЦО посредством линейной пространственно-временной интерполяции. При вычислениях данные по глубине группировались по слоям, соответствующим вертикальной структуре расчетной области МОЦО. Можно видеть, что для смещений система усвоения по сравнению с климатом дает почти везде улучшенные оценки. В терминах средних квадратичных отклонений выигрыш по системе усвоения отмечается на всех глубинах без исключений, как для температуры, так и для солёности воды.

Таким образом, оценки текущего состояния основных гидрофизических полей в рассмотренной системе усвоения океанографических данных оказываются информативнее, чем оценки по климатическим обобщениям, которые прежде были основным источником сведений о состоянии подповерхностных слоев океана.

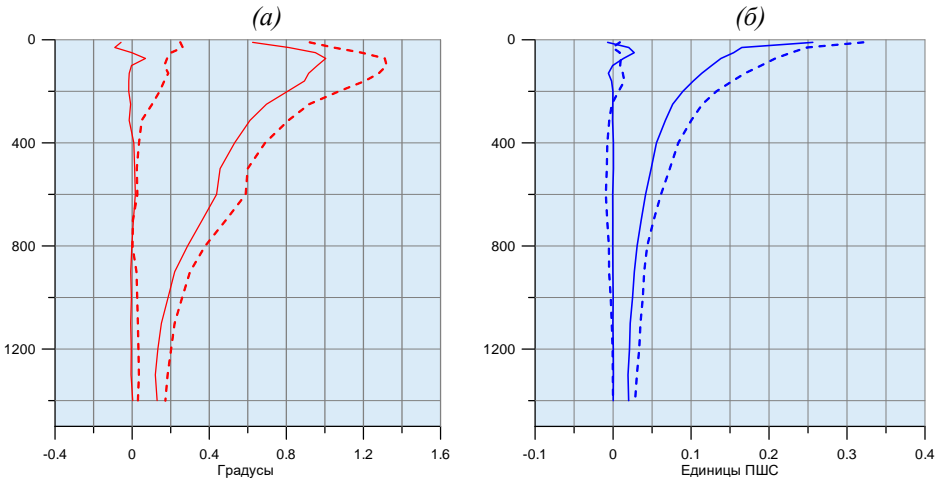


Рисунок 6. Распределение по глубине средних и средних квадратичных отклонений разностей оценок полей температуры ($^{\circ}\text{C}$) – (а), солёности (е.п.с.) – (б) и наблюдений Арго (сплошные кривые) и аналогичные статистики для климатических полей (пунктир), полученные за период 11.04.2008-01.11.2009. Система усвоения данных с одноградусным разрешением.

Как обычно в приложениях с оперативными гидрометеорологическими системами мониторинга и прогнозирования постоянно ведутся работы по совершенствованию этих систем, опирающиеся на развитие наблюдательных систем, моделей и вычислительных средств. На смену рассмотренной системе развивается новая версия СУОД, направленная, в первую очередь, на устранение имеющихся ограничений предшествующего варианта. Существенные ограничения обеих реализованных версий СУОД на базе МОЦО ГМЦ [Зеленько и др. 2007; 2010б] связаны с исключением из расчетной области приполярной зоны к северу от 80° с. ш. А условие жесткой крышки, используемое в циркуляционной модели, не даёт возможности явно рассчитывать изменения уровня океана, одной из важных переменных, характеризующих динамику океана и поддающейся корректировке в ходе усвоения имеющихся альтиметрических данных.

Поэтому при создании следующей версии системы усвоения было принято решение в качестве прогностической МОЦО использовать одну из активно развивающихся моделей общей циркуляции океана – модель NEMO. Применение этой модели позволяет снять основные из перечисленных ограничений, и модификация СУОД вносит по сравнению с предшествующими версиями следующие новации:

- эффективное в вычислительном отношении включение в расчетную область приполярного региона в сеточной конфигурации ORCA1;
- введение в МОЦО (и СУОД) новой эволюционной переменной – высоты поверхности океана – добавляющей новые возможности для усвоения данных спутниковой альтиметрии;
- применение современных массивно-параллельных алгоритмов для интегрирования модели, особенно актуальное в связи с внедрением в Гидрометцентре России нового вычислительного комплекса с пиковой производительностью ~1 петафлопс;
- включение в систему эволюционной модели морского льда в дополнение к использовавшемуся прежде подходу с предписанным из наблюдений ледовым покровом;
- расширение набора параметризаций для ряда океанических процессов и вычислительных алгоритмов.

На базе модели NEMO реализована версия СУОД 3.0 с 10-суточным и односуточным окном усвоения данных (последний вариант действует в оперативном режиме). Сравнительные характеристики основных спецификаций всех реализованных версий СУОД представлены в таблице 1. Выходная продукция новой версии системы включает в себя совокупность следующих океанографических полей, осредненных за текущие сутки анализа в узлах сетки модели ORCA1: поля температуры воды, её солёности, горизонтальных компонентов скорости течения на 46 модельных уровнях, двумерные поля уровня моря, толщины верхнего перемешанного слоя и сплоченности ледяного покрова. Наряду с числовыми данными в формате NetCDF, принятом в модели NEMO, результаты усвоения даются и в графическом представлении. Примеры выходной продукции для некоторых из получаемых гидрофизических полей приведены в п. 4.6 диссертации. Осредненные оценки точности получаемых полей температуры и солёности воды новой версии СУОД близки к оценкам, представленным на рисунке 6, и только по этим критериям не удаётся выделить предпочтительную версию системы.

Представленная система усвоения данных обеспечивает мониторинг текущего состояния океана и получение начальных условий для прогнозирования его развития путем интегрирования МОЦО на интервалах времени порядка 10 суток (для которых имеется информативный метеорологический прогноз для задания атмосферных воздействий).

Вместе с тем системы усвоения данных имеют ещё одно, ставшее уже традиционным, применение — это ретроспективный расчет (реанализ) гидрометеорологических полей на длительном временном интерва-

ле. К достоинствам реанализа относятся: во-первых, расширение информационной базы за счет данных наблюдений, распространяемых в задержанном режиме; и, во-вторых, использование единых процедур усвоения (в отличие от подверженных частым изменениям оперативных версий систем усвоения данных).

Таблица 1 – Основные характеристики трёх версий системы усвоения океанографических данных, развиваемой в Гидрометцентре России

Версия СУОД	1.0	2.0	3.0
Период действия	2007–2010	2011–н/вр	2017–н/вр
Модель океана	МОЦО ГМЦ 3.1	МОЦО ГМЦ 3.2	NEMO 3.6
Расчетная область	90°ю.ш.–81°с.ш.	90°ю.ш.–81°с.ш.	90°ю.ш.–90°с.ш.
Система координат	Географическая	Географическая	Трехполярная
Горизонтальное разрешение	2°×2°cosφ; ~ 40–200 км	1°×1°cosφ; ~20–100 км	1°×1°; ~30–100 км
Тип вертикальной координаты	Z-координата	Z-координата	Z-координата
Размерность сетки	180×175×32	360×266×32	362×292×46
Учет ледового покрова	Предписанный лёд (сплоченность)	Предписанный лёд (сплоченность)	Модель эволюции льда (LIM2)
Усваиваемые данные	T, S, SST, ICEC	T, S, SST, ICEC	T, S, SST, ICEC, SLA
Окно усвоения	10 сут	10 сут	1 сут / 10 сут
Метод анализа	2D-Var	3D-Var	3D-Var
Выходные поля	u, v, w, T, S, MLD, ψ	u, v, w, T, S, MLD, ψ	$u, v, w, T, S, MLD, \eta, C_{ice}, H_{ice}$
Период обновления полей	10 сут	10 сут	10 сут / 1 сут
Цифровая продукция	FTP сервер	FTP сервер	Локальная сеть
Графическая продукция	Web сервер	—	Локальная сеть

Примечания:

T, S – профильные наблюдения температуры и солёности (буи Арго, ХВТ, заякоренные буи); SST – поля ТПО (анализ), ICEC – поля сплоченности льда (анализ), SLA – аномалии уровня поверхности океана (анализ данных спутниковой альтиметрии AVISO/CMEMS); C_{ice} , H_{ice} – сплоченность и толщина льда (перечисленные модели LIM2). Красным цветом выделены важные модификации характеристик СУОД при переходе от одной версии к другой.

На базе второй версии СУОД (таблица 1) выполняется ретроспективный расчет (реанализ) основных гидрофизических полей Мирового океана, начинающийся с 2005 г. и продолжающийся в квазиоперативном режиме вплоть до настоящего времени [Зеленько и др., 2016а; Зеленько и др., 2016б]. В п. 4.5 диссертации представлено подробное описание используемых наблюдений и процедур реанализа и обсуждаются некоторые результаты, полученные на базе пополняемого обширного массива данных — временного ряда взаимосогласованных полей океанологических характеристик. Данные реанализа распространяются через Интернет по протоколу FTP в виде ежесуточных файлов в формате NetCDF, которые доступны для авторизованных пользователей.

В пятой главе “Прогнозирование ветрового волнения в океане и морях России” рассматривается комплексная система прогнозирования параметров ветрового волнения в Мировом океане и морях европейской части России. Разработка и внедрение систем оперативного прогноза ветрового волнения относятся к числу наиболее актуальных задач оперативной океанологии для развития информационного обеспечения морской деятельности. Общая задача состоит в том, чтобы пользователям предоставлялась оперативная прогностическая информация по основным параметрам ветрового волнения (с максимально возможной заблаговременностью и детализацией) для акваторий всех морей России и для океанических акваторий и регионов, обозначаемых в Морской доктрине РФ.

Анализ проводимых работ в этом направлении показывает, что для комплексного решения задачи прогноза волнения требуется тесное сопряжение технологических линий прогноза параметров волнения с системами метеорологического прогноза, поставляющими прогностические поля ветра. Преодолению проблемных обстоятельств, связанных с множественностью географических объектов для прогнозирования волновых условий, может способствовать применение базовой (единой) модели ветрового волнения для технологических линий по всем морским объектам и “тиражирование” основных элементов этих линий.

Оперативные системы прогнозирования ветрового волнения, развиваемые во многих центрах, основаны на использовании численных моделей. Наибольшее распространение получили спектральные модели, основанные на численном решении сеточными методами уравнения баланса волновой энергии или волнового действия в спектральной форме [WAMDI group, 1988; Лавренов, 1998; Tolman, 2009; SWAN team, 2010]. Входными данными для таких моделей в их прогностических приложениях служат результаты численного метеорологического прогноза.

При разработке комплексной системы были рассмотрены наиболее известные модели ветрового волнения, ориентированные на применения в прогностических системах, и проанализированы их возможности и специфические особенности, с учетом сформулированных требований для базовой модели. В итоге, в качестве базовой модели ветрового волнения для разработки технологических линий прогноза параметров волнения в морях России и других акваториях была выбрана модель WAVEWATCH III, версия 3.14+ (далее WW3).

Эта модель относится к третьему поколению волновых моделей. Расчет осуществляется путем интегрирования уравнения баланса для спектральной плотности волнового действия $N(k, \theta, \lambda, \phi, t)$, являющейся функцией волнового числа k , направления распространения θ , географических координат (λ, ϕ) и времени t . Для общего случая, в котором учитывается зависимость поля волн от средних течений (связанные с течениями доплеровские эффекты), расчетное уравнение в сферической системе координат записывается следующим образом [Tolman, 2009]:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{1}{\cos \phi} \frac{\partial}{\partial \phi} \dot{\phi} N \cos \theta + \frac{\partial}{\partial \lambda} \dot{\lambda} N + \frac{\partial}{\partial k} \dot{k} N + \frac{\partial}{\partial \theta} \dot{\theta}_g N = \frac{S}{\sigma}, \quad (13)$$

$$\dot{\phi} = \frac{c_g \cos \theta + U_\phi}{R}, \quad \dot{\lambda} = \frac{c_g \sin \theta + U_\lambda}{R}, \quad \dot{k} = -\frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial s} - \mathbf{k} \cdot \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial s},$$

$$\dot{\theta}_g = \dot{\theta} - \frac{c_g \tan \phi \cos \theta}{R}, \quad \dot{\theta} = -\frac{1}{k} \left[\frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m} + \mathbf{k} \cdot \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial m} \right], \quad c_g = \frac{\partial \sigma}{\partial k} = \frac{\sigma}{k} \left[\frac{1}{2} + \frac{kd}{\sinh(2kd)} \right],$$

здесь c_g – групповая скорость волн, определяемая из дисперсионного соотношения в рамках линейной теории волн $\sigma^2 = gk \tanh kd$, $\mathbf{U} = (U_\lambda, U_\phi)$ – средняя по глубине на масштабе порядка длины волны скорость течений, R – радиус Земли, d – глубина, s – координата по направлению θ , m – перпендикулярная s координата, \mathbf{k} – вектор волнового числа, S – совокупный вклад источников и стоков энергии волн в различных спектральных диапазонах:

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{bot} + S_{db} + S_{tr} + S_{sc}. \quad (14)$$

В модели учитываются основные процессы развития волн под действием ветра: ветровая накачка – приток энергии от ветра (S_{in}), перераспределение энергии по спектру вследствие нелинейных взаимодействий (S_{nl}), процессы ослабления волн из-за донного трения (S_{bot}), обрушения (S_{ds}), рассеяния энергии на донных неоднородностях (S_{sc}) и трехволновых

взаимодействий на мелководье (S_{tr}). Допускается учет влияния течений, приливов, островов подсеточного масштаба и ледового покрова.

Граничные условия на береговой линии для переноса N зависят от направления волн: при распространении волн к берегу принимается условие полного поглощения энергии (без отражения), если волны идут от берега, то на береговой линии задается отсутствие волнового действия $N=0$. В задаче расчета внутриспектральных процессов в пространстве (θ, k) для θ выполняется условие периодичности, а для k в низкочастотной части $k < k_{min}$ волновое действие обнуляется (k_{min} – первое значение в дискретной области волновых чисел), а на границе больших волновых чисел (высоких частот) используется заданная параметрическая форма спектра.

Программный код волновой модели позволяет по входным данным (скорости приводного ветра, скорости поверхностного течения, уровня воды и разности температур вода–воздух, сплоченности морского льда) рассчитывать изменения со временем спектральной плотности распределения дисперсии отклонений поверхности моря. По известной спектральной плотности определяются производные величины, представляющие практический интерес для потребителей морской информации, такие как высота значительных волн (англ. significant wave height, SWH), средняя длина волн, средний период, направление распространения волн и многие другие.

Помимо расчетного ядра, система прогноза ветрового волнения включает в себя средства конфигурирования расчетных областей и подготовки входной информации. Расчетные области, аппроксимирующие конфигурацию берегов и батиметрию реальных морских бассейнов, в прогностической модели определяются на регулярных широтно-долготных сетках. Основные характеристики реализованных расчетных конфигураций системы прогнозирования ветрового волнения представлены в таблице 2.

Прогнозы метеорологических полей берутся из нескольких оперативных источников. В их числе – продукция двух глобальных прогностических моделей, ПЛАВ и GFS, а также система мезомасштабного прогнозирования COSMO-RU. Полулагранжева модель ПЛАВ, разработана в Гидрометцентре России совместно с ИВМ РАН [Толстых, 2001]. Выходная продукция системы GFS (Global Forecasting System), функционирующей в метеорологическом центре NCEP/NOAA (США), поступает в оперативном режиме в Гидрометцентр России по специализированным каналам. Система мезомасштабного негидростатического прогнозирования COSMO-RU [Вильфанд и др., 2010;

Таблица 2 – Морские бассейны и расчетные сетки в системе прогноза волнения

Основной бассейн	Вложенные регионы	Сетка	Заблаговременность / дискретность (час)	Прогноз ветра
Мировой океан	Мировой океан	$0,5^\circ \times 0,5^\circ$ (~ 50 км)	120/3	ПЛАВ, GFS
	Баренцево море	$0,25^\circ \times 0,1^\circ$ (~ 10 км)	120/3	ПЛАВ, GFS
	Белое море	$3,0' \times 1,2'$ (~2 км)	120/3	ПЛАВ, GFS
Черное море	Черное море	$6,0' \times 6,0'$ (~10 км)	120/3	ПЛАВ, GFS
	Азовское море	$1,2' \times 1,2'$ (~2 км)	120/3, 48/1	ПЛАВ, GFS, COSMO-RU
	<i>Керченский пр-в</i>	<i>$0,3' \times 0,3'$ (~0.5 км)</i>	<i>48/1</i>	<i>COSMO-RU</i>
Каспийское море	Каспийское море	$3,6' \times 3,6'$ (~6 км)	120/3	ПЛАВ, GFS
	Северный Каспий	$1,2' \times 1,2'$ (~2 км)	120/3	ПЛАВ, GFS
Балтийское море	Балтийское море	$4,8' \times 2,4'$ (~4 км)	120/3	ПЛАВ, GFS
	Финский залив	$2,4' \times 1,2'$ (~2 км)	120/3, 48/1	ПЛАВ, GFS, COSMO-RU
	<i>Невская губа</i>	<i>$0,24' \times 0,12'$ (~0.2 км)</i>	<i>48/1</i>	<i>COSMO-RU</i>

Примечание: Курсивом выделены конфигурации, используемые в неоперативном режиме.

Ривин и др., 2011] обеспечивает получение метеорологической информации с более высоким, чем в глобальных моделях, пространственным разрешением. Основные спецификации метеорологических прогностических систем, обеспечивающих поступление оперативных данных атмосферного форсинга для прогнозирования характеристик ветрового волнения, представлены в таблице 3.

Дублирование источников метеорологического прогноза (таблицы 2 и 3) предусмотрено для повышения надежности функционирования системы прогнозирования волнения. При поступлении оперативных данных из нескольких метеорологических систем приоритет отдается продукции с более высокими характеристиками оправдываемости прогнозов полей ветра по данным регулярного мониторинга их качества.

Начальные условия для каждого из прогнозов, представляющие собой спектральную плотность распределения дисперсии отклонений поверхности моря в момент старта прогноза, задаются по данным предыдущего суточного прогноза. Разработана также процедура разгона модели из состояния покоя по данным последовательных анализов полей ветра, предшествующих старту прогноза.

Таблица 3 – Основные характеристики систем прогноза метеорологических полей, продукция которых используется для задания атмосферного форсинга в прогностических расчетах параметров ветрового волнения

Прогностическая система, Выпускающий центр	Регион	Разрешение	Стартовые сроки прогноза (час ВСВ)	Заблаговременность прогнозов (час)	Дискретность (час)
ПЛАВ <i>Гидрометцентр РФ</i>	Глобус	$\sim 0,9^\circ$	00, 12	0-120	3
GFS <i>NCEP/NOAA</i>	Глобус	$\sim 0,2^\circ$	00, 06, 12, 18	0-192	3
COSMO-RU07 <i>Гидрометцентр РФ</i>	ЕТР	~ 7 км	00, 12	0-78	1
COSMO-RU07 <i>Гидрометцентр РФ</i>	ЕТР	~ 7 км	12, 18	0-42	1

Регулярным расчетам прогнозов ветрового волнения в оперативном режиме предшествовал этап продолжительных (около года) испытаний системы для получения обеспеченных оценок качества прогностических полей параметров волнения по каждому из географических объектов. Точность прогнозов оценивалась путем сопоставления прогностических значений высоты значительных волн (SWH) с данными наблюдений двух типов: спутниковых (альтиметрических) измерений из базы данных RADSS, поддерживаемой в Дельфтском институте исследований Земли из космоса [Scharroo et al, 2013], и данных волновых буев при их наличии в соответствующей акватории. Для количественной оценки качества прогнозов высоты волн использовались такие показатели как оправдываемость прогноза Onp , подсчитываемая в соответствии с [Наставлением..., 2011], а также средние ошибки: CO — средние отклонения прогностических значений от наблюдаемых (смещения), среднеквадратичные ошибки CKO и коэффициенты корреляции Kop между измеренными и прогностическими значениями.

В качестве примера показателей точности прогнозов высоты волн в таблице 4 приведены результаты оценок для 5-суточных прогнозов параметров ветрового волнения по акватории Мирового океана. Полученные характеристики превосходят показатели других национальных прогностических систем для океана и его частей [Зеленько и др., 2016г] и в целом не уступают таковым для зарубежных систем (рисунок 7).

Таблица 4 – Показатели качества прогнозов высоты значительных волн в Мировом океане, оцениваемых относительно альтиметрических и буйковых данных за годовой период 1.10.2014-30.09.2015

Сутки прогноза	Наблюдательная система	Число сравнений (млн)	CO (м)	CKO (м)	Kop	Onp (%)
1	Спутниковая альтиметрия	48,580	0,23	0,53	0,94	88,3
	Волновые буй	1,007	0,13	0,47	0,90	90,2
2	Спутниковая альтиметрия	48,484	0,23	0,56	0,94	87,6
	Волновые буй	1,003	0,14	0,49	0,89	89,4
3	Спутниковая альтиметрия	48,309	0,23	0,61	0,92	86,3
	Волновые буй	1,001	0,14	0,52	0,88	88,3
4	Спутниковая альтиметрия	48,173	0,22	0,68	0,90	84,2
	Волновые буй	0,997	0,14	0,56	0,85	87,0
5	Спутниковая альтиметрия	48,033	0,21	0,78	0,86	81,3
	Волновые буй	0,993	0,14	0,61	0,82	85,1

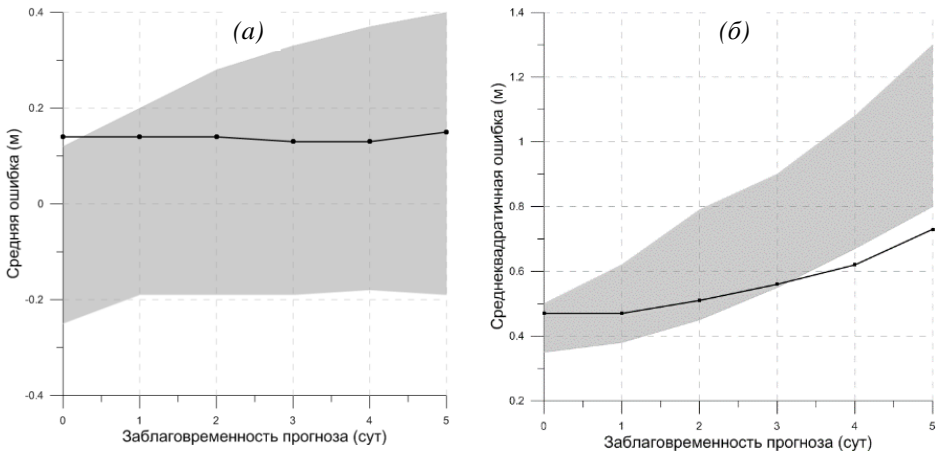


Рисунок 7. Зависимость смещения (а) и среднеквадратического отклонения (б) от заблаговременности прогноза высоты волн (SWH) для системы Гидрометцентра России (линии) и диапазон изменчивости указанных характеристик по данным [Intercomparison..., 2015] для 10 моделей зарубежных центров(заливка). Оценки получены по данным ежедневных оперативных прогнозов за январь-март 2015 г.

Помимо акватории Мирового океана текущая версия комплексной системы прогнозирования волнения поддерживает оперативный расчет прогнозов для Черного, Азовского, Каспийского и Балтийского морей. Соответствующие приложения системы для этих географических объектов прошли в 2012–2016 гг. ведомственную сертификацию Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам Росгидромета и получили статус основных прогностических методов на национальном уровне [*Струков и др., 2013б; Зеленко и др., 2014б; Зеленко и др., 2016г*]. Продукция прогностической системы распространяется в графическом виде через Интернет¹ и в цифровой форме через систему распределенных баз данных Единой государственной системы информации об обстановке в Мировом океане (ЕСИМО).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

К итогам проведенных исследований и технологических разработок, представленных в диссертационной работе, можно отнести:

- модель общей циркуляции океана (МОЦО), включающую формулировку гидротермодинамической задачи, конечно-разностную аппроксимацию системы уравнений и вычислительную реализацию МОЦО в виде программного комплекса;
- анализ физических механизмов развития и изменчивости конвективного перемешивания в открытом океане на суточном, сезонном и межгодовом масштабах по данным наблюдений и численных экспериментов с МОЦО;
- результаты исследования структуры и возможных путей распространения водных масс в циркуляционной системе Южного океана на основе анализа модельных траекторий жидких частиц;
- первую национальную систему усвоения океанографических данных для Мирового океана, действующую в оперативном режиме;
- ретроспективный расчет (реанализ) основных гидрофизических полей Мирового океана, выполненный с помощью разработанной системы усвоения данных;
- комплексную систему прогнозирования параметров ветрового волнения в Мировом океане и морях России.

¹ <http://hmc.meteorf.ru/sea/index.html>

Полученные результаты имеют большие перспективы для развития. Разработанные информационные системы могут быть существенно модифицированы в связи с введением в действие в Росгидромете нового высокопроизводительного (~ 1 петафлопс) вычислительного комплекса с массивно-параллельной архитектурой, который открывает возможность для реализации приложений оперативной океанологии нового поколения. Среди первоочередных задач — реализация моделей для явного описания так называемой погоды океана, то есть синоптических образований (циклонов и антициклонов) в океане, имеющих характерные размеры порядка 10–100 км. Ввод в действие новых вычислительных ресурсов подразумевает задачу внедрения технологий прогноза эволюции основных гидрофизических полей океана на сроки порядка 10 суток на основе начальных данных, поставляемых системой усвоения оперативных наблюдений. Ещё одно важное направление — разработка технологии детализированного мониторинга и прогнозирования гидрофизических полей в арктическом бассейне на базе детализированной модели высокого разрешения, сопряженной с глобальной моделью Мирового океана.

Во многих отношениях рассматриваемые в диссертации задачи сходны с многолетними исследованиями и работами по мониторингу и прогнозированию состояния атмосферы на разных пространственно-временных масштабах. К настоящему времени в этом направлении достигнуты большие успехи. Происходящая резкая активизация подобных работ применительно к океану в значительной степени стимулируется этими достижениями. Таким образом, есть основания полагать, что имеющее сейчас место отставание оперативной океанологии от более успешной и старшей по возрасту "оперативной метеорологии" будет сокращаться.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК

1. **Зеленько А.А.**, Вильфанд Р.М., Реснянский Ю.Д., Струков Б.С., Цырульников М.Д., Свиренко П.И. Система усвоения океанографических данных и ретроспективный анализ гидрофизических полей Мирового океана // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2016а. Т. 52, № 4. С. 501–513.

2. **Зеленько А.А.**, Реснянский Ю.Д. Струков Б.С. Режимные характеристики ветра и волнения в Печорском море по данным реанализа метеорологических полей и расчетов по волновой модели // Труды Гидроме-

теорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. Гидрометеорологические прогнозы. 2016в. Вып. 362. С. 19–36.

3. Реснянский Ю.Д., Цырульников М.Д., Струков Б.С., **Зеленько А.А.** Статистическая структура пространственной изменчивости термохалинных полей океана по данным профильных наблюдений системы Argo за 2005-2007 гг. // Океанология. 2010. Т. 50. № 2. С. 165-183.

4. **Зеленько А.А.**, Реснянский Ю.Д. Глубокая конвекция в модели общей циркуляции океана: изменчивость на суточном, сезонном и межгодовом масштабах // Океанология. 2007. Т. 47. № 2. С. 211–224.

5. Реснянский Ю.Д., **Зеленько А.А.**, Струков Б.С. Крупномасштабная циркуляция Южного океана по данным численных экспериментов в лагранжевом представлении // Проблемы Арктики и Антарктики. 2007. № 76. С. 49-67.

6. Реснянский Ю.Д., **Зеленько А.А.**, Нестеров Е.С., Розинкина И.А. Оценка потоков на поверхности океана, воспроизводимых оперативной системой среднесрочного прогнозирования Гидрометцентра России // Метеорология и гидрология. 2005. № 4. С. 85-101.

7. **Зеленько А.А.**, Реснянский Ю.Д., Струков Б.С. Моделирование распространения примеси в Северной Атлантике от линейных и точечных источников // Метеорология и гидрология. 2001. № 5. С. 72-86.

8. Реснянский Ю.Д., **Зеленько А.А.** Эффекты синоптических вариаций атмосферных воздействий в модели общей циркуляции океана: прямые и косвенные проявления // Метеорология и гидрология. 1999. № 9. С. 66-77.

9. **Зеленько А.А.**, Реснянский Ю.Д. Информационные возможности оперативной наблюдательной сети для глобального диагноза температуры поверхности океана // Метеорология и гидрология. 1996. № 10. С. 51-59.

10. Реснянский Ю.Д., **Зеленько А.А.** Сезонная изменчивость общей циркуляции океана по данным численного моделирования с двумя типами атмосферных воздействий // Метеорология и гидрология. 1996. № 9. С. 65-74.

11. Реснянский Ю.Д., **Зеленько А.А.** Исследование чувствительности и моделирование климатической циркуляции океана // Метеорология и гидрология. 1993. № 2. С. 77-86.

12. Реснянский Ю.Д., **Зеленько А.А.** Параметризация верхнего перемешанного слоя в модели общей циркуляции океана // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1991а. Т. 27. № 10. С. 1080-1088.

13. **Зеленько А.А.**, Реснянский Ю.Д. Баланс тепла верхних слоев Аравийского моря в весенний период // Метеорология и гидрология. 1990. № 10. С. 83-92.

14. Реснянский Ю.Д., **Зеленько А.А.** Автоматизированная схема прогноза температуры поверхностного слоя океана на 5 суток // Метеорология и гидрология. 1987. № 8. С. 71-80.

15. **Зеленько А.А.** Равновесная модель циркуляции Лангмюра в океане // Метеорология и гидрология. 1978. № 12. С. 56-64.

16. **Зеленько А.А.**, Радикевич В.М. Гидродинамическая неустойчивость слоя трения и циркуляция Лангмюра в океане // Метеорология и гидрология. 1977. № 4. С. 66-75.

17. Струков Б.С., **Зеленько А.А.**, Реснянский Ю.Д. Программа прогноза параметров ветрового волнения в Азовском, Черном и Каспийском морях. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2013615120 // Правообладатель: ФГБУ "Гидрометцентр России". Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 29.05.2013. М. 2013а.

18. Струков Б.С., **Зеленько А.А.**, Реснянский Ю.Д., Мартынов С.Л. Программа для прогноза параметров ветрового волнения в Белом море (заблаговременность 5 суток, пространственно-временное разрешение 2 км, 1 час). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2014615100 // Правообладатель: ФГБУ "Гидрометцентр России". Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 19.05.2014. М. 2014а.

19. Струков Б.С., **Зеленько А.А.**, Реснянский Ю.Д., Мартынов С.Л. Программа для прогноза параметров ветрового волнения в Балтийском море (заблаговременность 3-5 суток, пространственно-временное разрешение 2-5 км, 1-3 час). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2014615147 // Правообладатель: ФГБУ "Гидрометцентр России". Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 20.05.2014. М. 2014б.

20. **Зеленько А.А.**, Струков Б.С., Реснянский Ю.Д. Программа усвоения оперативных и ретроспективных океанографических данных. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2014617507 // Правообладатель: ФГБУ "Гидрометцентр России". Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 24.07.2014. М. 2014а.

Публикации в других изданиях

21. **Зеленько А.А.**, Реснянский Ю.Д., Струков Б.С. Изменения термических характеристик океана по данным реанализа за 2005-2015 гг. // Труды Государственного океанографического института им. Н.Н.Зубова. Исследование океанов и морей. Вып. 217. Москва. 2016б. С. 6-20.
22. **Зеленько А.А.**, Реснянский Ю.Д., Струков Б.С. Результаты испытаний системы прогнозирования ветрового волнения в Мировом океане // Информационный сборник № 43. Результаты испытаний новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. ФГБУ "Гидрометцентр России". М. 2016г. С. 133-147.
23. **Zelenko A.A.**, Strukov B.S., Resnyansky Yu.D., Martynov S.L. Verification of the wind wave forecasting system for the Baltic sea // Research activities in atmospheric and oceanic modelling. CAS/JSC WGNE. WCRP Report No. 12/2015. WMO. 2015. P. 8.23-8.24.
24. **Зеленько А.А.**, Реснянский Ю.Д., Струков Б.С. Оперативная океанология в Гидрометцентре России: состояние и перспективы // Труды Государственного океанографического института им. Н.Н.Зубова. Исследование океанов и морей. Вып. 216. Москва. 2015. С. 157-171.
25. Strukov B.S., Resnyansky, **Zelenko A.A.** Ocean data assimilation with a modified intermittent dynamic relaxation // Research activities in atmospheric and oceanic modelling. CAS/JSC WGNE. WCRP Report No. 12/2015. WMO. 2015. P. 8.19-8.20.
26. **Зеленько А.А.**, Струков Б.С., Реснянский Ю.Д., Мартынов С.Л. Система прогнозирования ветрового волнения в Мировом океане и морях России // Труды Государственного океанографического института им. Н.Н.Зубова. Исследование океанов и морей. Вып. 215. Москва. 2014б. С. 90-101.
27. Струков Б.С., **Зеленько А.А.**, Реснянский Ю.Д., Мартынов С.Л. Система прогнозирования характеристик ветрового волнения и результаты её испытания для акваторий Азовского, Черного и Каспийского морей // Информационный сборник № 40. Новые технологии, модели и методы гидрометеорологических прогнозов и результаты их оперативных испытаний. ФГБУ "Гидрометцентр России". М. 2013б. С. 64-79.

28. Strukov B.S., **Zelenko A.A.**, Resnyansky Yu.D., Martynov S.L. A system of wind wave forecasting in the World Ocean and Seas of Russia. The system's structure and its main constituents // Research activities in atmospheric and oceanic modelling. CAS/JSC WGNE. WCRP Report No. 42. WMO. 2012a. P. 8.03-8.04.

29. Strukov B.S., **Zelenko A.A.**, Resnyansky Yu.D., Martynov S.L. Verification of the wind wave forecasting system for the Black, Azov and Caspian seas // Research activities in atmospheric and oceanic modelling. CAS/JSC WGNE. WCRP Report No. 42. WMO. 2012b. P. 8.05-8.06.

30. **Зеленько А.А.**, Реснянский Ю.Д., Цырульников М.Д., Струков Б.С., Свиренко П.И. Мониторинг крупномасштабной структуры гидрофизических полей океана // В сб.: Современные проблемы динамики океана и атмосферы. М. Триада ЛТД. 2010б. ISBN 978-5-86344-215-3. С. 131-172.

31. Реснянский Ю.Д., **Зеленько А.А.** Развитие моделей и методов анализа данных наблюдений для мониторинга и прогнозирования крупномасштабных процессов в океане // В кн.: 80 лет Гидрометцентра России. М: ТРИАДА ЛТД, 2010. ISBN 978-5-86344-214-3. С. 350-375.

32. **Zelenko A.A.**, Resnyansky Yu.D., Tsyrlunikov M.D., Strukov B.S., Svirenko P.I. Development of a Global Ocean Data Assimilation System // Research activities in atmospheric and oceanic modelling. CAS/JSC WGNE. WCRP Report No. 38. WMO. 2008. P. 8.17-8.18.

33. Resnyansky Yu.D., Strukov B.S., Tsyrlunikov M.D., **Zelenko A.A.** Three-dimensional covariances of temperature and salinity fields estimated from Argo data // Research activities in atmospheric and oceanic modelling. CAS/JSC WGNE. WCRP Report No. 38. WMO. 2008. P. 8.07-8.08.

34. **Зеленько А.А.**, Реснянский Ю.Д., Цырульников М.Д., Струков Б.С., Свиренко П.И. Глобальная система усвоения океанографических данных: Пилотная версия // Труды VI Российской научно-технической конференции «Современное состояние и проблемы навигации и океанографии» («НО-2007»), 23-25 мая 2007 г. Санкт-Петербург. 2007. С. 464-473.

35. Resnyansky Yu.D., **Zelenko A.A.**, Strukov B.S. Ensemble of trajectories in the Southern Ocean circulation system // Research activities in atmospheric and oceanic modelling. CAS/JSC WGNE. WMO/TD - No. 37. WMO. 2007. P. 8.03-8.04.

36. **Zelenko A.A.**, Resnyansky Yu.D. Interannual variations of the upper ocean mixed layer in deep convection regions as revealed by numerical experiments with an OGCM // Research activities in atmospheric and oceanic modelling. CAS/JSC WGNE. WMO/TD - No. 37. WMO. 2007. P. 8.07-8.08.

37. **Зеленько А.А.** Оперативный модуль ЕСИМО – система гидрометеобеспечения нового поколения // Труды VI Российской научно-технической конференции «Современное состояние и проблемы навигации и океанографии» («НО-2007»), 23-25 мая 2007 г. Санкт-Петербург, 2007. С. 473-479.

38. Resnyansky Yu.D., **Zelenko A.A.**, Strukov B.S. Transport of waters from a deep convection region in the Labrador Sea: Sensitivity of trajectories to initial position and to atmospheric forcing // Research activities in atmospheric and oceanic modelling. CAS/JSC WGNE. Report No. 36. WMO. 2006. P. 8.21-8.22.

39. Resnyansky Yu.D., **Zelenko A.A.** Variability of thermohaline structure in the deep convection regions and water mass pathways in an ocean global circulation model with different types of atmospheric forcing // International Conference “Fluxes and Structures in Fluids”. Moscow, Russia, June 20 – 23, 2005. Selected Papers. Eds. Yu. D. Chashechkin, V. G. Baydulov. Institute for Problems in Mechanics of the RAS, M.V. Lomonosov Moscow State University. Moscow. 2006. P. 273–278.

40. **Zelenko A.A.**, Resnyansky Yu.D. Deep convection simulated by OGCM with different types of atmospheric forcing // Research activities in atmospheric and oceanic modeling. CAS/JSC WGNE. Report No. 35. WMO. 2005. P. 8.11-8.12.

41. Resnyansky Yu.D., **Zelenko A.A.** Observed and simulated variability of ocean currents on seasonal and intra-monthly scales // Research activities in atmospheric and oceanic modelling. CAS/JSC WGNE. Report No. 34. WMO. 2004. P. 8.21-8.22.

42. Реснянский Ю.Д., **Зеленько А.А.** Динамика водообмена между океаническими бассейнами и её связь с атмосферными воздействиями в модели общей циркуляции океана // В сб.: Фундаментальные и прикладные гидрометеорологические исследования. Под ред. Р.М. Вильфанда. СПб, Гидрометеиздат. 2003. С. 150-181.

43. **Zelenko A.A.**, Resnyansky Yu.D. Water exchange between the Arctic Ocean and adjacent basins: Essential role of short-term variations // Research activities in atmospheric and oceanic modelling. CAS/JSC WGNE. Report No. 33. WMO. 2003. P. 8.20-8.21.

44. Resnyansky Yu.D., **Zelenko A.A.** Variability of the ocean circulation and the upper mixed layer simulated by OGCM // Proceedings of the 1-st Korea-Russia Joint Workshop on Climate Change and Variability. (Jeju, Korea, December 18-20, 2001). Meteorological Research Institute/KMA, Main Geophysical Observatory/ Roshydromet. 2001*b*. P. 49-55.

45. Resnyansky Yu.D., **Zelenko A.A.** The Southern Ocean circulation and water mass exchange in an Ocean General Circulation Model // Research activities in atmospheric and oceanic modelling. CAS/JSC WGNE. Report No. 31. WMO. 2001*a*. P. 8.13-8.14.

46. Реснянский Ю.Д., **Зеленько А.А.** Об одном механизме формирования низкочастотной изменчивости в климатической системе. Результаты численных экспериментов с моделью общей циркуляции океана // Труды международной теоретической конференции "Проблемы гидрометеорологии и окружающей среды на пороге XXI века". Санкт-Петербург 24-25 июня 1999. СПб, Гидрометеиздат. 2000. С. 234-240.

47. Resnyansky Yu.D., **Zelenko A.A.** The response of the upper ocean to synoptic variations of atmospheric forcing: immediate and indirect manifestations // Oceanic Fronts and Related Phenomena (Konstantin Fedorov Memorial Symposium). Saint Petersburg. 18-22 May 1998. IOC Workshop Report No. 159. UNESCO. 2000. P. 460-466.

48. **Zelenko A.A.**, Resnyansky Yu.D. Seasonal changes of hydrographic fields in a numerical model of the Japan sea // Proceedings of Fourth CREAMS Workshop. 12-13 February. Vladivostok. 1996. P. 143-146.

49. **Zelenko A.A.**, Resnyansky Yu.D. SST monitoring in the tropical zone of the World Ocean: Capabilities of the real-time observing system // Proceedings of the International Scientific Conference on the TOGA Programme (2-7 April 1995, Melbourne, Australia). Volume I. WCRP-91, WMO/TD No. 717. December 1995. P. 226-231.

50. Реснянский Ю.Д., **Зеленько А.А.** О мониторинге состояния верхнего слоя океана // Морской гидрофизический журнал. 1994. № 2. С. 37-45.

51. Воскресенская Е.Н., **Зеленько А.А.**, Полонский А.Б. Эль-Ниньо 1991-1992 годов и его проявления в тропической Атлантике // Морской гидрофизический журнал. 1992. № 6. С. 62-70.

52. Реснянский Ю.Д., **Зеленько А.А.** Численная реализация модели общей циркуляции океана с параметризацией верхнего перемешанного слоя // Труды Гидрометцентра СССР. 1992. Вып. 323. С. 3-31.

53. Polonsky A.B., Voskresenskaya E.N., **Zelenko A.A.** ENSO-like event in the Tropical Atlantic in 1991 // TOGA Notes. January 1992, No 6. P. 8-10.

54. Реснянский Ю.Д., **Зеленько А.А.** Наблюдения и моделирование изменчивости верхних слоев Аравийского моря в период развития юго-западного муссона 1988 и 1989 гг. // Морской гидрофизический журнал. 1991б. № 1. С. 42-48.

55. **Зеленько А.А.** Упрощенная схема четырехмерного анализа характеристик верхнего квазигомогенного слоя океана // В кн.: Взаимодействие океана с атмосферой и динамика муссонов: Результаты сов.-инд. экспедиции "Муссон-88" 12 февр.-27 июня 1988 г. Л.: Гидрометеиздат. 1990. С. 172-181.

56. **Зеленько А.А.**, Горин И.Г., Пятин О.Г., Румянцев А.Е. К методике определения температуры и глубины верхнего квазигомогенного слоя океана по гидрологическим данным // В кн.: Взаимодействие океана с атмосферой и динамика муссонов: Результаты сов.-инд. экспедиции "Муссон-88" 12 февр.-27 июня 1988 г. Л.: Гидрометеиздат. 1990. С. 163-171.

57. **Зеленько А.А.**, Нестеров Е.С. Объективный анализ поля температуры поверхности океана // Труды Гидрометцентра СССР. 1986. Вып. 281. С. 76-83.

58. **Зеленько А.А.**, Михайлова Э.Н., Полонский А.Б., Шапиро Н.Б. Моделирование сезонной изменчивости полей течений и температуры в Экваториальной Атлантике // В кн.: Вопросы динамики океана. Гидрометеиздат. 1984. С. 70-79.

59. **Zelenko A.A.** Reducing wind observations on the high seas to standard levels // WMO. CMM-MC-V/DOC 24. 1986. 5 p.

60. **Зеленько А.А.**, Михайлова Э.Н., Полонский А.Б., Шапиро Н.Б. Моделирование циркуляции и поля температуры в экваториальной зоне Атлантического океана // В кн.: Гидрофизические исследования в Центральной Атлантике. Севастополь. Изд. МГИ АН УССР. 1983. С. 31-40.

61. **Зеленько А.А.** Расчет характеристик деятельного слоя и циркуляция Лангмюра в океане // Труды Гидрометцентра СССР. 1983. Вып. 255. С. 15-22.