

581
0-10
На правах рукописи

ЛЕБЕДЕВ СЕРГЕЙ АНАТОЛЬЕВИЧ

ВОЗМОЖНОСТИ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО АНАЛИ-
ЗА ДИНАМИКИ ОКЕАНА ПО ДАННЫМ СПУТНИ-
КОВОЙ АЛЬТИМЕТРИИ

11.00.08 - океанология

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

МОСКВА - 1997



Работа выполнена в Государственном океанографическом институте Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды и Институте геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор Кеонджян В.П. (ГЕОХИ РАН).

Официальные
оппоненты: доктор технических наук,
профессор Борисов Т.Н. (МО РФ).

кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник
Сафронов Г.Ф. (ГОИН).

Ведущая организация: Ги
на

Защита состоится « 17 »
на заседании диссертационно
океанографическом институте
кинский переулок, дом 6.

С диссертацией можно о
океанографического институт

Автореферат разослан « 1

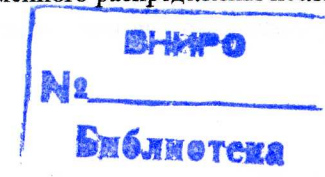
Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат географических

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Проводимые в настоящее время исследования изменчивости Мирового океана, основанные на традиционных (контактных) методах измерения океанографических параметров с использованием научно-исследовательских судов (НИС) и автономных буйковых станций уже не удовлетворяют требованиям широты охвата и оперативности получения информации о состоянии океана в целом. Для решения широкого класса задач необходимо получение информации со всей акватории океана с периодичностью не меньшей характерного временного масштаба изучаемых явлений. Это в полной мере возможно только при условии привлечения принципиально новых средств и методов наблюдений, наиболее перспективным из которых является дистанционное зондирование океана с борта искусственных спутников Земли (ИСЗ).

Очевидные успехи в развитии спутниковых методов измерения океанографических параметров ставят задачу изучения Мирового океана на новый, значительно более высокий уровень. В первую очередь это относится к задачам динамики, так как именно методы спутниковой альтиметрии позволили систематически измерять высоту морской поверхности, спектр возмущений которой настолько широк, что включает в себя почти все физические процессы, происходящие в океане и на его поверхности: от капиллярных и ветровых волн до изменений, связанных с глобальными океаническими круговоротами.

Эффективное использование спутниковой информации о состоянии Мирового океана, объем которой увеличивается с каждым годом, возможно только с помощью специализированных автоматизированных систем, позволяющих в интерактивном режиме решать задачи быстрого поиска и отбора необходимых данных, первичной обработки и визуализации пространственного или временного распределения исследуемых параметров, а



также решать широкий класс содержательных задач (статистический анализ, диагностические и прогностические модели и т.д.).

Цели работы - обоснование и разработка методов обработки и интерпретации данных спутниковой альтиметрии, программная реализация их в интегрированной среде Автоматизированной реляционной геодисциплинарной оперативной системы АРГОС; сравнение динамической топографии поверхности океана, определяемой по данным дистанционного зондирования, и приведенного уровня, рассчитанного по полю плотности, для оценки возможности проведения диагностического анализа динамики бароклинного океана по данным спутниковой альтиметрии и использования их в численном моделировании.

В соответствии с поставленной целью решались следующие задачи:

1. Разработка алгоритмов поиска и отбора данных спутниковой альтиметрии, доступных на сегодняшний день для открытого пользования, с учетом особенностей структуры и организации баз данных.

2. Расчет динамической топографии как отклонения высоты морской поверхности относительно геоида по данным спутниковой альтиметрии с учетом орбитальной ошибки и различного рода поправок. Анализ ее соответствия с приведенным уровнем бароклинного океана, полученным динамическим методом на основании поля плотности.

3. Построение диагностической геострофической модели расчета интегральной функции тока на основе данных спутниковой альтиметрии. Проведение специального численного эксперимента с целью верификации модели.

4. Программная реализация разработанных методов обработки и интерпретации данных спутниковой альтиметрии в рамках специализированной версии системы АРГОС.

В качестве основной **исходной информации** использовались независимые данные гидрометеорологических измерений эксперимента

НЬЮФАЭКС-88, проводимого осенью - весной 1987-88 гг. в акватории Ньюфаундлендской энергоактивной зоны (НЭАЗО), и данные спутниковой альтиметрии изомаршрутной программы ИСЗ GEOSAT за этот же период времени.

Научная новизна:

- впервые проведена обработка данных спутниковой альтиметрии с выделением динамической топографии поверхности океана для акватории НЭАЗО, циркуляция которой хорошо исследована многочисленными модельными расчетами по океанографическим полям, измеренным традиционными контактными методами;

- для марта 1988 года проведен сравнительный анализ динамической топографии, определяемой по данным спутниковой альтиметрии изомаршрутной программы ИСЗ GEOSAT, и приведенного уровня, рассчитанного динамическим методом по данным гидрологических станций эксперимента НЬЮФАЭКС-88;

- разработана диагностическая геострофическая модель расчета интегральной функции тока по данным спутниковой альтиметрии, верификация которой показала репрезентативность такого подхода к интерпретации данных дистанционного зондирования.

Практическая значимость работы. Диссертация выполнена в рамках научно-исследовательских работ Государственного океанографического института (ГОИН) и Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского (ГЕОХИ) РАН по проекту ГКНТ «Глобальные изменения природной среды и климата».

Разработана специализированная версия системы АРГОС, которая позволяет в интерактивном режиме отобразить и провести первичную обработку данных спутниковой альтиметрии как для проведения диагностического анализа динамики бароклинного океана, так и для решения различных геодезических задач.

Специалистами Геофизического центра (ГЦ) РАН после тестирования и обсуждения всех достоинств и недостатков системы было принято решение использовать специализированную версию системы АРГОС для создания интегрированной базы данных спутниковой альтиметрии (ИБДСА), в которую войдут результаты альтиметрических измерений с российских геодезических ИСЗ ГЕО-ИК и зарубежных ИСЗ GEOSAT, ERS-1, ERS-2, TOPEX/POSEIDON.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на семинарах Отдела динамики моря ГОИН (1994-1997 гг.), Лаборатории геоинформатики ГЕОХИ РАН (1991-1997 гг.), на Всесоюзном совещании «Актуальные проблемы развития океанографической информации» (Обнинск, 1989 г.), на совместном российско-французском семинаре «Современные геофизические исследования» (Москва, ГЦ РАН, 1996 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 6 научных работ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Она содержит 133 страниц текста, 40 рисунка, 11 таблиц и список литературы из 223 наименований, из них 143 работы иностранных авторов.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность работы, сформулированы основные задачи диссертационного исследования и изложена структура работы.

В **первой главе** кратко излагаются возможности использования спутниковой информации для решения задачи динамики бароклинного океана.

Сформулированы основные требования, предъявляемые к дистанционным измерениям температуры поверхности океана, высоты морской поверхности и поля приводного ветра для решения целого класса гидродина-

мических задач, таких как: общая циркуляция Мирового океана, изучение синоптической изменчивости, динамика основных фронтальных зон океана и западных граничных течений, задача прибрежного апвеллинга.

Анализ результатов работы российских и зарубежных ИСЗ показал, что существующая на настоящий момент точность измерения океанографических параметров различными дистанционными методами зондирования океана из космоса соответствует перечисленным выше требованиям и позволяет уже сегодня решать большой класс гидродинамических задач.

В конце главы кратко рассматриваются теории и методы интерпретации спутниковой информации для анализа динамики океана от картирования западных граничных течений по полю поверхностной температуры до моделей обработки данных дистанционного зондирования океана из космоса.

Вторая глава посвящена алгоритмам обработки и методам интерпретации данных спутниковой альтиметрии. Радиолокационный высотомер является сложным с точки зрения электроники, но концептуально простым прибором, который открывает широкую перспективу перед многими науками о Земле. Принципиальная схема метода спутниковой альтиметрии представлена на **Рис. 1**, на котором показаны различного рода поверхности, определяющие суть данного метода дистанционного зондирования из космоса.

Спутниковая альтиметрия в первую очередь призвана решать геодезические задачи: уточнение гравитационного поля Земли и формы морского геоида. Для изучения циркуляции океана по данным спутниковой альтиметрии определяют динамическую топографию поверхности океана, которая представляет собой высоту отклонения морской поверхности относительно геоида с учетом ряда поправок, связанных с прохождением

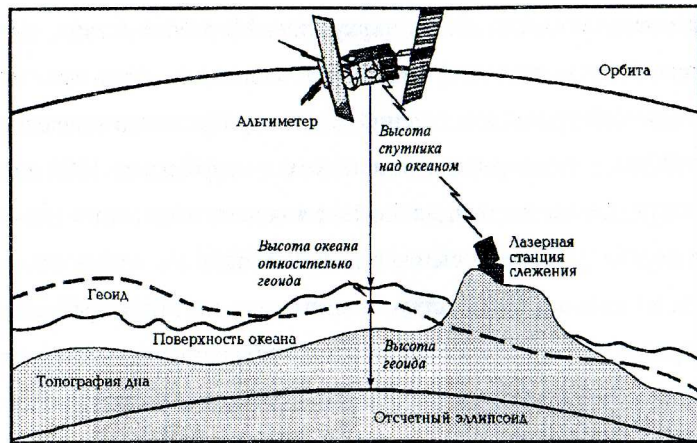


Рис. 1 Принципиальная схема метода спутниковой альтиметрии.

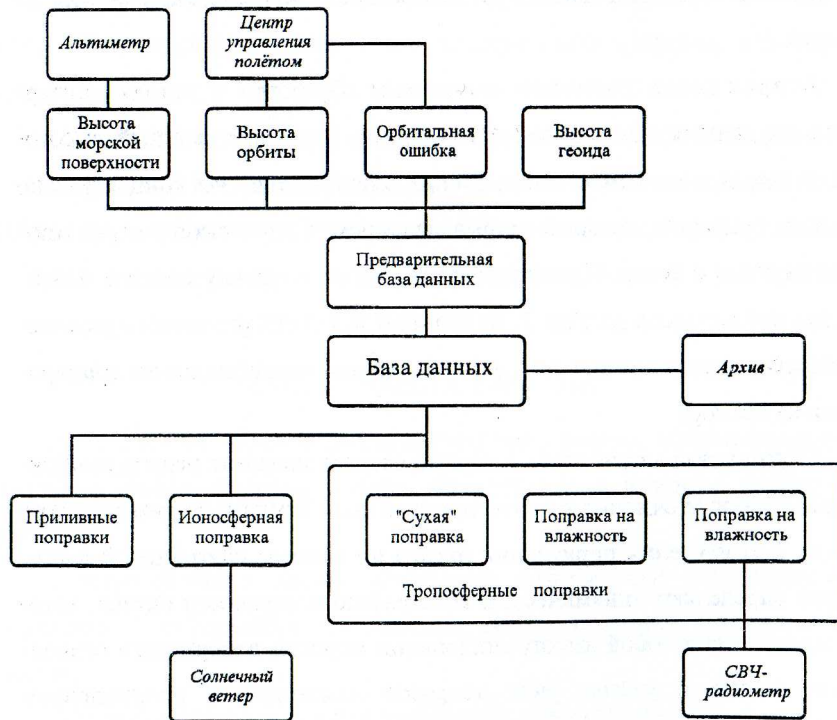


Рис. 2 Структура базы данных спутниковой альтиметрии.

радиосигнала через атмосферу, приливами, инструментальных и орбитальных ошибок.

Организация всех баз данных спутниковой альтиметрии экспериментов GEOSAT, ERS-1, ERS-2, GEO-ИК, TOPEX/POSEIDON строится в два этапа по следующей схеме Рис. 2. На первом этапе производится определение пространственного положения спутника (географические координаты над поверхностью океана и время проведения измерений), расчет высоты орбиты спутника относительно отсчетного эллипсоида и обработка сигнала альтиметра с целью определения расстояния от спутника до морской поверхности в положении надира.

В результате формируется предварительная база данных. Это связано с тем, что на основании навигационных данных может быть произведен пересчет пространственного положения и, соответственно, высоты орбиты спутника по новым геопотенциальным моделям, ошибки которых постоянно уменьшаются по мере уточнения гравитационного поля Земли и формы морского геоида на основании данных спутниковой альтиметрии.

На следующем этапе формирования базы данных к предварительной ее части добавляются рассчитанные по моделям величины:

- орбитальных ошибок, обусловленных прерыванием пространственного слежения, ошибкой доплеровского слежения и ошибкой геопотенциальной модели;
- поправок, связанных с влиянием ионосферы (рассеивание радиоимпульса свободными электронами) и атмосферы (молекулярное рассеивание радиоимпульса и поглощение водяным паром) на время запаздывания радиоимпульса;
- приливные поправки (солнечный и океанский приливы).

При этом часть атмосферных поправок может быть определена на основании соответствующей спутниковой информации, полученной другим типом датчиков или с борта другого ИСЗ.

Особенностью баз данных спутниковой альтиметрии является то, что они занимают значительный объем и в большинстве своем представлены на оптических дисках (CD-ROM). Информация записана в двоичном коде в бинарном формате в виде инвертированных файлов прямого доступа.

Первостепенное значение при анализе данных спутниковой альтиметрии приобретают задачи ее оперативной обработки и достоверной интерпретации с использованием аналитических и численных математических моделей.

На основе автоматизированной реляционной геодисциплинарной оперативной системы АРГОС, которая хорошо зарекомендовала себя при эффективном использовании океанографических данных, полученных традиционными контактными методами измерений, для работы со спутниковой альтиметрией разработана специализированная версия системы с сохранением всех возможностей и преимуществ уже существующей.

Поиск и отбор информации производится на основании простейшего критерия ($Const_1 \leq a \leq Const_2$) или более сложного, созданного логическими операторами (*or, and, not*). Дополнительные атрибуты поиска: *район, дата и время, сезон*, - дают возможность ввода информации в привычном для пользователя виде. Новые атрибуты: *цикл, серия спутника и номер орбиты*, - позволяют формировать критерии поиска без обращения к справочной литературе.

На основании способа инвертации файлов перед началом отбора составляется так называемая карта поиска, которая представляет собой последовательность номеров CD-ROM (для баз данных, записанных на нескольких носителях) и названия файлов, информация из которых в первом приближении удовлетворяет заданной логике поиска. Это значительно увеличивает скорость отбора и позволяет избежать трудностей в процессе работы, так как система автоматически запрашивает необходимый для чтения диск.

В систему включен новый программный модуль - блок расчета радиальной составляющей орбитальной ошибки, который формирует базу данных точек пересечения восходящих и нисходящих треков с определением разности в показаниях альтиметра в этих точках и рассчитывает орбитальные ошибки с последовательной коррекцией высоты поверхности моря вдоль всего трека.

Блок экспресс-анализа и первоначальной обработки данных позволяет разбить отобранную информацию на треки с определением их типа (восходящий или нисходящий), просмотреть их положения в пространстве и изменение высоты морской поверхности или поправок вдоль каждого трека. Для анализа пространственной структуры изучаемого параметра производится интерполяция данных по регулярной сетке с последующей визуализацией полученного поля в виде изообластей.

Дополнительные возможности системы позволяют исследовать не только высоту морской поверхности, с учетом различных поправок и ошибок, но и проводить анализ динамической топографии и ее синоптической изменчивости относительно средней высоты поверхности океана. В сочетании со средней динамической топографией, определяемой как отклонение средней высоты морской поверхности от высоты геоида, пользователь получает уникальную возможность анализа динамики океана по данным спутниковой альтиметрии в различных пространственно-временных масштабах.

В третьей главе проводится сравнительный анализ динамической топографией, полученной по данным дистанционного зондирования океана из космоса, и приведенного уровня, рассчитанного динамическим методом по полному давлению.

Для проведения подобного анализа привлекались независимые данные спутниковых и контактных методов измерений для Ньюфаундленд-

ской энергоактивной зоны океана (НЭАЗО), которая хорошо изучена и достаточно информационно обеспечена.

В рамках программы «Разрезы» с ноября 1987 года по апрель 1988 года в этом районе проводился эксперимент НЬЮФАЭКС-88. В этот же период времени осуществлялась изомаршрутная программа спутника GEOSAT. Уникальность обоих массивов данных заключается в том, что они независимы, то есть данные НИС не являются контрольными подспутниковыми измерениями, и положение треков и расстояние между ними почти полностью соответствует галсам судов.

Район НЭАЗО характеризуется сложной динамической структурой. Здесь расположена так называемая «дельта» Гольфстрима - район разделения собственно Гольфстрима на Северо-Атлантическое течение и ряд других ветвей. Центральное место на полигоне занимает квазистационарный антициклонический вихрь (КСАВ). По его развитию и положению можно судить об общей динамической ситуации на всей акватории НЭАЗО. Одной из основных черт динамической структуры данного района является существование квазистационарного меандра в юго-западной части полигона, который обусловлен выходом основного течения на южную оконечность Большой Ньюфаундлендской банки.

На основании данных о температуре и солености для 115 гидрологических станций на 19 стандартных горизонтах до глубины 2000 м, полученных в результате эксперимента НЬЮФАЭКС-88 за период с 16 марта по 2 апреля 1988 года, рассчитывалось поле плотности. По полю плотности динамическим методом

$$\zeta_d = -\frac{1}{\rho_0} \int_0^H \rho' dz \quad (1)$$

рассчитывался приведенный уровень для каждой гидрологической станции.

В глубинных слоях (ниже 2000 м), где измерения температуры и солености отсутствуют, поле плотности придонных вод аппроксимировалось из

предположения, что аномалии плотности линейно затухает от заданного значения на последнем горизонте до нуля на дне.

Из базы данных изомаршрутной программы спутника GEOSAT для этого же временного интервала выбиралась информация по восходящим трекам, наиболее близко лежащим к галсам НИС, и нисходящим трекам, пересекающим не менее 6 галсов (Рис. 3). Вдоль треков рассчитывалась динамическая топография морской поверхности с учетом всех поправок, радиальной составляющей орбитальной ошибки и поправки обратного барометра. Поле атмосферного давления на уровне океана определялось через атмосферную поправку на молекулярное рассеивание радиоимпульса, рассчитанную по модели Европейского центра прогноза погоды.

Для проведения корреляционного анализа из ряда динамической топографии отбирались данные, соответствующие минимальному расстоянию между гидрологической станцией и положением спутника вдоль тре-

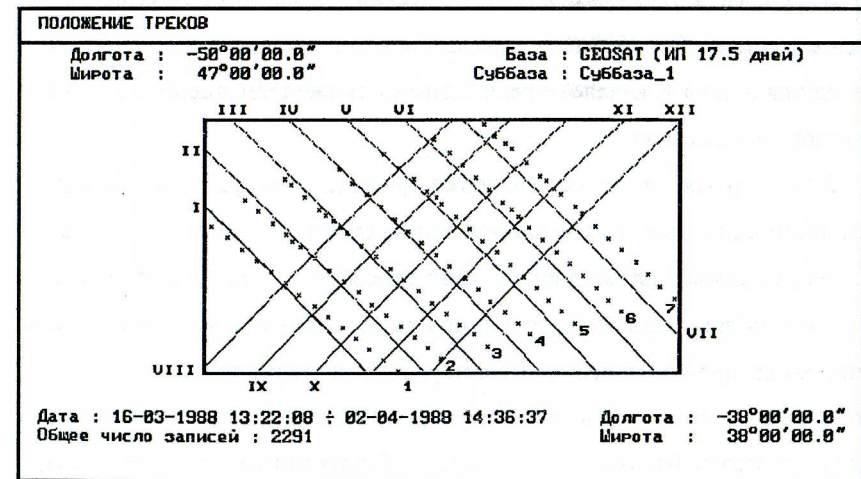


Рис. 3 Расположение гидрологических станций эксперимента НЬЮФАЭКС-88 и треков спутника GEOSAT на Ньюфаундлендском энергоактивном полигоне за период с 16 марта по 2 апреля 1988 года. Римская нумерация относится к трекам, арабская - к галсам НИС ГОИН «Муссон», «Волна» и «Виктор Бугаев».

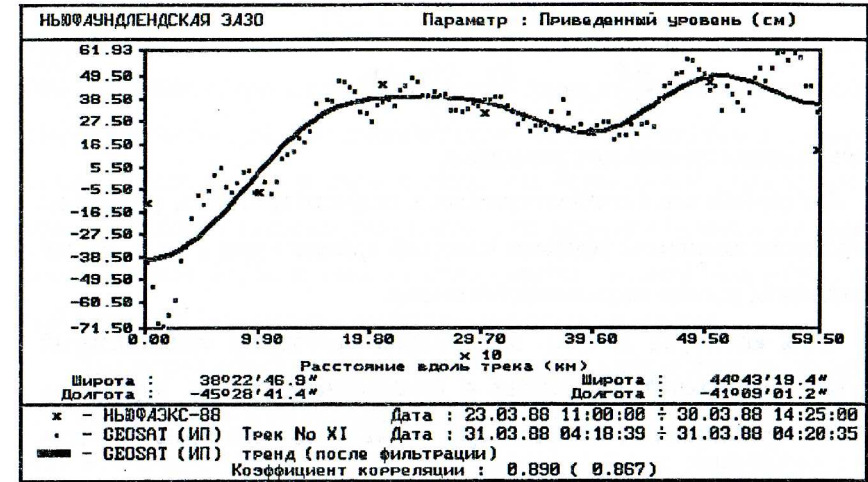
ка. На основании спектральной плотности для каждого трека осуществлялась фильтрация высокочастотной составляющей, связанной с поверхностными гравитационными волнами. Из полученного тренда проводилась новая выборка для проведения повторного анализа.

Статистический анализ показал хорошее соответствие между динамической топографией и приведенным уровнем (Рис. 4а). Малое значение коэффициента корреляции для некоторых рядов данных обусловлено в первую очередь тем, что по сравнению с судовыми измерениями вдоль галса, занятыми от 2 до 9 суток, дистанционное зондирование вдоль трека заняло не более двух минут.

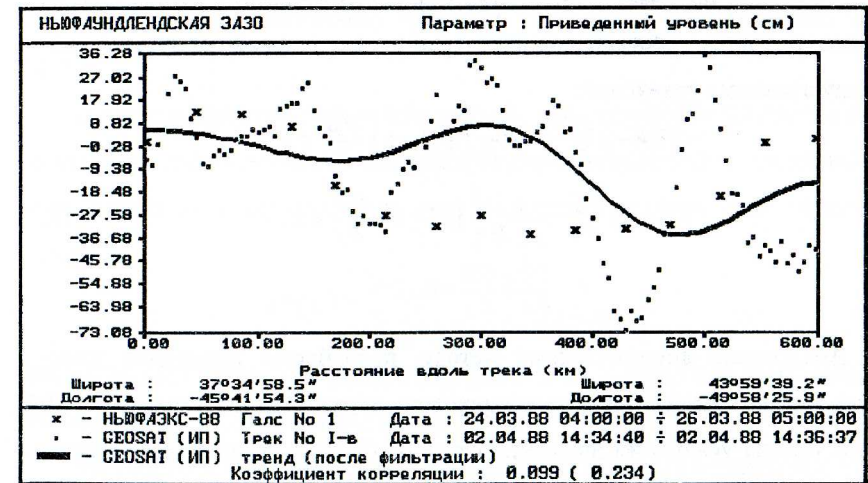
Следует отметить, что для треков I-II увеличение коэффициента корреляции стало возможным только при условии фильтрации длинных волн ($\lambda \approx 180$ км) (Рис. 4б), существование которых хорошо просматривается в функции спектральной плотности. Это связано с тем, что данные треки пересекают вдоль главной оси циклонический вихрь, который сформировался в конце ноября 1987 года из квазистационарного меандра. Уменьшение длины волны в начале апреля вызвано снижением энергии данного вихревого образования.

В четвертой главе на основе геострофического приближения строится диагностическая модель расчета интегральной функции тока по данным спутниковой альтиметрии, которая способна на основе спутниковой информации дать полную гидродинамическую картину на тот момент времени, когда производились соответствующие дистанционные измерения. Это, в свою очередь, позволит в первом приближении оценить динамическую структуру бароклинного океана по баротропным (средним по глубине) составляющим поля скорости, рассчитанным через интегральную функцию тока.

В качестве исходной системы уравнений рассматриваются уравнения геострофической диагностической задачи, записанные в приближении



(а)



(б)

Рис. 4 Изменение приведенного уровня поперек (а) и вдоль (б) галса НИС ГОИН и динамической топографии вдоль трека спутника GEOSAT. Сплошная линия - тренд динамической топографии после фильтрации высокочастотной составляющей и длинных волн на основании анализа спектральной плотности.

Буссинеска и квазистатическом приближении

$$\begin{aligned} -l v &= -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial x}, & l u &= -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial y}, \\ \frac{\partial P}{\partial z} &= \rho g, & \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} &= 0, \end{aligned} \quad (2)$$

со следующими граничными условиями.

Для вертикальной составляющей поля скорости граничное условие на поверхности заменяется условием «жесткой крышки» при $z=0$, а на дне принимается условие скольжения без трения.

Часть акватории НЭАЗО, для которой проводился сравнительный анализ динамической топографии и приведенного уровня, определена жидкими границами, на которых через составляющие интегрального расхода задаются средние по глубине составляющие поля скорости.

Выделяя из исходной системы уравнений баротропные составляющие поля скорости, после интегрирования уравнений движения по всей толще океана с учетом соответствующих граничных условий получаем следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned} -l \bar{v} &= -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{g}{\rho_0 H} \int_0^H (H-z) \frac{\partial \rho'}{\partial x} dz, \\ l \bar{u} &= -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{g}{\rho_0 H} \int_0^H (H-z) \frac{\partial \rho'}{\partial y} dz, \\ \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} &= 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Аналогично динамическому методу, пренебрегая аномалией плотности на дне океана, дифференцирование проинтегрированных по всей толще океана уравнений движения системы (3) дает уравнение для интегральной функции тока.

Однако возникают определенные сложности, связанные с тем, что неизвестная функция аномалии плотности стоит под знаком интегрирования. Это приводит к необходимости делать некоторые предположения относительно поля плотности.

Основываясь на общих представлениях о крупномасштабной океанической циркуляции, в океане всюду (за исключением высоких широт) можно выделить бароклинный слой h , в котором сосредоточены основные изменения плотности, и толщина которого мала по сравнению с глубиной океана. Предположим в связи с этим, что бароклинный слой является асимптотическим пограничным слоем, вне которого возмущения плотности затухают $\rho' \approx 0$, а, следовательно, затухают и связанные с градиентом плотности бароклинные составляющие скорости течения.

Для задачи обработки данных спутниковой альтиметрии, когда поле плотности считается неизвестным, логично искать интегральную функцию тока в отклонениях от среднесезонного значения. В силу этого можно сделать предположение о том, что изменения толщины бароклинного слоя незначительны $h \approx h_s$, т.е. все изменения, связанные с отклонением поля плотности от среднесезонного значения сосредоточены в бароклинном слое h_s .

В первом приближении можно считать, что отклонения плотности относительно среднесезонного значения по вертикали линейно изменяются от значения на поверхности до нуля на нижней границе бароклинного слоя:

$$\rho''(z) = \begin{cases} \rho''_{z=0} - a z & 0 \leq z < h_s \\ 0 & h_s \leq z \leq H \end{cases} \quad (4)$$

Это позволяет избежать трудностей, связанных с тем, что неизвестная функция стоит под знаком интеграла.

Исходя из выше сказанного, уравнение для отклонения интегральной функции тока от среднесезонного значения принимает вид:

$$\begin{aligned} L(\psi') &= \frac{h_s g}{l} \Delta \zeta' + \frac{g}{l} \left(\frac{\partial h_s}{\partial x} \frac{\partial \zeta'}{\partial x} + \frac{\partial h_s}{\partial y} \frac{\partial \zeta'}{\partial y} \right) + \frac{h_s g}{\rho_0 l} \Delta \int_0^{h_s} \rho'' dz + \\ &+ \frac{g}{\rho_0 l} \left(\frac{\partial h_s}{\partial x} \frac{\partial}{\partial x} \int_0^{h_s} \rho'' dz + \frac{\partial h_s}{\partial y} \frac{\partial}{\partial y} \int_0^{h_s} \rho'' dz \right) - \frac{g}{\rho_0 l} \Delta \int_0^{h_s} z \rho'' dz, \end{aligned} \quad (5)$$

где $L(\psi')$ - дифференциальный оператор второго порядка, определяемый

как

$$L(\psi') = \Delta \psi' + \frac{\beta}{l} \frac{\partial \psi'}{\partial y}. \quad (6)$$

Задача о расчете отклонения интегральной функции тока от среднесезонного значения сводится к решению соответствующего дифференциального уравнения второго порядка, которое численно аппроксимируется конечными разностями.

Полученная система алгебраических уравнений из соображений экономичности, устойчивости счета и простоты программирования решается итерационным методом Якоби и Зейделя.

Для верификации модели проводились два численных эксперимента. В первом - приведенная уровенная поверхность, полученная динамическим методом (1) по полю плотности для синоптического масштаба (НЬЮФАЭКС-88), имитировала собой данные динамической топографии спутниковой альтиметрии. Во втором исходная информация рассчитывалась непосредственно по данным дистанционных измерений с борта ИСЗ GEOSAT. Среднесезонные (весна) поля приведенного уровня и интегральной функции тока определялись по полям температуры и солёности Принстонского университета, известным как массив LEVITUS.

Для пространственного анализа приведенный уровень, рассчитанный для каждой гидрологической станции, и динамическая топография, определенная вдоль треков, интерполировались в узлы регулярной полуградусной сетки. Сравнение полученных полей показывает хорошее качественное соответствие их между собой. Динамическая топография, полученная по данным спутниковой альтиметрии, принципиально не противоречит общей гидродинамической структуре района НЭАЗО (Рис. 5).

Расчет отклонения интегральной функции тока от среднесезонного значения проводился по построенной модели в постановке краевой задачи Дирихле, когда на жидкой границе принималось условие первого рода $\psi'_\sigma = 0$, с точностью порядка 0.01 Сведр.

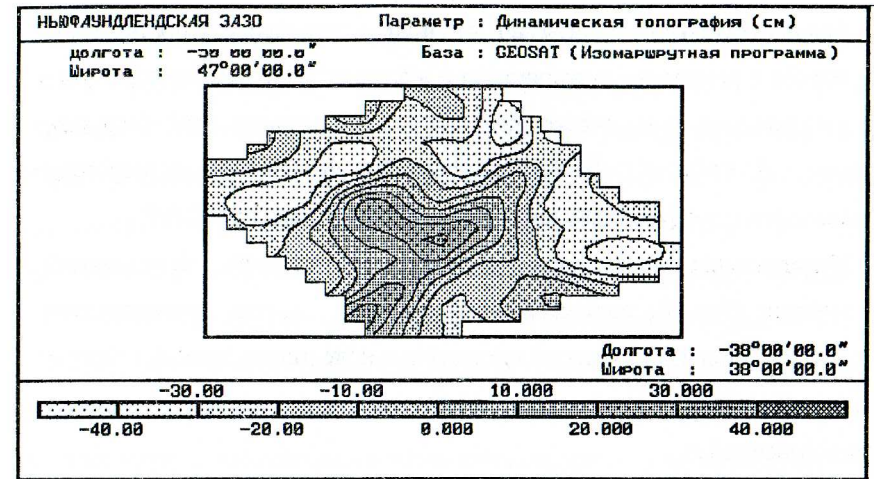


Рис. 5 Динамическая топография поверхности океана по данным спутника GEOSAT для временного интервала с 16 марта по 2 апреля 1988 года.

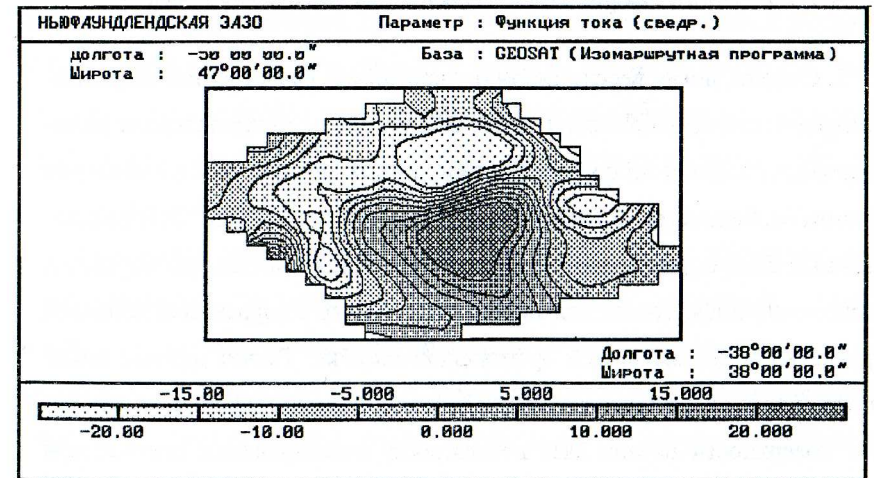


Рис. 6 Результаты модельных расчетов интегральной функции тока по данным спутниковой альтиметрии эксперимента GEOSAT через динамическую топографию поверхности океана для временного интервала с 16 марта по 2 апреля 1988 года.

Анализ результатов показывает, что поле интегральной функции тока, полученное в результате имитационного эксперимента, хорошо согласуется с результатами динамического метода расчета по полю плотности эксперимента НЬЮФАЭКС-88. Разброс точек относительно линии регрессии незначителен и коэффициент корреляции близок к единице (0.907).

Интегральная функция тока, определенная по данным спутниковой альтиметрии (Рис. 6), соответствует результатам расчета динамического метода в той степени, в которой согласуются поле динамической топографии и приведенный уровень, как для синоптического, так и для среднесезонного масштабов.

Таким образом, предложенная модель способна с достаточной точностью определять интегральную функцию тока по данным спутниковой альтиметрии.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы:

1. Создана новая версия автоматизированной реляционной геодисциплинарной оперативной системы АРГОС, которая в интерактивном режиме проводит поиск и отбор информации данных спутниковой альтиметрии с учетом особенностей структуры и организации баз данных. Специализированный блок осуществляет экспресс-анализ, первоначальную обработку и подготовку информации для моделирующей сети с коррекцией поправок и радиальной составляющей орбитальной ошибки. Расчет динамической топографии и ее синоптической изменчивости относительно средней высоты поверхности океана дает возможность использования спутниковой альтиметрии в задаче диагностического анализа динамики океана на различных пространственно-временных масштабах.

2. На основе данных спутников ГЕО-ИК, GEOSAT, ERS-1 и TOPEX/POSEIDON с помощью системы АРГОС сформированы информационные базы для акватории Ньюфаундлендской энергоактивной зоны

(НЭАЗО). Построена база точек пересечения восходящих и нисходящих треков изомаршрутной программы эксперимента GEOSAT и рассчитаны радиальные составляющие орбитальной ошибки для каждого трека. Информационная обеспеченность акватории НЭАЗО данными спутниковой альтиметрии дает уникальную возможность исследования изменчивости динамической топографии, начиная с 1985 года и до настоящего времени.

3. Проведен сравнительный анализ динамической топографии, полученной вдоль треков по данным спутниковой альтиметрии изомаршрутной программы спутника GEOSAT (ноябрь 1985 - декабрь 1989 гг.), и приведенного уровня, рассчитанного динамическим методом по полю плотности вдоль галсов НИС независимых данных эксперимента НЬЮФАЭКС-88, который проводился с ноября 1987 года по апрель 1988 года в рамках программы «Разрезы».

Динамическая топография адекватно отражает общую гидродинамическую структуру акватории НЭАЗО. По сравнению с уровенной поверхностью, рассчитанной динамическим методом по полю плотности, она учитывает многие особенности, которые достаточно сложно выделить традиционными методами, и позволяет исследовать волновую природу синоптических вихрей открытого океана.

4. В рамках геострофического приближения, которое достаточно хорошо описывает динамическую структуру НЭАЗО, предлагается диагностическая модель расчета интегральной функции тока, для которой в качестве исходной информации использует динамическое отклонение морской поверхности от высоты геоида, определяемое по данным спутниковой альтиметрии. Численно модель реализована в интегрированной среде системы АРГОС.

Корреляционный и регрессивный анализ интегральной функции тока, рассчитанной по полю плотности и по модели для случая, когда динамическая топография имитировалась уровенной поверхностью, определяемой