УДК 551.465

В.А.Рябченко[1], *А.Ю.Дворников*[1], *В.А.Горчаков*[1], *Ю.М.Либерман*[2]

РАЗРАБОТКА И ИСПЫТАНИЕ МОДЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ПРОГНОЗА ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК В ОГРАНИЧЕННЫХ РАЙОНАХ БАРЕНЦЕВА МОРЯ

Обсуждается система оперативного прогноза гидрофизических полей (ГФП) в ограниченных районах Баренцева моря, основанная на модели Принстоновского Университета POM и методе вложенных сеток с использованием грубой и мелкой сетки соответственно для всего моря и выделенной области. Модель приводится в действие прогностическими метеорологическими полями и климатическими ГФП на открытых границах. Система использовалась для прогноза ГФП на экспедиционном полигоне 21 рейса НИС «Академик Сергей Вавилов» в июне 2005 г. Как показывает сравнение модельных ГФП с экспедиционными данными и результатами расчетов по фактическим метеорологическим полям, отличия модельного решения от данных наблюдений в большей степени обусловлены ошибками задания ГПФ на открытых границах, чем ошибками метеорологического прогноза.

Гидрометеорологические службы многих стран (США, Великобритании, Франции, Германии и др.) на основе численных моделей общей циркуляции атмосферы и океана систематически выполняют в реальном масштабе времени анализ и прогноз температуры, солености, течений и характеристик морского льда на несколько суток вперед. В России развитие гидродинамических методов оперативного прогноза гидрофизических полей (ГФП) океана находится в начальной стадии [1, 2]. Вместе с тем, прогноз ГФП важен как для решения хозяйственных задач (навигации, рыболовства и др.), так и для оперативного обеспечения военно-морского флота [3]. В последнем случае особенно важен для подводного флота прогноз стратификации морской среды и акустических параметров в промежуточных слоях океана (сезонном пикноклине).

Данная работа посвящена разработке системы оперативного прогноза для ограниченных районов моря (характерный размер области порядка 100 км) и ее применению в Баренцевом море.

До настоящего времени все известные авторам модельные исследования были посвящены воспроизведению климатической циркуляции вод Баренцева моря и ее естественной изменчивости. Эти исследования были выполнены как в рамках моделей для всего Северного Ледовитого океана [4-7], так и на сетках, как правило, более высокого пространственного разрешения для собственно Баренцева моря [8-14]. Большая часть перечисленных исследований [4, 5, 8, 9, 11-13] основана на динамическом методе расчета течений по метеорологической информации на поверхности моря и по имеющимся данным о трехмерных полях температуры и солености морской воды. Основной недостаток динамического метода и его модификаций – фиксация поля плотности морской воды, не позволяющая учесть влияние поля скорости течений на распределение плотности. К другим ограничениям этих исследований можно отнести отсутствие в расчетах касательного напряжения трения ветра [8] и воспроизведение циркуляция по средним климатическим атмосферным полям только для летнего сезона [9, 11]. Детальные расчеты климатической циркуляции моря по полным гидротермодинамическим моделям, объединенным с моделями ледяного покрова, выполнены недавно на сетках высокого пространственного разрешения (7-9 км) [7, 14].

[1] Санкт-Петербургский Филиал Института океанологии им.П.П.Ширшова РАН
[2] Санкт-Петербургский Гидрометцентр
© Рябченко В.А., Дворников А.Ю., Горчаков В.А., Либерман Ю.М., 2009

В основе разрабатываемой авторами прогностической системы лежит модель Принстоновского Университета POM, версия pom2k ([15, 16]). Система предназначена для прогноза в реальном масштабе времени температуры, солености и скоростей течений в ограниченных районах Баренцева моря на срок до нескольких суток вперед. В будущем планируется включить в систему модель морского льда, что позволит прогнозировать вместе с океанскими параметрами и характеристики морского льда.

Создание подобной системы требует не только разработки математических методов расчета прогностических переменных и обработки входной и выходной информации, но и создания системы получения и обработки оперативной информации в режиме ”online”. Решение последней задачи возможно лишь в рамках уже существующих структур, обладающих собственной сетью высокоскоростных каналов связи (гидрометеорологическая служба). В рамках настоящей работы предпринимается попытка создания комплекса методов прогноза ГФП в ограниченных морских акваториях при условии наличия необходимой входной информации. Задача получения этой информации в режиме ”online” не рассматривается.

Описание модельного комплекса и условия расчетов

Модельный комплекс. Принципиальная схема прогноза такова. При решении задачи используется так называемый метод вложенных сеток: сначала на грубой сетке воспроизводятся и прогнозируются ГФП во всем Баренцевом море, затем на мелкой сетке дается прогноз для ограниченной выделенной области. Модель приводится в действие полями атмосферных характеристик, которые берутся из системы оперативного численного прогноза погоды, и полями океанских характеристик на открытых границах Баренцева моря, которые, в принципе, должны браться из оперативной океанской гидродинамической модели, охватывающей бóльшую область (например, Северную Атлантику и Северный Ледовитый океан). В качестве испытания подобной системы в настоящей работе она используется для прошлого периода, причем внешние воздействия задаются по существующим архивам атмосферных и океанских характеристик.

Разработанная система анализа и прогноза состояния ограниченных районов Баренцева моря содержит следующие модули:

– модель циркуляции океана POM, адаптированную к условиям Баренцева моря;

– модуль расчета атмосферных воздействий по архивным и оперативным данным о состоянии атмосферы (анализ и прогноз);

– модуль задания граничных условий на открытых боковых границах Баренцева моря по результатам расчета глобальной циркуляции океана на основе модели HOPE (Hamburg Ocean Primitive Equation Model) [17];

– модуль задания начальных условий в Баренцевом море по тем же результатам расчета.

В будущем планируется дополнить систему модулем, содержащим данные наблюдений о состоянии моря различного происхождения (судовые наблюдения, данные постоянных и дрейфующих буев, спутниковые данные). Эта информация может быть использована как для сравнения с результатами моделирования, так и для ассимиляции в модель. На настоящем этапе какие-либо схемы ассимиляции данных наблюдений не применяются.

Условия расчетов и исходная информация. Расчеты были выполнены в 2 этапа. *На этапе 1* модель интегрировалась для всего Баренцева моря на долготно-широтной сетке 20´×10´≈(14.5-6.5)×18.5 км (115*79 расчетных узлов), покрывающей акваторию Баренцева моря в пределах от 22º до 60º в.д. и от 67º до 80º с.ш. Число равноудаленных σ-уровней равно 33, что при заданной глубине моря, меняющейся от 10 до 500 м, соответствует шагу по вертикали от 15 м в самых глубоководных районах до 0.3 м – в самых мелководных. Поле глубин моря задано на основе архива ETOPO-5 [18]. Помимо поля глубин, исходная информация включала внешние воздействия на границе раздела море-атмосфера (скорость ветра на высоте z = 10 м, температуру воздуха на высоте z = 2 м, балл облачности,

скорость выпадения осадков и соленость на поверхности моря), граничные условия на открытых боковых границах моря и начальные условия (для горизонтальной компоненты скорости течений, температуры и солености воды).

Расчет изменчивости характеристик Баренцева моря был выполнен для 5-летнего периода с 1 января 2000 г. по 1 сентября 2005 г. Средние суточные поля скорости ветра, температуры воздуха, балла облачности и скорости выпадения осадков были заданы по данным реанализа атмосферной циркуляции NCEP/NCAR [19]. Поля скорости течений, температуры и солености на открытых боковых границах моря в каждый момент времени восстанавливались путем линейной интерполяции по их средним месячным значениям для 1990 г., полученным по результатам расчетов изменчивости состояния Мирового океана на основе модели HOPE в период 1979-1994 гг. [17]. В качестве начальных полей скорости течений, температуры и солености были использованы средние январские поля 1990 г., взятые из того же решения. Морской лед явно не моделировался, его присутствие на поверхности моря учитывалось следующим образом. Если температура морской воды становилась меньше или равной температуре замерзания морской воды (-1.8ºС), поток тепла на границе раздела море-атмосфера полагался равным нулю, а температура воды - равной температуре замерзания. Дополнительно в правую часть уравнения для солености в верхнем модельном слое добавлялся член вида $a_R(S_p - S_н)$, обеспечивающий привязку (ресторинг) рассчитываемой поверхностной солености S_p к ее заданному значению $S_н$. В качестве $S_н$ были заданы среднемесячные значения солености в 1990 г., полученные из расчетов по модели HOPE, включающей модель морского льда. Коэффициент a_R полагался равным 1/15 сут$^{-1}$. Описанный метод учета ледяного покрова мог приводить к искажениям рассчитанной скорости течений в северной части моря зимой за счет завышения касательного напряжения ветра, воздействующего на морскую поверхность. Вместе с тем искажения температуры и солености на поверхности моря, по-видимому, были невелики.

На этапе 2 модель интегрировалась на долготно-широтной сетке 5´×5´≈3.0-3.6 км×9.3 км, 156×48 расчетных узлов, покрывающей акваторию выделенного района моря (67-71.5˚с.ш.; 34-47˚в.д.) (рис. 1), где проводились исследования по программе 21 рейса НИС ”Академик Сергей Вавилов” в июне 2005 г. Число σ-уровней, как и в случае грубой сетки, равно 33. Поле глубин моря было задано путем интерполяции данных из архива ETOPO [18].

Внешние атмосферные воздействия задавались на основе информации о состоянии атмосферы, систематизированном сотрудниками 373 Центра ВМФ и полученными из ИНТЕРНЕТА. Граничные условия на открытых боковых границах области (температура, соленость и уровень), равно как и начальные условия, брались из решения на грубой сетке. Отметим, что это 5-летнее решение в конце периода интегрирования, когда оно используется для задания начальных и граничных условий, достаточно хорошо адаптировано к внешним воздействиям.

Были выполнены 2 расчета (прогноз и анализ) ГФП в выделенной области на 5 суток вперед, начиная с 9 июня 2005 г., 00 ч. ВСВ (Всемирное Скоординированное Время). В этот день начались работы НИС ”Академик Сергей Вавилов” на экспедиционном полигоне. В первом расчете (прогноз) задавались следующие атмосферные характеристики, полученные как результат метеорологического прогноза на рассматриваемый период 9-13 июня 2005 г.: скорость приземного ветра и температура воздуха (данные 373 Центра ВМФ). Облачность для указанного периода была задана на основе данных анализа Лаборатории атмосферных ресурсов Национальной Администрации США по океану и атмосфере (NOAA Air Resources Laboratory), находящихся в свободном доступе [20]. Осадки считались нулевыми, поскольку в период выполнения экспедиционных работ они не наблюдались. В результате граничное условие для солености на поверхности моря включало только испарение, и поэтому процедура ресторинга не применялась. Относительная влажность воздуха в атмосфере и атмосферное давление на уровне моря принимались постоян-

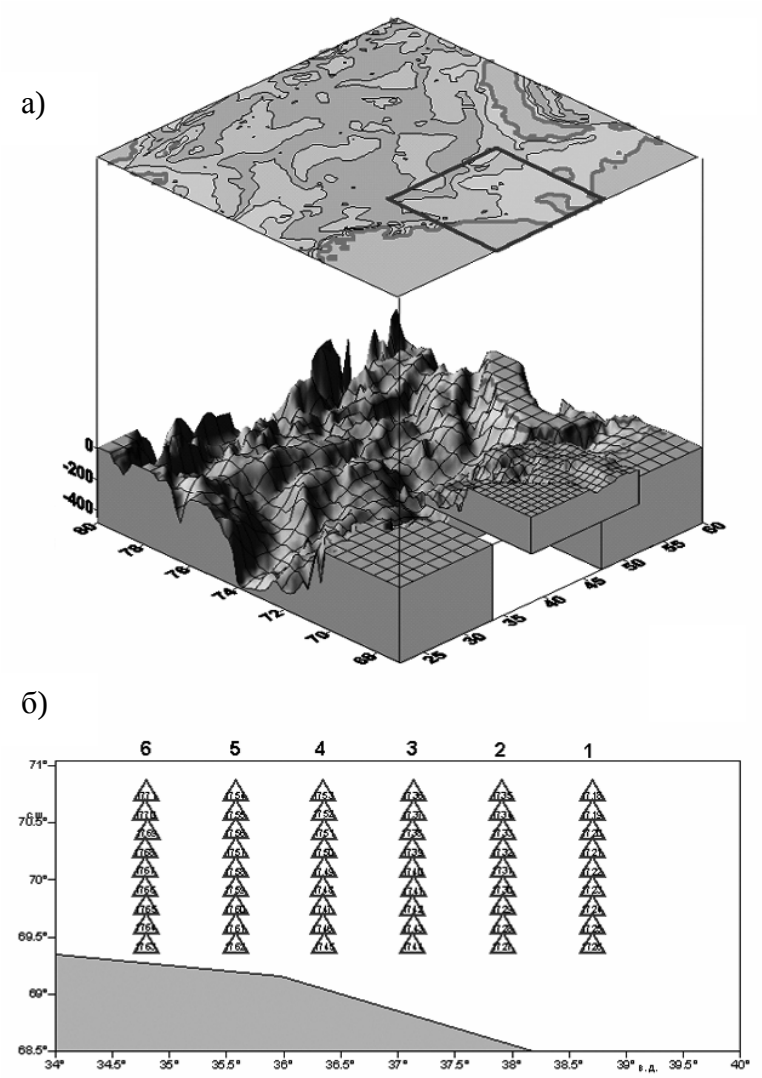


Рис. 1. *Рельеф дна и границы всей модельной области (Баренцево море) и выделенной подобласти (67-71.5˚с.ш.; 34-47˚в.д.), совпадающей с районом исследований XXI рейса НИС «Академик Сергей Вавилов»* (а). *По вертикальной оси - глубина дна в метрах. Схема расположения станций на гидрологическом полигоне в северо-западной части этого района* (б). *Цифрами 1-6 указаны номера разрезов на полигоне*

ными и равными соответственно 0.85 и 1013 мбар. Мгновенные поля скорости ветра, температуры воздуха и облачности задавались каждые 12 час. Значения характеристик между этими сроками восстанавливались путем линейной интерполяции. Второй расчет (анализ) был выполнен по фактическим полям скорости приземного ветра и температуры воздуха. Облачность, относительная влажность воздуха и атмосферное давление были заданы также, как и в первом расчете.

Данные судовых наблюдений. Модельная прогностическая система тестируется по результатам 21 рейса НИС ”Академик Сергей Вавилов” в юго-восточной части Баренцева моря (см.рис. 1а). Экспедиционные исследования проводились с 7 по 12 июня 2005 г. Были выполнены измерения на 60 океанографических станциях, 54 из которых располагались на полигоне в северо-западной части исследуемого района (см.рис. 1б). Гидрологическая съемка на полигоне проводилась в период с 9 по 12 июня и включала 6 меридиональных разрезов последовательно с востока на запад с постоянным расстоянием между станциями в 10 морских миль и расстоянием между разрезами в 13 морских миль. Первый, самый восточный разрез, был выполнен 9 июня с 4.16 до 16.48 ВСВ, второй – с 19.02 ВСВ 9 июня по 7.18 ВСВ 10 июня, третий - с 9.22 по 21.53 ВСВ 10 июня, четвертый - с 23.54 ВСВ 10 июня по 11.51 ВСВ 11 июня, пятый - с 14.01 ВСВ 11 июня по 03.12 ВСВ 12 июня и, наконец, самый западный, шестой - с 05.28 по 19.18 ВСВ 12 июня. Станции выполнялись до максимально возможной глубины с использованием в качестве основного прибора океанологического зонда SBE-25 производства США. Результаты профильных измерений температуры и электропроводности (солености) усреднялись по 1-метровым слоям. Географическое положение станций определялось по данным судовой спутниковой системы навигации**.**

Во время работ на полигоне погода была обусловлена слабо градиентным барическим полем. Атмосферное давление менялось в пределах от 1009 до 1023 ГПа. Преоблада-

ли умеренные и слабые ветры. Волнение моря с преобладанием зыби не превосходило 2-3 баллов. Осадков в период работ на полигоне не было.

Горизонтальные распределения температуры (рис. 2) и солености (рис. 3) на полигоне построены по всем разновременным экспедиционным данным. Отметим, прежде всего, что динамические условия в исследуемом районе характеризовались восточной периферией циклонического круговорота Мурманского прибрежного течения. Проявлениями этого в поле температуры являются:

– язык теплых вод в поверхностном слое моря, проникающий с запада в юго-западный угол полигона (см. распределение температуры на горизонте 0 м на рис. 2а);

– область пониженной температуры в нижележащих слоях с центром в точке (70.2°с.ш.; 35.6°в.д.) на горизонтах 50 и 100 м;

– ярко выраженная фронтальная зона в поверхностном слое в юго-западной части полигона.

Другая особенность поля температуры на всех трех горизонтах – язык холодной воды, вытянутый от юго-восточного угла полигона в северо-западном направлении.

Температура на полигоне в поверхностном слое изменялась в пределах от 4.3 до 6.2°С, причем ее максимальные значения отмечались в юго-западной части полигона, минимальные – в юго-восточной. Градиент температуры в юго-западной части полигона достигал 0.05°С/миля. В сравнении с многолетними средними значениями для июня (из архива [21]) в среднем для района полигона наблюдалась положительная аномалия температуры в 1°С. С ростом глубины характер распределения температуры меняется: на горизонте 50 м максимальные значения (4.3°С) наблюдались в северной части полигона, минимальные (2.2°С) - в юго-восточной. Зона максимальных градиентов температуры (до 0.05°С/миля) наблюдалась по периметру ядра холодных вод. Средняя аномалия температуры относительно средних многолетних значений составила 0.3°С. На горизонте 100 м максимум температуры (4.0°С) сдвинулся на северо-восток полигона, а минимум (1.9°С) остался в его юго-восточной части. Максимальные градиенты температуры наблюдались в северо-восточной части полигона. Средняя по полигону температура совпадала с климатической нормой.

Соленость на поверхности моря менялась от 33.65 до 34.90 ‰, причем ее максимальные значения наблюдались в северо-восточной мористой части полигона, а минимальные значения - в прибрежной юго-западной части. Такое распределение солености, по-видимому, в определенной мере обусловливается влиянием берегового стока. Максимальное значение горизонтального градиента солености на полигоне составляло 0.03 ‰/миля. В сравнении со средними многолетними значениями для июня (из архива [22]) в среднем для района полигона наблюдалась положительная аномалия солености в 0.2 ‰. На горизонтах 50 и 100 м качественная картина пространственной изменчивости солености сохранялась такой же, как на поверхности моря. Максимальный градиент солености составлял 0.005 и 0.007 ‰/миля соответственно на горизонтах 50 и 100 м. Средняя положительная аномалия солености, также как и для температуры, понижалась с глубиной, составляя 0.1 и ~0 ‰ соответственно на горизонтах 50 и 100 м.

Анализ распределений температуры на разрезах 1-6 полигона (распределения на разрезах 2 и 6 приведены на рис. 4 и 5) показал, что вертикальная структура температуры характеризуется ее монотонным понижением с глубиной без ярко выраженного верхнего перемешанного слоя. На разрезах 1-3 (см.рис. 4а) термоклин располагается в слое 10-60 м в прибрежной зоне и 50-150 м у северной границы полигона, причем температура растет с удалением от берега. В распределениях солености на этих разрезах (рис. 4в) ясно выраженная вертикальная стратификация отсутствует и наблюдается монотонный рост солености в направлении открытого моря. На разрезах 4-6 (рис. 5а и в) на отмеченные особенности распределений температуры и солености (существование выраженной вертикальной стратификации по температуре и ее отсутствие по солености, заметный горизон-

тальный градиент температуры и слабо выраженный горизонтальный градиент солености) накладывается область повышенной температуры и пониженной солености в приповерхностном слое, локализованная вблизи берега. Кроме того, у северной границы полигона в поверхностном слое существует область повышенных температур. Интерпретация выделенных особенностей температуры и солености затруднена из-за отсутствия измерений течений. Предположительно, наличие пятна воды повышенной температуры и пониженной солености в прибрежной зоне может быть связано с теплым вдольбереговым течением восточного направления и стоком пресной воды с побережья Кольского полуострова.

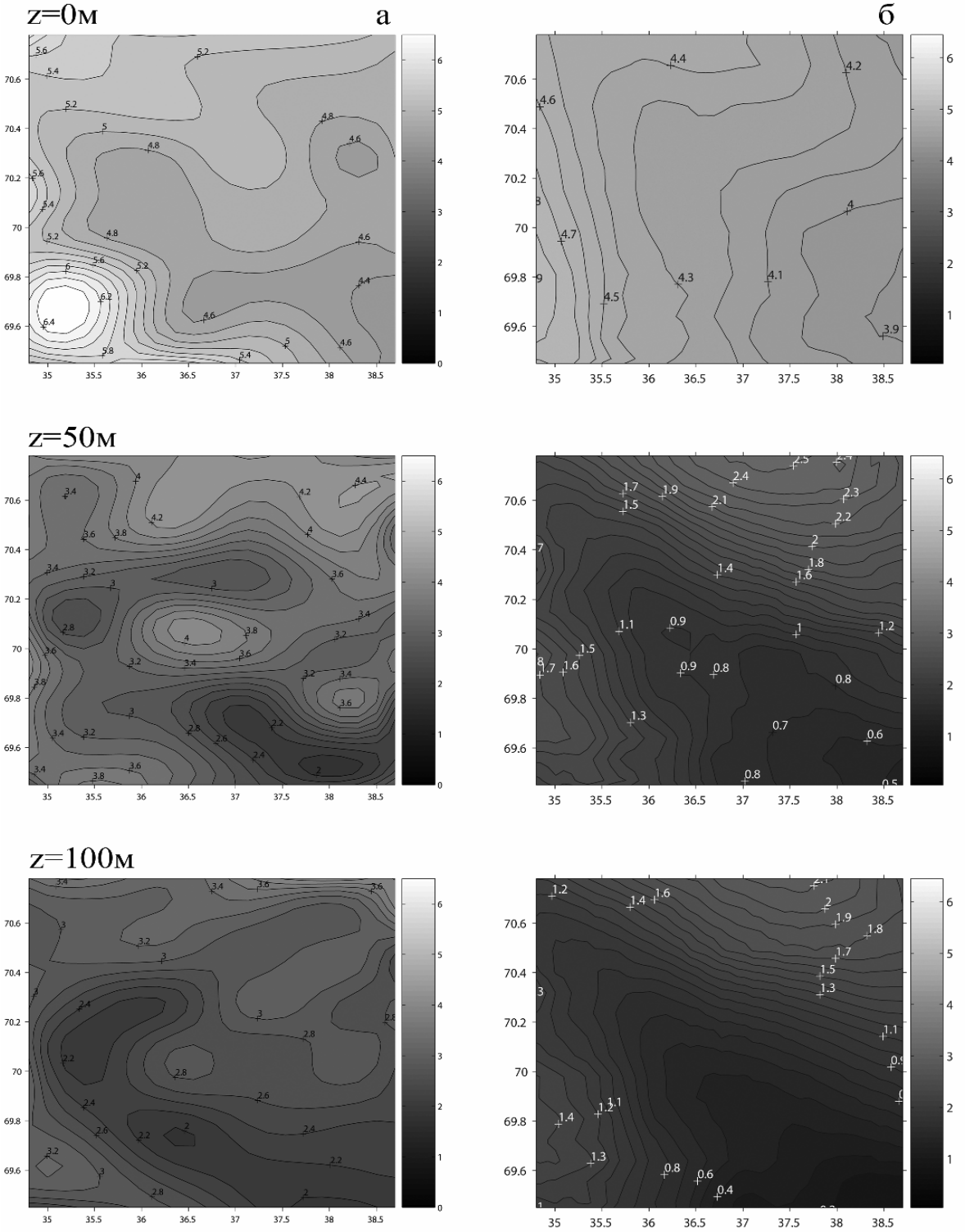


Рис. 2. *Наблюдаемое* (а) *и рассчитанное* (б) *горизонтальное распределения температуры (°С) в районе полигона на горизонтах z = 0, 50 и 100 м. Прогноз на 11.06.2005 г., 00.00 ВСВ*

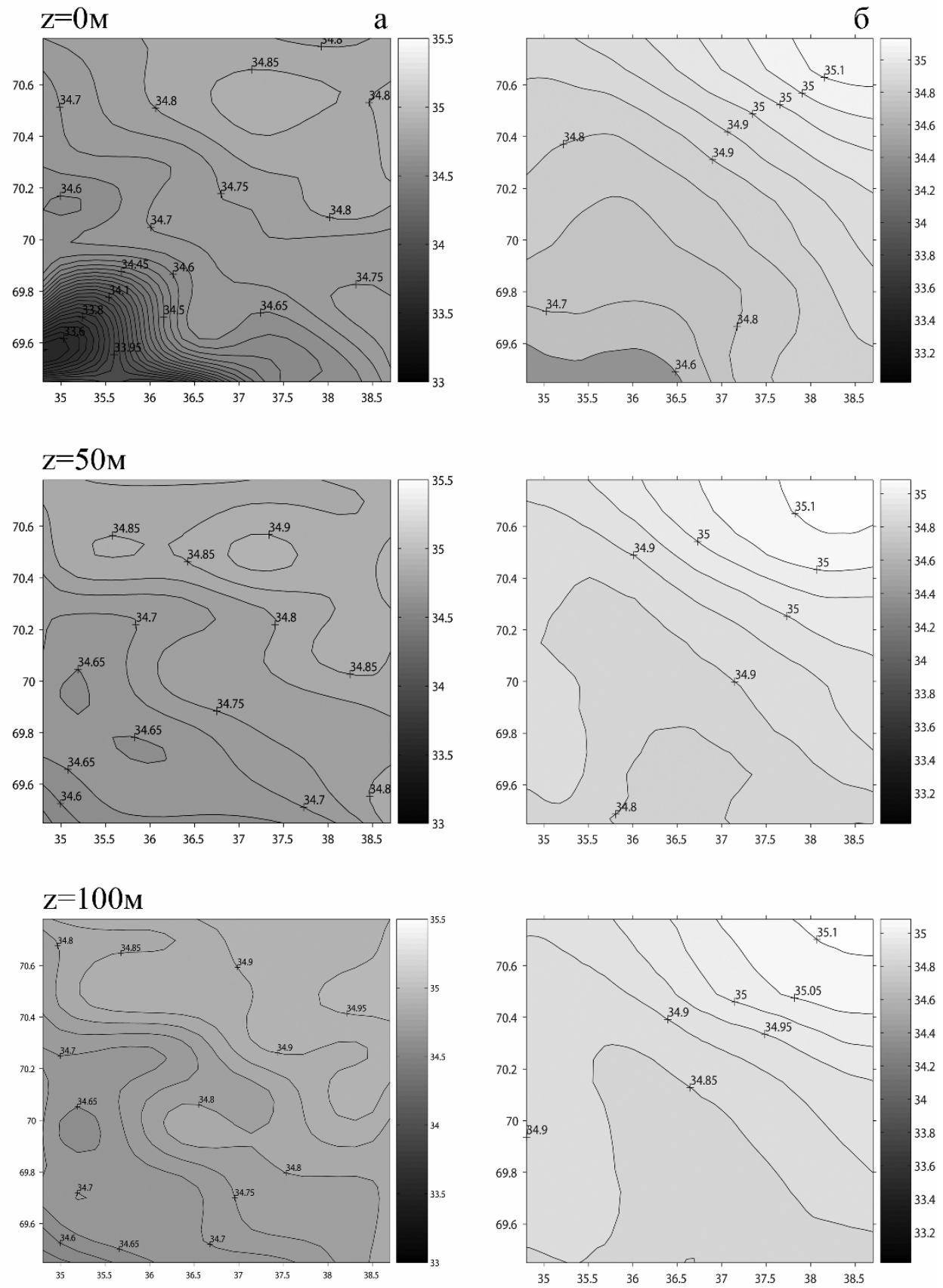


Рис. 3. *Наблюдаемое* (а) *и рассчитанное* (б) *горизонтальное распределения солености (‰) в районе полигона на горизонтах z=0, 50 и 100 м. Прогноз на 11.06.2005 г., 00.00 ВСВ*

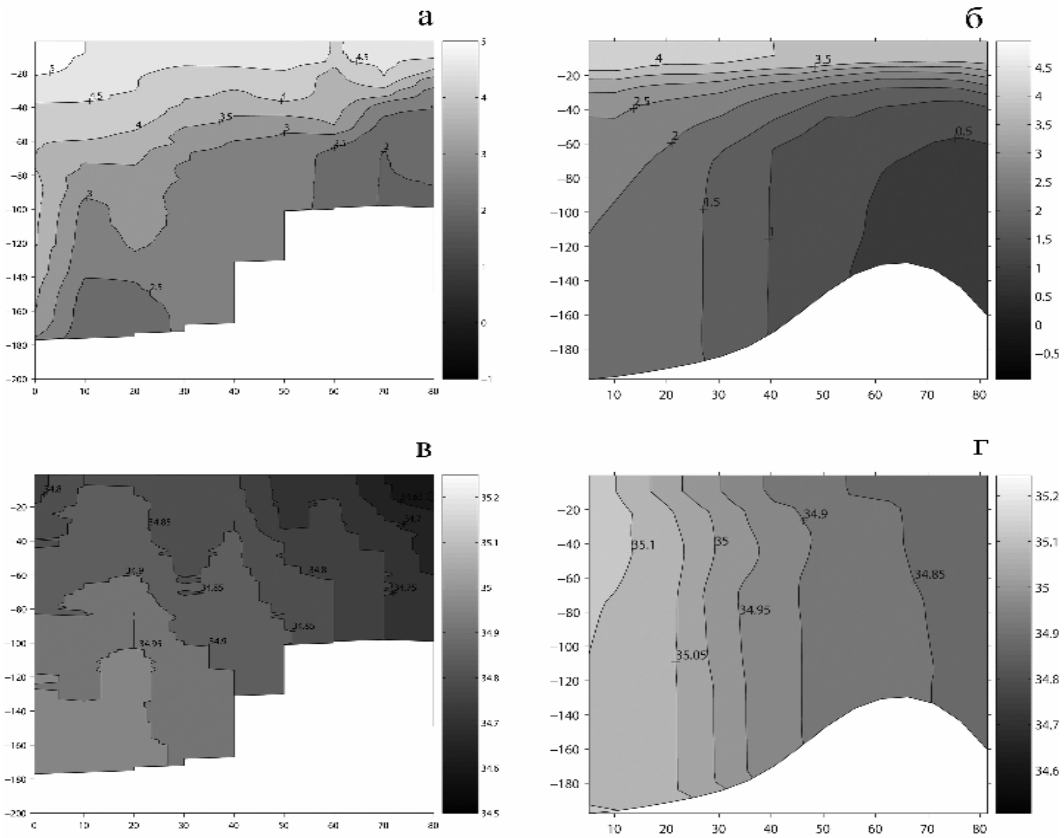


Рис. 4. *Наблюдаемые и прогностические распределения температуры в °С* (а), (б) *и солености в ‰* (в), (г) *на разрезе 2 полигона, 09.06.2005 г., 24.00 ВСВ. Вертикальная ось – глубина (метры), отсчитываемая от поверхности моря вверх, горизонтальная ось – расстояние (мили) от наиболее удаленной от берега станции разреза*

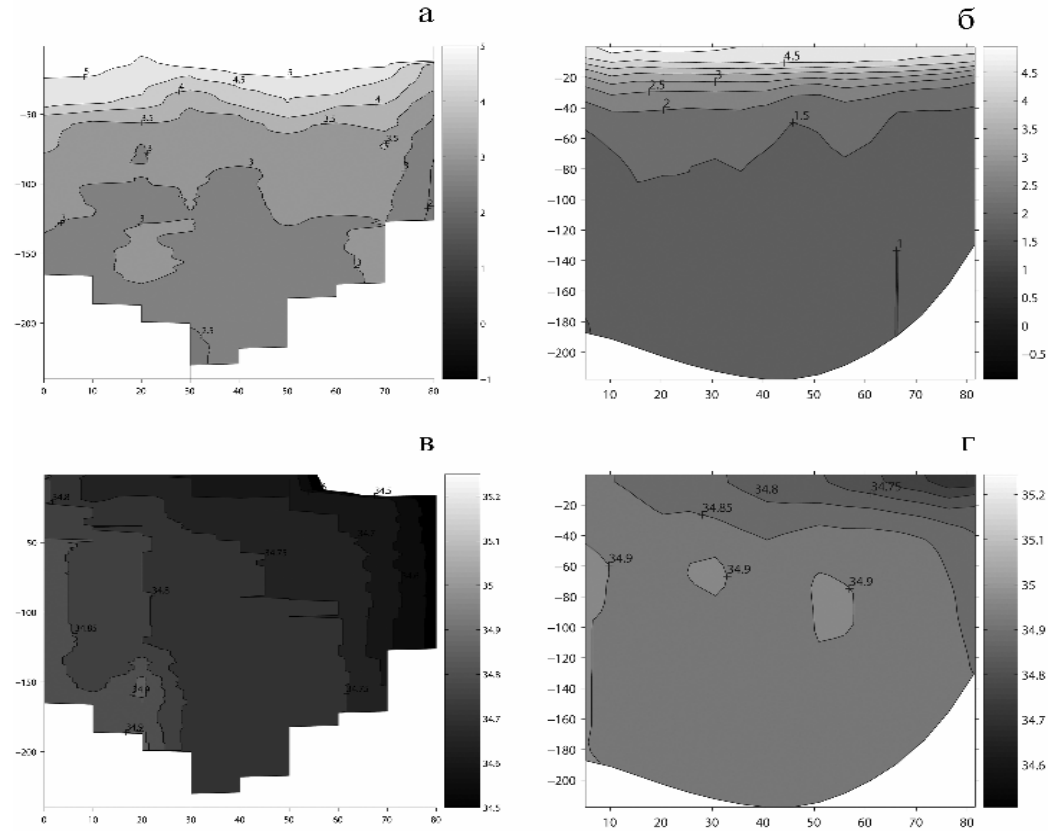


Рис. 5. *Наблюдаемые и прогностические распределения температуры в °С (а), (б) и солености в ‰ (в), (г) на разрезе 6 полигона, 12.06.2005 г., 12.00 ВСВ* (см. пояснения к рис. 4)

Результаты расчетов и сравнение их с экспедиционными данными

Результаты прогностического расчета. Рассчитанные горизонтальные распределения температуры и солености в пределах экспедиционного полигона на горизонтах z = 0, 50 и 100 м в момент времени 11.06.2005 г., 00.00 ВСВ (середина периода, на который давался прогноз) приводятся на рис. 2б и 3б. Сравнение рассчитанных и наблюдаемых (рис. 2а и 2б) распределений температуры показывает, что модель качественно правильно воспроизводит поверхностное распределение температуры в исследуемой области. Действительно, на всех указанных горизонтах отмечается язык холодной воды, вытянутый в северо-западном направлении от юго-восточного угла полигона. На поверхности моря модельная температура изменяется от 3.9°С в юго-восточной части полигона до 4.8°С в юго-западной (по данным наблюдений она меняется от 4.5 до 6.1°С), причем в южной части полигона горизонтальный градиент температуры увеличивается с ростом расстояния от берега, как это и имеет место по данным наблюдений. Хотя на горизонтах 50 и 100 м модельные и наблюдаемые распределения схожи, исключая наблюдаемое пятно теплой воды в центре полигона, отсутствующее в модельном распределении, модельная температура в целом оказалась заметно заниженной (на 1.5-2°С).

Модельное распределение солености также качественно согласуется с наблюдаемым (рис. 3а и 3б): в обоих случаях соленость растет от юго-западного к северо-восточному углу полигона на всех горизонтах. Наибольшие количественные отличия (завышение до 0.9 ‰) отмечаются на поверхности моря в области минимальных значений солености, в остальной части полигона на всех горизонтах модельные значения завышены на 0.2-0.3 ‰.

Следует подчеркнуть условность проведенного сравнения, связанную с тем, что модельные распределения относятся к фиксированному моменту времени, а наблюдаемые построены по всем данным, полученным в период выполнения измерений на полигоне. Более адекватным является сравнение прогностических распределений температуры и солености на разрезах 1-6 с данными наблюдений на тех же разрезах (в таблице приводятся статистические характеристики этих распределений на всех 6 разрезах, на рис. 4 и 5 приведены распределения на разрезах 2 и 6). Наблюдаемые распределения построены по всем разновременным данным для каждого разреза, модельные распределения - по мгновенным полям, относящимся к середине интервала времени, в течение которого производились измерения на разрезе. Этот интервал составлял от 12 до 14 час.

Таблица

Статистические характеристики полей температуры и солености на 6 меридиональных разрезах полигона 21 рейса НИС ”Академик Сергей Вавилов” в юго-восточной части Баренцева моря (расположение и время выполнения разрезов указаны в предыдущем разделе)

Номер разреза	Среднее значение		Стандартное отклонение		Средняя абсолютная ошибка	Средняя квадратичная ошибка
	наблюдения	модель	наблюдения	модель		
Температура, ºС						
1	3.14	1.77	0.87	1.07	1.24	1.29
2	3.31	1.62	0.90	1.06	1.08	1.17
3	3.32	1.56	0.94	1.16	0.83	0.88
4	3.39	1.61	0.95	1.21	0.76	0.82
5	3.24	1.68	1.01	1.16	0.79	0.86
6	3.44	1.66	0.87	1.10	1.38	1.27
Соленость, ‰						
1	34.89	34.86	0.07	0.05	0.07	0.07
2	34.85	34.73	0.09	0.07	0.11	0.13
3	34.81	34.86	0.10	0.09	0.20	0.21
4	34.76	34.91	0.12	0.10	0.31	0.31
5	34.71	34.95	0.14	0.11	0.42	0.41
6	34.69	34.96	0.13	0.10	0.44	0.42

Как показал анализ, в качественном отношении модельные и рассчитанные распределения согласуются на всех разрезах. Действительно, в обоих случаях на разрезах 1-3 (см.рис. 4, а, б) минимальные температуры отмечаются в придонном слое у берега, а максимальные – в поверхностном слое на северной границе полигона, толщина термоклина увеличивается с расстоянием от берега, в глубинном слое отмечается ярко выраженный горизонтальный градиент температуры, растущий с расстоянием от берега. К основным отличиям модельных распределений температуры от наблюдаемых на этих трех разрезах относятся отсутствие пятна холодной воды в придонном слое у северной границы полигона, заметно меньшая толщина верхнего перемешанного слоя, особенно в северной части области, и больший градиент температуры в термоклине. На разрезах 4-5 область минимальных температур в придонном слое смещается от берега к центру полигона и на разрезе 6 (рис. 5а) исчезает вовсе, так что горизонтальный градиент температуры в глубинном слое постепенно (от разреза 4 к разрезу 6) уменьшается и на разрезе 6 практически исчезает. Эти особенности, как и наблюдаемый рост температуры поверхностного слоя от разреза 1 к разрезу 6, хорошо воспроизводятся моделью (рис. 5, б). Вместе с тем модель не воспроизводит пятно теплой воды в поверхностном слое у берега на разрезах 4-6, и также, как на разрезах 1-3, дает заметно меньшую толщину верхнего перемешанного слоя и более тонкий термоклин. Модельные температуры на всех разрезах занижены: на 1.37-1.78 °С в среднем (см.табл.), причем в поверхностном слое меньше (на 0.5-1.0 °С), а в нижних слоях больше (на 1.5-2.0 °С).

Переходя к сравнению распределений солености (рис. 4в, г и рис. 5в, г), отметим качественное соответствие модельных и рассчитанных распределений, характеризующихся их близостью к однородному распределению в северной части полигона на всех разрезах и наличием поверхностного пятна низкой солености в поверхностном слое у южной границы полигона (разрезы 3-6). В обоих случаях (как по модели, так и по данным наблюдений) верхний перемешанный слой выражен слабо, его модельная толщина составляет около 10 м, тогда как наблюдения дают 30-40 м. В среднем значения солености в модели оказались заниженными на 0.03 и 0.12 ‰ соответственно на разрезах 1 и 2 и завышенными на 0.07-0.27 ‰ на разрезах 3-6 (см.табл.). Максимально модель завышает соленость на 0.9 ‰ в пятне ее пониженных значений.

Представление о количественном соответствии модельных и рассчитанных распределений дает таблица. Судя по стандартным отклонениям модельных и наблюдаемых полей температуры и солености от их средних значений, модельное поле температуры оказалось менее гладким, чем наблюдаемое, тогда как для солености имеет место обратная ситуация. В целом модель неплохо воспроизвела наблюдаемые поля: средняя абсолютная ошибка и средняя квадратичная ошибка для разрезов 1-6 не превышают соответственно 1.37 и 1.29 °С для температуры и 0.44 и 0.42 ‰ для солености. Рост ошибок для солености от разреза 1 к разрезу 6 связан, по-видимому, с плохим воспроизведением пятна низкой солености в поверхностном слое у южной границы полигона в прибрежной зоне (разрезы 4-6), обусловленным стоком пресной воды с побережья Кольского полуострова, что моделью никак не учитывается.

Результаты расчета по восстановленным полям атмосферных характеристик. Представление об отличиях двух решений («прогноз минус анализ») дает рис. 6, на котором приведены отклонения прогностических полей температуры на разрезах 2, 5, 6 полигона от аналогичных полей анализа. Максимальные отклонения (около 0.1 °С) на разрезах 1-3 (первые двое суток прогноза) сосредоточены в основании верхнего перемешанного слоя – верхней части термоклина. С ростом заблаговременности прогноза (разрезы 4-6, 3-4 сутки прогноза) отклонения увеличиваются, причем максимальные отклонения приходятся на верхний слой толщиной 5-7 м. Абсолютный максимум отклонений (0.6 °С) достигается на разрезе 6 в верхнем слое у северной границы области. Как показали расчеты, отмеченный рост разностей «прогноз минус анализ» (ошибки прогноза) согласуется с рос-

том аналогичной ошибки в прогнозе температуры воздуха. Вместе с тем обсуждаемые отклонения температурных полей в двух расчетах оказались заметно меньше, чем отклонения прогностических полей температуры от данных наблюдений, особенно в глубинных слоях, где они составляют 1.5-2.0 °С.

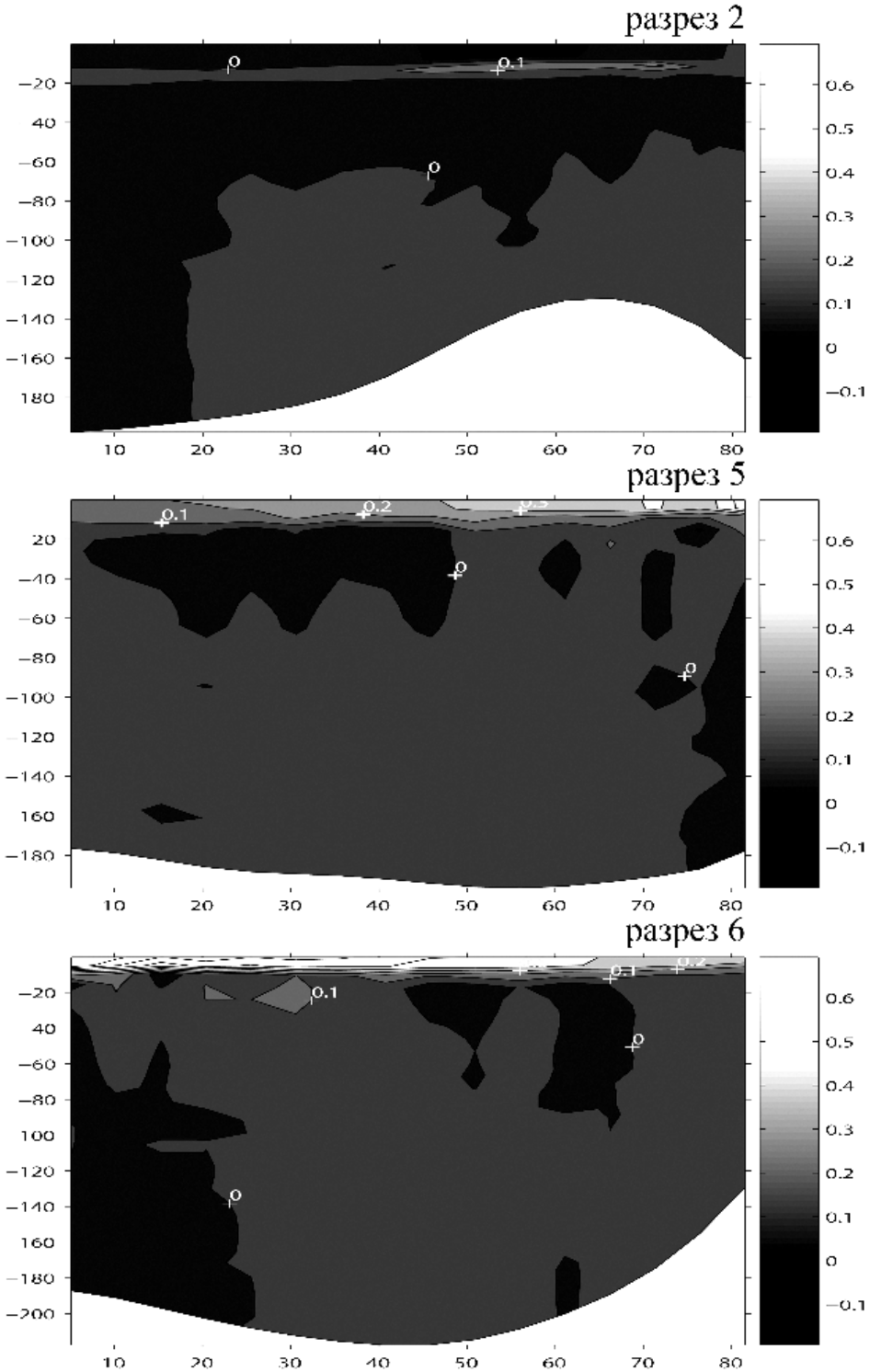


Рис. 6. *Отклонения температуры (°С) в двух расчетах на разрезах 2, 5, 6: разность «прогноз минус анализ»* (см.пояснения к рис. 4)

Что касается отклонения прогностических полей солености от аналогичных полей, рассчитанных по восстановленным при анализе полям атмосферных характеристик, то они оказались малыми (максимально 0.02 ‰ в слое 5-15 м в северной части области на

разрезе 6) и здесь не приводятся. Малость анализируемых отклонений солености связана, по-видимому, с тем, что скорость испарения, определяющая поверхностный поток солености, вносит малый вклад в ее изменения. Вместе с тем отклонения прогностических распределений солености от наблюдаемых (0.1-0.3 ‰) так же, как и для температуры, заметно выше обсуждаемых отклонений двух решений.

* * *

Гидродинамическое моделирование морской среды на ограниченных акваториях требует максимальной детализации сведений об исходном состоянии как водной массы, так и атмосферы над нею. Степень детализации зависит от пространственно-временных масштабов моделируемых процессов: чем меньше эти масштабы, тем более подробной и надежной должна быть исходная информация.

Применительно к атмосфере источником фактической информации являются обширные сводки метеорологических наблюдений, циркулирующие по каналам Росгидромета и Всемирной Метеорологической Организации. Эти регулярные сводки содержат данные станций, судов, самолетов, буев, спутников. Наряду с ними передается большой объем информации о фактических и прогностических атмосферных полях в виде значений метеорологических элементов в узлах трехмерных сеток с шагами от 1.25-2.5 градусов до 3-5 миль (от 150 до 5-10 км).

Что касается гидросферы, то прогнозируются лишь два поля – температура поверхности моря и волнение. Оперативный прогноз других гидрофизических полей в акватории Баренцева моря возможен на базе совместного использования мезомасштабных атмосферных и океанических моделей. Примером атмосферной модели такого рода может быть модель консорциума северных стран Европы HIRLAM с пространственным разрешением 22 км [23]. Объединение атмосферного и морского блоков должно сопровождаться развитием соответствующей технологии приема, обработки и использования больших объемов информации.

Результаты прогноза ГПФ для выделенной области моря (полигон в северо-западной части района экспедиционных исследований 21 рейса НИС «Академик Сергей Вавилов»), сравнение прогностических ГФП с данными экспедиционных измерений и результатами аналогичных расчетов по восстановленным атмосферным полям (анализ) свидетельствуют о том, что отличия модельного решения от данных наблюдений в большей степени связаны с ошибками задания характеристик на открытых морских границах исследуемой области, чем с ошибками прогноза атмосферных параметров. Отсюда следует, что проблеме задания граничных условий на открытых боковых границах области должно быть уделено особое внимание. Кардинальное значение при этом имеют оперативные данные о ГФП в толще моря. Вместе с тем в Баренцевом море отсутствуют систематические оперативные данные о профилях температуры и солености (дрейфующие буи-профилометры, буи Арго, заякоренные станции, поставляющие информацию в режиме ”online”).

Оперативные данные о профилях температуры и солености нужны не только для задания граничных условий, но и для ассимиляции их моделью. Использование же для ассимиляции данных разовых измерений, полученных в разное время в разных точках моря, вряд ли целесообразно, так как будет вносить в решение случайно распределенные в пространстве и во времени ошибки, генерирующие “шоковые волны”. Таким образом, успех прогноза ГФП в море связан не только с совершенствованием методов их расчета, но и - даже в большей степени - с созданием сети постоянно действующих буйковых станций в ключевых районах моря, поставляющих информацию в режиме ”online”.

Литература

1. *Нестеров Е.С.* Оперативные системы прогноза параметров морской среды для европейских морей // Метеорология и гидрология. 2005. №1. С.121-126.

2. *Рябченко В.А., Либерман Ю.М., Руховец Л.А. и др.* Прогноз погоды и состояния водных объектов Северо-Западного региона России на базе комплекса гидродинамических моделей. СПб.: Нестор-История, 2008.
3. *Семенов Е.В.* Состояние и развитие гидродинамических моделей океана // Сб.научн.тр. «Фундаментальная и прикладная гидрофизика». СПб.: Наука, 2008. № 1. С.48-62.
4. *Кулаков М.Ю., Павлов В.К.* Диагностическая модель циркуляции вод Северного Ледовитого океана // Труды ААНИИ. 1988. Т.413. С.5-16.
5. *Яковлев Н.Г.* Моделирование распространения атлантических вод в Северном Ледовитом океане // Метеорология и гидрология. 1998. № 2. С.73-84.
6. *Proshutinsky A. et al.* Multinational Effort Studies Differences Among Arctic Ocean Models // Eos. 2001. V.82. No.51. P.637, 643-644.
7. *Maslowski, W., D.Marble, W.Walczowski, U.Schauer, J.L.Clement, L. Jaclyn, and A.J.Semtner.* On climatological mass, heat, and salt transports through the Barents Sea and Strait from a pan-Arctic coupled ice-ocean model simulation // Journal of Geophysical Research. 2004. Vol.109. C03032, doi:10.1029/2001JC001039.
8. *Булушев М.Г., Сидорова А.Н.* Расчет среднемесячной циркуляции в Баренцевом море… // Метеорология и гидрология. 1994. № 4. С.78-87.
9. *Семёнов Г.А., Чвилёв С.В.* Численное исследование межгодовой изменчивости циркуляции вод Баренцева моря в летний сезон // Океанология. 1996. Т.36. № 4. С.498-511.
10. *Harms, I.H.* Watermass transformation in the Barents Sea – Application of the HAMburg Shelf Ocean Model (HAMSOM) // ICES J. Mar. Sci. 1997. Vol.54. P.351-365.
11. *Яковлев Н.Г.* Восстановление среднемесячной циркуляции Баренцева моря и анализ ее чувствительности к водообмену на открытых границах // Известия АН. Физика атмосферы и океана. 1999. Т.35. № 6. С.1-12.
12. *Трофимов А.Г.* Численное моделирование циркуляции вод в Баренцевом море. Мурманск: Изд-во ПИНРО, 2000.
13. *Сидорова А.Н., Щербинин А.Д.* Внутригодовая изменчивость термохалинной структуры и циркуляции в Баренцевом море по результатам модельных расчетов // Океанология. 2004. Т.44. № 5. С.670-678.
14. *Harms, I.H., C.Schrum, K.Hatten.* Numerical sensitivity studies on the variability of climate-relevant processes in the Barents Sea // Journal of Geophysical Research. 2005. Vol.110. C06002, doi:10.1029/2004JC002559.
15. *Blumberg, A.F., Mellor, G.L.* A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model. In: Heaps N. (Ed.), Three-Dimensional Coastal Ocean Models. Washington, D.C.: AGU, 1987.
16. *Mellor, G. L.* Users guide for a three-dimensional, primitive equation, numerical ocean model (June 2003 version). Princeton: Princeton University, 2003.
17. *Wolff J.-O., Maier-Reimer E., Legutke S.* The Hamburg Ocean Primitive Equation Model (HOPE). Technical Report No. 13. Hamburg: Deutsches Klimarechenzentrum, 1997.
18. NOAA's National Geophysical Data Center. VRML 2.0 Topographic Map Generator. Http://www2.evl.uic.edu/pape/vrml/etopo.
19. NCEP/NCAR Reanalysis. Http://dss.ucar.edu/pub/reanalysis.
20. Air Resources Laboratory. Http://www.arl.noaa.gov.
21. World Ocean Atlas 2001, Vol.1: Temperature / Ed. S. Levitus. Wash., D.C.: U.S. Government Printing Office, 2002.
22. World Ocean Atlas 2001, Vol.2: Salinity / Ed. S. Levitus. Wash., D.C.: U.S. Government Printing Office, 2002.
23. HIRLAM (High Resolution Limited Area Modelling project). Http://hirlam.org.

Статья поступила в редакцию 25.09.2008 г.

УДК 551.466.6

В.Р.Фукс[1]

О ВОЗМОЖНОСТИ ОЦЕНКИ ПОЛОЖЕНИЯ ФРОНТАЛЬНЫХ ЗОН В ОКЕАНЕ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Спутниковая океанография открывает новые возможности в описании пространственно-временной изменчивости фронтов в широком диапазоне масштабов. В работе предпринята попытка формализовать понятия, связанные с этой проблемой, с целью выделения фронтальных зон и фронтальных разделов по данным спутниковых измерений. Фронтальная зона представляется как зона конвергенции потоков, а линия максимальной конвергенции потоков в этой зоне принимается за фронтальный раздел или фронт. По данным спутниковой альтиметрической информации выделяются динамические фронты на поверхности океана, по спутниковым данным о температуре поверхности воды выделяются термические фронты. Примеры подобных оценок приводятся для Японского моря.

Следует признать, что понятие океанологический фронт до сих пор не установилось, у разных авторов отмечаются существенные различия как в гидродинамической интерпретации этого термина, так и в методах выделения фронтальных зон и разделов по данным натурных измерений [1-7].

Одни авторы в качестве основного критерия выделения фронта принимали высокие горизонтальные градиенты гидрологических характеристик [8-10], другие – выделяли фронт по динамическим признакам [11] (градиенты в поле скоростей течения, зоны конвергенции и дивергенции). В фундаментальной сводке знаний об океанических фронтах К.Н.Федоров [4] выделяет фронтальную зону, проявляющуюся во всей толще термоклина, по максимальным горизонтальным градиентам гидрологических характеристик и максимальным горизонтальным градиентам горизонтальной и вертикальной циркуляции вод и фронтальный раздел – как поверхность внутри фронтальной зоны, совпадающую с поверхностью максимального градиента одной или нескольких характеристик, а также фронт – линию пересечения фронтального раздела с любой выбранной поверхностью, в частности, с поверхностью моря, «поверхностный фронт».

Кроме того, выделяют главные климатические океанические фронты как границы основных океанических круговоротов, каждый из которых содержит воды определенной вертикальной структуры и фронты синоптического масштаба, связанные с процессами синоптического масштаба в атмосфере и в океане. Выделяются также термические фронты, соленостные, плотностные (стерические), термохалинные, динамические, термодинамические, фронты в поле гидрохимических характеристик, различного рода биотические фронты и т.д. По местонахождению фронты разделяют на океанические, прибрежные, эстуарные, поверхностные, придонные и другие, например, прибрежный приливной фронт как граница между стратифицированными водами открытого моря и однородными в результате приливного перемешивания прибрежными водами.

В настоящей работе предпринята попытка формализовать эти понятия с целью выделения фронтальных зон и фронтальных разделов по данным спутниковых измерений, которые открыли новые возможности в описании их пространственно-временной изменчивости в широком диапазоне масштабов [12, 13].

Будем исходить из простых феноменологических представлений: фронт возникает там, где в море сходятся потоки количества движения, тепла, солей, плотности (плавучести), других физических, химических и биологических характеристик.

[1] Санкт-Петербургский государственный университет
© Фукс В.Р., 2009

Введем, прежде всего, основные определения.

Уравнение переноса консервативной субстанции ρ удобно представлять в виде:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \mathrm{div}\rho\vec{\mathbf{V}} = 0, \tag{1}$$

где $\vec{\mathbf{V}}$ - вектор скорости течения (u, v, w – составляющие этого вектора по координатным осям).

Уравнение (1) при $\mathrm{div}\,\vec{\mathbf{V}} = 0$ эквивалентно уравнениям

$$\begin{aligned} &\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \\ &\frac{\partial \rho}{\partial t} + u\frac{\partial \rho}{\partial x} + v\frac{\partial \rho}{\partial y} + w\frac{\partial \rho}{\partial z} = 0. \end{aligned} \tag{2}$$

Интегрируя уравнения (1) и первое из (2) от поверхности моря до постоянной глубины H, при условии отсутствия вертикальных потоков субстанции через ограничивающие поток поверхности и кинематическом условии на свободной поверхности $w = -\frac{\partial \xi}{\partial t}$, получим:

$$\begin{aligned} &\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial \overline{\rho u}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{\rho v}}{\partial y} = 0, \\ &\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u} H}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v} H}{\partial y} = 0, \end{aligned} \tag{3}$$

где $\bar{\rho} = \frac{1}{H}\int_0^H \rho\, dz$, $\overline{\rho u} = S_x = \frac{1}{H}\int_0^H \rho u\, dz$, $\overline{\rho v} = S_y = \frac{1}{H}\int_0^H \rho v\, dz$, $\bar{u} = \frac{1}{H}\int_0^H u\, dz$, $\bar{v} = \frac{1}{H}\int_0^H v\, dz$

или, опуская далее знаки операции осреднения, запишем (3) в виде:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \mathrm{div}\vec{\mathbf{S}} = 0,$$

$$\frac{\partial \xi}{\partial \mathrm{t}} + \mathrm{div}\,\vec{\mathbf{V}} H = 0,$$

где $\mathrm{div}\vec{\mathbf{S}}$ - горизонтальная дивергенция полного потока субстанции и $\mathrm{div}\vec{\mathbf{V}}H$ - дивергенция полного потока течения.

Очевидно (в соответствии со сформулированным ранее определением) область, где $\mathrm{div}\vec{\mathbf{S}} < 0$, - это фронтальная зона, т.е. зона конвергенции, а линия максимальной конвергенции в этой зоне $\mathrm{div}\vec{\mathbf{S}} = \max$ есть фронт или фронтальный раздел. В настоящее время доступны для выделения фронтальных зон и фронтальных разделов спутниковые альтиметрические измерения, данные о температуре поверхности океана и о концентрации хлорофилла, позволяющие выделять динамические, термические и биотические фронты на поверхности океана.

Рассмотрим с этой точки зрения элементарные динамические и термические фронты, описываемые соответственно уравнениями неразрывности движения и переноса тепла:

$$\begin{aligned} &\mathrm{div}\,\vec{\mathbf{S}}_u = -\frac{\partial \xi}{\partial t}, \\ &\mathrm{div}\,\vec{\mathbf{S}}_\Theta = -\frac{\partial \Theta}{\partial t}, \end{aligned} \tag{4}$$

где $\vec{\mathbf{S}}_u = \vec{\mathbf{V}}H$ - полный поток, $\vec{\mathbf{S}}_\Theta = \vec{\mathbf{V}}\Theta$ - поток тепла.

Важно отметить, что дивергенция потоков субстанции, тепла – существенно нелинейный процесс. Пусть, например, потоки количества движения определяются годовой изменчивостью течений и теплового баланса:

$$u = U(x,y)\cos\sigma t \quad , \qquad v = V(x,y)\cos\sigma t ,$$

$$\Theta = \Theta_0(x,y)\cos\sigma t , \qquad \sigma = \frac{2\pi}{365\,\text{сут}} ,$$

тогда

$$\operatorname{div}\vec{\mathbf{S}}_\Theta = \frac{\partial u\Theta}{\partial x} + \frac{\partial v\Theta}{\partial y} = \left(\frac{\partial U\Theta_0}{\partial x} + \frac{\partial V\Theta_0}{\partial y}\right)\cos^2\sigma t = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial U\Theta_0}{\partial x} + \frac{\partial V\Theta_0}{\partial y}\right)(1+\cos 2\sigma t) ,$$

т.е. сезонный ход в изменчивости течений и тепла определяет в дивергенции из-за нелинейности процесса некую постоянную составляющую и обертон годовой гармоники.

На линии фронта внутри зон конвергенции потоков должны выполняться основные условия, следующие из определения конвергенции, и дополнительные условия, следующие из законов сохранения:

$$\operatorname{grad}(\operatorname{div}\vec{\mathbf{V}}H) = 0 \text{ и } \operatorname{grad}\left(\frac{\partial\xi}{\partial t}\right) = 0 \quad (\text{динамический фронт});$$

$$\operatorname{grad}(\operatorname{div}\vec{\mathbf{S}}_\Theta) = 0 \text{ и } \quad \operatorname{grad}\left(\frac{\partial\Theta}{\partial t}\right) = 0 \quad (\text{термический фронт}).$$

Если при описании фронтов учитывать турбулентные потоки тепла, то последнее условие примет вид:

$$\text{для термического фронта } \operatorname{grad}\left(\frac{\partial\Theta}{\partial t} - A_\Theta\,\Delta\Theta\right) = 0 ,$$

где A_Θ - коэффициент горизонтальной турбулентной теплопроводности.

Сопоставление выполнимости основных и дополнительных условий может служить критерием достаточности упрощений, положенных в исходные уравнения модели. Для оценки потоков субстанций необходимы величины скоростей течений, которые можно определить по альтиметрическим измерениям.

Примем исходную систему уравнений движения в квазигеострофическом приближении (с учетом горизонтального турбулентного потока количества движения, внутреннего трения):

$$\begin{aligned} -fv &= -g\frac{\partial\xi}{\partial x} + A\Delta u \\ fu &= -g\frac{\partial\xi}{\partial y} + A\Delta v \quad , \end{aligned} \tag{5}$$

где u и v – зональная и меридиональная составляющие среднего по глубине вектора скорости течения; ξ – возвышение уровня моря; A – коэффициент горизонтального турбулентного обмена; Δ – плоский лапласиан; g – ускорение силы тяжести.

Найдем из (5) зависимость каждой из составляющих скорости течения от возвышений уровня:

$$\begin{aligned} D(u) &= -g\frac{\partial\xi}{\partial y} + A[\Delta(\frac{g}{f}\frac{\partial\xi}{\partial x})] \\ D(v) &= g\frac{\partial\xi}{\partial x} + A[\Delta(\frac{g}{f}\frac{\partial\xi}{\partial y})] \quad , \end{aligned} \tag{6}$$

где дифференциальный оператор для характерных пространственно-временных масштабов синоптической и сезонной изменчивости $D(\quad) = f + A\Delta[\frac{A}{f}\Delta(\quad) \approx f$.

Тогда (6) можно представить в виде:

$$u = -\frac{g}{f}\frac{\partial\xi}{\partial y} + \frac{A}{f}[\Delta(\frac{g}{f}\frac{\partial\xi}{\partial x})]$$

$$v = \frac{g}{f}\frac{\partial\xi}{\partial x} + \frac{A}{f}[\Delta(\frac{g}{f}\frac{\partial\xi}{\partial y})] \ ,$$

т.е. оценить составляющие скорости течения по альтиметрическим уклонам уровня моря.

Используя уравнение неразрывности в виде (3), получим выражение для дивергенции полного потока, определяемое по данным альтиметрических измерений:

$$\operatorname{div} S_V = -\frac{\partial a}{\partial x}\frac{\partial\xi}{\partial y} + \frac{\partial a}{\partial y}\frac{\partial\xi}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}[aA\Delta(f^{-1}\frac{\partial\xi}{\partial x})] + \frac{\partial}{\partial y}[aA\Delta(f^{-1}\frac{\partial\xi}{\partial y})], \qquad (7)$$

где $a = \frac{gH}{f}$.

Очевидно, что уровень моря во фронтальной зоне достаточно сложно зависит от основных параметров, определяющих движение.

Достаточность допущений, положенных в основу выражений (4) и (7), может быть проверена решением обратной задачи путем динамико-стохастического анализа [13, 14].

В качестве примера рассмотрим опыт выделения фронтальных зон и фронтальных разделов на основе альтиметрических измерений в Японском море.

Одним из основных центров сбора и хранения альтиметрической спутниковой информации является центр данных AVISO французского космического агентства CNES. Этот архив включает в себя данные альтиметрических измерений со спутников T/P, Jason-1, ERS-1 и ERS-2, и EnviSat. На сайте AVISO (http://www.aviso.oceanobs.com/) находятся в свободном доступе вдольтрековые данные и значения, пересчитанные в узлы регулярной сетки с шагом 1/3° на 1/3°.

Результаты расчетов положения динамических фронтов с помощью вышеизложенной методики представлены в качестве примера для Японского моря в виде карт дивергенции полного потока [15, 16]. Процедура расчетов состояла из следующих этапов обработки и анализа альтиметрической информации:

– получение среднемесячных, среднесезонных и среднегодовых значений уровня в узлах сетки 1°×1° за период 2001-2006 гг.;

– расчет $\frac{\partial\xi(x,y)}{\partial t}$ и выделение зон вергенций в поле возвышений уровня: $\frac{\partial\xi}{\partial t} = 0$ - зоны нулевой дивергенции; $\frac{\partial\xi}{\partial t} < 0$ - зоны дивергенции; $\frac{\partial\xi}{\partial t} > 0$ - зоны конвергенции полных потоков;

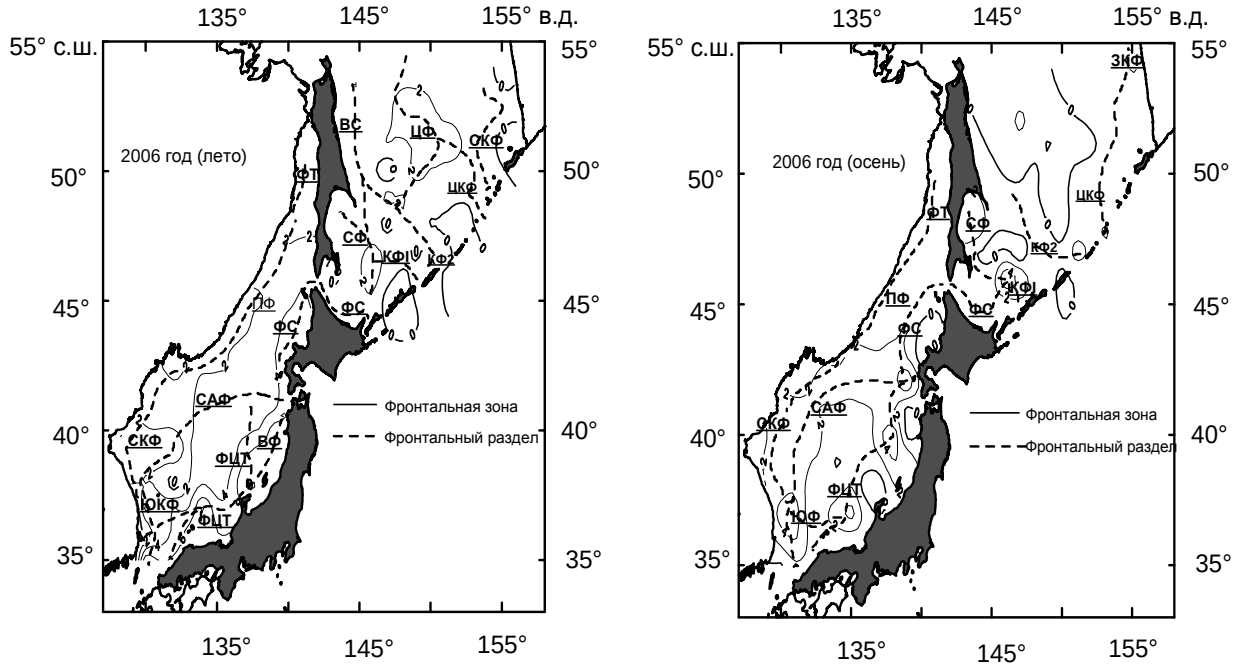
– построение карт среднемноголетнего, среднегодового, среднесезонного и среднемесячного положения фронтальных зон за период 2001-2006 гг.

Идентификация фронтов производилась на основе классификации термических фронтов Японского моря, выделенных А.А.Никитиным по результатам дешифрирования спутниковых ИК-снимков за 1977-2003 гг. [17].

Выделена система основного Субарктического фронта (САФ) с его двумя западными ветвями: Северо-Западной (СЗ) и Юго-Западной (ЮЗ) и двумя северными: Северо-Восточной (СВ) и Северной Центральной (СЦ). САФ ориентирован в центральной и западной части моря преимущественно по широте, а в северной - по долготе. В зоне Цусим-

ского течения выделены три фронта: Приморский фронт (ПФ), Сахалинский фронт (СФ), Северо-Корейский фронт (СКФ), фронт Татарского пролива (ТФ).

На рисунке для примера представлено положение фронтальных разделов в Японском и Охотском морях в 2006 г., вычисленных по среднесезонным полям. Сравнивая положение динамических и термических фронтов, выделенных по альтиметрическим и ИК-измерениям, отметим их принципиальное подобие при различиях, которые вполне объяснимы полученными зависимостями.



Положение фронтальных разделов в Японском и Охотском морях летом и осенью 2006 г.

Проделанная работа убедила нас в том, что выделение на основе спутниковой информации разномасштабных фронтальных зон и фронтальных разделов по конвергенции полных потоков количества движения может быть успешно реализовано.

Литература

1. *Грузинов В.М.* Фронтальные зоны Мирового океана. М.: Гидрометеоиздат, 1975. 198 с.
2. *Грузинов В.М.* Гидрология фронтальных зон Мирового океана. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 272 с.
3. *Степанов В.Н.* Динамические зоны в океанах и атмосфере // Изв. АН СССР, сер. геогр., 1978. № 3. С.101-113.
4. *Федоров К.Н.* Физическая природа и структура океанических фронтов. Л.: Гидрометеоиздат, 1983. 296 с.
5. *Шакина Н.П.* Динамика атмосферных фронтов и циклонов. Л.: Гидрометеоиздат, 1985. 263 с.
6. *Родионов В.Б., Костяной А.Г.* Океанические фронты морей Северо-Европейского бассейна. М.: ГЕОС, 1998. 123 с.
7. *Воробьев В.Н., Смирнов Н.П.* Общая океанология. Часть II. Динамические процессы. СПб.: РГГМУ, 1999. 230 с.
8. *Defant A. Stabile Lagerung d.* Ozeanischer Wasserkörper und dazu gehörige Stromsystem // Veröff. Inst. Meer. Univ. Berlin, 1929. Neufolge A.H. P.116-124.
9. *Uda M.* Researches on “siome” or current rip in the seas and oceans // Geophys. Mag., 1938. V.11. N 4. P.306-372.
10. *Mooers C.N.K.* Frontal dynamics and frontogenesis / In: Oceanic Fronts in Coastal Processes / Ed. M.Bowman, W.Esaias. Springer-Verlag, 1978. P.16-22.
11. *Иванов Ю.А., Нейман В.Г.* Фронтальные зоны Южного океана / В кн.: Антарктика. М.: Наука. 1964. С.98-109.

12. *Фукс В.Р.* Гидрометеорологические основы интерпретации спутниковой альтиметрической информации // Сб.: Колебания уровня морей. СПб.: Гидрометиздат, 2003. С.121-128.
13. *Фукс В.Р.* Альтиметрическая оценка положения зон вергенций течений для промысловых приложений // Тез. докл. IX Всероссийской конференции по проблемам рыбопромыслового прогнозирования. 19-21 окт.2004. г.Мурманск. Мурманск: ПИНРО, 2004. С.283-285.
14. *Фукс В.Р.* Оценка параметров динамико-стохастической модели океанографических полей на основе спутниковых измерений // Вестник СПбГУ. Сер.7. 2008. Вып.2. С.67-75.
15. *Старицын Д.К., Фукс В.Р.* Сезонная изменчивость уровня Японского моря (по данным альтиметрических измерений) // Вестник СПбГУ. Сер.7. 2004. Вып.4 (№ 31). С.56-71.
16. *Старицын Д.К., Фукс В.Р.* Анализ особенностей океанологических условий северо-западной части Тихого океана в 2002-2004 гг. на основе спутниковых вдоль трековых альтиметрических измерений // Вестник СПбГУ. Сер.7. 2005. № 2. С.32-39.
17. *Никитин А.А.* Основные черты пространственного распределения поверхностных термических фронтов в водах Японского моря и их изменчивость // Исследование Земли из Космоса. 2006. № 5. С.49-62. Владивосток: ТИНРО, 2002. 83 с.

Статья поступила в редакцию 24.07.2008 г.