

УДК 551.465

Е.В.Семенов¹

СОСТОЯНИЕ И РАЗВИТИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ОКЕАНА

В статье представлен обзор результатов моделирования морских гидрологических условий в реальном масштабе времени в нашей стране. Это направление исследований является основной альтернативой использованию океанографических баз данных. В общем случае задача моделирования гидрофизических полей в реальном масштабе времени формулируется как обратная, т.е., в первую очередь находятся начальные и граничные условия. Иногда возможно непосредственно решать прямую краевую задачу, что, например, возможно для условий Белого моря. В статье представлены результаты разработки и тестирования элементов систем моделирования гидрологических условий в реальном масштабе времени для Белого и Баренцева морей.

Современные представления об изменчивости океанологических полей. Причиной, приводящей к необходимости применения достаточно сложных методов оперативной океанологии, является, в первую очередь, изменчивость морской среды.

Собственно изменчивость океанологических полей - установленный экспериментально факт. Принято делить процессы, приводящие к изменчивости океанологических полей, по пространственно-временным масштабам.

В настоящее время установлено, что основной энергетический вклад в изменчивость морской среды вносят так называемые синоптические вихри. Их аналогом в атмосфере являются хорошо известные атмосферные циклоны и антициклоны, которые определяют погоду в конкретный срок.

Полезно рассмотреть классификацию процессов по пространственно-временным масштабам с тем, чтобы хотя бы отчасти упорядочить всю совокупность процессов геофизической термогидродинамики, наблюдаемую в океане.

Воспользуемся классификацией процессов, предложенной в работе А.С.Монина и Н.Н.Корчагина «Мезоокеанология». В океане различают неоднородности горизонтального и вертикального развития, которые порождаются обширной иерархией разномасштабных по пространству и времени процессов. Пространственный спектр масштабов рассматриваемых явлений - от молекулярных и до размеров собственно океана. При этом спектр масштабов и пространственный, и временной не является непрерывным, а собирается в некоторые группы, удаленные на спектре друг от друга. Эта особенность и позволяет ввести классификацию основных процессов. Объединенные по близости пространственно-временного масштаба и, зачастую, имея различные физические причины их порождающие, процессы могут быть разбиты на четыре интервала: **крупномасштабный, мезомасштабный, тонкоструктурный и мелкомасштабный**. Далее приведем описание авторами работы «Мезоокеанология» соответствующих интервалов: «Минимальный интервал спектра масштабов включает структурные неоднородности с размерами от долей миллиметра до 1-2 м – масштаб **микроструктуры**. Этот интервал связан с такими процессами, как мелкомасштабная турбулентность, микроконвекция, молекулярные процессы, а также с самой короткопериодной частью спектра внутренних волн. В этом интервале вертикальные и горизонтальные движения жидкости равноправны. Временные масштабы микроструктуры, с одной стороны, ограничены самой высокочастотной компонентой спектра

¹ Институт океанологии им.П.П.Ширшова РАН (Москва)
© Е.В.Семенов, 2008

флуктуаций гидрофизических полей (доли секунды), с другой стороны, его можно ограничить локальной частотой Вайсяля-Брента $N = \left(\frac{g}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial z} \right)^{1/2}$, где g – ускорение свободного падения, ρ_0, ρ – средняя и текущая потенциальные плотности морской воды.

Следующий за микроструктурой интервал *тонкой структуры* ($ТС$) полей включает неоднородности с вертикальными размерами от масштабов локально-изотропных турбулентных пульсаций скорости жидкости в устойчиво стратифицированной среде $L \approx \varepsilon^{1/2} / N^{3/2}$, (ε – скорость диссипации турбулентной энергии), минимальные оценки которого составляют от 10 см до нескольких десятков метров. Горизонтальная протяженность таких неоднородностей на два – три порядка больше их вертикальных размеров. Поэтому тонкоструктурные неоднородности полей имеют характер слоистой стратификации вод в океане. Этот интервал связан с такими процессами, как дифференциально-диффузионная конвекция, короткопериодные внутренние волны, турбулентное перемешивание и др. Соответствующие вертикальным размерам тонкоструктурных неоднородностей временные масштабы менее определены, особенно в области длиннопериодной части спектра: в ней время жизни тонкоструктурных слоев может изменяться от нескольких часов до десятков суток. Минимальные сроки жизни таких слоев также неопределены. Однако, поскольку одним из главных механизмов тонкоструктурного расслоения вод являются внутренние волны, за минимальный срок жизни $ТС$ естественно принять локальный период Вайсяля-Брента.

Третий интервал отражает наименее изученные в океане мезомасштабные явления. Вертикальные размеры таких явлений меняются от нескольких метров до сотни метров, а их горизонтальные масштабы 10^2 - 10^4 м. Нетрудно заметить, что пространственные масштабы тонкоструктурных и мезомасштабных неоднородностей физических полей частично перекрываются, что создает определенные трудности в распознавании того или иного образа явлений. Однако, в отличие от $ТС$, мезомасштабные явления представлены более устойчивыми структурами. При этом максимальные времена жизни мезоструктур могут составлять месяцы, например, для термохалинных ступчатых структур и даже годы, как у внутритермоклинных линз, а иногда и более того, как у квазистационарных струйных течений. Минимальный же срок жизни мезоструктур менее определен, и здесь мы его условно ограничиваем одним часом. Таким образом, временной интервал мезомасштабных явлений в океане можно заключить в диапазоне 10^0 - 10^4 ч.

Четвертый интервал масштабов явлений соответствует крупномасштабным структурам движений вод. Этот интервал включает крупномасштабные квазистационарные течения и противотечения, меандры и ринги, образованные такими течениями, синоптические вихри, волны Россби и др. Основными структурообразующими факторами в этом интервале движений являются вращение Земли и ее сферичность. Пространственные масштабы таких явлений составляют по вертикали от 100 м до всей толщи океана, а по горизонтали от 100 км до размеров самого океана. Такие структуры довольно устойчивы, и их времена жизни составляют от нескольких лет и более».

Можно утверждать, что в настоящее время интересы флота требуют учета, как минимум, крупно- и мезомасштабных явлений. Очевидно также, что в ряде случаев, необходим учет ветровых и внутренних волн, которые, в соответствии с приведенной классификацией, относятся к тонкоструктурным масштабам. Поэтому становится ясным, что переход к методам оперативной океанологии представляет собой трудную задачу.

На самом деле ситуация еще сложнее: в последние годы отмечаются очевидные изменения уже среднестатистических (климатических) характеристик океанологических полей. Приведем пример, свидетельствующий о таких изменениях. На рис. 1 приведены поля температуры и солености на полигоне в Баренцевом море на горизонтах 0, 45 и 90 м

(врезка) для середины июня 2005 г. на фоне климатических полей для июня месяца (по результатам 21-го рейса НИС «Акад.С.Вавилов»).

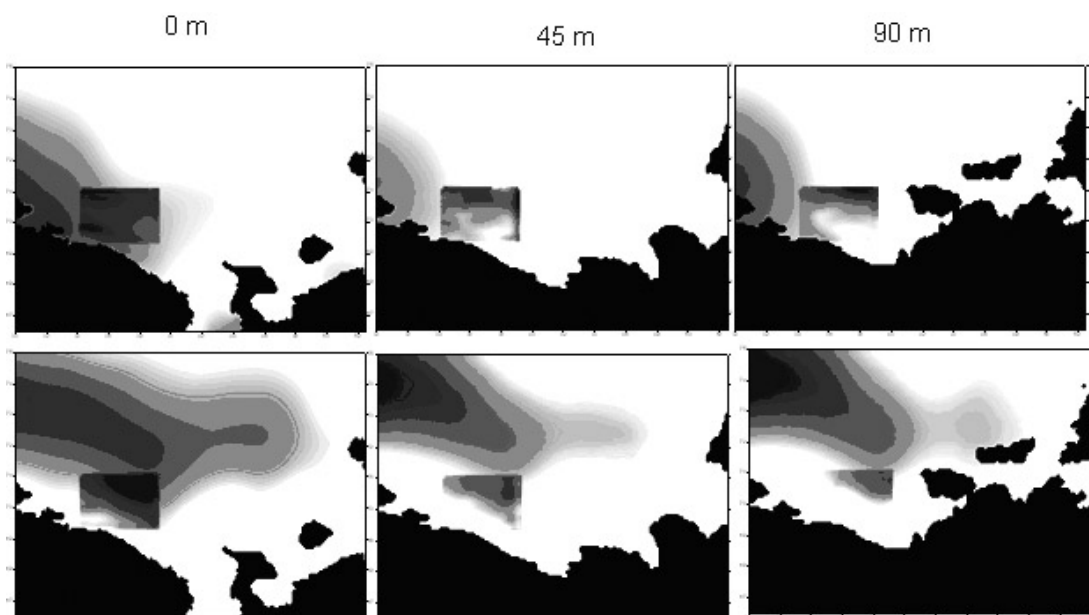


Рис. 1. Поля температуры в июне 2005 г. (на врезке сверху) и солёности (на врезке внизу), восстановленные методами оперативной океанологии (Семенов, 2005 г.) по данным наблюдений, на фоне климатических полей Баренцева моря (данные Левитуса, июнь)

Очевидно, что в июне 2005 г. теплые и высокосолёные воды Северо-Атлантического течения проникли далеко на восток относительно своего среднестатистического положения. Среднеквадратическое отклонение от климатической нормы по температуре на всех уровнях для 54 станций превысило 1° . Не настаивая именно на глобальном потеплении (в ряде полей, особенно в промежуточных и глубинных слоях Атлантики отмечается наоборот охлаждение), необходимо признать сам факт изменения среднестатистических характеристик океанологических полей. Сказанное приводит к выводу о необходимости использования методов оперативной океанологии при решении задач в интересах флота. Именно проблемам оперативной океанологии уделим главное внимание в дальнейшем.

Оперативные численные модели гидрофизических полей океана. Каждая система оперативного мониторинга (СОМ) гидрофизических полей, реализующая задачу оперативной океанологии технологически включает три основных компонента: специализированную наблюдательную сеть, математический блок усвоения натурной информации и специализированную математическую численную модель, которая в итоге и вычисляет динамически согласованные, удовлетворяющие основным законам сохранения гидрофизические поля в режиме реального времени.

В основе любой СОМ лежит требование выполнения расчета с заданной точностью параметров морской среды (полей течений, температуры, солёности, плотности и давления) в реальном времени и с необходимым пространственно-временным разрешением.

Математический аппарат, используемый для решения задач оперативной океанологии это аппарат четырехмерного анализа данных наблюдений, который включает в себя методы подготовки данных, нахождение краевых условий (решение обратных задач), методы решения начально-краевых задач.

Задачей четырехмерного анализа данных океанографических наблюдений в общем случае можно считать нахождение эволюции основных гидрофизических полей во всей трехмерной области за весь период проведения измерений. Очевидно, что в случае непре-

рывного выполнения необходимого комплекса измерений, задача анализа переходит уже в задачу мониторинга рассматриваемой акватории.

Необходимо также отметить, что решение задачи четырехмерного анализа данных измерений есть необходимое условие для выполнения краткосрочного и среднесрочного прогноза гидрофизических характеристик в исследуемой области.

Из определения краткосрочного прогноза следует принципиальная зависимость решения при таком прогнозе от начальных условий. При решении задачи четырехмерного анализа начальные условия на момент начала прогноза известны.

Решение задачи среднесрочного прогноза требует уже знания неадиабатических источников на прогнозируемой акватории. И здесь можно предложить методику получения таких неадиабатических источников при решении задачи четырехмерного анализа данных наблюдений.

Остановимся на наиболее сложной проблеме нахождения краевых условий (решения обратных задач) и приведем пример достаточно общей постановки начально-краевой задачи. Почему же возникает необходимость решения весьма сложных обратных задач?

Рассмотрим морской бассейн, имеющий как твердые, так и жидкие границы. Состояние морской среды описано, если известен в заданных точках функционального пространства вектор состояния $\Phi(U, P, T, S, \rho)$, где: U – вектор скорости течения, состоящий из трех компонент; P – гидростатическое давление; T, S, ρ – температура, соленость и плотность, соответственно.

Важно, что для бароклинного океана необходим согласованный расчет всех указанных компонент одновременно, если только ставится задача о получении каких-либо количественных характеристик. Поэтому, вектор состояния необходимо находить как решение начально-краевой задачи:

$$\Phi = L(\Phi^0, \Phi_T), \quad (1)$$

где Φ^0 – вектор начальных условий, Φ_T – вектор граничных условий; $L(\Phi^0, \Phi_T)$ – замкнутая система дифференциальных уравнений в частных производных с краевыми условиями – математическая модель.

Проблема состоит в том, что, как правило, из данных наблюдений Φ^0, Φ_T – неизвестны, отчасти и потому, что синхронное измерение Φ^0, Φ_T практически невозможно.

На практике же известен вектор состояния $\Phi(U, P, T, S, \rho)$, который есть подмножество $\Phi(U, P, T, S, \rho)$, т.е. известно решение в отдельных точках интересующей области моря.

Задача состоит в определении векторов: Φ^0 – вектора начальных условий и Φ_T – вектора граничных условий по значениям неполного вектора состояния $\Phi(U, P, T, S, \rho)$, известного в отдельных точках расчетной области, т.е. имеем так называемую обратную задачу.

Решение обратных задач, которые относятся к классу некорректно поставленных, представляет известные трудности. Проблема сводится к необходимости получать сглаженное решение (регуляризация), причем гладкость решения зависит в первую очередь от количества и качества (точности) измеренного решения $\Phi(U, P, T, S, \rho)$.

В общем виде, обратная задача может быть сформулирована как вариационная. При этом основной проблемой является нахождение градиентов в функциональном пространстве, которые необходимы для нахождения оптимальных вариаций краевых условий. На этом пути возникают проблемы с формулировкой сопряженного оператора для сложных нелинейных систем геофизической гидродинамики и необходимостью хранить при решении сопряженной задачи решение прямой задачи. После линеаризации исходной нелинейной системы при численной аппроксимации сопряженный оператор может быть найден; сложнее - с необходимостью хранить, как правило, большие массивы решения прямой задачи.

Поэтому имеют смысл поиски упрощенного решения задачи. На практике часто реализуется подход, разработанный в институте океанологии им.П.П.Ширшова РАН и неоднократно апробированный для обработки глубоководных термохалинных измерений. Подход основан на формулировке задачи как вариационной. Важно, что используемый подход применим к сложным нелинейным системам уравнений термогидродинамики океана. Предлагаемый подход тестировался на точных решениях и показал вполне приемлемые результаты. Условно метод можно назвать методом ньютоновских источников.

Внешний итерационный цикл можно описать следующим образом:

$$1. \text{ а) } L(\Phi_0^0) = \Phi_0^m, \quad t = t_0 - t_m, \quad \Delta t > 0, \quad \text{расчет ошибки (RMSE);} \quad (2)$$

$$\text{б) } \Phi_1^0 = L^*(\Phi_0^m) + Q_f(\Phi, \underline{\Phi}), \quad t = t_m - t_0, \quad \Delta t < 0, \quad \text{усвоение измерений } \underline{\Phi},$$

где $L^*(\)$ – оператор интегрирования по времени назад, отличающийся от $L(\)$ знаками перед локальной производной по времени и перед слагаемыми, описывающими трение и процессы турбулентной диффузии; $Q_f(\Phi, \underline{\Phi})$ – оператор, описывающий процедуру ассимиляции натуральных данных.

$$2. \text{ а) } L(\Phi_1^0) = \Phi_1^m, \quad t = t_0 - t_m, \quad \Delta t > 0, \quad \text{расчет ошибки;} \quad (3)$$

$$\text{б) } \Phi_2^0 = L^*(\Phi_1^0) + Q_f(\Phi, \underline{\Phi}), \quad t = t_m - t_0, \quad \Delta t < 0, \quad \text{усвоение измерений } \underline{\Phi}. \quad \text{и т.д.}$$

На этапе а) происходит решение краевой задачи на основе очередного приближения краевых условий. В качестве нулевого приближения начальных условий можно задавать или климатические условия, или данные измеренных значений, отнесенные к начальному моменту времени. На этом этапе происходит расчет среднеквадратичной ошибки расчета на основе данных измерений, которые считаются точными.

На этапе б) исходная система уравнений термогидродинамики океана интегрируется по времени назад; при этом все слагаемые, описывающие турбулентный обмен и трение в системе, сохраняют свой знак по отношению к производной по времени. При этом происходит ассимиляция данных наблюдений путем введения оператора $Q_f(\Phi, \underline{\Phi})$, который имеет вид ньютоновского источника, т.е. зависит от разности измеренного и расчетного значений функции. Вид его не совсем тривиален, а весовая функция, в общем виде, не изотропна и зависит от характеристик движения типа f/H и структуры течения (здесь f – параметр Кориолиса, H – рельеф дна).

Следующее приближение начального условия получается непосредственно при интегрировании по времени назад и достижении момента времени t_0 .

Важно, как варьируются граничные условия. Здесь принципиально используются два положения: применение условий излучения для нахождения граничных условий первого рода на жидкой границе и факт интегрирования системы уравнений вперед-назад по времени.

При использовании условий излучения, когда возмущение стремится покинуть область расчета, привлекается информация из внутренней части области, т.е. граничные условия находятся с учетом усвоенных данных измерений. Таким образом, та часть граничных точек, которая была определена с использованием условий излучения, скорректирована данными измерений. Остаются, тем не менее, точки, где фазовая скорость возмущения направлена внутрь области и где граничные условия должны быть заданы.

Решение данной проблемы происходит при смене направления интегрирования системы уравнений, когда меняется знак приращения по времени и, соответственно, знак фазовой скорости возмущения (а знак фазовой скорости определяет тип граничной точки), и втекающие точки становятся вытекающими, и, в свою очередь, определяются с использованием условия излучения и, соответственно, данных измерений. Таким образом, все гра-

ничные точки в итоге определяются по условиям излучения, а значит, с использованием данных измерений.

Имеет место весьма важный момент, связанный с обработкой граничных значений. Дело в том, что при использовании ньютоновских источников порождаются инерционно-гравитационные волны, которые, унося избыточную, геострофически не согласованную энергию, покидают область расчета при применении условий излучения. Поэтому временной ряд, полученный при использовании условий излучения в точке, содержит значительный эффект инерционно-гравитационных волн, не имеющих физического смысла, и которые должны быть отфильтрованы при смене направления интегрирования перед использованием временного ряда граничных условий.

Процесс решения контролируется по эволюции средоквадратичной ошибки (RMSE), которая при правильном варьировании Φ^0 и Φ_r должна уменьшаться. Принимаются те значения Φ^0 и Φ_r , которые минимизируют RMSE.

После определения Φ^0 и Φ_r решается задача

$$\Phi = L(\Phi^0, \Phi_r) \quad (4)$$

и находится приближенное решение во всей области четырехмерного пространства.

Данный алгоритм неоднократно использовался при обработке глубоководных термохалинных измерений на полигоне Гольстрима (1984), Мегполигоне (1987), полигоне г. Пулковской (1989), на полигоне к северо-западу от Новой Земли (1997), на центральном полигоне 21-й экспедиции НИС «Акад.С.Вавилов» (2005), на динамическом полигоне в Белом море в рейсе НИС «Эколог» (2007).

Конечным этапом решения задачи четырехмерного анализа данных наблюдений является решение начально-краевой задачи на основе полученных приближенных начальных и граничных условий.

Проблемы создания систем оперативного мониторинга в нашей стране и за рубежом. Остановимся кратко на состоянии вопроса об оперативной океанологии в нашей стране и за рубежом. Основной проблемой развития оперативных систем мониторинга морской среды является создание дорогостоящих наблюдательных систем, которые в широком смысле включают в себя стационарные наблюдательные системы: заякоренные буйковые станции, донные станции, береговые системы, спутниковые наблюдения, наблюдения на подвижных морских объектах (судовые наблюдения, данные дрейфующих поплавков и т.д.). Очевидно, что развертывание таких систем – дорогостоящая задача.

На самом деле все зависит от тех задач, которые решаются. Если говорить о задачах обороны собственных рубежей, то представляется, что данная проблема может быть вполне решена на основе лишь судовых наблюдений, которые поставляют наиболее содержательную информацию.

Утверждаем, что для целей защиты своих рубежей создание таких систем в окраинных морях России принципиально возможно и недорого на базе апробированной методики судовых наблюдений.

В настоящее время можно говорить только об одной имеющейся в нашей стране системе оперативного мониторинга морской среды, созданной для Белого моря. Учитывая специфику динамических процессов в Белом море, данная система использует весьма ограниченный объем оперативной входной информации без использования элементов наблюдательной сети внутри самого моря.

Если говорить о разработках оперативных систем мониторинга на Западе, то необходимо отметить несколько важных моментов, как минимум три из них глобальные.

Одна из них (NLOM – Navy Layered Ocean model) с разрешением порядка 1/16 градуса предназначена для оперативного анализа и прогноза основных гидрофизических полей океана с разрешением синоптического пространственно-временного масштаба.

Другая, NCOM – Navy Coastal Ocean model, запущена в оперативный режим в конце

2002 г., предназначена для более детального описания прибрежных, мелководных и слабостратифицированных районов.

Отдельного рассмотрения заслуживает мобильная оперативная система MODAS-NRLPOM (запущена не позже лета 2000 г.) с весьма развитым математическим и программным обеспечением, позволяющим быстро, в течение нескольких часов перенастраивать систему на любой заданный морской регион с учетом специфической термогидродинамики рассматриваемого района. Концепция этой системы: за несколько часов выполнить анализ и дать прогноз на 2 дня для любого района Мирового океана независимо от того, имеются ли в интересующем районе наблюдения *in-situ* или другие наблюдения. Концепция MODAS-NRLPOM определенно направлена на решение задач военного флота в первую очередь. Следует признать концепцию MODAS-NRLPOM весьма состоятельной.

Следует отметить, что все системы программно и технологически связаны между собой, что позволяет действительно оперативно рассчитывать необходимые гидрофизические параметры и давать прогноз. Так, система MODAS обрабатывает входную информацию для всех моделей.

По существу имеет место единая глобальная оперативная система освещения гидрологической обстановки.

Имеются региональные оперативные системы, например, оперативная система мониторинга Средиземного моря, прогностическая система высокого разрешения для Балтийского моря HIROMB, в нашей стране ведутся работы по созданию прогностической оперативной модели Финского залива Балтийского моря.

По математической постановке на основе доступных источников многие положения математической постановки задач оперативной океанологии, отечественные и зарубежные, похожи, но отставание в части используемых вычислительных средств, возможностей наблюдательных сетей, объемов финансирования работ представляется существенным.

Отметим дополнительно два важных обстоятельства. Глобальные системы могут быть развернуты в любом районе Мирового океана в течение нескольких часов и дают точность, превышающую климатическую оценку.

Важно отметить, что совершенно по-разному создавались базы океанологической информации в России и за рубежом. Российские базы содержат осредненные данные по времени и пространству для различных районов Мирового океана. Наряду с аналогичными данными зарубежные базы содержат принципиально иную информацию, которая и позволяет им решать задачи оперативной океанологии более эффективно. Эти базы содержат информацию о вертикальной структуре полей для различных структурных образований – циклонов и антициклонов. При этом, имея оперативную спутниковую информацию о типе структурного образования и параметрах этого образования на поверхности, удастся на основе архивных данных о вертикальной структуре таких образований в данном месте и в данное время года получить оценку вертикальных профилей основных полей, превышающих по точности климатическую оценку.

Результаты работ в области оперативной океанологии. Рассмотрим некоторые результаты, полученные в нашей стране в области оперативной океанологии. Предложенный выше, в общем виде, подход, основанный на ньютоновских источниках, вообще говоря, универсален. Основная трудность связана с решением обратной задачи. На практике этот этап требует максимальных финансовых затрат вследствие необходимости создания эффективной наблюдательной сети на контролируемой акватории. Одними из наиболее информативных измерений для решения задач оперативной океанологии являются глубоководные термохалинные измерения.

При этом степень пространственно-временного разрешения наблюдательной сети определяет и точность восстанавливаемого решения. Тем не менее для региональных сис-

тем оперативной океанологии создание комплексных наблюдательных сетей - решаемая задача.

Очевидно, что в случае создания глобальных систем оперативной океанологии подход к созданию наблюдательной сети должен основываться на дистанционных методах, прежде всего спутниковых методах измерения доступных характеристик морской поверхности с последующим использованием правильно собранной архивной информации для приближенного восстановления вертикальной структуры океанологических полей. При этом, конечно, необходимо использование дополнительной информации в районах, представляющих наибольший интерес.

Вообще говоря, вариационная формулировка задачи четырехмерного анализа принципиально допускает использование практически любой измеряемой информации, эволюция полей которой может быть строго описана.

Следует признать, что именно создание эффективных наблюдательных сетей есть центральная проблема оперативной океанологии.

В этой связи представляют особый интерес морские акватории, где возможны постановки оперативных задач изначально как краевых без промежуточного трудоемкого этапа решения обратной задачи. Конечно, с увеличением требований к точности решения все равно придется решать полные постановки, однако возможность получать приемлемое для практики решение непосредственно на основе постановки краевой задачи весьма соблазнительна.

В нашей стране можно назвать, по крайней мере, один такой бассейн – Белое море. Причина такой возможности кроется в решающем преобладании относительно легко контролируемых в Горле Белого моря периодических приливных процессов в динамике вод Белого моря. Другие наиболее важные процессы, а именно атмосферный форсинг может задаваться на основе уже существующих оперативных технологий для атмосферы. Возможности создания системы оперативного мониторинга на Белом море апробировались в 2004, 2005, 2006 и в 2007 г. в натуральных условиях.

При испытаниях в качестве оперативной информации использовался четыре раза в сутки срочный приземный (приводный) анализ атмосферы. Оперативно задавались поля напряжений трения ветра и потоки тепла. Учитывая опыт 2004 г., в 2005 г. предварительно в начале лета были выполнены пять глубоководных термохалинных станций с целью корректировки термохалинной структуры глубоководных слоев, которая формируется в зимний период, исключенный пока из рассмотрения. Получаемые расчетные поля основных океанологических характеристик сравнивались с натурными измерениями, в том числе, с расчетными профилями скорости звука, основанными на натуральных данных. Приведем некоторые результаты расчетов и апробации расчетных полей в исследованиях 2004-2007 гг. на Белом море.

В 2004 г. работы проводились в Кандалакшском заливе. Рассчитывались следующие характеристики на 31-м горизонте: температура, соленость, плотность, скорости течений (в том числе, вертикальные), уровень моря. Важной задачей анализа полученных результатов являлась верификация расчетов с использованием натуральных измерений гидрофизическим зондом в контрольных точках района калибровки. На рис. 2 показан пример такого сравнения:

Сплошная кривая – результаты расчёта, крестики – эксперимент (результаты, полученные измерениями гидрофизическим зондом).

Из приведенных результатов сравнения видно, что совпадение расчетных значений вертикального профиля скорости звука и температуры удовлетворительное.

Во время 21-й экспедиции НИС «Акад.С.Вавилов» на Белом море в 2005 г. ставились две основные задачи. Во-первых, выполнить натурные измерения профилей температуры и солёности в глубоководной части Кандалакшского залива с целью корректировки на-

чальных условий в глубоководной части моря. Во-вторых, верифицировать результаты расчетов по системе оперативного мониторинга на основе качественно выполненных гидрофизических измерений.

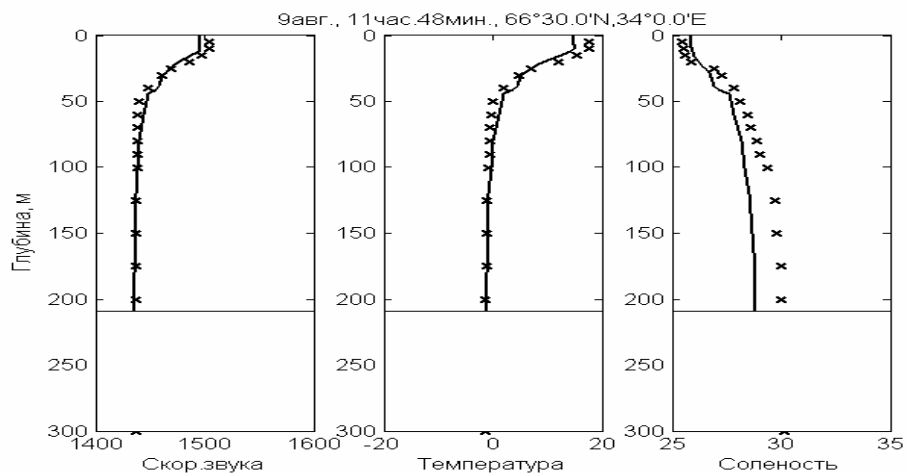


Рис. 2. Сплошная кривая – расчет по оперативной модели, крестики – натурные данные. Скорость звука находилась расчетным путем на основе натуральных измерений или модельных значений температуры, солености и давления

Две станции использовались для выполнения сравнения с расчетными данными. На рис. 3 и 4 приведены расчетные и измеренные профили температуры, солености и скорости звука для этих двух станций.

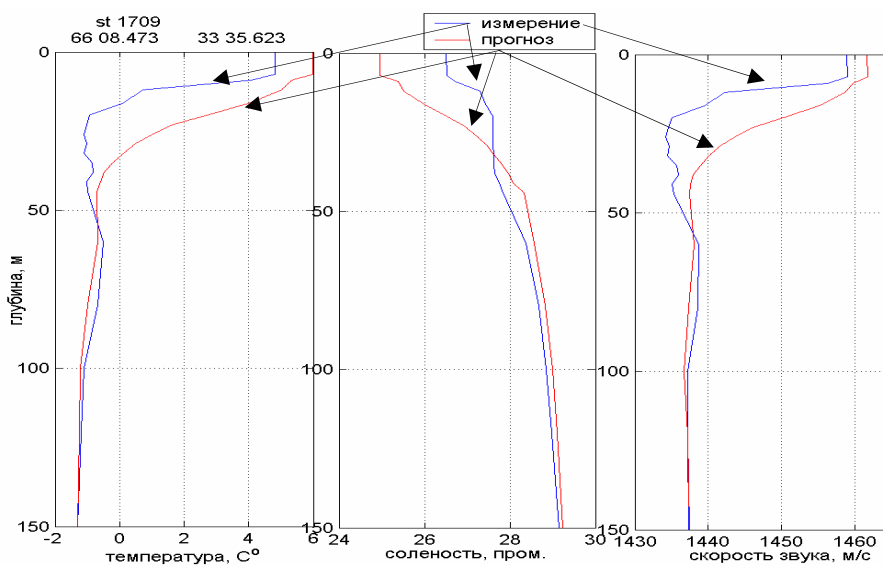


Рис. 3. Расчетные и фактические (измеренные) профили температуры и солености для тестовой станции № 1709. Скорость звука находилась расчетным путем на основе натуральных измерений или модельных значений температуры, солености и давления

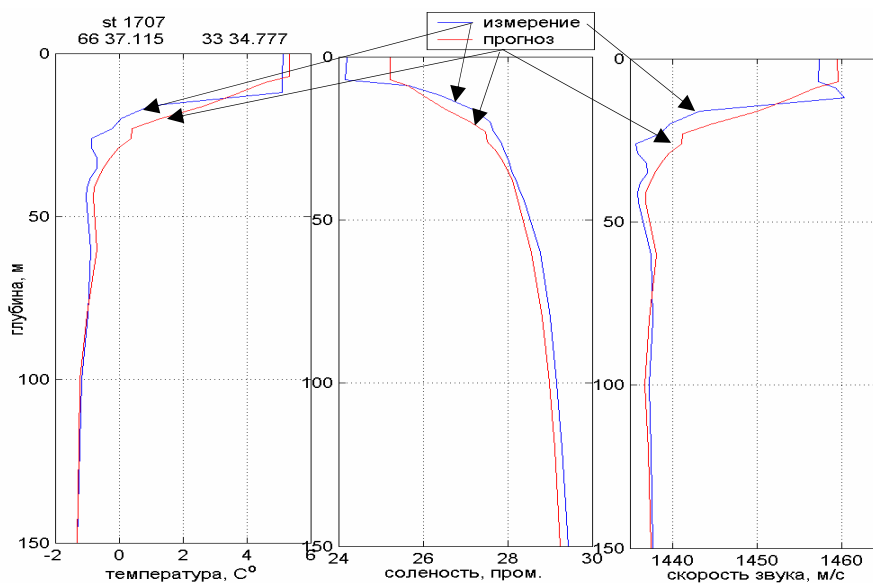


Рис. 4. Расчетные и фактические (измеренные) профили температуры и солености для тестовой станции № 1707. Скорость звука находилась расчетным путем на основе натуральных измерений или модельных значений температуры, солености и давления

Из приведенных результатов сравнения видно, что совпадение расчетных и измеренных вертикальных профилей удовлетворительное. Наибольшие расхождения имеют место для солености, как и в 2004 г.

По результатам апробации системы оперативного мониторинга Белого моря во время 21-й экспедиции в итоговом Протоколе указывается, что «...первичные результаты обработки, проведенной в ходе экспедиции, показали удовлетворительную работу модели СОМ Белого моря, что подтверждается сопоставлением результатов моделирования и экспериментально полученных ВРСЗ, приведенных в настоящем Протоколе, и подтверждает результаты, полученные в ходе апробации модели СОМ Белого моря в 2004 г.»

В 2006 г. проводилась калибровка решения на основе прямых измерений уровня на ГМС Соловки. Полученные результаты позволили провести опытную эксплуатацию системы оперативного мониторинга в Гидрометцентре ВМФ.

В 2007 г. сотрудниками Института океанологии РАН и Санкт-Петербургского научного центра РАН совместно выполнялась комплексная калибровка решения системы оперативного мониторинга гидрофизических полей Белого моря при использовании, в том числе, и обрывных термохалинных зондов. Приведем результаты обработки данных полигона глубоководных термохалинных измерений, выполненного с помощью обрывных зондов.

На рис. 5 приведено положение полигона из 25 станций, выполненного обрывными термохалинными зондами.

Задача состояла в обработке данных измерений с учетом временной изменчивости полей. Собственно съемка полигона происходила с 22 ч 15 мин 23 июля до 5 ч 11 мин 24 июля, т.е. заняла порядка 7 ч. Однако условия Белого моря таковы, что 7 ч составляют чуть больше половины периода основного полусуточного прилива. Приливные же движения в Белом море, в основном, ответственны за изменчивость гидрофизических полей. Поэтому было необходимо подвергнуть полученные обрывными зондами данные глубоководных термохалинных измерений обработке по схеме четырехмерного анализа. Проблема, однако, возникает в связи с невозможностью получения основной баротропной компоненты прилива на основе данных термохалинных измерений. Эта ситуация в корне отличается от центрального полигона в Баренцевом море в 2005 г. и от других ранее вы-

полненных полигонов, где приливные движения не были доминирующей причиной изменчивости гидрофизических полей в период выполнения съемки.

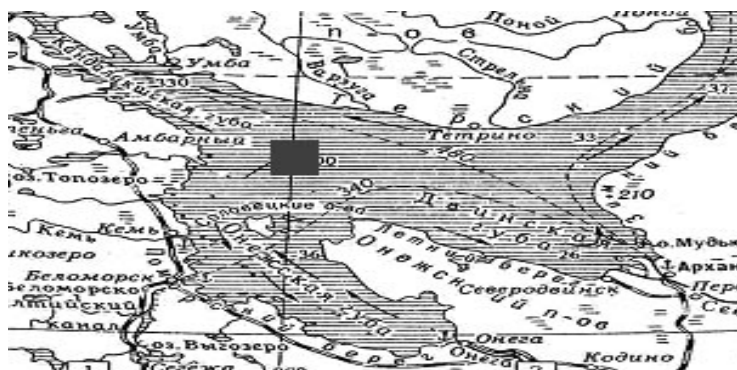


Рис. 5. Положение полигона из 25 глубоководных термохалинных станций, выполненного обрывными зондами 23-24 июля 2007 г.

Решением проблемы в данном случае является использование решения задачи оперативного мониторинга, которая была реализована на этот период. Это решение и позволило синхронизировать данные измерений, полученные с помощью обрывных зондов.

На рис. 6 приведены начальные для 22 ч 15 мин 23 июля поля температуры и солёности для горизонтов 12 и 52 м, а на рис. 7 те же поля для момента окончания полигона в 5 ч 11 мин 24 июля.

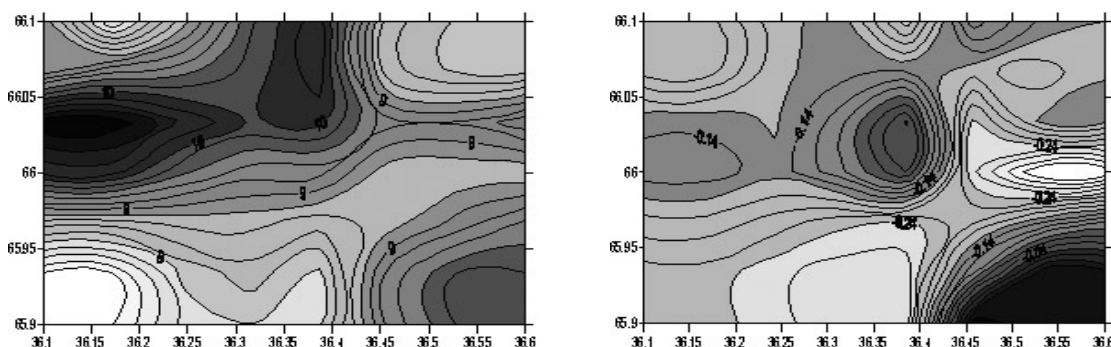


Рис.6. Начальные (22 ч 15 мин 23 июля) поля температуры для горизонтов 12 и 52 м после обработки по схеме четырехмерного анализа с использованием баротропной части решения задачи оперативного мониторинга гидрофизических полей Белого моря

Важный результат, подтверждающий необходимость обработки информации по схеме четырехмерного анализа, с одной стороны, и отчасти верифицирующий результаты расчетов по схеме оперативного мониторинга, с другой стороны, приведен на рис. 8. Здесь приведены на тех же горизонтах поля температуры, полученные из решения задачи оперативного мониторинга на момент окончания съемки. В расчете этих полей данные съемки с помощью обрывных зондов не использовались. Качественное сходство полей получается после обработки данных измерений по схеме четырехмерного анализа. При анализе рис. 7 и 8 под сходством полей понимается близость фаз и направлений распространения инерционно-гравитационных волн, составляющих основной фон полей, хотя имеют место очевидные из постановок задач различия в описании синоптической компоненты изменчивости полей. В общей постановке задачи мониторинга гидрофизических полей Белого моря в начальных условиях синоптическая компонента отсутствует в виду отсутствия оперативно полученных измерений начальных данных. Это необходимо учитывать при анализе

результатов. Понятно также как, преодолеть указанный недостаток, который не носит характер научной проблемы.

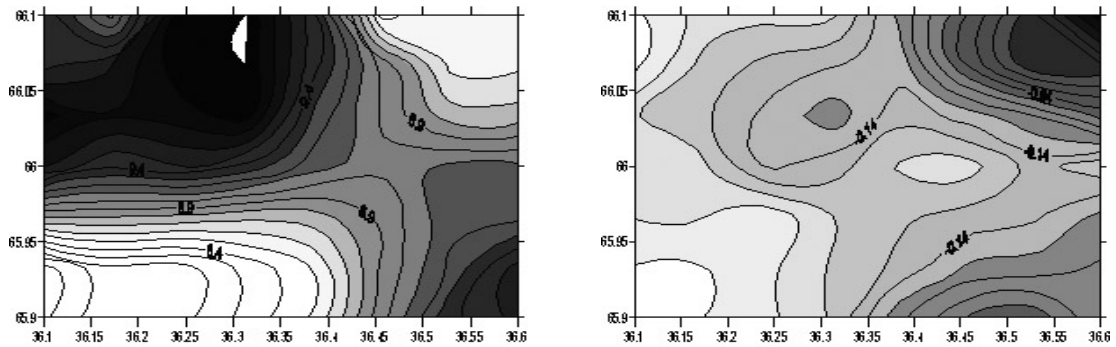


Рис.7. Поля температуры для горизонтов 12 и 52 м на момент окончания съемки (5 ч 11 мин 24 июля) после обработки по схеме четырехмерного анализа с использованием баротропной части решения задачи оперативного мониторинга гидрофизических полей Белого моря

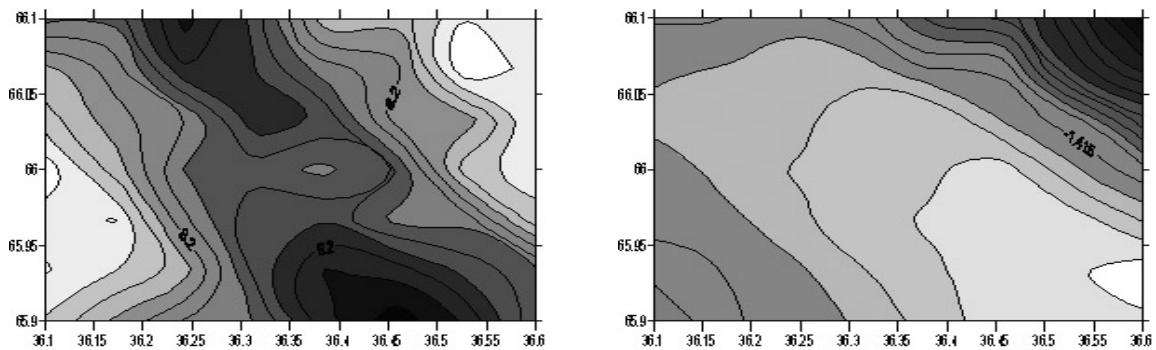


Рис. 8. Поля температуры для горизонтов 12 и 52 м, полученные из решения задачи оперативного мониторинга на момент окончания съемки. В расчете этих полей данные измерений с помощью обрывных зондов не использовались

Приведем результаты выполненных в 2005 г. в 21-й экспедиции НИС «Акад.С.Вавилов» работ по реализации системы оперативного мониторинга гидрофизических полей Баренцева моря.

Как отмечалось выше, главным вопросом общей технологии создания систем оперативного мониторинга конкретного района является наличие наблюдательной сети. В данной экспедиции в качестве такой наблюдательной сети, очевидно, использовались данные гидрологического полигона из 54 станций, выполненного НИС «Акад.С.Вавилов» в районе, указанном на рис. 9.

В ходе выполнения работ на Баренцевом море в выбранном районе было выполнено 59 станций, на которых были получены фактические данные о вертикальных профилях термохалинных характеристик морской среды. При этом 5 станций было выполнено на переходе и 54 станции было выполнено при работах в районе, указанном на рис. 9. На рис. 10 приведены среднеквадратичные ошибки расчета за весь период интегрирования (4 суток) и средние для каждого горизонта. Прежде всего, отметим последовательное уменьшение ошибки при выполнении четырех внешних итераций, которые отмечены на рис. 10 сплошными линиями справа налево в соответствии с номером итерации. Таким образом, можно говорить, что варьирование краевых условий происходило правильно.

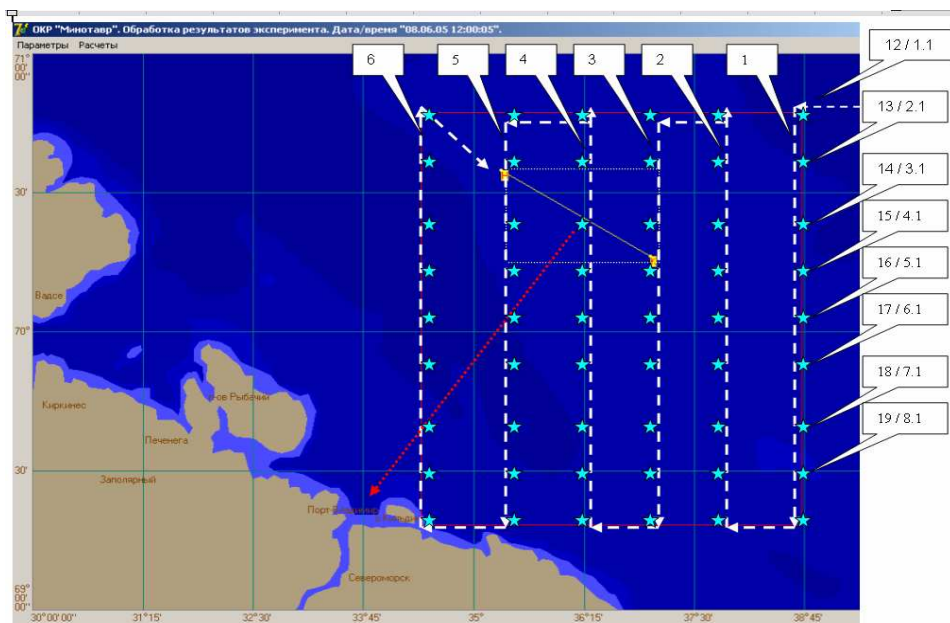


Рис. 9. Местоположение полигона работ в Баренцевом море в июне 2005 г.

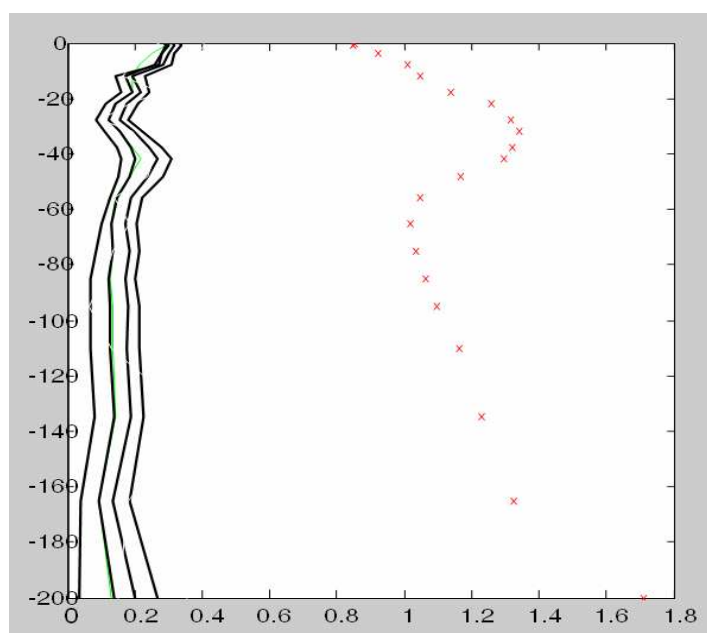


Рис. 10. Среднеквадратичные ошибки по температуре. По вертикальной оси отложена глубина в метрах, по горизонтальной оси отложена среднеквадратичная ошибка (в градусах) расчета температуры на каждом расчетном уровне, осредненная за весь период съемки. Сплошные линии – последовательное справа налево уменьшение ошибки при итерировании (4 итерации). (Левая кривая – минимальная ошибка при радиусе усвоения по горизонтали равном 20 км). Крестики - ошибка климатического прогноза (данные Левитуса, июнь, 1/4 градуса)

измерений. При этом наблюдательная сеть реализовывалась на базе научно-исследовательского судна. Использовалась четыре раза в сутки оперативная информация

Существенно, что климатическая ошибка, т.е. отклонение климатических значений (крестики) от фактически измеренных является наибольшей и весьма значительной и составляет величину более градуса.

В итоговом Протоколе сказано: «...приведенные выше результаты позволяют сделать вывод о достаточно устойчивой работе модели СОМ Баренцева моря, что подтверждается результатами сравнения модельных кривых ВРСЗ и экспериментальных результатов...». И далее «...Апробация системы оперативного мониторинга показала вполне удовлетворительные результаты. При работе СОМ в оперативном режиме достигнута высокая точность вырабатываемых данных...».

Отметим, что в последних приведенных расчетах на полигоне в Баренцевом море в период 21-й экспедиции НИС «Акад.С.Вавилов» реализована общая постановка задачи четырехмерного анализа данных глубоководных термохалинных

о приводном анализе атмосферы так, как это указывалось при расчетах в Белом море.

Многолетний опыт работы со схемами четырехмерного анализа натуральных данных показал, что наиболее доступными и обеспечивающими необходимую точность расчетов являются глубоководные термохалинные измерения. Для их выполнения достаточно обычного STD-зонда, и сами измерения не являются сложными. В этой связи имеется возможность организовать попутные судовые наблюдения. Такой эксперимент был выполнен в октябре 2007 г. в южной части Баренцева моря. На небольшое рыболовное судно, занимавшееся промыслом в прибрежной зоне Кольского полуострова, по договоренности с руководством компании, был направлен научный сотрудник с гидрофизическим зондом. Удалось организовать съемку из 56 станций за период примерно 5 сут. По параметрам съемка оказалась близка к полигону, выполненному НИС «Акад.С.Вавилов» в 2005 г. Отличие состояло в пространственной нерегулярности съемки, выполненной рыболовным судном, что сказалось и на точности полученных результатов. Так по температуре максимальная среднеквадратичная ошибка выросла на 0.2° . Если сравнить финансовые затраты, то они несопоставимы.

На рис. 11 и 12 приведены поля температуры после обработке по схеме четырехмерного анализа для начального момента съемки и на момент ее окончания.

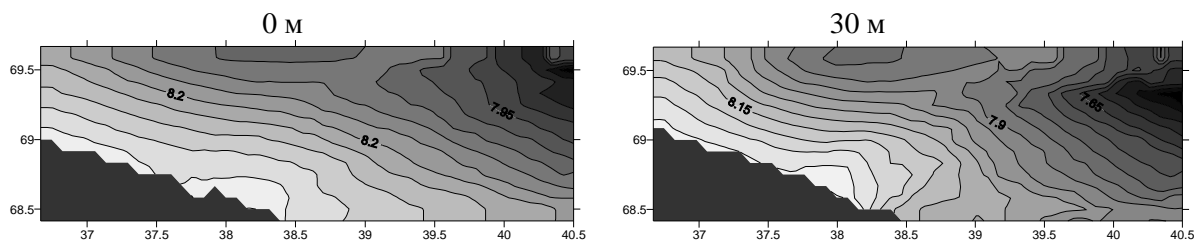


Рис. 11. Поля температуры вначале съемки в южной части Баренцева моря на горизонтах 0 и 30 м, рассчитанные на основе данных, полученных рыболовным судном.

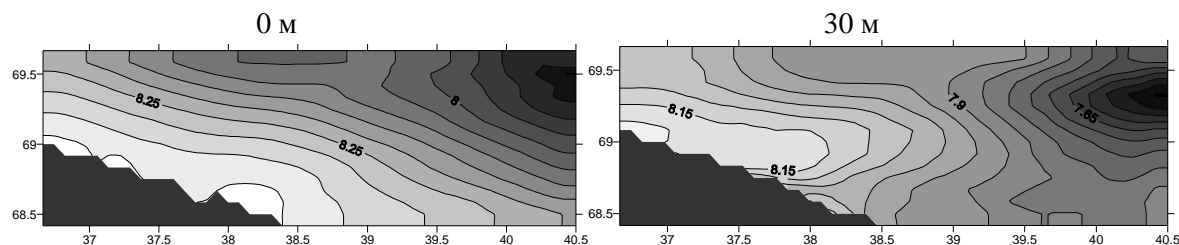


Рис. 12. Поля температуры через 5 суток на момент окончания съемки в южной части Баренцева моря на горизонтах 0 и 30 м, рассчитанные на основе данных, полученных рыболовным судном

Краткие выводы. Результаты теоретических исследований и опыт натуральных работ свидетельствуют о том, что создание оперативных систем для окраинных морей России или иных ограниченных морских акваторий является реальной технической задачей, не требующей высоких финансовых затрат.

Summary

This paper presents an overview of the results of real-time numerical modeling of the sea hydrological fields in our country. The real-time modeling is the main alternative of using oceanographic data bases. The task of real-time modeling is formulated as an inverse problem, so, initial and boundary conditions are provided first of all. Sometimes it is possible to solve direct boundary task of real-time modeling of hydrological fields, for example, it's possible for the conditions of the White Sea. It's important, because there is no real marine observation networks for the Russian seas. So, the absence of the marine observation networks is the principal problem of real-time numerical sea modeling in our country. The results of testing the elements of real-time numerical modeling systems of the hydrological fields for the White and Barents Seas are presented in this paper.

Литература

1. *Корчагин Н.Н., Монин А.С.* Мезоокеанология. М.: , 2004. 176 с.
2. *Семенов Е.В., Русецкий К.К.* Численная модель для обработки полигонных термохалинных измерений // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1987. Т.23. № 3. С.314-319.
3. *Ефимов С.С., Семенов Е.В.* О зависимости результатов модельных расчетов по схеме четырехмерного анализа от начального состояния // Океанология. 1990. Т.30. Вып.1. С.21-26.
4. *Саркисян А.С., Семенов Е.В., Ефимов С.С.* Численная модель четырехмерного анализа полигонных термохалинных измерений // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. Т.25. № 1. С.53-61.
5. *Семенов Е.В., Бирюк С.В.* Применение метода множителей Лагранжа к задачам усвоение натуральных данных // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1991. Т.27. №12. С.1316-1324.
6. *Семенов Е.В., Бирюк С.В.* Восстановление начального условия для линейного одномерного уравнения переноса тепла градиентным методом // Эксперимент «Мегаполигон». М.: Наука, 1992. С.363-370.

Статья поступила в редакцию 16.02.2008 г.