

В.Л. Дорофеев, Г.К. Коротаев

Ассимиляция данных спутниковой альтиметрии в вихреразрешающей модели циркуляции Черного моря

Используется спутниковая альтиметрия для моделирования циркуляции Черного моря. Альтиметрические данные спутников *TOPEX/Poseidon* и *ERS* подготовлены в рамках проекта *NASA Ocean Altimeter Pathfinder*. Дополнительная обработка данных выполнена для вычисления динамического уровня, отражающего циркуляцию в Черном море. Альтиметрический уровень ассимилируется в вихреразрешающей модели циркуляции Черного моря, основанной на примитивных уравнениях. Точность полученных полей температуры и солёности оценивается путем сравнения с крупномасштабными гидрографическими съемками по программе *ComSBlack*. Оцениваются прогностические возможности модели путем сравнения с полями, полученными с помощью ассимиляции альтиметрии.

Введение

Черное море является одним из самых больших внутренних морей мира. Оно связано с Атлантическим океаном цепью морей и узких проливов. Бассейн имеет простую береговую линию без больших заливов или островов. Крым — единственный значительный полуостров, делящий глубоководную часть моря на две почти симметричные части. Наибольшая глубина в центре моря достигает 2 км. Расход рек, расположенных главным образом на северо-западном шельфе (СЗШ), и приток соленых вод через Босфорский пролив формируют поле солёности, вносящей основной вклад в плотностную стратификацию Черного моря. Постоянный пикноклин в море располагается на глубинах между 100 и 300 м. Уникальной особенностью термической стратификации бассейна является холодный промежуточный слой (ХПС) с температурой в ядре меньше 8°C. ХПС формируется в результате зимней конвекции на СЗШ или на куполах циклонических вихрей и располагается на глубинах 40-80 м. Ниже ХПС температура увеличивается с глубиной, что обусловлено как геотермальными потоками, так и глубокой конвекцией тепловой и соленой воды Мраморного моря, поступающей через Босфор.

Наиболее выраженной особенностью циркуляции в верхнем слое является Основное Черноморское течение (ОЧТ). Оно опоясывает Черное море по периметру и формирует крупномасштабный циклонический круговорот. В западной и восточной частях бассейна основной круговорот в зимнее время разбивается на два круговорота меньшего масштаба. Крупномасштабные гидрологические съемки, спутниковые наблюдения и вихреразрешающие численные расчеты показывают, что в Черном море наблюдается интенсивная синоптическая изменчивость, искажающая простую структуру круговоротов. Интенсивное меандрирование ОЧТ происходит на свале глубин СЗШ и в восточной части Анатолийского побережья. Справа от струи ОЧТ наблюдаются

© В.Л. Дорофеев, Г.К. Коротаев, 2004

квазистационарные мезомасштабные антициклоны, в статистическом смысле являющиеся элементом сезонного цикла [1 – 4].

Глубинная циркуляция в Черном море известна плохо, так как долгосрочные глубоководные измерения течений никогда не осуществлялись. Численные прогностические или диагностические расчеты в бассейне с реальной геометрией слишком грубы, чтобы получить надежное представление о глубинных течениях [5, 6]. Упрощенные модели и лабораторные эксперименты [7 – 9] показывают, что циркуляция, вызываемая потоками плавучести через боковую границу бассейна, имеет трехслойную структуру с циклоническим вращением у поверхности и в придонном слое и антициклоническим вращением на промежуточной глубине. Был выполнен специальный эксперимент [10], в котором сделана попытка найти под ОЧТ подповерхностное противотечение, предписываемое теорией. Однако, так как наблюдения были краткосрочными и выполнялись в районе сильной синоптической изменчивости, трудно понять, наблюдалось ли предсказываемое теорией стационарное течение с антициклоническим вращением или же через район наблюдений перемещался синоптический вихрь со сложной вертикальной структурой нестационарных течений.

Численные расчеты осесимметричных течений, вызываемых потоками плавучести через боковые границы в круглом бассейне, показывают формирование проникающей до дна ячейки циркуляции в вертикально-радиальном сечении бассейна [9]. Эта ячейка обуславливает формирование глубинных вод в бассейне посредством нисходящих движений у его побережья. Апвеллинг, доминирующий в центральной части бассейна, поддерживает основной пикноклин в соответствии с классической теорией океанского термоклина. Такой характер вертикальных движений подтверждается результатами расчетов климатической циркуляции в Черном море, построенной на основе ассимиляции климатических массивов температуры и солености в численной модели течений [11]. Качественное соответствие результатов расчетов работы [11] физическим представлениям о характере циркуляции, вызываемой потоками плавучести через границы бассейна, позволяет надеяться, что климатическая глубинная циркуляция, построенная в этой работе, также близка к реальности. В генерализованной форме эта циркуляция вызывается интенсивным опусканием вод вдоль материкового склона, главным образом вблизи Босфорского пролива, их распространением с запада на восток и медленным подъемом в открытой части моря. Климатический расчет течений в Черном море, описанный в работе [11], воспроизводит также главные особенности динамики, в частности сезонный ход циркуляции, интенсифицирующейся в зимний период времени. Однако моделируемые поля слишком сглажены для адекватного воспроизведения деталей сезонной и синоптической изменчивости в бассейне.

Спутниковые альтиметрические измерения, ставшие доступными в последнее десятилетие, существенно расширяют наши возможности исследования процессов в море. В работе [12], основываясь на данных альтиметрических измерений со спутников *ERS-1* и *TOPEX/Poseidon (T/P)*, предварительно обработанных в *National Aeronautics and Space Administration (NASA)*, рассчи-

тан динамический уровень с точностью, которая позволяет изучать динамику Черного моря, в частности, исследовать типичный сезонный ход ОЧТ и наиболее яркие процессы синоптического масштаба. Альтиметрические наблюдения позволили установить, что ветер вызывает интенсификацию ОЧТ зимой и ослабление летом [12]. Ветер ответственен также за заметную межгодовую изменчивость циркуляции в Черном море, как это было показано в [13].

Как уже отмечалось выше, в динамике Черного моря значительную роль играют прибрежные квазистационарные антициклоны. Поскольку спутниковые альтиметрические измерения дают возможность измерять уровень моря на расстоянии более 30 км от берега, в работах [3, 4] для исследования синоптической изменчивости в Черном море спутниковые альтиметрические измерения ассимилировались в простейшей полутораслойной модели циркуляции. В этих работах показано, что ассимиляция позволяет описать детали синоптической изменчивости в бассейне и существенно уточнить представления, полученные в результате анализа крупномасштабных гидрологических съемок в рамках программы *ComSBlack* [1]. В данной работе ассимилируем спутниковые измерения уровня в вихреразрешающей модели циркуляции Черного моря, воспроизводящей реальную трехмерную гидрологию бассейна. Целью работы является оценка качества модели путем сопоставления расчетных полей с данными гидрологических измерений в рамках программы *ComSBlack* и путем сравнения прогностических полей с полученными в результате ассимиляции альтиметрии. Трехмерные гидрологические поля, рассчитанные с ассимиляцией альтиметрических измерений, в дальнейшем предполагается также использовать для совершенствования описания физических механизмов, лежащих в основе модели.

Альтиметрические данные

Используются спутниковые альтиметрические данные для Черного моря, предварительно обработанные в *NASA*. Данные *ERS-1*, -2 покрывают с некоторым пропуском временной интервал с апреля 1992 г. по октябрь 2000 г., а данные *T/P* — с октября 1992 г. по май 2001 г. Наземные треки *ERS* имеют лучшее пространственное разрешение, чем треки *T/P*, но повторяемость циклов для *ERS* составляет 35 сут, а для *T/P* — 10 сут. Предварительная обработка данных включает атмосферную коррекцию, коррекцию влияния поверхностных волн, приливов и атмосферного давления. После предварительной обработки, выполненной в *NASA*, альтиметрические данные подвергаются дальнейшей обработке. В частности, отбрасываются измерения, сделанные

ближе 25 км к берегу, ввиду их низкой точности. Далее учитывается, что данные, подготовленные в *NASA*, представляют собой аномалию уровня моря от его среднего по времени значения в каждой точке. Осредненный по времени уровень включает в себя как возвышение геоида, так и средний динамический уровень моря. Поэтому для восстановления абсолютного динамического уровня по данным альтиметрических измерений привлекались климатические гидрофизические поля, полученные в [11]. Подробно процедура подготовки альтиметрических данных для ассимиляции изложена в [14].

Описание модели

При проведении расчетов использовалась модель циркуляции в море, основанная на примитивных уравнениях [15]. Уравнения модели записаны в декартовой системе координат с осями X, Y, Z , направленными на восток, север и вертикально вниз соответственно, в форме Громеки – Лемба:

$$\frac{\partial u}{\partial t} - (\xi + f)v + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial(P+E)}{\partial x} - \nu_H \Delta^2 u + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_V \frac{\partial u}{\partial z} \right), \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + (\xi + f)u + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial(P+E)}{\partial y} - \nu_H \Delta^2 v + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_V \frac{\partial v}{\partial z} \right), \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} = g\rho, \quad P = g\rho_0 \zeta + g \int_0^z \rho dz, \quad (4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial(uT)}{\partial x} + \frac{\partial(vT)}{\partial y} + \frac{\partial(wT)}{\partial z} = K_H \nabla^2 T + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_V \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (5)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial(uS)}{\partial x} + \frac{\partial(vS)}{\partial y} + \frac{\partial(wS)}{\partial z} = K_H \nabla^2 S + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_V \frac{\partial S}{\partial z} \right), \quad (6)$$

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

В уравнениях (1) – (7) введены следующие обозначения: u, v, w - проекции скорости течения на оси OX, OY и OZ соответственно; $\xi = \partial v / \partial x - \partial u / \partial y$ — вертикальная составляющая вектора вихря скорости; $E = \rho_0(u^2 + v^2)/2$; T, S и P — температура, соленость и давление соответственно; f — параметр Кориолиса; g — ускорение свободного падения; ν_V — коэффициент вертикальной турбулентной вязкости; ν_H — коэффициент горизонтальной бигармонической вязкости; K_V, K_H — коэффициенты горизонтальной и вертикальной диффузии.

Численное интегрирование системы уравнений (1) – (7) проводится со

следующими граничными условиями:

на морской поверхности, $z = 0$:

$$\begin{aligned} \nu_v \partial u / \partial z = -\tau^X, \quad \nu_v \partial v / \partial z = -\tau^Y, \quad w = -\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{PR - EV}{\rho_w}, \\ K_v \partial T / \partial z = Q^T, \quad K_v \partial S / \partial z = \frac{PR - EV}{\rho_w} S_0; \end{aligned} \quad (8)$$

на дне, $z = H(x, y)$:

$$u = v = w = 0, \quad \partial T / \partial z = \partial S / \partial z = 0; \quad (9)$$

на твердых границах:

$$u_n = \partial v / \partial l = \partial^3 v / \partial l^3 = 0, \quad \partial T / \partial n = \partial S / \partial n = 0; \quad (10)$$

в устьях рек и проливов:

$$u_n = u_r, \quad T = T^P, \quad S = S^P, \quad (11)$$

где индекс n означает нормальную к берегу компоненту, а l — тангенциальную.

При постановке граничных условий используются следующие обозначения: (τ^X, τ^Y) — вектор тангенциального напряжения трения ветра; Q — поток тепла; PR — осадки и EV — испарение на поверхности моря; T^P и S^P — известные из наблюдений [16] климатические значения температуры и солености в устьях рек или в проливах; u_r — скорости в точках втока рек.

Численная схема модели сохраняет энергию, а в случае баротропных бездивергентных течений — и потенциальную энтрофию. Аккуратная аппроксимация уравнения гидростатики позволяет точно описывать обмен потенциальной и кинетической энергией в пределах каждого бокса с учетом нелинейной зависимости плотности от температуры и солености.

Конечно-разностная аппроксимация уравнений (1) – (7) по горизонтали выполнена на сетке с шагом 7 км. По вертикали используются 33 неравномерно расположенных горизонта. Дискретизация во времени осуществляется методом «чехарды» с периодическим подключением схемы Мацуно.

Постоянные коэффициенты горизонтальной бигармонической вязкости и диффузии (одинаковые для тепла и соли) приняты равными $\nu_H = 5 \cdot 10^{17}$, $K_H = 10^6$ см²/с. Коэффициент вертикальной вязкости равен $\nu_v = 5$ см²/с, а коэффициент вертикальной диффузии принят изменяющимся с глубиной.

Интегрирование уравнений проводится с 1 января 1992 г. Поле тангенциального напряжения трения ветра, подготовленное Морским отделением УкрНИГМИ на каждые шесть часов, используется для задания на морской

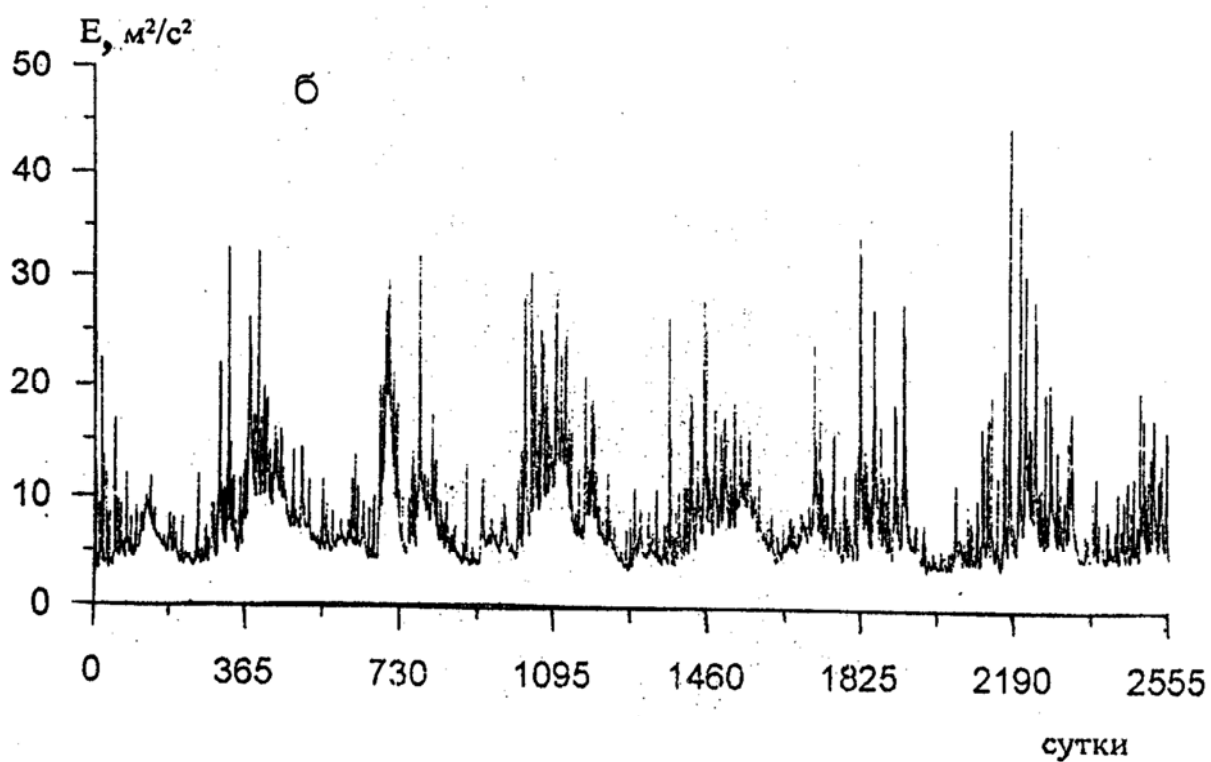
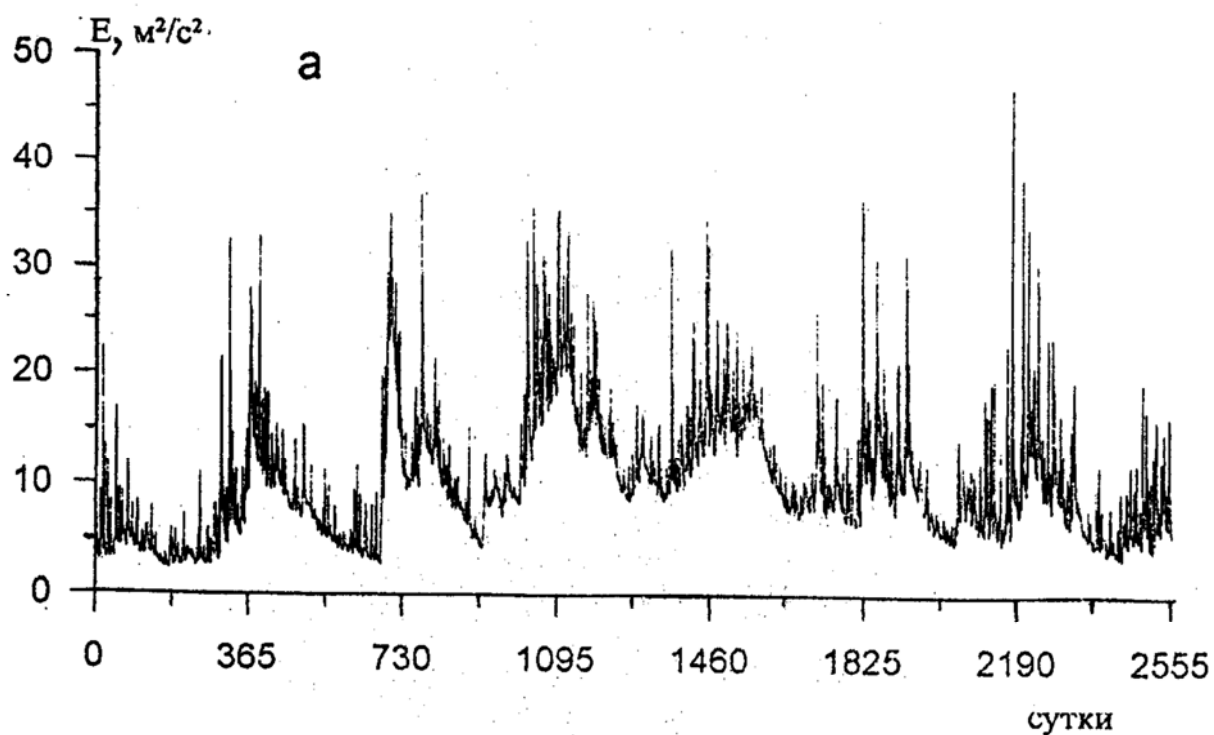
поверхности потока импульса. Среднемесячные климатические поля потоков тепла и осадков/испарения [16] используются для задания граничных условий (8). В качестве начальных условий берутся согласованные климатические поля температуры, солености и горизонтальных составляющих скорости течений [11]:

$$T = T^c, S = S^c, u = u^c, v = v^c \text{ при } t = t_0 = 0. \quad (12)$$

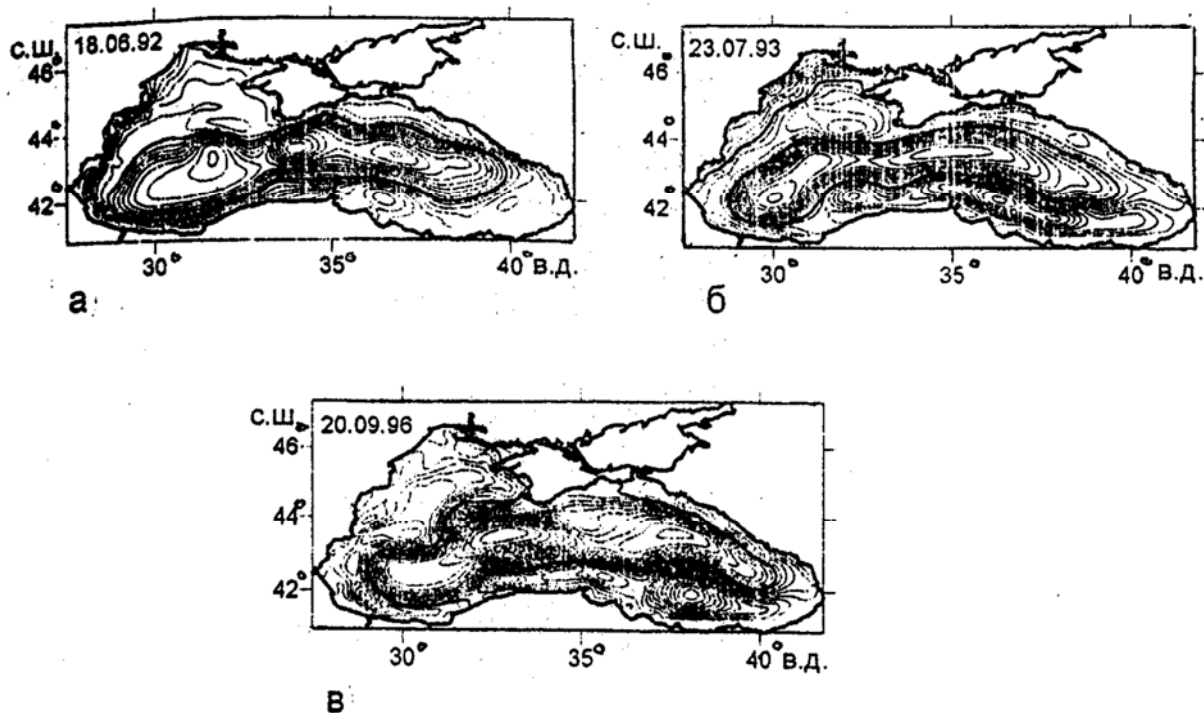
Радиус Россби в глубоководной части Черного моря равен 25 км. Поэтому горизонтальное разрешение модели и значение коэффициентов вязкости и диффузии позволяет воспроизводить синоптическую изменчивость. Рассмотрим сначала прогностический расчет с реальным полем ветра, чтобы показать, что модель работает в вихреразрешающем режиме.

Как уже отмечалось выше, из анализа спутниковой альтиметрии следует, что крупномасштабная циркуляция вод в Черном море демонстрирует вызываемую ветром сезонную и межгодовую изменчивость. Вихреразрешающий расчет показывает тот же самый характер изменчивости, как это следует из поведения кинетической энергии (рис. 1). На рисунке хорошо видна зимняя интенсификация циркуляции в Черном море и ее летнее ослабление. Из альтиметрических наблюдений следует также, что межгодовая изменчивость течений, как и сезонная, вызвана изменчивостью завихренности тангенциального напряжения трения ветра [13]. Наш численный расчет подтверждает этот вывод, так как только ветер является источником межгодовой изменчивости, представленной на рис. 1.

Вихреразрешающий расчет показывает, что большинство антициклонов, располагающихся справа от струи ОЧТ, в основном воспроизводятся моделью (рис. 2). Модель идентифицирует три главных района генерации антициклонической завихренности в Черном море. Первый район – это СЗШ, где антициклоническая завихренность генерируется ветром и стоком пресной воды из Дуная. Интересным результатом, следующим из прогностического расчета, являются быстроэволюционирующие апвеллинги на мелководье СЗШ, вызванные ветром. Два других региона образования антициклонической завихренности обусловлены обтеканием струи ОЧТ Крымского п-ова и Анатолийского побережья. Хотя в целом имеется соответствие между смоделированной и наблюдаемой картинами, существует также несколько различий. Так, в прогностическом расчете отсутствуют антициклонические вихри вдоль Восточного побережья Крыма. Батумский антициклон, расположенный в юго-восточном углу бассейна, смещен в расчетах к западу. Вихри вдоль Кавказского побережья имеют меньшую интенсивность, чем наблюдаемые.



Р и с. 1. Плотность кинетической энергии как функция времени для прогностического расчета (а) и расчета с ассимиляцией альтиметрии (б)



Р и с. 2. Мгновенные поля уровня моря из прогностического расчета, демонстрирующие антициклонические вихри

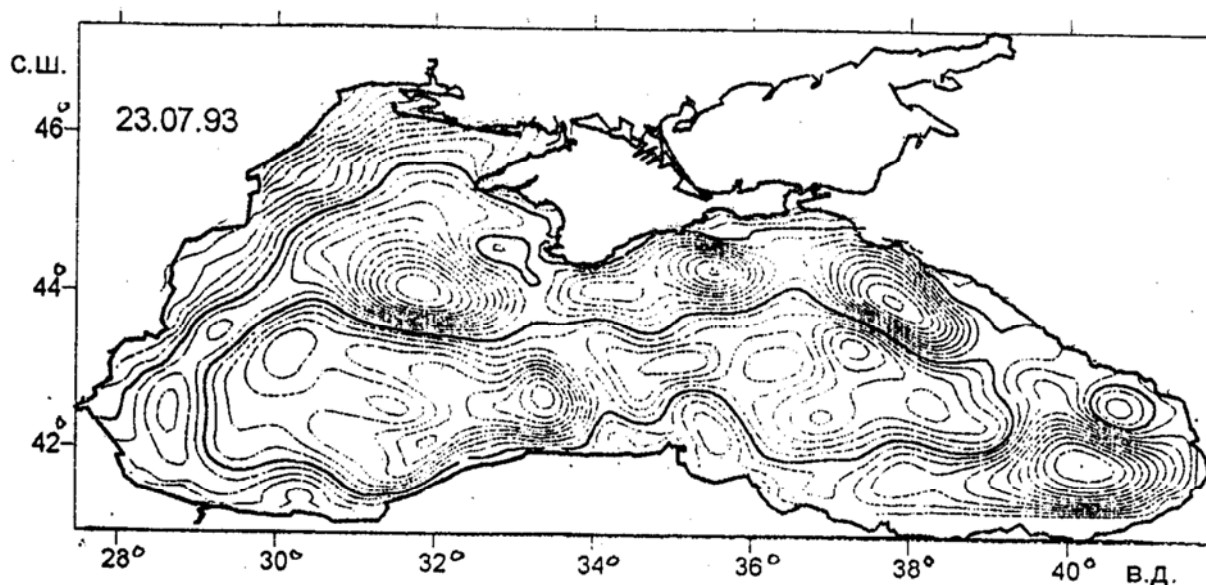
Эксперимент с ассимиляцией данных альтиметрии

Процедура ассимиляции основана на теории фильтра Калмана. Она позволяет оптимально корректировать модельные поля по наблюдениям одной или нескольких характеристик состояния моря. Подробно алгоритм ассимиляции альтиметрических данных уровня моря изложен в [14]. Здесь только отметим основные сделанные допущения. Ошибки прогностических полей в данном варианте ассимиляции предполагаются статистически стационарными, горизонтально однородными и изотропными; взаимная корреляция между ошибками солёности (и температуры) и уровня моря представляется в виде произведения двух множителей, зависящих от горизонтальной и вертикальной координат соответственно; статистика ошибок прогностических полей считается пропорциональной статистике самих полей. Согласно этим предположениям оцениваются автокорреляционные, взаимные корреляционные функции из наблюдений, которые используются в процедуре ассимиляции.

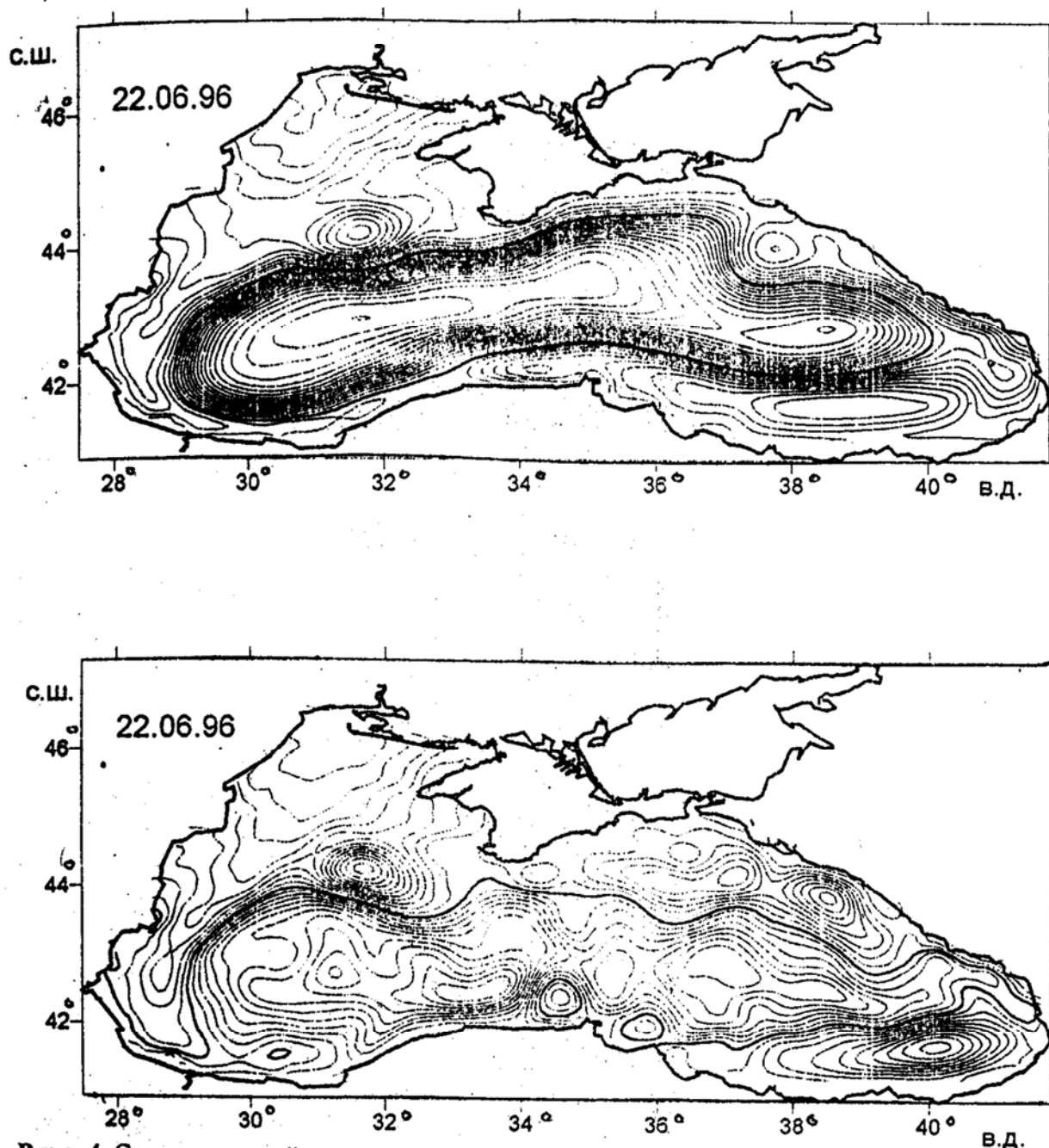
Моделирование циркуляции Черного моря с ассимиляцией альтиметрических данных выполнено за период с 1992 по 2000 год. Граничные условия на поверхности моря такие же, как в прогностическом расчете. Анализ девятилетней эволюции уровня Черного моря по результатам ассимиляции показывает, что все квазистационарные антициклонические вихри, описанные в [1], присутствуют на картах уровня моря (рис.3). Тем не менее суще-

ствует несколько различий между альтиметрическими данными и анализом на основе гидрологических съемок. Наиболее очевидное наблюдается в северной части моря на СЗШ, где ассимиляционные расчеты демонстрируют наличие области антициклонической завихренности, отсутствующей в результатах гидрологического анализа. Кроме того, в расчетах присутствуют два различных антициклонических вихря к востоку от п-ва Крым вместо одного, Крымского антициклона [1]. Один из них формируется возле Анапы, другой — возле Ялты. У Кавказского побережья регулярно наблюдаются два антициклонических вихря, возле Сухуми и Сочи, в то время как только один, Кавказский вихрь, упоминается в работе [1]. Несколько большее число антициклонических вихрей формируются эпизодически вдоль Анатолийского побережья.

Прямое сравнение прогностического расчета и расчета с ассимиляцией альтиметрии показывает очевидную разницу в деталях. Тем не менее общая структура главного круговорота, его сезонная изменчивость и большая часть периферийных антициклонов воспроизводятся в прогностическом расчете в довольно хорошем качественном соответствии с результатами ассимиляции (рис. 4).



Р и с. 3. Основные антициклонические вихри, полученные в эксперименте с ассимиляцией альтиметрических данных

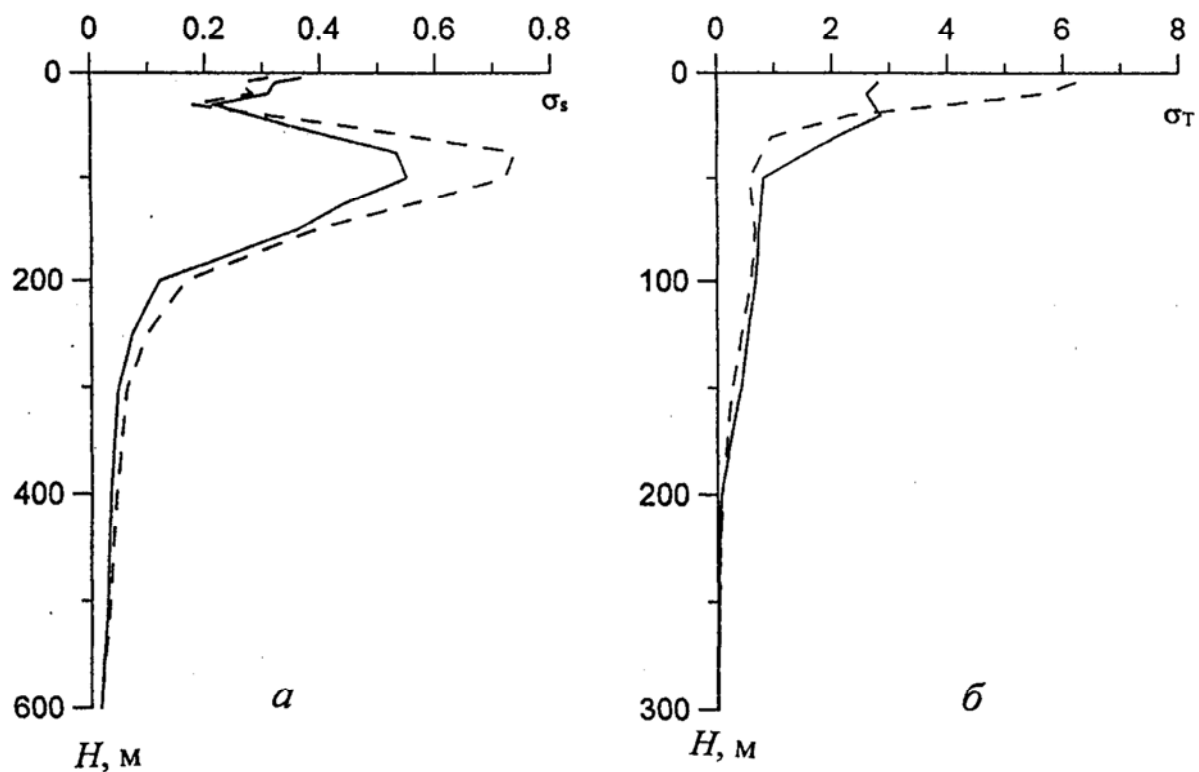


Р и с. 4. Сравнение полей уровня моря, полученных в прогностическом расчете и с ассимиляцией альтиметрии

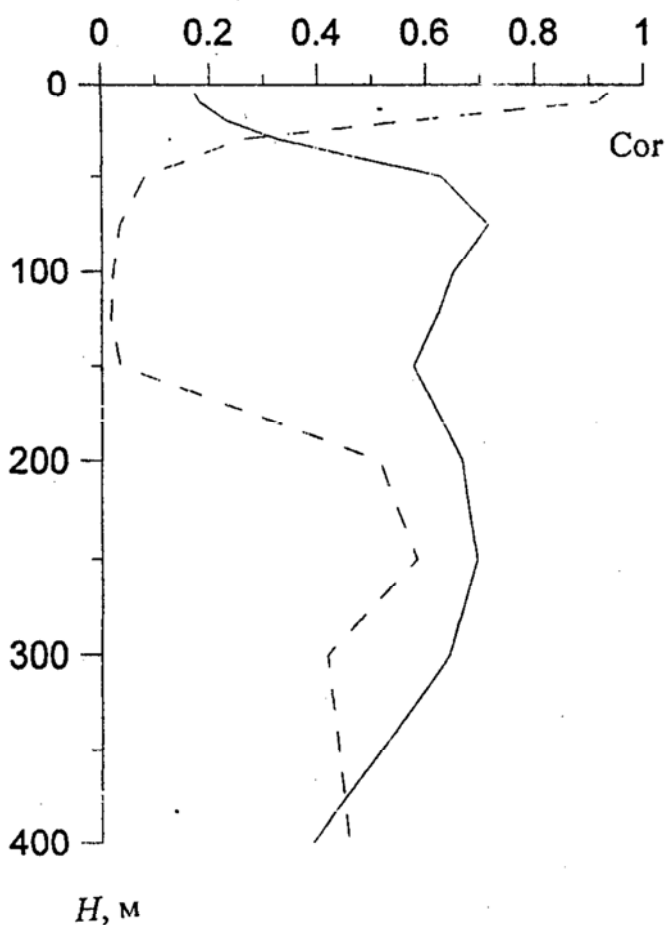
Оценка точности моделируемых полей

Для того чтобы оценить количественно точность восстановления моделью трехмерных гидрофизических полей в ассимиляционном расчете, используем данные четырех крупномасштабных гидрографических съемок *ComSBlack*. Среднеквадратичное отклонение альтиметрии от уровня моря, полученного по гидрографическим наблюдениям, оценено в [14]. Оно варьируется от 3,5 до 4,8 см для разных съемок, а коэффициент корреляции — в пределах 0,56 – 0,83. Эти значения находятся на уровне шума радара альтиметра и хорошо согласуются с оценкой точности альтиметрических данных, полученной с помощью непосредственных измерений уровня океана на островных станциях.

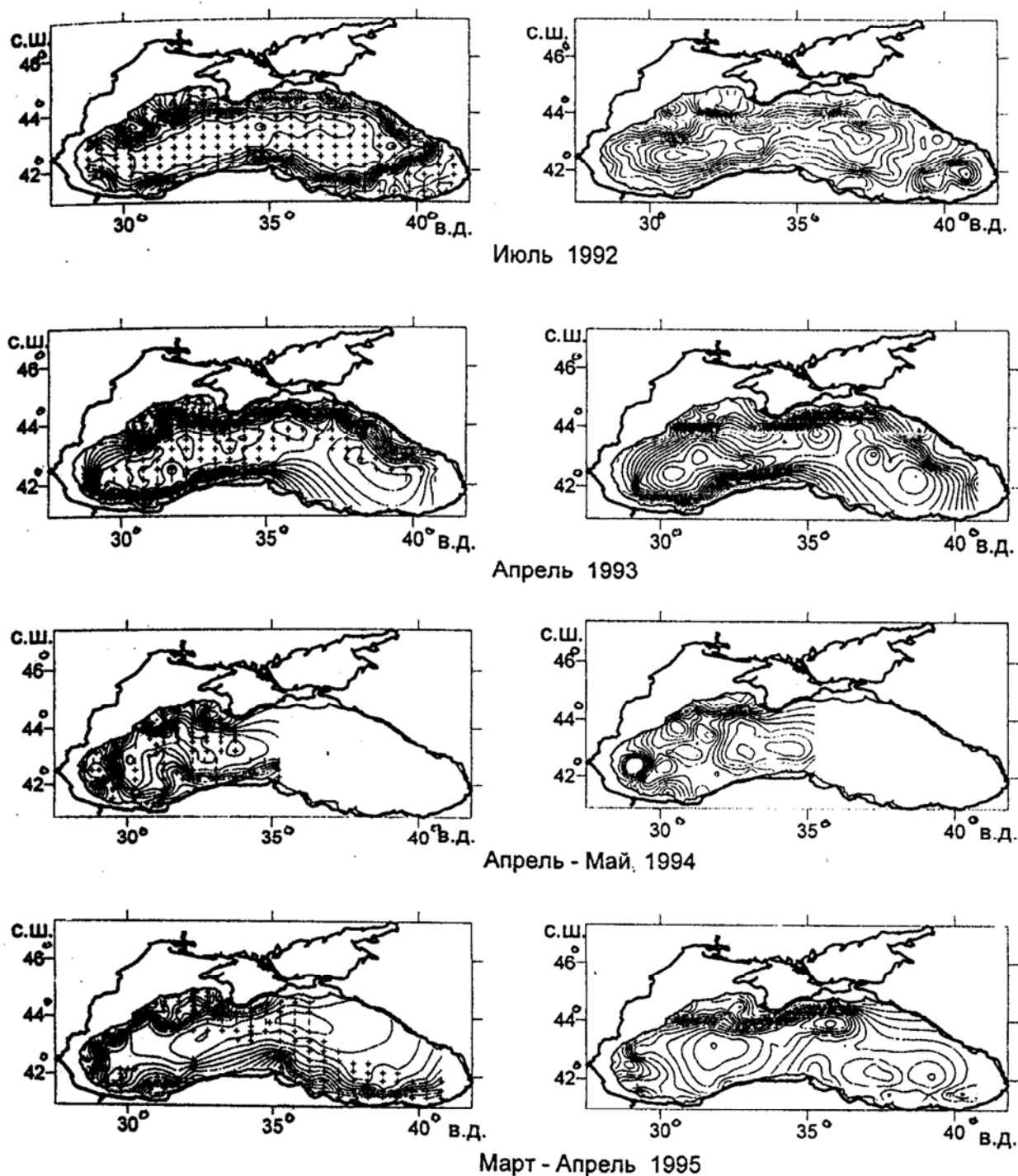
В дальнейшем сопоставлялись количественно поля солености и температуры. Были вычислены среднеквадратичные отклонения модельных и наблюдаемых полей на каждом из расчетных горизонтов. Они представлены на рис.5 как функция глубины; там же показана естественная изменчивость полей.



Р и с. 5. Среднеквадратичное отклонение расчетных полей от наблюдаемых (сплошные линии): *а* – соленость; *б* – температура как функция глубины. Штриховые кривые показывают естественную дисперсию полей



Р и с. 6. Коэффициенты корреляции между измеренными и модельными полями температуры (штриховая) и солености (сплошная линия)



Р и с. 7. Поля солёности на глубине 100 м, полученные по модели с ассимиляцией альтиметрии (справа) и по данным гидрографических станций программы *ComSBlack* (1992 – 1995) (слева). Крестики – гидрографические станции

Наиболее значительные различия между модельными и измеренными полями солёности наблюдаются вблизи и в пределах галоклина. Это связано с тем, что галоклин является областью наиболее значительной есте-

ственной изменчивости поля солёности, так как здесь наблюдаются максимальные вертикальные градиенты. Таким образом, если рассматривать относительную точность моделирования поля солёности, то оказывается, что лучшая оценка наблюдений находится как раз в пределах галоклина. Ассимиляция альтиметрии позволяет описать ~ 25% естественной изменчивости поля солёности.

Среднеквадратичное отклонение температуры имеет наибольшее значение возле поверхности. Это означает, что термодинамика верхнего слоя моря в модели слишком упрощена. Для лучшего воспроизведения поверхностной температуры необходимо прямое описание динамики верхнего перемешанного слоя. Дополнительные экстремумы в среднеквадратичном отклонении температуры наблюдаются возле термоклина и внутри ХПС, что является специфической особенностью стратификации Чёрного моря. Возрастание значений ошибки возле термоклина имеет ту же причину, что и в случае солёности. Большие вертикальные градиенты в термоклине вызывают большие изменения в температуре, даже если ошибка в положении изотермы невелика. Однако в противоположность модельному полю солёности среднеквадратичная ошибка поля температуры имеет такое же значение, как естественная изменчивость. Следует отметить, что стратификация в Чёрном море определяется главным образом солёностью, а температура переносится течениями почти как пассивный скаляр. Поэтому точность моделирования поля температуры сильно зависит от точности задания граничных условий на поверхности моря, которые в настоящих расчетах приняты климатическими.

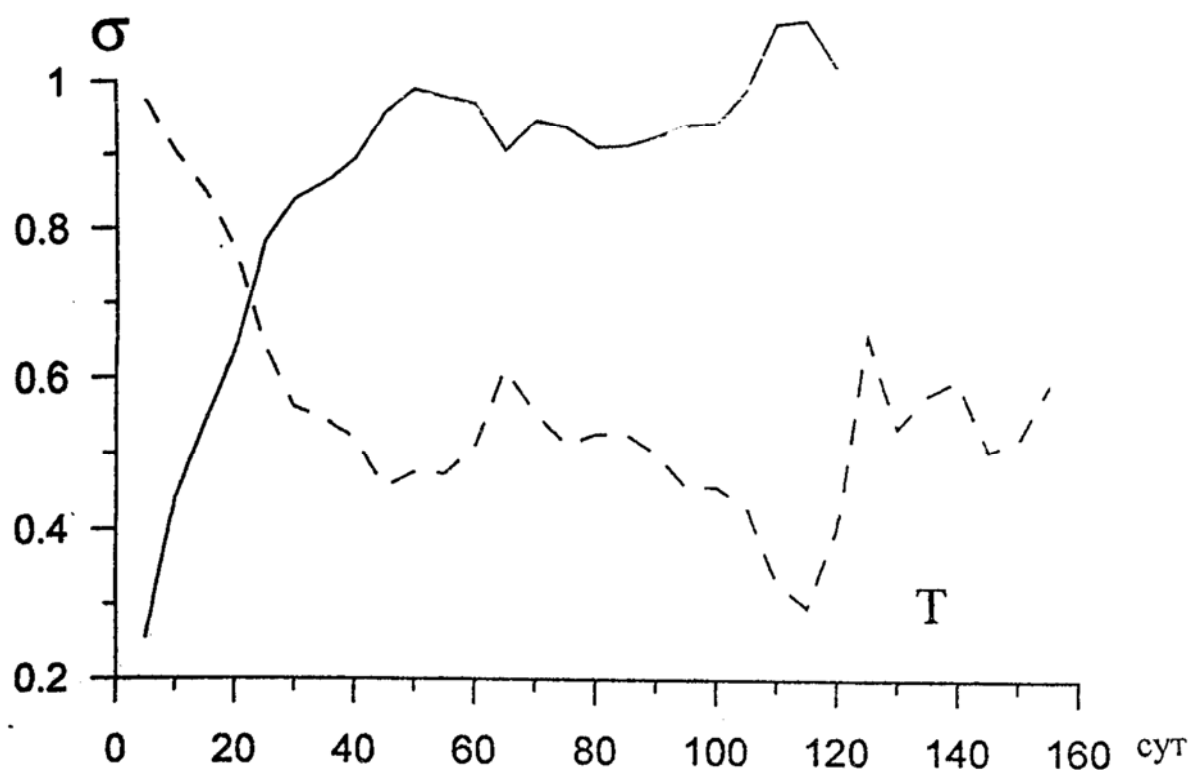
На рис.6 представлены коэффициенты корреляции модельных и наблюдаемых полей температуры и солёности. Наибольшая корреляция для обоих полей находится в пределах пикноклина. Тем не менее если для солёности коэффициент корреляции равен ~ 0,65, то для температуры он меньше и равен только 0,45.

На рис.7 представлены модельные и наблюдаемые поля солёности на глубине 100 м. Можно видеть, что положение фронта ОЧТ в расчете с ассимиляцией альтиметрии хорошо соответствует наблюдениям. Отдельные черты синоптической динамики, присутствующие в наблюдениях, также видны на картах модельных полей.

Прогнозируемость циркуляции Чёрного моря

Используя результаты моделирования трехмерных полей с помощью ассимиляции альтиметрии, остановимся далее на вопросе прогнозируемости циркуляции Чёрного моря с помощью вихреразрешающей модели, описанной выше. Поскольку выполненное сопоставление результатов ассимиляционных расчетов с наблюдениями показало удовлетворительное соответствие, можно рассматривать модельные поля, полученные по результатам ассимиляции спутниковых измерений, в качестве эталона. Для оценки времени, на

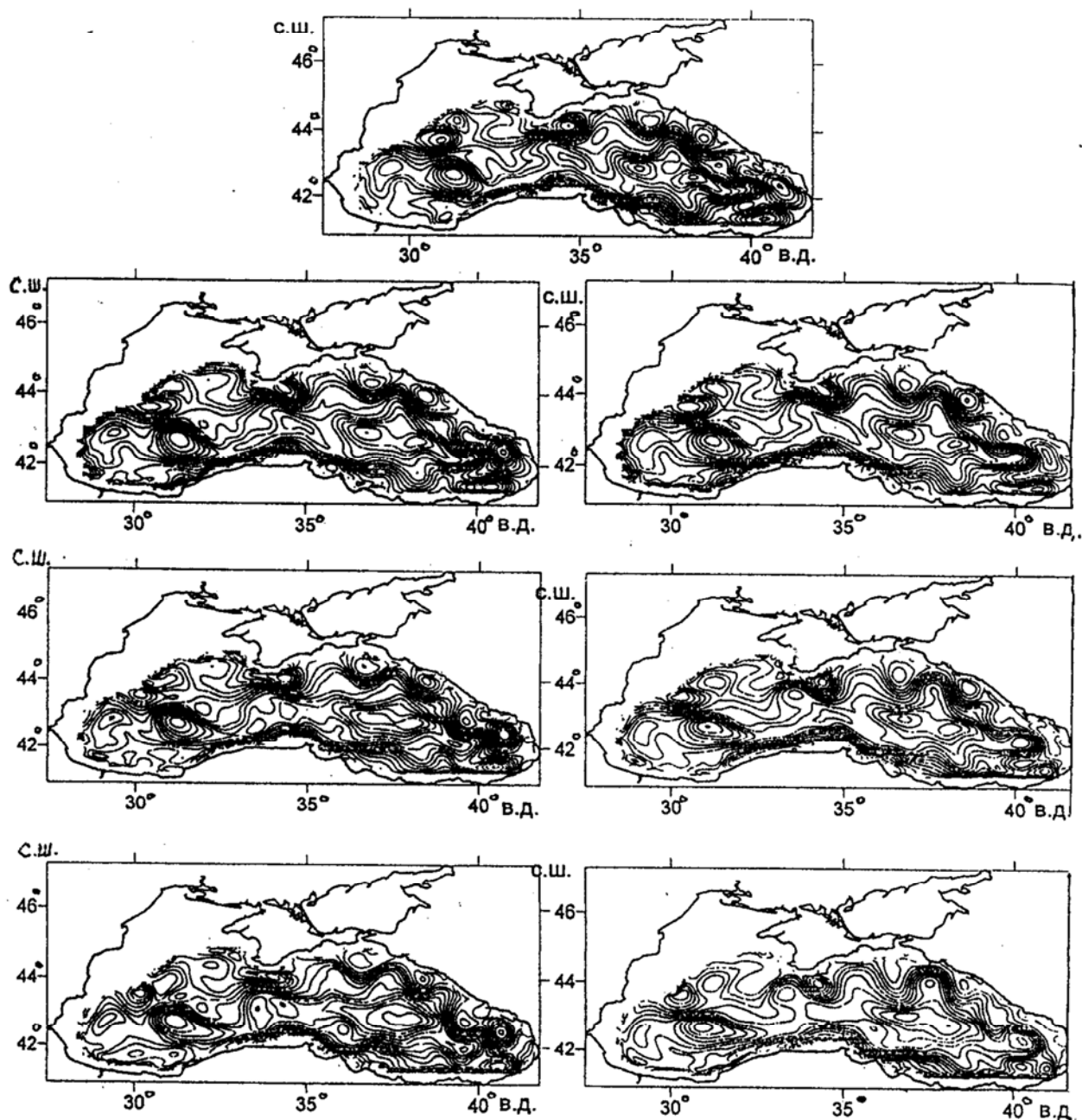
которое прогноз по модели дает удовлетворительные результаты, сначала проводится инициализация прогностической модели с использованием полей течений, температуры и солёности, полученных в расчетах с ассимиляцией альтиметрии. Затем результаты прогностического расчета сопоставляются с полями, полученными путем ассимиляции.



Р и с. 8. Нормализованное стандартное отклонение поля солёности на глубине 100 м (сплошная линия) и коэффициент корреляции (штриховая) как функции времени

Рассмотрим среднеквадратичное отклонение прогностических полей от полей, полученных ассимиляцией альтиметрии. На рис. 8 представлена зависимость стандартного отклонения, нормированного на амплитуду естественной изменчивости поля солёности на глубине 100 м в зависимости от времени. Среднеквадратичное отклонение достаточно мало, а коэффициент корреляции достаточно велик в течение первых двух недель. Затем после 50 сут. интегрирования нормализованная кривая выходит на уровень 40%-ной естественной изменчивости, а коэффициент корреляции опускается до величины 0,4.

Сравним теперь поле солёности на глубине 100 м с тем же полем, полученным с помощью ассимиляции альтиметрии (рис. 9). Оказывается, что качественное соответствие прогностического поля, полученного по модели, также сохраняется на протяжении ~ 15 сут. Единственное значительное несоответствие двух полей можно обнаружить в юго-восточном углу бассейна. Антициклонический вихрь, который виден на карте поля солёности, полученной с помощью ассимиляции, отсутствует на прогностической карте. Таким образом, наш расчет показывает, что модель может предсказывать состояние моря с приемлемой точностью на срок до 15 сут (при известном поле напряжения трения ветра).



Р и с. 9. Поля солёности на глубине 100 м, полученные с использованием ассимиляции альтиметрии (слева) и в прогностическом расчёте (справа) после 5, 10 и 15 суток. Вверху – начальное поле

Обсуждение

Спутниковая альтиметрия является единственным методом, позволяющим охарактеризовать дистанционно глобальную циркуляцию в океане. Однако при этом требуется высокая точность измерений расстояния от спутника до поверхности моря, что возможно только при проведении тщательной оценки скорости распространения сигнала радара, учитывающей реальное состояние атмосферы и степень шероховатости поверхности океана. Работа альтиметров, размещенных на спутниках *ERS* и *T/P*, определенно показывает, что спутниковая альтиметрия обеспечивает высокоточный продукт, готовый для широкого применения в океанографии. В частности, представляет интерес использование данных альтиметрии в замкнутых морях. Однако для этого нужно принимать во внимание специфические особенности изучаемого

бассейна. В настоящей работе рассматривается Черное море, но очевидно, что приложение спутниковой альтиметрии к другому замкнутому или полузамкнутому бассейну будет связано с теми же проблемами.

Общая проблема обусловлена тем, что необходимо знать местный геоид с очень высокой точностью, которую еще не могут обеспечить современные геофизические модели. Знание климатической гидрологии значительно упрощает проблему геоида. Предыдущий опыт работы с данными *Geosat* в Тропической Атлантике [17] и настоящее исследование показывают эффективность использования известного климата бассейна совместно с данными альтиметрии.

Специфическая проблема полузамкнутого моря заключается в том, что средний уровень меняется в соответствии с изменением полного объема жидкости в бассейне. При дополнительной обработке альтиметрических измерений учитывалось то обстоятельство, что отклик бассейна на изменения объема жидкости является, главным образом, баротропным и пространственно однородным, если размер моря много меньше баротропного радиуса Россби, но намного больше бароклинного [18,19]. Этот факт используется в настоящей работе для вычисления динамического уровня моря по данным альтиметрии.

Сами по себе данные спутниковой альтиметрии описывают только поверхностные геострофические течения. Однако ассимиляция альтиметрических данных в модели циркуляции дает уникальную возможность описывать трехмерные гидрографические поля бассейна и интерполировать в пространстве и во времени спутниковые данные, имеющие изначально довольно грубое разрешение. Сопоставление с гидрологическими наблюдениями показывает, что с помощью альтиметрии наиболее эффективно восстанавливаются колебания основного пикноклина. Такой результат не является неожиданным, поскольку динамический уровень поверхности моря более всего коррелирует с глубиной залегания основного пикноклина.

Наконец, на основании выполненных расчетов можно сделать предварительное заключение, что современная вихреразрешающая модель способна прогнозировать циркуляцию в море от синоптических явлений до явлений в масштабе всего бассейна на период до 15 суток.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Oguz T., Aubrey D.G., Latun V.S. et al.* Mesoscale circulation and thermohaline structure of the Black Sea observed during HydroBlack'91//Deep-Sea Res. –1994. – Part I. – 41. – P. 603 – 628.
2. *Bulgakov S.N., Demyshev S.G., Korotaev G.K.* Modelling of the Black Sea circulation and water stratification (review)//Problems of the Black Sea. – Sevastopol: MHI UAS, 1992. – P. 34-53.
3. *Коротаев Г.К., Огуз Т., Никифоров А.А. и др.* Динамика антициклонов в Черном море по данным спутниковых альтиметрических измерений//Исслед. Земли из космоса. – 2002. – № 6. – С.1 – 10.
4. *Korotaev G.K., Oguz T., Nikiforov A.A., et al.* Seasonal, interannual and mesoscale variability of the Black Sea upper layer circulation derived from assimilation of altimeter data into a reduced-gravity model// J. Geophys. Res. – 2003. – 108, № C4. – P. 3122.
5. *Stanev E. V.* On the mechanisms of the Black Sea circulation// Earth Sci. Rev. – 1990. – 28. – P. 285 – 319.

6. *Oguz T., Malanotte-Rizzoli P., Aubrey D.* Wind and thermohaline circulation of the Black Sea driven by yearly mean climatological forcing. // *J. Geophys. Res.* – 1994. – 100, № C4. – P. 6845–6863.
7. *Булгаков С.Н., Коротаев Г.К., Уайтхед Д.А.* Роль потоков плавучести в формировании крупномасштабной циркуляции и стратификации вод моря. Часть 1: теория // *Изв. РАН ФАО.* – 1996. – 32, № 4. – С. 548 – 556.
8. *Булгаков С.Н., Коротаев Г.К., Уайтхед Д.А.* Роль потоков плавучести в формировании крупномасштабной циркуляции и стратификации вод моря. Часть 2: лабораторный эксперимент // Там же. – С. 557 – 564.
9. *Korotaev G.K.* Circulation in semi-enclosed seas induced by buoyancy flux through a strait // *Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Sensitivity of North Sea, Baltic Sea and Black Sea to Anthropogenic and Climatic Changes.* – Kluwer Academic Publisher, 1997. – P. 395 – 401.
10. *Булгаков С.Н., Кушнир В. М.* Особенности поля течений в северо-западной части Черного моря по экспериментальным данным // *Морской гидрофизический журнал.* – 1996. – № 5. – С. 66 – 78.
11. *Korotaev G.K., Demyshev S.G., Knysh V.V.* Three-dimensional climate of the Black Sea/Black Sea Ecosystem Processes and Forecasting/Operational Database Management System/Report of the Workshop and Project Evaluation Meeting. – Istanbul, 15-18 May, 2000.
12. *Korotaev G.K., Saenko O.A., Koblinsky C.J.* Satellite altimetry observations of the Black Sea level // *J. Geophys. Res.* – 2001. – 106, № C1. – P. 917 – 933.
13. *Korotaev G.K., Oguz T., Oszoy E.* Predictability of the Black Sea annual and interannual variability // *Black Sea Ecosystem Processes and Forecasting/Operational Database Management System/Report of the Workshop and Project Evaluation Meeting.* – Istanbul, 15-18 May, 2000.
14. *Коротаев Г.К., Саенко О.А., Коблинский Ч.Ж. и др.* Точность, методология и некоторые результаты ассимиляции альтиметрических данных TOPEX/Poseidon в модели общей циркуляции Черного моря // *Исследование Земли из космоса.* — 1998. — № 3. — С. 3 – 17.
15. *Демьшев С.Г., Коротаев Г.К.* Численная энергосбалансированная модель бароклинных течений океана с неровным дном на сетке C // *Численные модели и результаты калибровочных расчетов течений в Атлантическом океане.* – М.: ИВМ РАН, 1992. – С. 163 – 231.
16. *Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т.IV. Черное море. Выпуск 1. Гидрометеорологические условия.* — СПб.: Гидрометеиздат, 1991. — С. 103 – 262.
17. *Carton J.A., Chepurin G.A., Korotaev G.K. et al.* Comparison of dynamic height variations in the Tropical Atlantic during 1987 – 1989 as viewed in Sections hydrography and Geosat altimetry // *J. Geophys. Res.* – 1993. – 98, № C80. – P. 14,369 – 14,377.
18. *Дорофеев В.Л.* Влияние стока рек на формирование уровня замкнутого моря // *Морской гидрофизический журнал.* – 1999. – № 3. – С. 18 – 29.
19. *Дорофеев В.Л., Демьшев С.Г., Коротаев Г.К.* Баротропный отклик Черного моря на водообмен через боковые границы и поверхность // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.* — Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2002. — С. 150 – 158.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,
Севастополь

Материал поступил
в редакцию 16.07.02
После доработки 22.07.02

ABSTRACT Satellite altimetry is applied for simulating the Black Sea circulation. Altimetry data of TOPEX/Poseidon and ERS satellites are prepared within the framework of the NASA Ocean Altimeter Pathfinder Project. Additional data processing is done to calculate the dynamic sea level reflecting the circulation in the Black Sea. The altimetry sea level is assimilated in the primitive equation eddy-resolving model of the Black Sea circulation. Accuracy of simulated temperature and salinity fields is estimated based on their comparison with large-scale hydrographic surveys of the ComSBlack program. Predictive capabilities of the model are estimated through the comparison with the fields resulted from the altimetry assimilation.