

Реанализ гидрофизических полей Черного моря на основе ассимиляции данных измерений температуры и солёности в z -координатной модели

Настоящая работа посвящена развитию ретроспективного анализа гидрофизических полей Черного моря на основе ассимиляции данных измерений температуры и солёности в z -координатной модели циркуляции посредством алгоритма адаптивной статистики. Предложены способы оценки «типичных» дисперсий ошибок прогноза температуры и солёности, позволяющей получить квазиоптимальные веса в ассимиляционных слагаемых уравнений переноса тепла и соли. Разработанная ассимиляционная модель была использована для проведения реанализа гидрофизических полей Черного моря за 1985 – 1993 гг. Для этого периода выполнено сравнение результатов восстановления гидрофизических полей на основе алгоритма адаптивной статистики и упрощенного алгоритма. Выбранный способ оценки «типичных» дисперсий ошибок прогноза позволил получить согласованные гидрофизические поля.

Ключевые слова: Черное море, реанализ, ассимиляция данных, межгодовая изменчивость, моделирование циркуляции.

1. Введение. Процедура восстановления пространственно-временной изменчивости гидрофизических полей на основе архивных данных измерений и численных гидродинамических моделей циркуляции (ретроспективный анализ) становится все более актуальной в последнее время [1, 2].

Реанализ позволяет исследовать тенденции сезонной и межгодовой изменчивости термохалинных характеристик и кинетической энергии скорости течений для всего бассейна, что представляет научный и практический интерес. Первые результаты реанализа для Черного моря в период, наиболее обеспеченный данными наблюдений (1971 – 1993 гг.), были получены с использованием упрощенного алгоритма ассимиляции данных измерений температуры и солёности в σ -координатной модели [3]. В этом алгоритме не учитывалась эволюция статистических характеристик ошибок прогноза. Опыт его применения для реанализа показал удовлетворительное качество воспроизводимых гидрофизических полей. Ранее было отмечено, что при использовании данного алгоритма в z -координатной модели для восстановления климатических течений роль климатических данных, ассимилируемых в модели, оказывается завышенной [4]. Это отражается на точности расчета полей вертикальной скорости. Таким образом, необходимо применение более усовершенствованного алгоритма ассимиляции, который позволил бы получить согласованные гидрофизические поля.

Кроме того, результаты расчетов гидрофизических полей на σ -поверхностях не всегда являются удобными для анализа. Основная сложность – ошибки интерполяции с σ -поверхностей на z -горизонты (которая необходима при изучении пространственной изменчивости полей), возникающие для области резкого свала глубин. А также при проведении расчетов гидрофизиче-

ских параметров моря на базе ассимиляции имеющихся данных наблюдений необходимо применение интерполяции с z -горизонтов на σ -поверхности. Этим сложностям можно избежать, если использовать z -координатную модель.

В настоящей работе рассматриваются вопросы усовершенствования реанализа гидрофизических полей на основе z -координатной модели посредством алгоритма, в котором учитывается динамика статистических характеристик ошибок. Представлена ассимиляционная модель, которая была использована для воспроизведения непрерывной эволюции гидрофизических полей Черного моря в период 1985 – 1993 гг. Выполнен сравнительный анализ результатов реконструкции этих полей, полученных на основе алгоритма адаптивной статистики и упрощенного алгоритма.

2. Краткое описание ассимиляционной модели. Для проведения реанализа на основе ассимиляции данных измерений температуры и солёности использовалась численная нелинейная модель циркуляции, разработанная в МГИ НАН Украины и подробно описанная в работах [5 – 8]. Для краткости изложения приведем только уравнения переноса – диффузии тепла и соли с включенными в правую часть ассимиляционными источниками:

$$T_t + (uT)_x + (vT)_y + (wT)_z = -\kappa^H \nabla^4 T + (\kappa^V T_z)_z + Q_T - R_z, \quad (1)$$

$$S_t + (uS)_x + (vS)_y + (wS)_z = -\kappa^H \nabla^4 S + (\kappa^V S_z)_z + Q_S, \quad (2)$$

где T – температура моря, S – солёность; u , v , w – компоненты скорости течений вдоль осей x , y , z , направленных на восток, север и вертикально вниз соответственно; κ^H – коэффициент горизонтальной, а κ^V – коэффициент вертикальной турбулентной диффузии; R – поток коротковолновой радиации; Q_T , Q_S – ассимиляционные источники.

Турбулентный обмен импульсом, теплом и солью по горизонтали параметризован в модели бигармоническими операторами. Значения коэффициентов турбулентной вязкости ν^H и турбулентной диффузии κ^H равны 10^9 м⁴/с и 5×10^8 м⁴/с соответственно.

На поверхности моря к потоку соли, равному произведению рассчитываемой поверхностной солёности на разность между осадками и испарением, добавляется релаксационное слагаемое, пропорциональное разности между поверхностными климатической и рассчитываемой солёностями. На дне приняты условия прилипания для компонент вектора скорости течений, а также отсутствия потоков тепла и соли.

На твердых боковых границах принимаются условия равенства нулю лапласиана нормальной компоненты скорости; лапласиана нормальной производной касательной скорости; лапласианов нормальных производных температуры и солёности. В устьях рек задаются значения горизонтальных компонент скорости, температуры и солёности и перечисленные выше лапласианы также равны нулю. Для Керченского пролива, когда течение направлено из Черного моря в Азовское, и верхнего течения в Босфорском проливе задается меридиональная компонента скорости, а лапласианы нормальной компонен-

ты скорости, нормальной производной касательной скорости и нормальной производной температуры и солёности равны нулю.

Конечно-разностная аппроксимация исходных уравнений модели выполнялась на сетке C . Для аппроксимации адвективных слагаемых в уравнениях (1) и (2) использовалась так называемая TVD-схема [9]. Для дискретизации по времени применялась схема «чехарда», для предотвращения расщепления решения по времени – схема Мацуно [10]. При отсутствии трения в модели выполняется ряд законов сохранения. Запись уравнений движения в форме Громеки – Лэмба [11] позволяет обеспечить в баротропном приближении сохранение с точностью до аппроксимации по времени полной энергии и потенциальной энтропии [11, 12]. Специальная аппроксимация уравнения гидростатики [13] обеспечивает выполнение закона сохранения полной энергии в случае нелинейного уравнения состояния. При аппроксимации уравнения для уровня моря была применена полуневяная схема [14].

Параметризация вертикального турбулентного перемешивания осуществляется посредством модели Меллора – Ямады с уровнем замыкания 2,5 [15]. Шаги горизонтальной сетки имеют значения $4,9 \times 4,9$ км [6]. По вертикали использовались 38 горизонтов со следующими глубинами: 2,5; 5, 10, ..., 30, 40, 50, 62,5; 75, ..., 125, 150, ..., 200, 250, 300, 400, ..., 2100 м. Шаг по времени равнялся 5 мин.

3. Особенности проведения реанализа гидрофизических полей Черного моря. Сопоставление результатов различных вариантов ретроспективного анализа целесообразно проводить для наиболее обеспеченного данными наблюдений периода 1985 – 1993 гг. В этих вариантах использовались процедуры, подробно изложенные в статьях [3, 16]. Ассимиляция данных гидрологических съемок в модели осуществлялась посредством двух ранее разработанных методик: алгоритма адаптивной статистики ошибок прогноза [8] и его упрощенной реализации [17]. Апробация упомянутых выше методик применительно к задаче реанализа проводилась ранее в работах [7, 18, 19].

При усвоении данных измерений температуры и солёности в модели на базе алгоритма адаптивной статистики [8, 19] ассимиляционные источники в правых частях уравнений (1) и (2) имели вид:

$$Q_T(\bar{x}, t) = \frac{\sigma_T^2(\bar{x}, t)}{\text{REL}[\sigma_T^2(\bar{x}, t) + \sigma_{T_m}^2(\bar{x}, t)]} [T^{\text{obs}}(\bar{x}, t) - T(\bar{x}, t)], \quad (3)$$

$$Q_S(\bar{x}, t) = \frac{\sigma_S^2(\bar{x}, t)}{\text{REL}[\sigma_S^2(\bar{x}, t) + \sigma_{S_m}^2(\bar{x}, t)]} [S^{\text{obs}}(\bar{x}, t) - S(\bar{x}, t)], \quad (4)$$

где $\sigma_T^2(\bar{x}, t), \sigma_S^2(\bar{x}, t)$ – дисперсии ошибок прогноза температуры и солёности; $\sigma_{T_m}^2(\bar{x}, t), \sigma_{S_m}^2(\bar{x}, t)$ – дисперсии ошибок оптимальной интерполяции измерений температуры и солёности в узлы сеточной области; $T^{\text{obs}}(\bar{x}, t), S^{\text{obs}}(\bar{x}, t)$ – измеренные значения; $T(\bar{x}, t), S(\bar{x}, t)$ – модельные значения температуры и солёности; REL – параметр релаксации; $\bar{x} = (x, y, z)$.

Дисперсии ошибок прогноза температуры и солёности для расчета функций мощности источников находились путем численного решения одностепенных дифференциальных уравнений, имеющих вид [19]:

$$\frac{\partial \sigma_T^2}{\partial t} + \frac{\partial (u \sigma_T^2)}{\partial x} + \frac{\partial (v \sigma_T^2)}{\partial y} + \frac{\partial (w \sigma_T^2)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \kappa^v \frac{\partial \sigma_T^2}{\partial z} + \kappa^H \Delta \sigma_T^2 + \frac{1}{\text{REL1}} (\sigma_{*T}^2 - \sigma_T^2), \quad (5)$$

$$\frac{\partial \sigma_S^2}{\partial t} + \frac{\partial (u \sigma_S^2)}{\partial x} + \frac{\partial (v \sigma_S^2)}{\partial y} + \frac{\partial (w \sigma_S^2)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \kappa^v \frac{\partial \sigma_S^2}{\partial z} + \kappa^H \Delta \sigma_S^2 + \frac{1}{\text{REL1}} (\sigma_{*S}^2 - \sigma_S^2), \quad (6)$$

где $\sigma_{*T}^2, \sigma_{*S}^2$ – некоторые «типичные» дисперсии ошибок прогноза; REL1 – параметр релаксации (принимался равным 1 сут).

Для параметризации горизонтальной диффузии в уравнениях (5), (6) использовался гармонический оператор с коэффициентом, равным $10 \text{ м}^2/\text{с}$.

В моменты усвоения данных измерений дисперсии ошибок прогноза температуры и солёности корректировались следующим образом [8]:

$$\sigma_T^2(\bar{x}, t_i^+) = \sigma_T^2(\bar{x}, t_i^-) - \frac{\sigma_T^2(\bar{x}, t_i^-) \sigma_T^2(\bar{x}, t_i^-)}{\sigma_T^2(\bar{x}, t_i^-) + \sigma_{T_m}^2(\bar{x})}, \quad (7)$$

$$\sigma_S^2(\bar{x}, t_i^+) = \sigma_S^2(\bar{x}, t_i^-) - \frac{\sigma_S^2(\bar{x}, t_i^-) \sigma_S^2(\bar{x}, t_i^-)}{\sigma_S^2(\bar{x}, t_i^-) + \sigma_{S_m}^2(\bar{x})}, \quad (8)$$

где t_i^- и t_i^+ – моменты времени до и после усвоения данных.

Формулы (3) – (8) получены из более общих соотношений фильтра Калмана при предположениях: 1) ковариационная функция поля ошибок оптимальных оценок солёности (температуры) представляется в виде произведения среднеквадратических отклонений ошибок оценок на нормированную корреляционную функцию поля; 2) в каждой точке сеточной области имеется измеренное значение солёности (температуры) и оно учитывается как независимое от других; 3) на заданном горизонте влиянием данных измерений на других горизонтах пренебрегается [8, 19].

При решении уравнений (5), (6) использовались следующие граничные условия. На поверхности моря, боковых твердых границах и дне потоки дисперсии ошибок прогноза температуры и солёности равнялись нулю. Численная реализация уравнений (5), (6) аналогична реализации уравнений переноса – диффузии тепла и соли (1), (2), при этом ассимиляционные источники Q_T, Q_S в уравнениях (1), (2) и последний член в правых частях уравнений (5), (6) учитываются с предыдущего шага по времени.

Заметим, что при проведении реанализа с использованием алгоритма адаптивной статистики фактические дисперсии ошибок оптимальной интерполяции температуры и солёности оценивались как произведения относительных дисперсий ошибок оптимальной интерполяции измерений температуры и солёности в узлы сеточной области на дисперсии соответствующих климатических полей. Были получены 2×108 массивов (9 лет по 12 мес) на 38 горизонтах, соответствующих расчетным горизонтам модели.

В случае упрощенного алгоритма ассимиляционные источники в правых частях уравнений (1) и (2) имеют вид [17]:

$$Q_T(\bar{x}, t) = \frac{1}{\text{REL}[1 + \sigma_{T_m}^2(\bar{x})]} [T^{\text{obs}}(\bar{x}, t) - T(\bar{x}, t)], \quad (9)$$

$$Q_S(\bar{x}, t) = \frac{1}{\text{REL}[1 + \sigma_{S_m}^2(\bar{x})]} [S^{\text{obs}}(\bar{x}, t) - S(\bar{x}, t)], \quad (10)$$

где $\sigma_{T_m}^2(\bar{x})$, $\sigma_{S_m}^2(\bar{x})$ – относительные дисперсии ошибок оптимальной интерполяции измерений температуры и солёности в узлы сеточной области (нормировка производилась на дисперсии климатических полей) [16].

При проведении реанализа в качестве атмосферного воздействия использовались поля скорости ветра, поверхностной температуры, потоков коротковолновой и длинноволновой радиации, потоков явного и скрытого тепла, осадков, испарения, полученные на сетке модели по результатам глобального атмосферного реанализа ERA-40 [20]. Среднемесячные данные измерений температуры и солёности, относительных дисперсий ошибок оптимальной интерполяции, значений расходов воды в реках и проливах, а также значения параметров атмосферы линейно интерполировались на каждый шаг по времени. Время релаксации бралось равным 1 сут [17].

В качестве начальных условий при выполнении реанализа на основе упрощенного алгоритма использовались климатические поля температуры, солёности, горизонтальной скорости течений и уровня, полученные при восстановлении климата. В экспериментах на основе алгоритма адаптивной статистики использовались результаты реанализа, полученные на основе упрощенного алгоритма.

4. Оценка «типичных» дисперсий ошибок прогноза температуры и солёности и проведение реанализа. Ранее с применением упрощенного алгоритма был восстановлен непрерывный ряд осредненных за 24 ч полей температуры, солёности, скорости течений и уровня Черного моря для периода 1971 – 1993 гг. с дискретностью 1 сут [7, 19] (вариант 1).

При выполнении реанализа посредством алгоритма адаптивной статистики важен вопрос об оценке «типичных» дисперсий ошибок прогноза температуры и солёности в уравнениях типа (5) и (6). Воспроизведенные поля температуры и солёности на базе упрощенного алгоритма ассимиляции данных (вариант 1), которые использовались для сравнительного анализа, позволяют получить такие оценки. В качестве оценок можно использовать дисперсии временной изменчивости реконструированных полей.

Их расчет проводился следующим образом. Для временного ряда трехмерных полей солёности $S(i, j, k, t_d, m)$, восстановленных с дискретностью по времени 1 сут для интервала M лет, на каждый день t_d в пределах года можно рассчитать среднее значение солёности за рассматриваемый период

$$\bar{S}(i, j, k, t_d) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M S(i, j, k, t_d, m), \quad (11)$$

где i соответствует изменению координат в зональном направлении, j – изменению координат в меридиональном направлении, k – номеру горизонта, а m – номеру года.

Тогда дисперсия отклонений значений солёности от среднего по времени может быть оценена по формуле

$$\sigma_S^2(i, j, k, t_d) = \frac{1}{M-1} \sum_{m=1}^M [S(i, j, k, t_d, m) - \bar{S}(i, j, k, t_d)]^2. \quad (12)$$

Рассчитанная дисперсия меняется как по времени в пределах года, так и по пространству. Аналогично выполняется оценка «типичных» дисперсий ошибок прогноза температуры. Поскольку при проведении реанализа в модели ассимилируются среднемесячные массивы температуры и солёности [16], в качестве «типичных» брались среднемесячные массивы временных дисперсий полей температуры и солёности. Данные массивы были использованы и как начальные условия при численном решении уравнений эволюции дисперсий (5), (6).

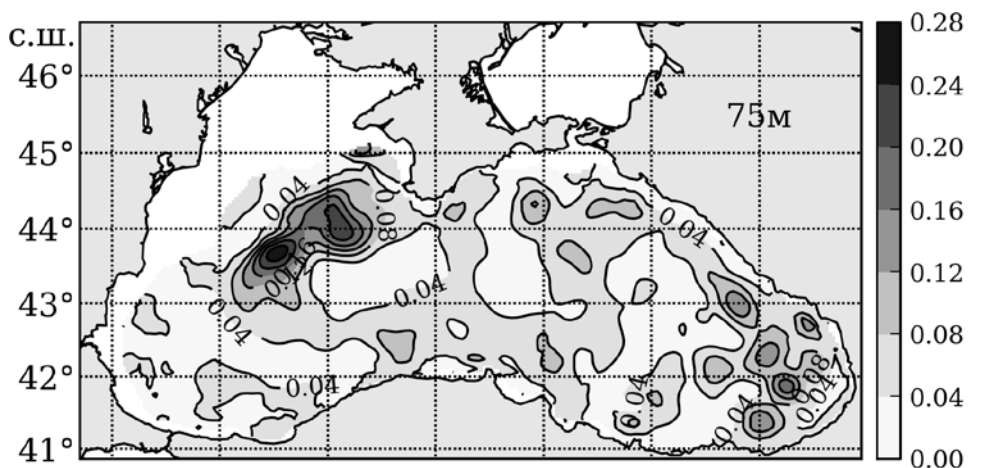
На базе алгоритма адаптивной статистики и оценок «типичных» дисперсий ошибок прогноза температуры и солёности был восстановлен непрерывный ряд осреднённых за 24 ч полей температуры, солёности, скоростей течений и уровня Чёрного моря для периода 1985 – 1993 гг. с дискретностью 1 сут (вариант 2).

В работе [19] показано, что при использовании таких оценок в качестве «типичных» дисперсий ошибок прогноза в выполненном реанализе влияние данных измерений на восстанавливаемые гидрофизические поля оказывается меньшим по сравнению с влиянием модели циркуляции.

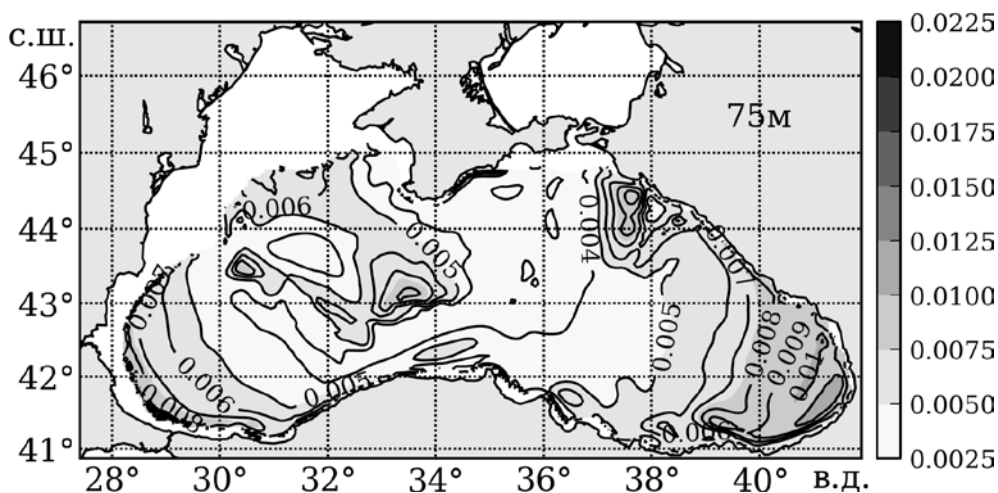
Отметим, что ранее В.Л. Дорофеевым был выполнен реанализ гидрофизических полей Чёрного моря за период 1993 – 2001 гг. с ассимиляцией спутниковой альтиметрии [21]. Сравнение этих полей с полями реанализа из статьи [3] показало, что в этот период наблюдается более существенная синоптическая изменчивость течений, струя Основного Чёрноморского течения (ОЧТ) более узкая и ха [21]. Интенсивность кинетической энергии течений в слое 0 – 1000 м существенно выше.

С учётом отмеченного оценки дисперсий временной изменчивости гидрофизических полей моря были выполнены по результатам реанализа для периода 1993 – 2001 гг. на основе формул (11), (12). Пример среднемесячной дисперсии для солёности, рассчитанной по результатам этого реанализа, представлен на рис. 1, а. Подчеркнем, что значения дисперсии в этом случае на порядок выше значений дисперсии, оценённой по результатам варианта 1 реанализа, а ее пространст (рис. 1, б). Зоны повышенных значений дисперсии в основном соответствуют положениям наиболее интенсивных мезомасштабных вихрей Чёрного моря (Севастопольского, Сакаръякского, Батумского, Кавказских, Крымского). Все вышесказанное справедливо и по отношению к дисперсии временной изменчивости температуры в слое постоянного галоклина.

С использованием нового вида оценок «типичных» дисперсий ошибок прогноза температуры и солёности был также выполнен реанализ гидрофизических полей Чёрного моря для периода 1985 – 1993 гг. (вариант 3).



a

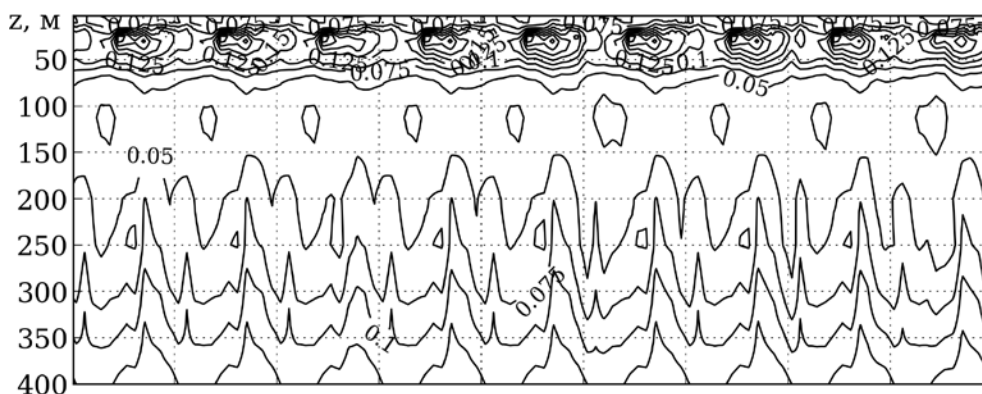


б

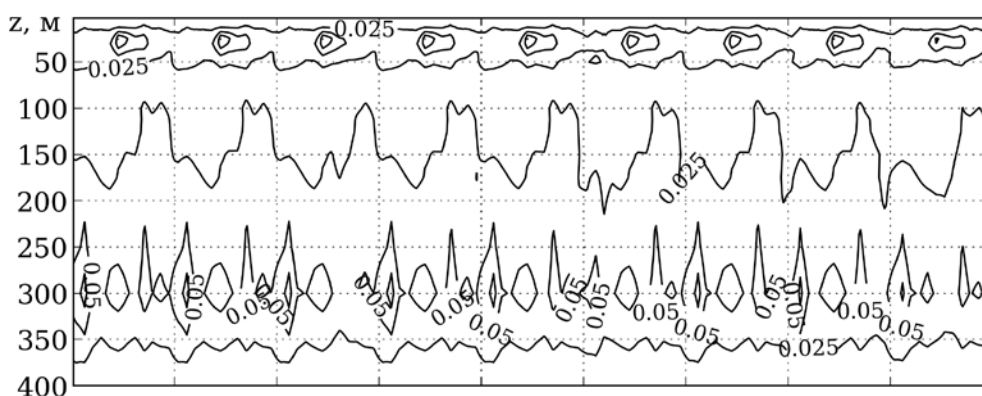
Р и с. 1. Распределения среднемесячных дисперсий временной изменчивости солености ($\%{}^2$) в октябре: *a* – по данным реанализа за 1993 – 2001 гг. [21]; *б* – по данным реанализа за 1971 – 1993 гг.

Увеличение влияния данных наблюдений при использовании новых оценок «типичных» дисперсий демонстрируют диаграммы временной изменчивости средних по горизонтам весовых коэффициентов в слое 0 – 400 м (рис. 2, *a*). Наиболее высокие значения среднего по горизонту коэффициента при источнике наблюдаются в верхнем слое 0 – 50 м, что вызвано высокой изменчивостью гидрофизических полей Черного моря, восстановленных в реанализе за 1993 – 2001 гг. Как видно, значения весов для слоя 0 – 50 м в варианте 3 реанализа оказались в 4 – 5 раз выше, а для слоя 50 – 300 м в 1,5 – 2 раза выше, чем в варианте 2 реанализа (рис. 2, *б*). Отметим, что при использовании упрощенного алгоритма значения средних по горизонтам весов существенно больше (рис. 2, *в*), чем при использовании алгоритма адаптивной статистики с

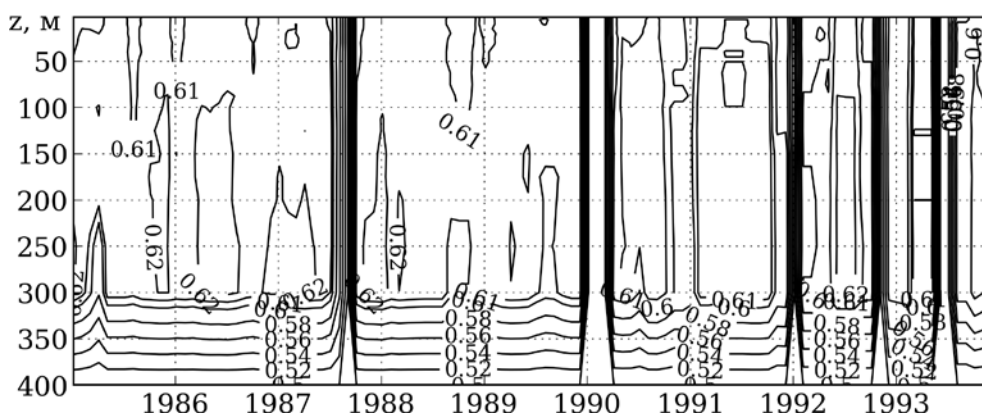
различными оценками «типичных» дисперсий ошибок прогноза, и они незначительно меняются с глубиной.



a



б

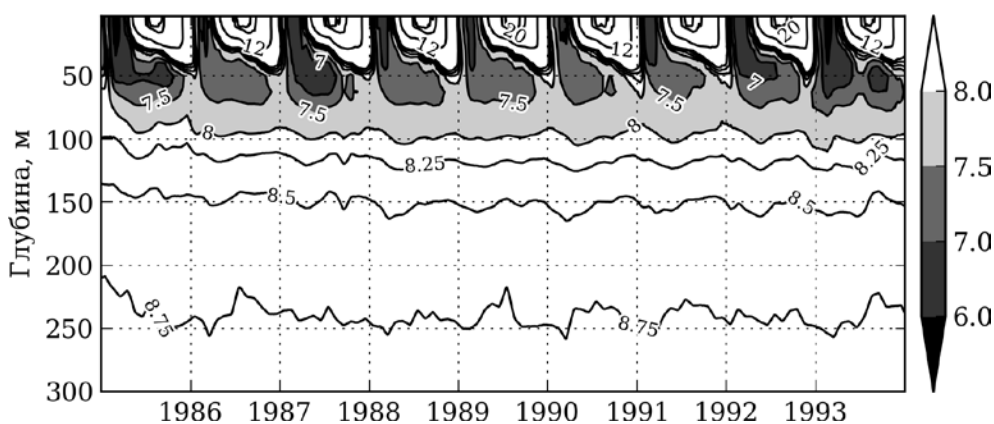


в

Р и с. 2. Диаграммы временной изменчивости средних по горизонтам весовых коэффициентов в уравнении переноса – диффузии соли в слое 0 – 400 м в различных вариантах реанализа: *a* – вариант 3 (алгоритм адаптивной статистики); *б* – вариант 2 (алгоритм адаптивной статистики); *в* – вариант 1 (упрощенный алгоритм)

5. Сопоставление результатов реанализа гидрофизических полей для периода 1985 – 1993 гг. Гидрофизические поля Черного моря, восстановленные посредством упрощенного алгоритма [7] (вариант 1) и алгоритма адаптивной статистики (варианты 2 и 3) [19], были исходными при анализе и сопоставлении отдельных термохалинных и динамических характеристик.

При изучении межгодовой изменчивости температуры моря важным является поведение интегральных характеристик в слое 0 – 300 м. Анализ диаграммы распределения средней по горизонтам температуры в этом слое в период 1985 – 1993 гг. для всех трех вариантов позволяет выделить физические процессы, влияющие на вертикальную структуру водных масс в течение каждого года. На диаграммах прослеживается процесс формирования и обновления вод холодного промежуточного слоя. Для примера одна из диаграмм приведена на рис. 3. Характер поведения со временем глубины залегания отдельных изотерм, а также изменчивость положения холодного промежуточного слоя (изотермы 8°C) в трех вариантах реанализа приблизительно одинаковы. Различия в большей степени проявляются на горизонтах глубже 100 м.

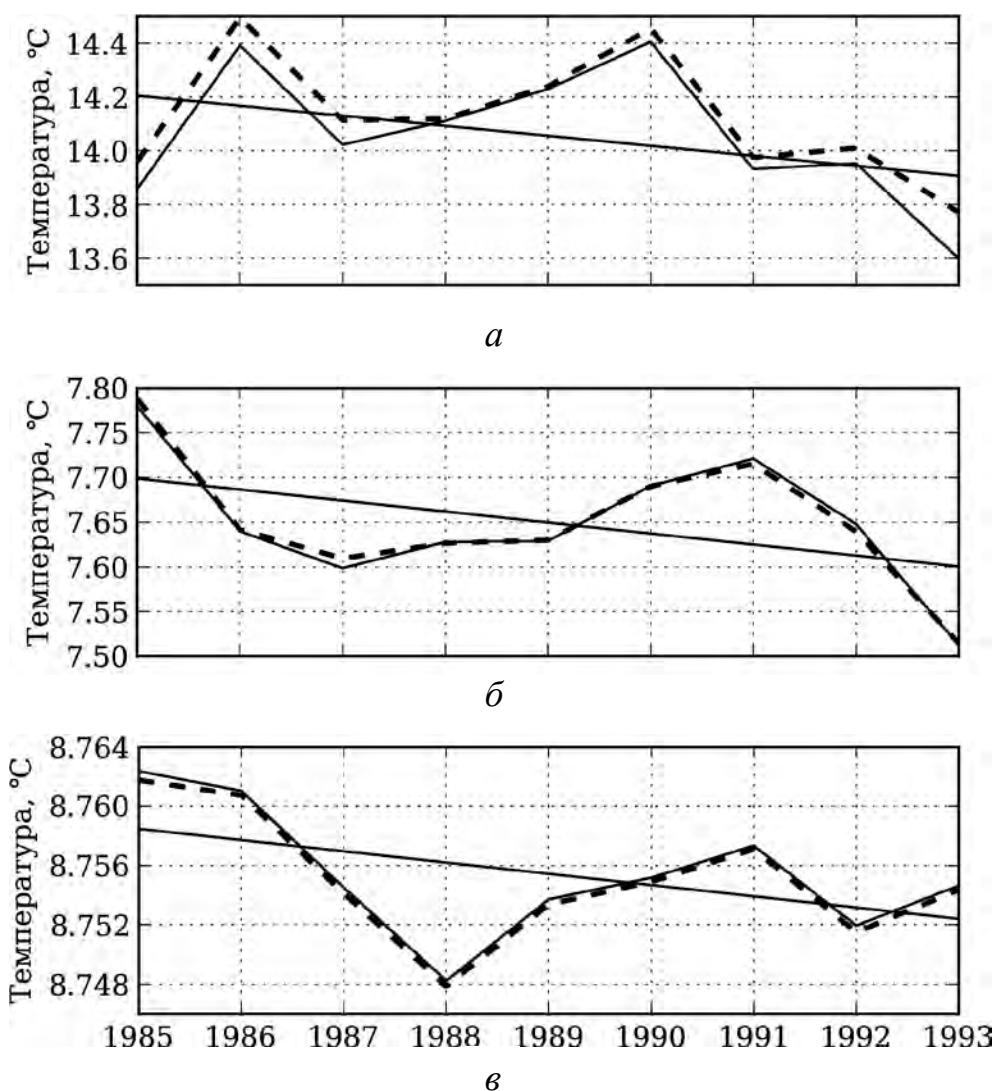


Р и с. 3. Диаграмма межгодовой и сезонной изменчивости средней по горизонтам температуры (°C) в слое 0 – 300 м по результатам варианта 3 реанализа

Линейные тренды, характеризующие межгодовую изменчивость средней по различным горизонтам слоя 0 – 300 м температуры, по результатам трех вариантов качественно близки, но имеются количественные различия (рис. 4). Среднегодовая осредненная для поверхности моря температура во всех вариантах снижается (рис. 4, а). Характеристики трендов составляют: $-0,0358^{\circ}\text{C}/\text{год}$ (вариант 1), $-0,0363^{\circ}\text{C}/\text{год}$ (вариант 2) и $-0,0374^{\circ}\text{C}/\text{год}$ (вариант 3). Количественные различия в поведении среднегодовых значений температуры, осредненной для горизонта 75 м, в трех вариантах реанализа оказались незначительны. На рис. 4, б представлена межгодовая изменчивость температуры на этом горизонте в вариантах 1 и 3 реанализа (характеристики трендов $-0,013^{\circ}\text{C}/\text{год}$ и $-0,012^{\circ}\text{C}/\text{год}$ соответственно).

В слое 200 – 300 м количественные различия в вариантах 1 и 3 также незначительны (рис. 4, в). Глубже 300 м значения «типичных» дисперсий, используемых в варианте 2, заметно уменьшаются, что влияет на весовые множители в

источниках правых частей уравнений переноса – диффузии температуры. Роль данных наблюдений при восстановлении полей на этих горизонтах будет намного меньшей по сравнению с ролью гидротермодинамической модели. Поэтому в среднегодовых значениях температуры глубже 300 м в трех вариантах количественные различия более выражены.



Р и с. 4. Кривые межгодовой изменчивости средней температуры: *а* – на горизонте 2,5 м, *б* – на горизонте 75 м, *в* – в слое 200 – 300 м (сплошная кривая – вариант 3, штриховая – вариант 1; прямые – линейные тренды по варианту 3 реанализа)

Сопоставление диаграмм сезонной изменчивости солёности, полученных по результатам реанализов, показало, что количественно и качественно их поведение имеет схожий характер. Можно отметить, что локальные минимумы и максимумы в изменчивости изохалин, обусловленные усвоением дан-

ных наблюдений, оказались более сглаженными в варианте 2 реанализа, что свидетельствует о большем влиянии гидротермодинамической модели. Представление о межгодовой изменчивости средней по горизонтам солёности в слое 0 – 300 м в период 1985 – 1993 гг. даёт диаграмма, приведенная на рис. 5 (вариант 3). Подчеркнем, что солёность в верхнем слое 2,5 – 20 м оказалась несколько ниже в варианте 2 реанализа, что является результатом большего влияния граничных условий.

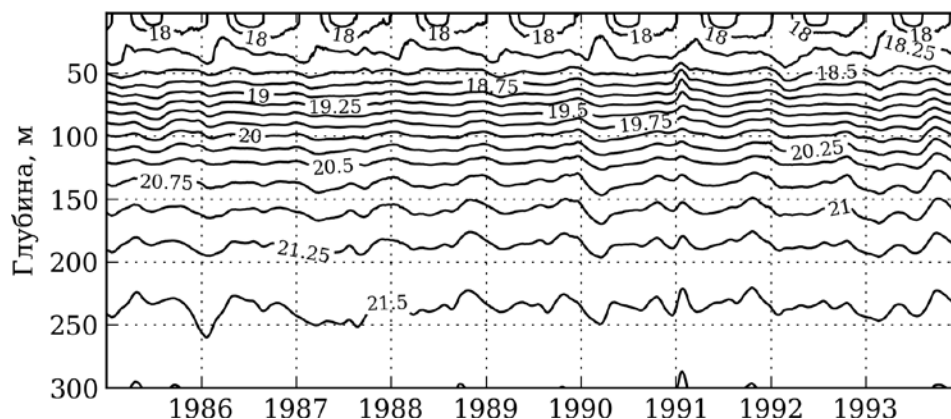
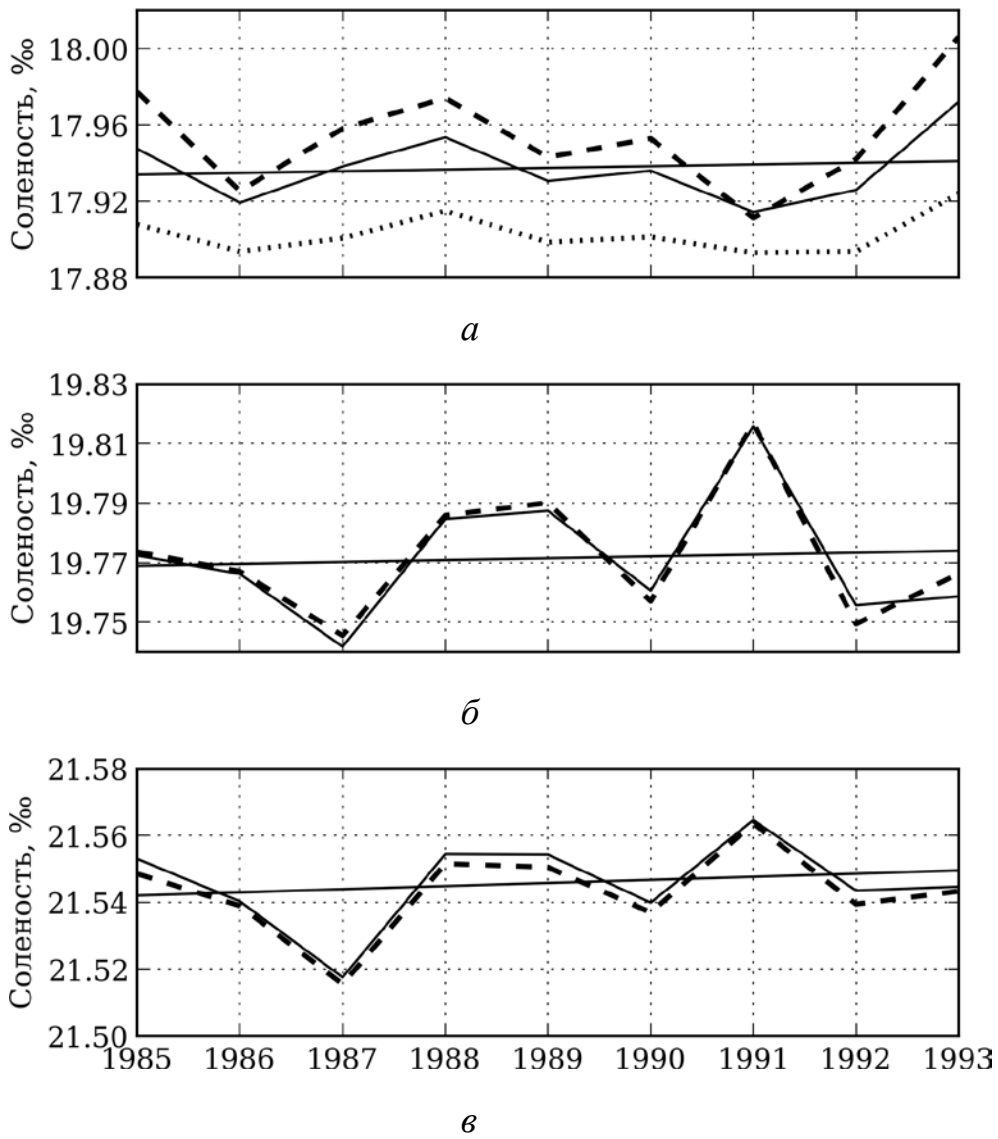


Рис. 5. Диаграмма межгодовой и сезонной изменчивости средней по горизонтам солёности (‰) в слое 0 – 300 м по результатам варианта 3 реанализа

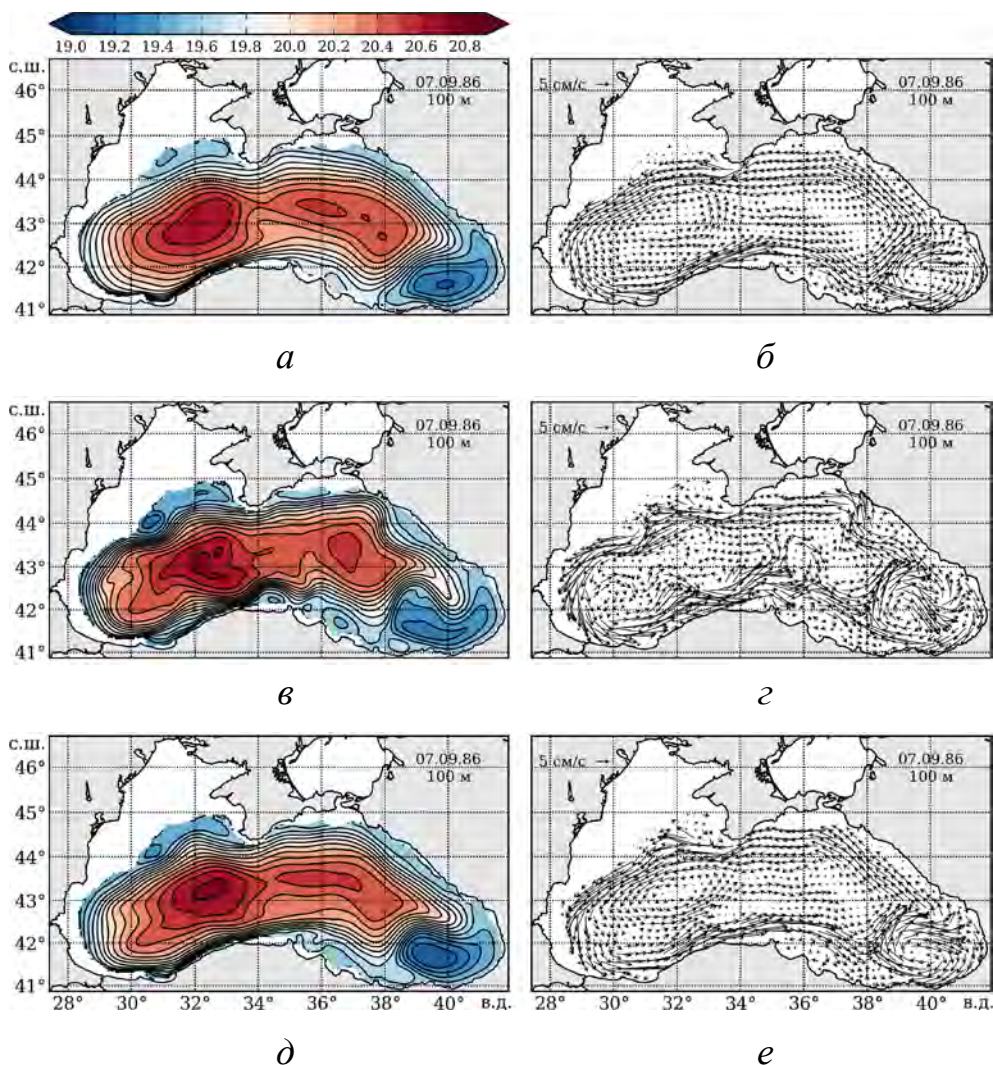
Линейные тренды в межгодовой изменчивости осредненной по слоям солёности, полученные в трех вариантах, качественно совпадают. Но характеристики трендов различаются (рис. 6). Отличия более заметны в верхнем слое 2,5 – 20 м (рис. 6, *a*). Это обусловлено различным влиянием граничных условий на поверхности. Солёность в этом слое в период 1985 – 1993 гг. растёт. Характеристики трендов следующие: $6,03 \times 10^{-4}$ ‰/год (вариант 1); $8,41 \times 10^{-4}$ ‰/год (вариант 2) и $8,89 \times 10^{-4}$ ‰/год (вариант 3). В слоях 50 – 150 и 200 – 300 м количественные различия между кривыми изменчивости солёности незначительны. Характеристики трендов для варианта 3 реанализа составляют: в слое 50 – 150 м $6,26 \times 10^{-4}$ ‰/год, в слое 200 – 300 м $9,33 \times 10^{-4}$ ‰/год. В этих слоях в период 1985 – 1993 гг. минимум солёности во всех вариантах наблюдается в 1987 г., а максимум – в 1991 г.

Примеры карт полей солёности на различных горизонтах, восстановленных в реанализах, приведены на рис. 7, *a, в, д*. Значения солёности в основных структурах крупномасштабной циркуляции (ОЧТ, Батумский антициклон, западный циклонический круговорот) близки, однако конфигурации изохалин существенно различаются. В полях солёности, реконструированных с использованием алгоритма адаптивной статистики (варианты 2 и 3), более ярко выражена синоптическая изменчивость, обусловленная более интенсивным меандрированием ОЧТ. В частности, наблюдается большее количество мезомасштабных вихрей. Положение и конфигурация восточного и западного

циклонических круговоротов значительно отличаются от воспроизведенных в варианте реанализа по упрощенному алгоритму ассимиляции данных. В полях солености варианта 2 реанализа струя ОЧТ более узкая. Прибрежный фронт в западной части моря более обострен в вариантах реанализа на основе алгоритма адаптивной статистики (рис. 7, а, в, д).

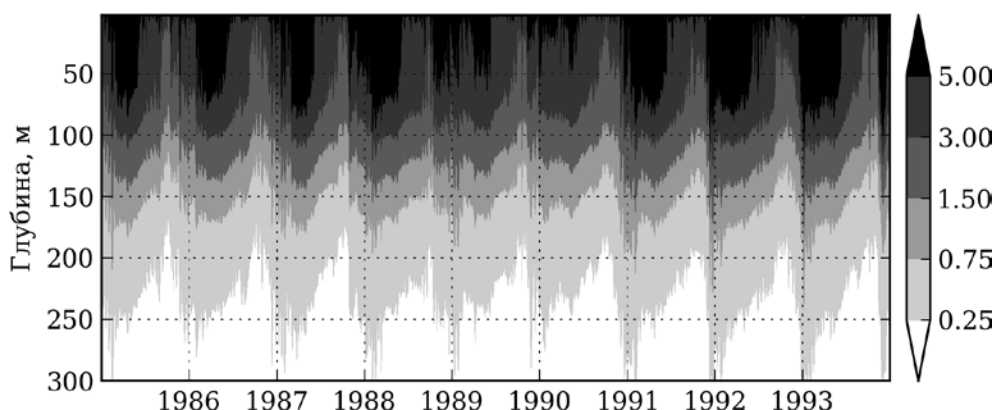


Р и с. 6. Кривые межгодовой изменчивости средней по слоям солености: *a* – 2,5 – 20 м; *б* – 50 – 150 м; *в* – 200 – 300 м (штриховая кривая – вариант 1, пунктирная – вариант 2, сплошная кривая – вариант 3; прямые – линейные тренды по варианту 3 реанализа)



Р и с. 7. Поля солёности (‰) (*а, в, д*) и скоростей течений (*б, г, е*), реконструированные в трех вариантах реанализа: *а, б* – вариант 1; *в, г* – вариант 2; *д, е* – вариант 3

Перейдем к сопоставлению воспроизведенных в реанализах динамических характеристик. При анализе диаграмм сезонной изменчивости осредненной по горизонтам кинетической энергии (КЭ) в слое 0 – 300 м, воспроизведенной в реанализах, отмечается большее влияние модели на результаты реанализа в варианте 2. Представление о межгодовой и сезонной изменчивости средней по горизонтам КЭ в слое 0 – 300 м по результатам варианта 3 реанализа дает рис. 8. Приведенная диаграмма позволяет выделить годы с наибольшими (1988, 1991 – 1993 гг.) и наименьшими (1985 – 1987, 1990 гг.) значениями КЭ. Интервал изменчивости КЭ в этом варианте оказался промежуточным между вариантом 1 и вариантом 2. Анализ диаграмм для всех трех вариантов показал качественное совпадение поведения КЭ в сопоставляемых результатах реанализов.



Р и с. 8. Диаграмма межгодовой и сезонной изменчивости средней по горизонтам кинетической энергии ($\text{Дж}/\text{м}^3$) в слое 0 – 300 м по результатам варианта 3 реанализа

Наглядно различия в полях горизонтальных скоростей течений, реконструированных в трех вариантах реанализа, показаны на рис. 7, б, з, е. Как видно, использование оценок «типичных» дисперсий ошибок прогноза, учитывающих синоптическую изменчивость, в алгоритме адаптивной статистики (вариант 3) по сравнению с результатами, полученными на базе упрощенного алгоритма ассимиляции (вариант 1). Использование заниженных значений «типичных» дисперсий ошибок прогноза температуры и солености в алгоритме адаптивной статистики (вариант 2) привело к значительной интенсификации ОЧТ и увеличению синоптической изменчивости в гидрофизических полях (рис. 7, в, з). Это явилось причиной существенного увеличения средней КЭ во всем деятельном слое моря в этом варианте. В полях течений этого варианта реанализа наблюдается значительно более узкая струя ОЧТ, величины скоростей существенно выше, а меандрирование струи больше по сравнению с результатами реанализа в вариантах 1 и 3 (рис. 7, б, е). Особенно ярко различия выражены в районе Батумского антициклона, у Южного побережья Крыма и у берегов Турции. В варианте 2 реанализа антициклонические вихри образуются не только справа от ОЧТ, но и в центральной части моря.

Применение оценок «типичных» дисперсий ошибок прогноза, полученных по результатам реанализа с учетом синоптической изменчивости, позволило рассчитать квазиоптимальные весовые коэффициенты. Гидрофизические поля в варианте 3 реанализа (рис. 7, д, е) оказались ближе к наблюдаемым и являются динамически более согласованными, чем в варианте 1 (рис. 7, а, б).

Поведение с глубиной среднегодовых профилей вертикальной скорости в области глубин $1050 < H < 2000$ м в варианте 3 реанализа оказалось близким к поведению аналогичных профилей в варианте 1 реанализа, выполненном посредством упрощенного алгоритма ассимиляции (рис. 9). Как видно, в исследуемой области моря в 1987, 1988, 1991 – 1993 гг. преобладает подъем вод (отрицательные значения $\bar{w}(z)$), а в 1985, 1986, 1989, 1990 гг. – опускание (положительные значения $\bar{w}(z)$). В слое 0 – 100 м во все годы преобладает подъем вод. В этих вариантах значения $\bar{w}(z)$ по модулю имеют одинаковый порядок величины. В варианте 3 наблюдается ранее отмеченная корреляция [7] между

отрицательными и положительными значениями осредненной за год и по горизонтам вертикальной скорости с максимальными и минимальными значениями КЭ течений в отдельные годы соответственно.

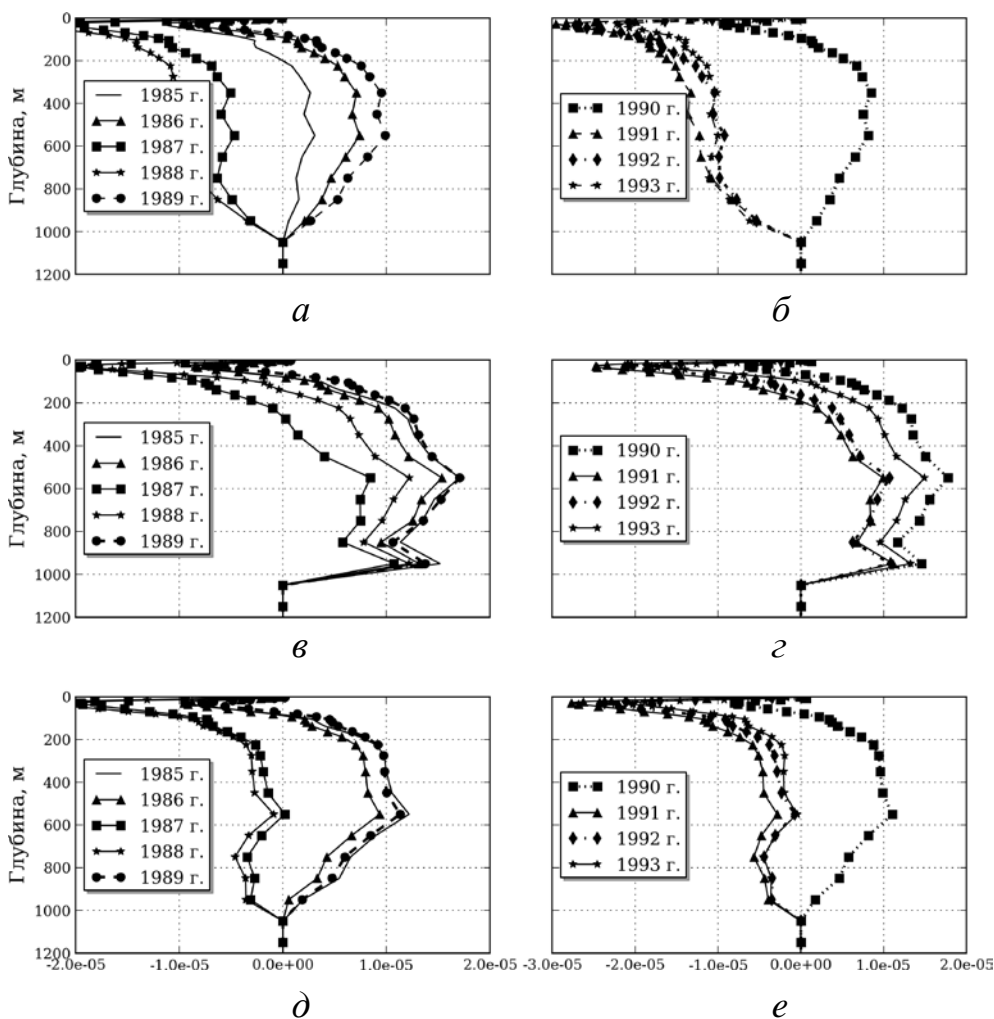


Рис. 9. Среднегодовые профили вертикальной скорости в области моря с глубинами от 1050 до 2000 м, рассчитанные для разных лет по результатам вариантов реанализа: а, б – вариант 1; в, г – вариант 2; д, е – вариант 3

В варианте 2 реанализа в глубоководной части моря в основном преобладает опускание вод (рис. 9, в, г). На горизонтах глубже 300 м модель воспроизводит свою систему более интенсивных течений с выраженной синоптической изменчивостью, которые значительно отличаются от течений вариантов 1 и 3 реанализа. Это является следствием заниженного влияния данных наблюдений на восстанавливаемые гидрофизические поля и соответственно возрастания роли атмосферного воздействия. Увеличение количества мезомасштабных антициклонических вихрей и их интенсивности на всей акватории моря приводит к смене знака среднегодовых значений вертикальной скорости в зоне отмечен-

ных глубин и к ее завышенным значениям. Следовательно, в задаче реанализа на основе алгоритма адаптивной статистики использование оценок «типичных» дисперсий ошибок прогноза, учитывающих синоптическую изменчивость, является более предпочтительным.

6. Выводы. На основе алгоритма адаптивной статистики и упрощенного алгоритма ассимиляции данных в z -координатной модели, разработанной в МГИ НАН Украины, выполнены реанализы гидрофизических полей Черного моря для периода 1985 – 1993 гг.

Показано, что использование оценок дисперсий временной изменчивости гидрофизических полей моря по результатам реанализа, выполненного на основе упрощенного алгоритма ассимиляции данных в z -координатной модели, занижает роль данных наблюдений при реконструкции гидрофизических полей вследствие малости весовых коэффициентов в источниках правых частей уравнений переноса – диффузии тепла и соли.

Применение оценок «типичных» дисперсий ошибок прогноза, полученных по результатам реанализа с учетом синоптической изменчивости, позволило получить квазиоптимальные весовые коэффициенты. Воспроизведенные на основе этих оценок гидрофизические поля оказались ближе к наблюдаемым и являются динамически более согласованными.

Исследование поведения отдельных интегральных термохалинных и динамических характеристик позволило выявить следующее. Средняя по горизонтам слоя 0 – 300 м температура снижается во всех вариантах реанализа. Показатели трендов различаются незначительно.

В поведении средней солености количественные отличия более заметны в верхнем слое 2,5 – 20 м, что обусловлено различным влиянием граничных условий на поверхности. Тренды в поведении средней в слое 0 – 300 м солености положительные. Значения трендов в трех вариантах реанализа близки.

Величины средней кинетической энергии в деятельном слое, воспроизведенные на основе алгоритма адаптивной статистики, несколько выше, чем аналогичные, полученные посредством упрощенного алгоритма ассимиляции данных. Использование заниженных значений «типичных» дисперсий ошибок прогноза в задаче реанализа на основе алгоритма адаптивной статистики привело к значительной интенсификации ОЧТ и увеличению синоптической изменчивости в гидрофизических полях.

Оценки «типичных» дисперсий ошибок прогноза, в которых учитывается синоптическая изменчивость, являются более предпочтительными. Их использование в задаче реанализа позволило сохранить корреляцию отрицательных/положительных значений (подъем / опускание вод) осредненной за год и по горизонтам вертикальной скорости в отдельные годы в области глубин $1050 < H < 2000$ м с максимальными / минимальными значениями кинетической энергии течений соответственно. Такое соответствие кажется обоснованным, поскольку интенсификация Основного Черноморского течения или его ослабление связаны с подъемом либо опусканием основного пикноклина и соответствующим усилением или ослаблением прибрежного фронта.

Автор выражает благодарность В.В. Кнышу за помощь при выполнении реанализа гидрофизических полей и интерпретации полученных результатов и С.Г. Демьшеву за предоставленную z -координатную модель циркуляции Черного моря и полезные замечания по содержанию работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Köhl A., Stammer D. Variability of the meridional overturning in the North Atlantic from the 50 years GECCO State Estimation // J. Phys. Oceanogr. – 2008. – 38. – P. 1913 – 1930.
2. Carton J.A., Giese B.S. A reanalysis of ocean climate using simple ocean data assimilation (SODA) // Mon. Wea. Rev. – 2008. – 136. – P. 2999 – 3017.
3. Кныш В.В., Коротаев Г.К., Моисеенко В.А. и др. Сезонная и межгодовая изменчивость гидрофизических полей Черного моря, восстановленных на основе реанализа за период 1971 – 1993 гг. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. – 2011. – 47, № 3. – С. 433 – 446.
4. Демьшев С.Г., Кныш В.В., Коротаев Г.К. Результаты расчета адаптированных полей Черного моря на основе ассимиляции в модели данных по климатической температуре и солености // Там же. – 2006. – 42, № 4. – С. 604 – 617.
5. 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.
6. Демьшев С.Г. Исследование чувствительности параметризации Меллора – Ямады к выбору конечно-разностных аналогов в численной трехмерной модели оперативного прогноза течений в Черном море // Морской гидрофизический журнал. – 2010. – № 3. – С. 29 – 39.
7. Кныш В.В., Демьшев С.Г., Кубряков А.И. и др. Сопоставление результатов реанализа гидрофизических полей Черного моря, выполненного по моделям в σ - и z -координатах // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2011. – Вып. 24. – С. 19 – 37.
8. Кныш В.В., Демьшев С.Г., Инюшина Н.В. и др. Ассимиляция климатических гидрологических данных в модели Черного моря на основе алгоритма адаптивной статистики ошибок прогноза // Морской гидрофизический журнал. – 2008. – № 1. – С. 44 – 55.
9. Pietrzak J. The use of TVD limiters for forward-in-time upstream-biased advective schemes in ocean modeling // Mon. Wea. Rev. – 1998. – 126. – P. 812 – 830.
10. Matsuno T. Numerical integrations of the primitive equations by a simulated backward difference method // J. Meteor. Soc. Japan. Ser. 2. – 1966. – 44, № 1. – P. 76 – 84.
11. Arakawa A., Lamb V.R. A potential enstrophy and energy conserving scheme for the shallow water equation // Mon. Wea. Rev. – 1981. – 109, № 1. – P. 18 – 36.
12. Демьшев С.Г. Численные эксперименты по сопоставлению двух конечно-разностных схем для уравнений движения в дискретной модели гидродинамики Черного моря // Морской гидрофизический журнал. – 2005. – № 5. – С. 47 – 59.
13. Демьшев С.Г. Аппроксимация силы плавучести в численной модели бароклинных течений океана // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. – 1998. – 34, № 3. – С. 404 – 412.
14. Демьшев С.Г. О повышении точности расчета течений в Черном море при использовании приведенного уровня моря в численной модели // Метеорология и гидрология. – 1996. – № 9. – С. 75 – 83.
15. Mellor G.L., Yamada T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problem // Rev. Geophys. – 1982. – № 20. – P. 851 – 875.

16. *Моисеенко В.А., Белокопытов В.Н.* Оценка качества массива данных измерений, подготовленного для решения задачи реанализа состояния Черного моря за период 1985 – 1994 гг. // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2008. – Вып. 16. – С. 184 – 189.
17. *Кныш В.В., Демьяшев С.Г., Коротчаев Г.К.* Методика реконструкции климатической сезонной циркуляции Черного моря на основе ассимиляции гидрологических данных в модели // Морской гидрофизический журнал. – 2002. – № 2. – С. 36 – 52.
18. *Мизюк А.И.* Реанализ гидрофизических полей Черного моря на базе ассимиляции в σ -координатной модели ежемесячных массивов данных измерений температуры и солености для периода 1971 – 1993 гг. посредством алгоритма адаптивной статистики // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2011. – Вып. 24. – С. 56 – 77.
19. *Мизюк А.И.* Развитие ретроспективного анализа гидрофизических полей Черного моря посредством ассимиляции в моделях измерений температуры и солености: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2012. – 164 с.
20. *Uppala S.M., Kallberg P.W., Simmons A.J. et al.* The ERA-40 re-analysis // Quart. J. Roy. Meteor. Soc. – 2005. – 131, № 612. – P. 2961 – 3012.
21. *WP10 VI Reanalysis Product Quality Information Document* // http://catalogue.myocean.eu.org/static/resources/myocean/quid/MYO-WP10-QUID-V1-BS-MHI-BS-MHIR_DAVER_PHYS-RAN-v1.0.pdf.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,
Севастополь
E-mail: artem.mizyuk@gmail.com

Материал поступил
в редакцию 22.03.13
После доработки 14.06.13

АНОТАЦІЯ Дана робота присвячена розвитку ретроспективного аналізу гідрофізичних полів Чорного моря на основі асиміляції даних вимірювань температури та солоності в z -координатній моделі циркуляції за допомогою алгоритму адаптивної статистики. Запропоновано способи оцінки «типових» дисперсій помилок прогнозу температури та солоності, яка дозволяє отримати квазіоптимальні ваги в асиміляційних доданках рівнянь переносу тепла та солі. Розроблена асиміляційна модель була використана для проведення реаналізу гідрофізичних полів Чорного моря за 1985 – 1993 рр. Для цього періоду виконано порівняння результатів відновлення гідрофізичних полів на основі алгоритму адаптивної статистики та спрощеного алгоритму. Обраний спосіб оцінки «типових» дисперсій помилок прогнозу дозволив отримати узгоджені гідрофізичні поля.

Ключові слова: Чорне море, реаналіз, асиміляція даних, міжрічна мінливість, моделювання циркуляції.

ABSTRACT Retrospective analysis (reanalysis) of the Black Sea hydrophysical fields is developed in the paper based on temperature and salinity data assimilation in the z -coordinate circulation model using the adaptive statistics procedure. The approaches for estimating the errors' «background» variances in temperature and salinity forecast are proposed. It permits to obtain quasi-optimum weights in the assimilation components of the heat and salt transport-diffusion equations. The developed assimilation model is used for reanalyzing the Black Sea hydrophysical fields for 1985 – 1993. The hydrophysical fields reconstructed using the adaptive statistics algorithm, on the one hand, and the simplified assimilation procedure, on the other, are compared for this period. The chosen method of estimating the errors' «background» variances of a forecast permits to obtain the adjusted hydrophysical fields.

Keywords: Black Sea, reanalysis, data assimilation, interannual variability, circulation modeling.