

П. Н. Лишаев

*Морской гидрофизический институт РАН, г. Севастополь***ПРИМЕНЕНИЕ ТРЕХМЕРНЫХ ПОЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И СОЛЕННОСТИ, ВОССТАНОВЛЕННЫХ ПО ДАННЫМ БУЕВ *Argo* И АЛЬТИМЕТРИИ, В ОПЕРАТИВНОЙ СИСТЕМЕ ДИАГНОЗА И ПРОГНОЗА СОСТОЯНИЯ ЧЕРНОГО МОРЯ**

Предложена методика восстановления и алгоритм ассимиляции ежесуточных трехмерных полей температуры и солёности для использования в системе диагноза и прогноза состояния Черного моря. Для восстановления трехмерных полей использовались гидрологические измерения буев *Argo* и массив аномалий уровня моря *AVISO* за 2012 г. Ассимиляция полей температуры и солёности позволила более качественно воспроизвести среднюю стратификацию вод бассейна. Выполнена оценка статистических характеристик точности восстановленных полей температуры и солёности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *альтиметрия, буи Argo, температура, солёность, Черное море, малочисленные контактные наблюдения, ассимиляция, диагноз, прогноз*

Описание схемы диагноза и прогноза гидрофизических полей Черного моря. Оперативная система диагноза и прогноза состоит из двух частей: диагноз – ассимиляция наблюдений в течение четырех суток, прогноз – следующий после диагноза гидродинамический расчет на пять суток. Начальными полями для блока диагноза служат поля с предыдущего цикла. В данной работе был выполнен численный эксперимент, направленный на отработку методики восстановления и последующей ассимиляции в модели циркуляции Черного моря полей температуры и солёности по данным буев-профилемеров *Argo* в оперативном режиме. Расчет проводился на 2012 г. с помощью вихреразрешающей модели Морского гидрофизического института (разрешение по горизонтали 5 км) [1], которая была настроена под режим, имитирующий работу оперативной системы диагноза и прогноза. Атмосферное воздействие задавалось из реанализа *ERA-Interim*. Коэффициенты турбулентного обмена импульсом и турбулентной диффузии тепла и соли по вертикали определялись по формулам Филандера-Пакановски [2].

Для коррекции средней стратификации вод ассимилировались ежесуточные трехмерные поля температуры и солёности. Поскольку усваиваемые поля предполагается использовать в системе диагноза и прогноза состояния Черного моря, необходимо скорректировать алгоритм их восстановления, так как могут использоваться только «прошлые» измерения.

Алгоритм восстановления трехмерных полей заключался в следующем. Для заданных суток 2012 г. по глубоководной области бассейна (ограничение по изобате 500 м) накапливались измерения буев *Argo*. Окно накопления равнялось 45 суток. Каждому измерению соответствуют координаты и дата. По этим параметрам проводилась синхронизация с картами уровня моря. В работе используются массивы аномалий уровня для бассейна Черного моря *AVISO (Url-1)* (<http://www.aviso.altimetry.fr/duacs/>). Аномалии уровня

моря представлены в виде значений на регулярной сетке с пространственным разрешением $1/8^\circ$ и дискретностью по времени равной 7 суткам. Для построения карт уровня моря значения аномалий уровня суммировались со значениями среднегодового климатического уровня Черного моря, восстановленного в работе [3]. Так как контактных измерений достаточно мало (в среднем 25 – 26 измерений в месяц), для получения трехмерного распределения температуры и солености определялась линейная зависимость залегания изохалин от значения уровня моря [4, 5]. Используя данную зависимость и карту уровня, получали карты температуры и солености, отражающие пространственную изменчивость уровня моря.

В качестве начальных полей температуры, солености, скоростей течений и уровня моря были выбраны поля из реанализа 1993 – 2012 гг. [6] с ассимиляцией среднемесячных профилей температуры и солености, рассчитанных по данным буев *Argo*.

Ассимиляция трехмерных полей температуры и солености в уравнениях переноса – диффузии тепла и соли проводилась путем включения в правую часть источников:

$$T_t + (uT)_x + (vT)_y + (wT)_z = -\kappa^H \nabla^4 T + (\kappa^T T_z)_z - \frac{\partial I}{\partial z} + Q_T, \quad (1)$$

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

где T – температура; S – соленость; u, v, w – составляющие вектора скорости течений; $\kappa^T, \kappa^S, \kappa^H$ – коэффициенты вертикальной и горизонтальной турбулентной диффузии соответственно; $I(z) = Swr[a \exp(-z/b_1) + (1-a) \exp(-z/b_2)]$, Swr – коротковолновая радиация на поверхности моря, a, b_1, b_2 – эмпирические константы. Горизонтальная турбулентная диффузия и горизонтальный турбулентный обмен импульсом (с коэффициентом v^H) параметризованы в модели в виде бигармонических операторов. Значения коэффициентов v^H и κ^H брались равными $5 \cdot 10^9$ и 10^8 м⁴/с соответственно. Функции источников Q_T, Q_S в правых частях уравнений (1), (2) имеют следующий вид:

$$Q_T(\bar{x}, t) = \frac{1}{REL[1 + \eta_T^2(z, t_m)]} [T^{\text{obs}}(\bar{x}, t) - T(\bar{x}, t)], \quad (3)$$

$$Q_S(\bar{x}, t) = \frac{1}{REL[1 + \eta_S^2(z, t_m)]} [S^{\text{obs}}(\bar{x}, t) - S(\bar{x}, t)], \quad (4)$$

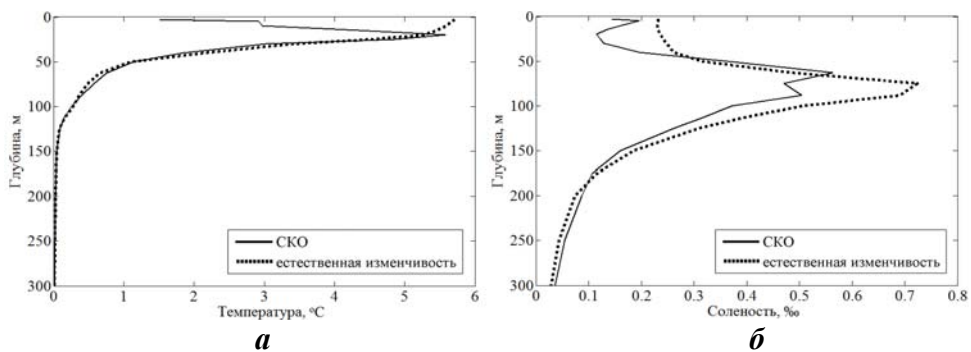
где REL – параметр релаксации; $T^{\text{obs}}(\bar{x}, t), S^{\text{obs}}(\bar{x}, t)$ – восстановленные по измерениям температура и соленость; $T(\bar{x}, t), S(\bar{x}, t)$ – модельные значения температуры и солености; $\eta_T^2(z, t_m), \eta_S^2(z, t_m)$ – среднемесячная мера ошибок измерений [7], представляющая собой отношение среднемесячного квадрата разностей температуры и солености к среднемесячной дисперсии естественной изменчивости соответствующих полей; $\bar{x} = (x, y, z)$. Ассимиляционные источники при численном решении уравнений (1), (2) учитывались с предыдущего шага по времени. Параметр релаксации равнялся 1 сут. Соотношения (3), (4) справедливы для случая, когда измерение температу-

ры (солёности) имеется в каждой точке сеточной глубоководной области, и оно учитывается как независимое от других.

Статистические характеристики точности восстановленных в модели полей температуры и солёности. Расчет статистических характеристик точности проводился сопоставлением восстановленных на этапе диагноза полей с измерениями на гидрологических станциях и буях *Argo*, находящихся в области, ограниченной изобатой 500 м. Отклонения между модельными и измеренными значениями температуры и солёности определяли на каждом горизонте. Для этого значения восстановленных с помощью модели температуры и солёности интерполировали в точки с координатами контактных измерений, с синхронизацией во времени. Поскольку ассимиляция трехмерных полей температуры и солёности в модели осуществлялась в слое 100 – 500 м, слой 0 – 100 м в большей степени определяется ка-

Т а б л и ц а . Среднеквадратические отклонения и естественная изменчивость диагностических полей (первые сутки) температуры и солёности за 2012 г.

гори- зонт, м	диагностические поля				прогноз	
	СКО		σ_T темпера- туры, °С	σ_S солёно- сти, ‰	СКО	
	темпера- туры, °С	солёно- сти, ‰			темпера- туры, °С	солёно- сти, ‰
3	1,5089	0,1440	5,7118	0,2319	1,9690	0,1414
5	2,9238	0,1966	5,6741	0,2314	2,4315	0,2141
10	2,9679	0,1637	5,5934	0,2313	2,4564	0,1858
15	4,3494	0,1329	5,4627	0,2315	3,7675	0,1562
20	5,5788	0,1156	5,2647	0,2357	5,0903	0,1369
25	4,8577	0,1217	4,5153	0,2407	4,5631	0,1333
30	3,0238	0,1296	3,4256	0,2483	2,9868	0,1386
40	1,8446	0,1960	2,1543	0,2613	1,8840	0,1986
50	1,1338	0,3650	1,0886	0,3162	1,1170	0,3430
63	0,7506	0,5642	0,6561	0,4845	0,7388	0,5824
75	0,5722	0,4709	0,4807	0,7235	0,6146	0,5577
88	0,3951	0,5044	0,3604	0,6910	0,5078	0,5800
100	0,2558	0,3713	0,2786	0,5050	0,3626	0,5340
113	0,1540	0,3184	0,1565	0,3969	0,2262	0,4589
125	0,0948	0,2627	0,0846	0,3109	0,1437	0,3797
150	0,0478	0,1609	0,0480	0,1852	0,0953	0,2481
175	0,0336	0,1062	0,0354	0,1152	0,0759	0,1655
200	0,0290	0,0866	0,0251	0,0741	0,0549	0,1117
250	0,0189	0,0542	0,0164	0,04399	0,0325	0,0816
300	0,0119	0,0364	0,0092	0,0289	0,0267	0,0506
400	0,0063	0,0217	0,0047	0,0168	0,0159	0,0308
500	0,0051	0,0143	0,0040	0,0097	0,0164	0,0232

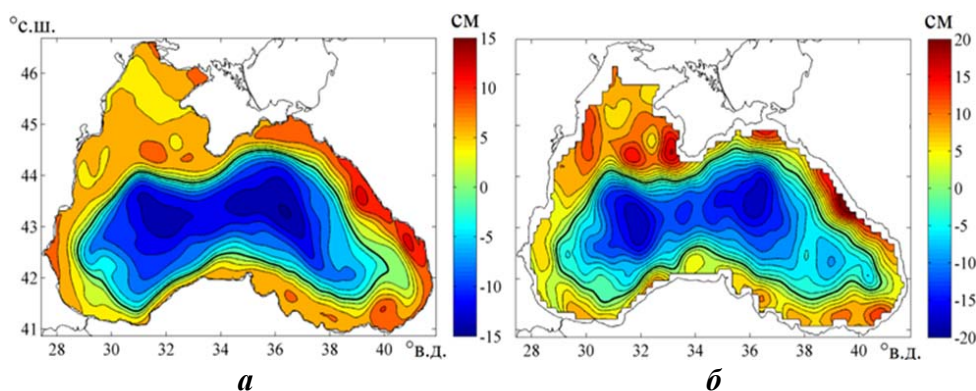


Р и с . 1 . Среднеквадратические отклонения и естественная изменчивость диагностических полей температуры (*a*) и солёности (*б*), оцененные по глубоководной области моря за 2012 г.

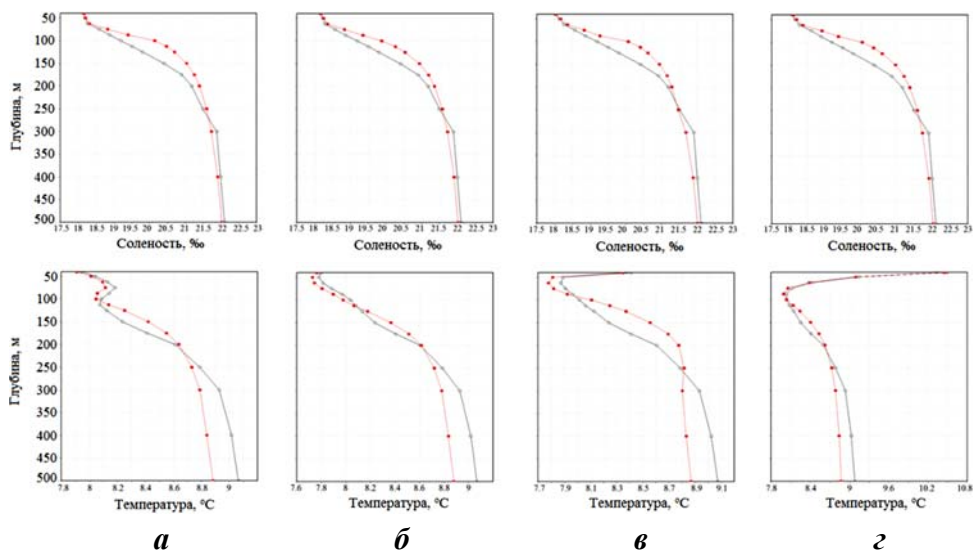
чеством модели и полей атмосферного воздействия. В таблице представлены среднеквадратические отклонения между восстановленными в модели и измеренными значениями температуры и солёности, а также естественная изменчивость диагностических полей (σ_T , σ_S), определяемая как среднее значение корня квадратного из дисперсий. Отметим, что максимальные значения СКО наблюдаются на горизонтах слоя 20 – 125 м и свидетельствуют о неточности воспроизведения моделью термодинамики верхнего слоя моря.

На рис.1 представлены профили СКО и естественной изменчивости полей температуры и солёности для глубин 0 – 300м. Естественная изменчивость температуры выше СКО для всего слоя, за исключением глубин 50 – 175 м.

Анализ восстановленных термохалинных полей Черного моря за 2012 г. Восстановленные в численном эксперименте поля уровня моря были сопоставлены с данными альтиметрии. На рис.2 показаны структуры уровней, восстановленных в модели и по данным альтиметрии. На картах представлены антициклонические вихри: Севастопольский, Батумский, Калиакрский, Синопский, Кизилірмакский. В диагностических полях интенсивность циклонических и антициклонических круговоротов меньше в сравнении с аналогичными образованиями по альтиметрическим данным. Это



Р и с . 2 . Уровень моря: диагностический (*a*), по данным альтиметрии (*б*) на 28 марта 2012 г.



Р и с . 4 . Профили осредненных по горизонтам солености и температуры в слое моря 40 – 500 м на 15 февраля (а), 15 мая (б), 15 августа (в) и 15 ноября (г) 2012 г. (красные кривые – диагноз с усвоением трехмерных полей; черные кривые – прогностический расчет).

может быть объяснено тем, что в слое 0 – 100 м коррекция модельных значений температуры и солености не проводилась.

В восстановленных полях температуры коррекция модельных значений проявляется в слое выше 100 м до глубины 75 м. На рис.4 представлены среднесуточные профили температуры в слое 0 – 500 м, осредненные по бассейну Черного моря, для двух численных расчетов. Красные кривые – расчет с ассимиляцией трехмерных полей температуры и солености, черные кривые – чисто прогностический расчет без усвоения. Прогностический расчет был выполнен на весь 2012 г. Видно, что профили, полученные по данным прогноза, более гладкие. Также из таблицы видно, что, начиная с горизонта 75 м и глубже, СКО прогностического расчета выше. Это свидетельствует о том, что ассимиляция трехмерных полей в слое 100 – 500 м позволила скорректировать среднюю стратификацию вод и улучшить статистические характеристики точности восстановленных полей.

Закключение. Анализ восстановленных в численном эксперименте полей уровня моря показал хорошее качественное воспроизведение синоптических структур. Оценка статистических характеристик точности полей температуры и солености показали, что СКО температуры и солености меньше естественной изменчивости на всех горизонтах, за исключением слоя 25 – 75 м. Усвоение в модели трехмерных полей температуры и солености позволил более точно воспроизвести среднюю стратификацию вод бассейна. Проведенный численный эксперимент показал необходимость ассимиляции температуры поверхности моря и совершенствования модели термодинамики верхнего слоя моря 0 – 100 м.

Работа выполнялась при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №16-05-00621 а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демьшев С.Г. Численная модель оперативного прогноза течений в Черном море // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.– 2012.– 48, № 1.– С.137-149.
2. Pacanowski R.C., Philander S.G.H. Parameterization of vertical mixing in numerical models of tropical oceans // J. Phys. Oceanogr.– 1981.– 11.– P.1443-1451.
3. Кныш В.В., Кубряков А.И., Инюшина Н.В. и др. Восстановление климатической сезонной циркуляции Черного моря на основе модели в σ -координатах с использованием ассимиляции данных о температуре и солёности // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь, 2008.– вып.16.– С.243-265.
4. Коротаев Г.К., Лишаев П.Н., Кныш В.В. Методика анализа данных измерений температуры и солёности Черного моря с использованием динамического альтиметрического уровня // Морской гидрофизический журнал.– 2015.– № 2.– С.26-42.
5. Коротаев Г.К., Лишаев П.Н., Кныш В.В. Восстановление трехмерных полей солёности и температуры Черного моря по данным спутниковых альтиметрических измерений // Исследование Земли из космоса.– 2016.– № 1-2.– С.199-212.
6. Коротаев Г.К., Саркисян А.С., Кныш В.В., Лишаев П.Н. Реанализ сезонной и межгодовой изменчивости полей Черного моря за 1993 – 2012 гг. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.– 2016.– т.52, № 4.– С.475-487.
7. Гандин Л.С., Каган Р.А. Статистические методы интерпретации метеорологических данных.– Л.: Гидрометеиздат, 1976.– 357 с.

Материал поступил в редакцию 01.12.2016 г.
После доработки 29.05.2017 г.

P. N. Lishaev

APPLICATION OF THE THREE DIMENSIONAL TEMPERATURE AND SALINITY FIELDS RECONSTRUCTED USING *ARGO* BUOY DATA AND ALTIMETRY IN OPERATING SYSTEM OF DIAGNOSIS AND PROGNOSIS OF THE BLACK SEA

The technique of recovery and algorithm for assimilation of daily three-dimensional fields of temperature and salinity, which will use in the system of diagnosis and prediction of the Black Sea state, is proposed. To restore the three-dimensional fields the hydrological measurements of Argo buoys and an array of AVISO sea level anomalies for 2012 were used. The assimilation of the temperature and salinity fields is allowed to reproduce the average stratification of the basin waters more qualitatively. The statistical parameters of the accuracy of the restored fields of temperature and salinity are estimated.

KEYWORDS: altimetry, Argo buoys, temperature, salinity, Black Sea, small contact observations, assimilation, diagnosis, forecast