

С.Г.Демышев, О.А.Дымова

Морской гидрофизический институт НАН Украины, г.Севастополь

**ТЕСТИРОВАНИЕ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ МГИ НАН УКРАИНЫ
НА ОСНОВЕ ПРОГНОСТИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ЦИРКУЛЯЦИИ
ЧЕРНОГО МОРЯ В ПЕРИОД 2007 – 2008 ГГ.**

Для проверки модели проведен численный прогностический эксперимент с реальным атмосферным воздействием для периода 2007 – 2008 гг. Результаты расчетов сопоставлялись с данными наблюдений, которые включали спутниковую температуру поверхности моря и данные буёв-профилемеров *ARGO*. Анализ профилей температуры при сравнении с данными буёв-профилемеров *ARGO* показал, что в верхнем перемешанном слое наблюдаются наибольшие отличия между значениями температуры, с глубиной разница между модельными и натурными данными уменьшается. Расчетные значения солёности соответствуют данным наблюдений по всей глубине. Ниже 300 м рассчитанная температура и солёность практически не отличаются от измеренных значений.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *Черное море, циркуляция, численное моделирование, температура, солёность, данные измерений.*

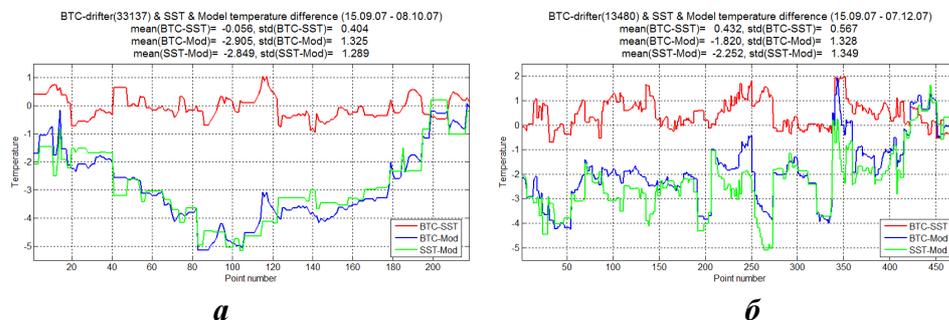
Постановка задачи. С помощью численной нелинейной термогидродинамической модели МГИ НАНУ [1] проведен прогностический эксперимент без ассимиляции данных наблюдений с реальным атмосферным воздействием на период с 1 января 2007 г. по 31 декабря 2008 г. Расчет был выполнен при следующих условиях. В начальный момент времени использованы трехмерные поля температуры, солёности, горизонтальных скоростей течений и уровень, соответствовавшие 31 декабря 2006 г. На поверхности моря каждые сутки задавались поля тангенциального напряжения трения ветра, потоки тепла, осадки и испарение. При проведении расчетов граничные поля линейно интерполировались на каждый момент времени. Для задания температуры, солёности и скорости в устьях рек и проливах использовались климатические данные. В расчете принималось, что в верхне-босфорском течении температура и солёность та же, что и в море; в нижне-босфорском потоке солёность равнялась 35 ‰ и температура 16°С, что соответствует характеристикам вод Мраморного моря. Коэффициенты турбулентности по вертикали вычислялись в соответствии с параметризацией Меллора-Ямады 2.5 [2]. Коэффициенты горизонтальной турбулентной вязкости и горизонтальной турбулентной диффузии равны соответственно:

$$\nu^H = 10^{17} \text{ см}^4 \text{ с}^{-1}, \quad \kappa^H = 10^{16} \text{ см}^4 \text{ с}^{-1}.$$

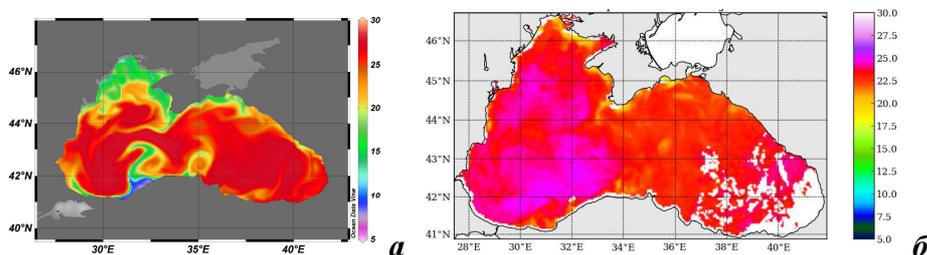
Расчеты проводились на горизонтальной сетке 5 × 5 км (238 × 132 точки), по вертикали использовалось 38 горизонтов, шаг по времени равнялся 5 мин. Интегрирование проводилось до 31 декабря 2008 г. В результате численного эксперимента были получены трехмерные поля термогидродинамических характеристик на каждые сутки периода с 1 января 2007 г. по 31 декабря 2008 г.

Спутниковая температура поверхности моря (SST). В банке данных МГИ НАНУ имеются данные о температуре поверхности моря, полученные со спутников NOAA. Так как значения SST по объективным причинам отсутствуют для каждой точки модельной сетки, то сопоставление спутниковой и модельной температуры проводилось в точках, где имелись также данные о температуре поверхности, полученные при помощи дрейфующих буёв с термокосой [3]. Рассмотрены данные за период с 15 сентября 2007 г. по 7 декабря 2007 г., все измерения выполнены в районе ОЧТ. В каждой точке, где проводились замеры, рассчитаны разницы между дрейферными (BTC), модельными (Mod) и спутниковыми (SST) данными. Результаты показаны на рис.1. Видно, что спутниковая и дрейферная температура (красная кривая) хорошо согласуется между собой: в среднем разница составляет $0,5^{\circ}\text{C}$, а СКО – $0,4 - 0,5^{\circ}\text{C}$. Значения невязки между BTC-Mod (синяя кривая) и SST-Mod (зеленая кривая) в основном отрицательны, следовательно, модельная температура превышает как спутниковую, так и дрейферную температуру. СКО модельных данных от спутниковых и дрейферных равно $\approx 1,3^{\circ}\text{C}$. Для дрейфера № 33137 (рис.1, а) максимальные отклонения модельной температуры соответствуют 28 – 29 сентября 2007 г. В это время дрейфер двигался вдоль свала глубин в западной части моря и в поле SST наблюдалась зона более холодных вод. Можно предположить модель не воспроизвела подъем холодных вод с нижележащих слоев, поэтому модельная температура в слое 20 – 40 м значительно завышена по сравнению с данными дрейфующего буя. Для дрейфера № 13480 (рис.1, б) наибольшие значения невязки соответствуют 19 октября 2007 г. В это время дрейфер попал в антициклонический круговорот – область, которая характеризуется опусканием поверхностных вод. После 22 ноября 2007 г. (начиная с 338 точки) дрейфер двигался вдоль Анатолийского побережья между 32° и 38° в.д. Из рис.1, б видно, что разница между модельными значениями температуры и данными наблюдений уменьшается, что свидетельствует о высоком качестве получаемых результатов для прибрежных зон моря.

По картам SST были выявлены нетипичные особенности температурного режима Черного моря и проверялась способность модели воспроизводить аномалии температуры. Для этого были построены пространственные распределения модельных значений температуры на верхнем расчетном гори-



Р и с . 1 . Разница между (BTC-SST), (BTC-Mod) и (SST-Mod) на поверхности моря по данным буёв № 33137 (а) и № 13480 (б).



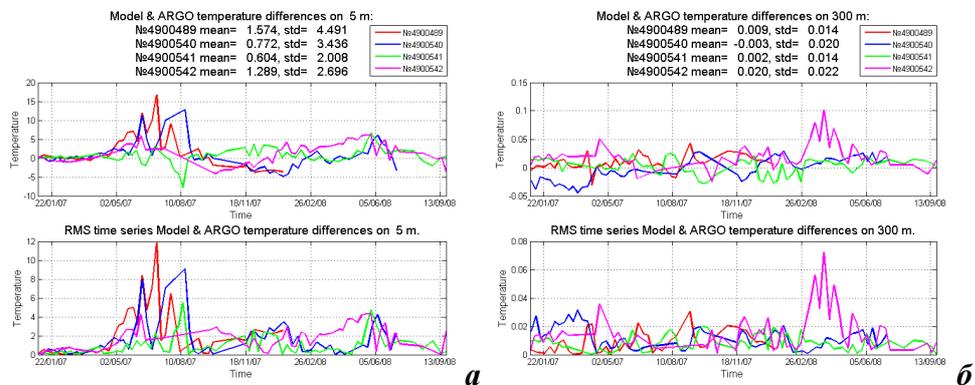
Р и с . 2 . Температура поверхности моря 8 июля 2008 г. по модельным (а) и спутниковым (б) данным.

зонте и проведено сравнение с полями *SST*. Выявлено, что качественно модель воспроизводит апвеллинги, подъемы вод в циклонах и другие особенности. Однако количественные характеристики расходятся для различных ситуаций. В качестве примера на рис.2 представлены поля температуры поверхности моря, полученные по модели и по данным спутника. На обеих картах наблюдается апвеллинг у берегов Крыма и на северо-западе, но если по модельным данным температура там изменяется примерно от 15 до 17° С (рис.2, а), то по спутниковым – от 18 до 20° С (рис.2, б). При этом следует учесть, что модельные данные представлены в верхнем расчетном боксе, толщина которого составляет 2,5 м.

Данные буёв-профиломеров *ARGO*. Вдоль траекторий движения четырех буёв-профиломеров *ARGO* [4] были построены профили модельных температуры и солёности, временные ряды их разницы и среднеквадратических отклонений на характерных горизонтах: 3 м – поверхность моря, верхний перемешанный слой, 50 м – нижняя граница верхнего перемешанного слоя, холодный промежуточный слой, 150 м – слой постоянного пикноклина, 300 м – нижняя граница слоя постоянного пикноклина, 1000 м – глубинные воды.

Рассмотрим результаты сравнения данных по температуре. На рис.3 представлены временные ряды невязки температуры и СКО на горизонте 5 и 300 м. Верхний перемешанный слой отличается наибольшими расхождениями значений температуры. В большинстве случаев (рис. 3, а) модельная температура превышает измеренные значения: средняя по времени невязка положительна. С января по май 2007 г. наблюдаются минимальные расхождения между натурными и модельными результатами. Отметим, в этот период траектории буёв №№ 4900489 и 4900542 проходили близко к берегу в юго-восточной части моря, что свидетельствует о репрезентативности модели в мелководных районах.

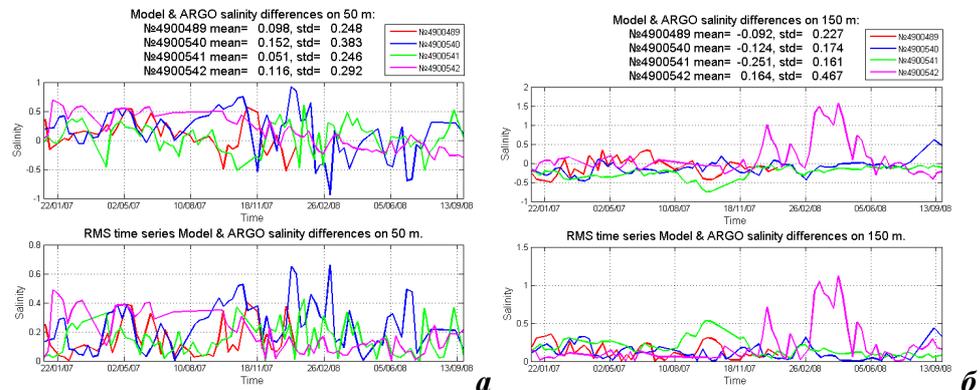
Летом 2007 г. для буёв №№ 4900489 и 4900540 наблюдаются максимальные отличия в верхнем перемешанном слое. Однако, анализ вертикальных профилей температуры, а также сопоставление с картами *SST* позволяет отнести эти отклонения к ошибке измерений. Если исключить заведомо ошибочные значения, то разница температур изменяется в пределах 4 – 5° С. С глубиной отличия уменьшаются: на горизонте 50 м невязки температуры лежат в интервале – 1,5 – 2° С, на 150 м – от – 0,2 до 0,2° С. Таким образом, в глубоководной части моря модель воспроизводит температуру вод моря в соответствии с данными наблюдений (рис.3, б).



Р и с . 3 . Временные ряды невязок температуры и СКО на горизонте 3 (а) и 300 м (б).

Аналогичный анализ был проведен и для солёности. Сравнение рассчитанных и натуральных профилей показало, что модель лучше воспроизводит солёность, чем температуру, т.к. максимальные отличия по всей глубине не превышают 1,5‰. В верхнем перемешанном слое модельные данные хорошо соответствуют данным наблюдений, модельная солёность отличается от измеренной в среднем на 0,5 ‰, СКО 0,4 ‰. Наибольшая разница между данными выявлена в слое 50 – 150 м. Временные ряды разницы между модельной и измеренной солёностью и СКО представлены на рис.4 для горизонтов 50 и 150 м.

Из рис.4, а видно, что на глубине 50 м значительная изменчивость невязки наблюдается для данных, полученных с буя № 4900540 (синяя кривая) с конца ноября 2007 г. по февраль 2008 г. В это время траектория дрейфера проходила вдоль струи ОЧТ в северо-восточной части моря. Интенсификация ОЧТ в холодный сезон приводит к формированию фронтальных зон в полях температуры и солёности и при попадании буя во фронтальную зону возрастают ошибки моделирования. В слое постоянного пикноклина расхождение между модельными и натурными данными минимально, за исключением значений, полученных с буя № 4900542 (рис.4, б фиолетовая кривая) с марта по апрель 2008 г., когда его траектория проходила в юго-западном углу моря – зоне интенсивной мезомасштабной изменчивости. С увеличением глубины разница между модельными и измеренными значениями солёности уменьшается и на горизонтах ниже 300 м данные практически совпадают.



Р и с . 4 . Временные ряды невязок солёности и СКО на горизонте 50 (а) и 150 м (б).

Выводы. Проведен численный прогностический эксперимент на 2007 – 2008 гг. Модель адекватно воспроизводит известные пространственные особенности циркуляции Черного моря и сезонную изменчивость термохалинных полей. На вертикальных разрезах в поле температуры холодный промежуточный слой прослеживается в течение всего года. Вблизи западного и восточного материковых склонов его границы несколько заглублены. В целом изменчивость глубины залегания ХПС хорошо отвечает данным наблюдений. Проведено сравнение модельных профилей температуры и солёности с данными наблюдений, их изменчивости со временем на характерных горизонтах, построены временные ряды средних и среднеквадратических отклонений. Анализ показал, что модельная температура на поверхности моря завышена по сравнению со спутниковой и полученной с дрейфующих буй в среднем на 2 °С, особенно в области свала глубин в северо-западной части моря. В теплое время года модельные профили температуры отвечают данным *ARGO*, в холодное – в верхнем 100-м слое данные отличаются. Модельные значения солёности соответствуют данным наблюдений по всей глубине. Ниже 300 м рассчитанные температура и солёность практически не отличаются от измеренных значений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демьяшев С.Г., Коротаев Г.К. Численная энергосбалансированная модель бароклинных течений океана на сетке C/τ / Численные модели и результаты калибровочных расчетов течений в Атлантическом океане.– М.: ИВМ РАН, 1992.– С.163-231.
2. Mellor G.L., Yamada T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems // *Rev. Geophys. Space Phys.*– 1982.– v.20, № 4.– P.851-875.
3. Толстошеев А.П., Коротаев Г.К., Лунев Е.Г. Термопрофилирующий дрейфующий буй // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.*– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2005.– вып.11.– С.143-154.
4. <http://www.argo.ucsd.edu>

Материал поступил в редакцию 25.08.2013 г.

АНОТАЦІЯ Для перевірки моделі проведено чисельний прогностичний експеримент з реальним атмосферним впливом для періоду 2007 – 2008 рр. Результати розрахунків зіставлялися з даними спостережень, які включали супутникову температуру поверхні моря і дані буйів-профілемерів *ARGO*. Аналіз профілів температури при порівнянні з даними буйів-профілемерів *ARGO* показав, що у верхньому перемішаному шарі спостерігаються найбільші відмінності між значеннями температури, з глибиною різниця між модельними і натурними даними зменшується. Розрахункові значення солоності відповідають даним спостережень по всій глибині. Нижче 300 м розраховані температура і солоність практично не відрізняються від вимірених значень.

ABSTRACT The prognostic numerical experiment with real atmospheric forcing for the period 2007 – 2008 was carried out for testing model. The results were compared with observations which contained the sea surface temperature and the data from buoys *ARGO*. Analysis of the temperature profiles shown that the greatest differences between the temperature values were obtained in the upper mixing layer. The difference between the model and the measured data was decreased with depth. Calculated values of salinity are consistent with observations over the entire depth. 300 m below the calculated temperature and salinity differ a little from measured values.