

А.Н. Лукьянова¹, А.В. Багаев¹, Т.В. Пластун¹,
Н.В. Маркова¹, В.Б. Залесный², В.А. Иванов¹

¹Морской гидрофизический институт РАН, г. Севастополь

²Институт вычислительной математики РАН, г. Москва

ИССЛЕДОВАНИЕ ГЛУБОКОВОДНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ ЧЕРНОГО МОРЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И НАТУРНЫМ ДАНЫМ: ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ИВМ РАН И СРАВНЕНИЕ С ДАННЫМИ БАНКА ДАННЫХ МГИ РАН

Проведен анализ результатов численных экспериментов по моделированию климатической циркуляции Черного моря, выполненных на основе термогидродинамической модели Черного и Азовского морей Института вычислительной математики РАН (ИВМ). Построены карты течений и вертикальные разрезы в поле температуры. Показано, что модель хорошо воспроизводит основные элементы циркуляции вод, а их вертикальная термохалинная структура согласуется с данными среднепогодных наблюдений.

Впервые рассмотрена совокупность измерений из Банка данных (БД) Морского гидрофизического института РАН (МГИ) и результатов климатического расчета с применением численных моделей ИВМ и МГИ, обобщенная и приведенная к единым пространственным координатам. Проведен анализ данных о скоростях и направлениях течений на глубинах 500, 750 и 1000 м. Отмечена характерная неустойчивость направления измеренных течений, наиболее резко проявляющаяся для точек над свалом глубин, и высокая дисперсия при осреднении амплитуд. Обе модели показали гораздо более устойчивую структуру поля скоростей. Модель ИВМ в ряде случаев точнее воспроизводит направление течений относительно БД, но для многих точек занижает амплитуды модуля скорости. Это может быть объяснено недостаточным разрешением в описании рельефа дна Черного моря, сравнительно низкими энергиями климатического поверхностного форсинга и отсутствием ассимиляции профилей климатической температуры и солености.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: численное моделирование, глубоководная циркуляция, база данных, Черное море

Модель гидродинамики Черного и Азовского морей Института вычислительной математики РАН (ИВМ) основана на системе примитивных уравнений, записанных в сферической системе координат с учетом приближений гидростатики и Буссинеска. В качестве вертикальной координаты в модели используется безразмерная переменная $\sigma \in [0, 1]$:

$$\sigma = \frac{z - \zeta}{H - \zeta},$$

где ζ – отклонение уровня моря от его невозмущенного состояния, H – глубина моря в состоянии покоя, z – направленная вниз физическая вертикальная координата с началом на невозмущенной поверхности моря [1, 2]. Уравнения модели записываются в симметризованной форме и приведены в [2].

© А.Н. Лукьянова, А.В. Багаев, Т.В. Пластун,
Н.В. Маркова, В.Б. Залесный, В.А. Иванов, 2016

В численной реализации модели используются методы многокомпонентного расщепления по физическим процессам и геометрическим координатам, применение которых существенно увеличивает экономичность расчётов [3].

Расчетная область, аппроксимирующая акваторию Черного и Азовского морей, расположена от $27^{\circ}26'60''$ до $41^{\circ}45'00''$ в.д. и от $40^{\circ}54'36''$ до $47^{\circ}16'12''$ с.ш. Пространственное разрешение модели составляет $(0^{\circ}3') \times (0^{\circ}2'24'')$ по долготе и широте соответственно, что составляет ~ 4 км по горизонтальным координатам. По вертикали задается 40 неравномерно распределенных по глубине σ -уровней. Шаг расчета по времени – 5 минут. Топография дна, начальные и граничные условия приведены в [1].

Для расчета атмосферного воздействия в модели ИВМ используется форсинг по данным *CORE* [4]. Пространственное разрешение данных *CORE* составляет $1,825^{\circ}$ по долготе (192 точки) и неравномерно по широте (94 точки).

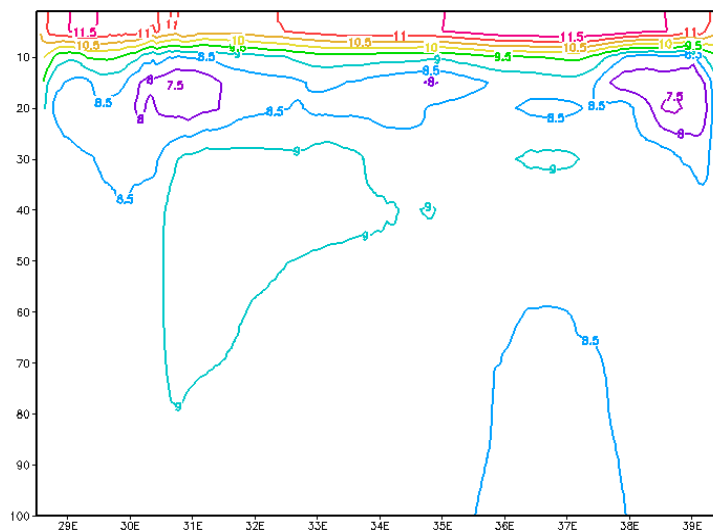
Проводился численный эксперимент сроком на 4 года. Запись данных для анализа производилась на последний год расчета каждые 7 дней.

Модель хорошо воспроизводит важный элемент термохалинной структуры Черного моря – холодный промежуточный слой [5] (рис.1). В поле поверхностной циркуляции определяются характерные черты Основного черноморского течения. Циркуляция в верхних слоях циклоническая (рис.2, *вверху*). На глубинах более 750 м в областях наибольшего градиента дна отмечены узкие относительно интенсивные течения (10 – 20 см/с), направленные против основного потока (рис.2, *внизу*), подробнее их исследование приводится в [6].

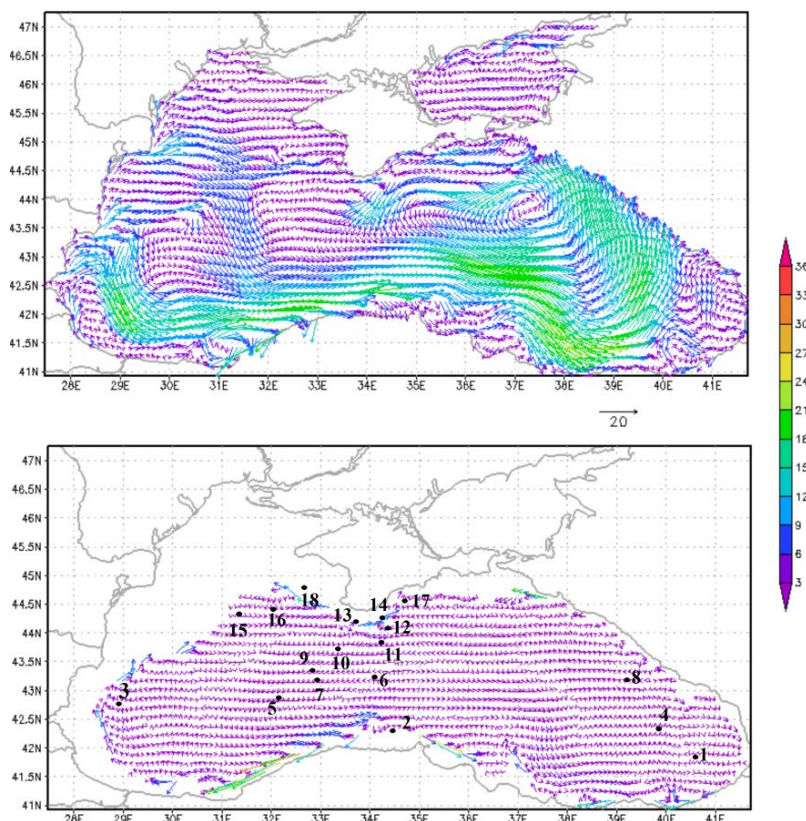
В модели МГИ в качестве вертикальной координаты используется физическая координата z , поэтому аппроксимация рельефа в моделях ИВМ и МГИ различна, что является важным аспектом при исследовании глубоководной циркуляции и сравнении результатов. Атмосферный форсинг для проведения климатического эксперимента модели МГИ строился синтезировано, специально для черноморского региона. Для расчета на поверхности моря использовалось касательное напряжение ветра на каждые сутки года, полученное по распределениям приземного давления [7]. Поток тепла на поверхности моря задавался в соответствии с [8], поля осадков и испарений – согласно [9]. Обе модели с использованием соответствующих атмосферных форсингов показывают адекватное воспроизведение циркуляции в верхних слоях [10].

Была произведена выборка измерений глубоководных течений в Черном море из Банка данных МГИ (БД МГИ). Выборка содержит ретроспективные данные о годе, месяце, широте, долготе, горизонте, направлении и скорости течений. Всего 21798 измерений за годы: 1960, 1975, 1988, 1991, 1992 гг. Проведено межгодовое осреднение данных в точках измерений на разных горизонтах. Построены карты, визуализирующие направление и скорость течений, на горизонтах 500, 750, 1000 и 1500 м по данным БД МГИ.

Для получения наибольшей достоверности из модельных данных были выбраны точки с одинаковыми глубинами и координатами, близкими к координатам точек измерения БД МГИ. В этих же точках были получены данные численного расчета по численной модели МГИ для улучшения надежности валидации [11].



Р и с . 1 . Среднемесячное поле температуры ($^{\circ}\text{C}$) в марте на широтном разрезе вдоль $43,5^{\circ}$ с.ш. по данным численного расчета. Изотермы проведены каждые $0,5^{\circ}$.



Р и с . 2 . Среднемесячное поле скорости (см/с) в феврале на глубинах 5 (вверху) и 500 (внизу) м. Цифрами отмечено положение точек из БД МГИ.

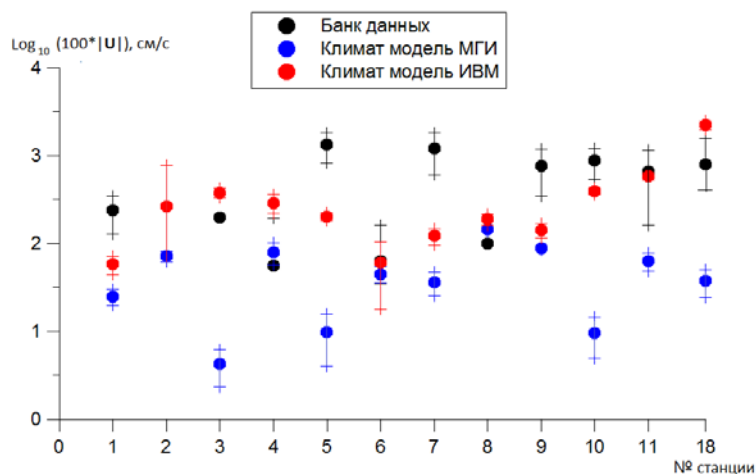


Рис. 3. Сравнительный график модулей скоростей в полулогарифмической шкале по результатам численного моделирования по моделям МГИ (синий) и ИВМ (красный) и данным БД МГИ (черный), глубина 1000 м.

Было произведено два варианта подбора точек: в первом – выбиралось две точки по четырем направлениям сетки из данных каждой модели, близлежащие к каждой точке из БД МГИ. Во втором варианте выбиралась одна точка для каждого направления. В обоих случаях средние скорости и направления течений различались в пределах погрешностей, поэтому для валидации моделей был выбран второй вариант подбора точек.

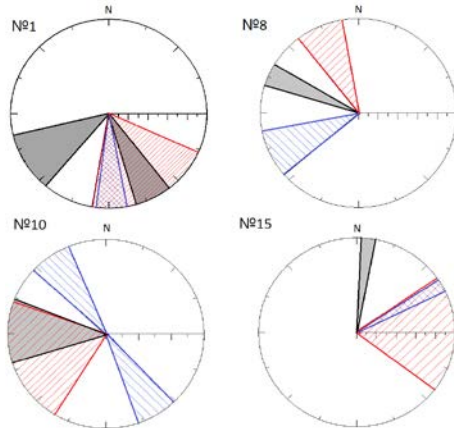


Рис. 4. Сравнительные диаграммы направления течений для различных точек на глубине 500 м по результатам моделирования (модели МГИ (синий сектор) и ИВМ (красный сектор)) и данным БД МГИ (серый сектор). Ширина сектора соответствует величине дисперсии. Цифрами показаны номера точек из БД МГИ.

Сравнительный анализ модулей скоростей течений по модели ИВМ и данным БД МГИ показывает, что данные по скоростям течений модели ИВМ для ряда точек (в особенности, для горизонта 500 м) содержат меньшие по модулю скорости значения, чем данные БД МГИ (рис.3).

Это может быть объяснено сравнительно низкими энергиями заданного атмосферного воздействия. Кроме того, большинство точек, в которых наблюдаются отличия в значениях модулей скоростей, располагаются на свале глубин.

Сравнение направлений течений по данным БД МГИ и модели ИВМ показывает хорошее соответствие, подтверждая общий циклонический характер циркуляции и наличие противотечений в областях наибольшего градиента дна (рис.4, точки 1 и 15).

Работа Багаева А.В. и Лукьяновой А.Н. выполнена в МГИ при финансовой поддержке государства в лице Министерства образования и науки РФ в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 – 2020 годы» (уникальный идентификатор проекта RFMEFI57714X0110). Работа Марковой Н.В. выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №16-05-00264 "А".

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Zalesny V.B., Diansky N.A., Fomin V.V. et al* Numerical model of the circulation of the Black Sea and the Sea of Azov // *Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling.*– 2010.– v.25, № 6.– P.581-609.
2. *Залесный В.Б., Гусев А.В., Мошонкин С.Н.* Численная модель гидродинамики Черного и Азовского морей с вариационной инициализацией температуры и солености // *Изв. РАН. ФАО.*– 2013.– т.49, № 6.– С.699-716.
3. *Марчук Г.И.* Методы вычислительной математики.– СПб: Лань, 2009.– 608 с.
4. Он-лайн ресурс <http://data1.gfdl.noaa.gov/> (дата проверки: 26.01.2016)
5. *Иванов В.А., Белокопытов В.Н.* Океанография Черного моря.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011.– 212 с.
6. *Демьшев С.Г., Дымова О.А., Маркова Н.В., Пиотух В.Б.* Численные эксперименты по реконструкции глубинных течений в Черном море // *Морской гидрофизический журнал.*– 2016.– № 2.– С.38-52.
7. *Дорофеев В.Л., Коротаев Г.К.* Ассимиляция данных спутниковой альтиметрии в вихререзающей модели циркуляции Черного моря // *Морской гидрофизический журнал.*– 2004.– № 1.– С.52-68.
8. *Staneva J.V., Stanev E.V.* Oceanic response to atmospheric forcing derived from different climatic data sets. Intercomparison study for the Black Sea // *Oceanologia Acta.*– 1998.– 21, № 3.– P.383-417.
9. *Ефимов В.В., Тимофеев Н.А.* Теплобалансовые исследования Черного и Азовского морей.– Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 1990.– 237 с.
10. *Демьшев С.Г., Иванов В.А., Маркова Н.В., Черкесов Л.В.* Построение поля течений в Черном море на основе вихререзающей модели с ассимиляцией климатических полей температуры и солености // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.* – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2007.– вып.15.– С.215-226.
11. *Демьшев С.Г.* Численная модель оперативного прогноза течений в Черном море // *Изв. РАН. ФАО.*– 2012.– т.48, № 1.– С.1-13.

Материал поступил в редакцию 12.02.2016 г.

A.N.Lukyanova, A.V.Bagaev, T.V.Plastun,
N.V.Markova, V.B.Zalesny, V.A.Ivanov

THE BLACK SEA DEEP-WATER CIRCULATION RESEARCH BY RESULTS OF NUMERICAL MODELLING AND IN-SITU DATA: INM RAS MODEL NUMERICAL EXPERIMENT

The present work analyses the numerical experiments on the climatic circulation modeling run with a thermodynamic model of the Black Sea and the Sea of Azov developed by the Institute of Numerical Mathematics, RAS (INM). Maps of currents and vertical sections of temperature fields are given. The model is shown to reproduce the

main elements of water circulation well, while their vertical thermohaline structure agrees with the data from long-term observations.

The database query from Marine Hydrophysical Institute RAS (MHI) and results of climatic experiment with numerical models of INM and MHI are generalized and transferred to a unified grid. Information on amplitudes and directions of currents at 500, 750 and 1000 m is analyzed. The currents in question are characterized by high variance for averaged amplitudes and an unstable change of directions, which is most evident for the stations over continental slopes. The INM model is more accurate (compared to the database) when reproducing the currents direction, but, for many stations, it underscores the speed amplitudes. This might be explained by insufficient resolution for the Black Sea bathymetry description, relatively low energy for the surface forcing, and absence of climatic temperature and salinity profiles assimilation.

KEYWORDS: *numerical modeling, deep sea circulation, data base, the Black Sea*