

Н.В.Маркова, О.А.Дымова, С.Г.Демышев

Морской гидрофизический институт РАН, г.Севастополь

ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ МОРСКОГО ГИДРОФИЗИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ГЛУБОКОВОДНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ ЧЕРНОГО МОРЯ

Рассмотрены результаты численных экспериментов по реконструкции течений Черного моря ниже основного пикноклина (на глубинах более 300 м). Расчеты проведены на базе нелинейной z -координатной модели Морского гидрофизического института с учетом климатического атмосферного воздействия и данных атмосферного реанализа за 2006, 2010, 2013 гг. В полях скоростей на горизонтах ниже 1000 м обнаружено течение, распространяющееся вдоль свала глубин в противоположном Основному Черноморскому потоку направлении (противотечение). В климатических полях противотечение существует в весенне-летний период года в северной части бассейна. В полях, полученных с учетом атмосферного реанализа, противотечение в форме отдельных струй наблюдается также в других регионах моря во все сезоны.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *численное моделирование, глубинная циркуляция, климатические течения, противотечение, Черное море*

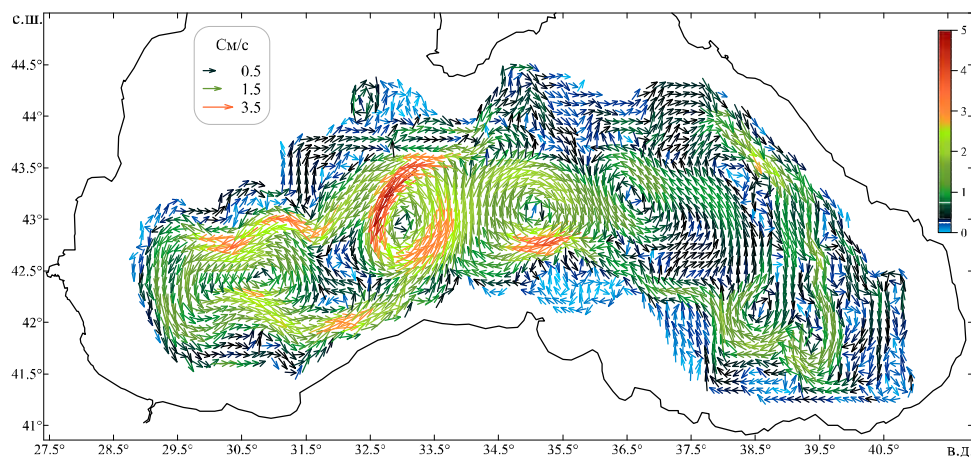
Введение. Несмотря на постоянно пополняемую базу натуральных наблюдений, отдельные районы Черного моря и особенно глубины ниже 300 м остаются недостаточно обеспеченными измерениями. Восстановление полной картины циркуляции только на их основе не дает удовлетворительного результата, и поэтому для изучения глубоководных течений необходимо применение математических моделей. Численное моделирование позволяет исследовать основные гидрофизические характеристики морской среды с высокой дискретностью по пространству и времени. В статье представлен численный анализ поля течений Черного моря ниже основного пикноклина на основе нелинейной z -координатной модели Морского гидрофизического института РАН [1].

Для получения трехмерных массивов полей течений, температуры, солёности и уровня моря было проведено два численных эксперимента: с климатическим атмосферным форсингом на сетке 5 км [2] и с использованием данных атмосферного реанализа *ALADIN* (для 2006 г.) [3] и *ERA-Interim* (для 2010 и 2013 гг.) на сетке 1,6 км.

При изучении реконструированных полей течений важно получить ответ на нерешенный вопрос о наличии глубинного противотечения антициклонической направленности на более низких по отношению к Основному Черноморскому течению (ОЧТ) горизонтах. В отдельных работах, например, [4, 5], представлены теоретические исследования, где показана возможность изменения знака завихренности в глубинных слоях. С развитием океанических моделей появилась возможность качественно воспроизводить трехмерную динамику вод. Так, например, на основе Бергенской модели в Московском государственном университете был проведен эксперимент [6], показавший существование в Черном море антициклонического противоте-

чения в климатических полях на глубине около 1500 м во все сезоны. Предварительные оценки климатического поля течений, полученного по модели Института вычислительной математики РАН [Ошибка! Источник ссылки не найден.], также указывают на присутствие антициклонической циркуляции в глубинных слоях моря. В то же время, результаты расчетов лагранжевых скоростей течений по данным буев Арго [8 – 10] не выявили наличия обратной ОЧТ циркуляции под основным пикноклином. Выполненные в [10] оценки средних скоростей глубинных течений показывают сопоставимые с результатами наших экспериментов величины средней скорости порядка 5 см/с, однако небольшое количество буев, дрейфовавших в субпикноклине в расчетный период (всего 16 шт. за 10-ти летний период с 2005 по 2015 г.) и достаточно большой период осреднения при вычислении скорости глубоководных течений (в несколько суток) не позволили в этом исследовании достаточно подробно воспроизвести пространственно-временные особенности глубинной циркуляции.

Результаты. В ходе анализа климатических течений на горизонтах 900 – 1800 м установлено, что в весенне-летний период вдоль свала глубин возникает поток антициклонической направленности. На рис.1 показано расположение этой струи на горизонте 1500 м: примерно от г.Варна на западе до северо-кавказского побережья на востоке, далее на юго-восток и затем в центральную часть моря вдоль Анатолийского берега, соединяясь в итоге с глубинным антициклоном в центральной части. В районе сужения свала глубин (долгота г.Ялта) одна ветвь потока уходит вправо и сразу объединяется с антициклоном. Характерные скорости в этом вихре на глубине 1800 м составляют 2 – 2,5 см/с, максимальные – около 4 см/с. Скорости самого течения по абсолютной величине довольно слабые, хотя и превышают фоновые значения на данном горизонте в 2 – 3 раза, составляя в среднем 1 см/с. Скорость течения усиливается до 2 – 2,5 см/с в зонах сужения свала глубин и уменьшается до 0,2 – 0,5 см/с при его расширении. В северо-восточной части моря отмечено проявление противотечения и на более высоких горизонтах, где оно характеризуется большими величинами скоростей. Так,



Р и с . 1 . Климатические течения (см/с) Черного моря 30 мая на горизонте 1500 м.

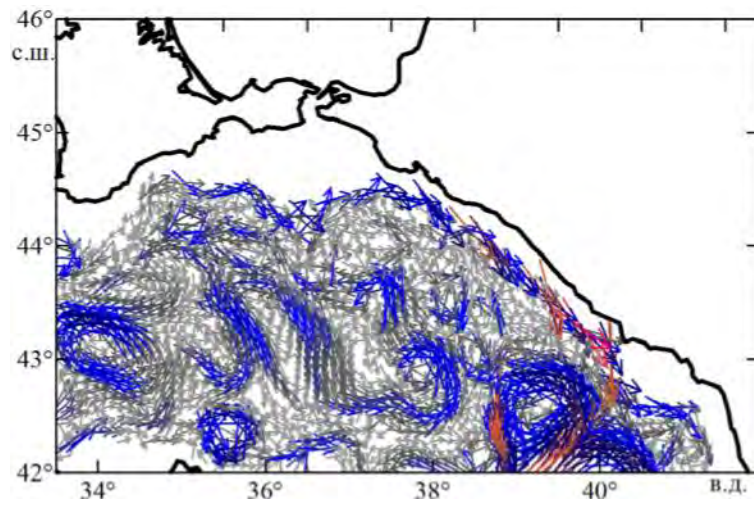
у кавказского побережья в районе Геленджика на глубинах 300 – 350 м и ниже течение существует с марта по июль и распространяется вдоль побережья на юго-восток со скоростями 2,5 – 4 см/с против направления ОЧТ. На этих горизонтах оно имеет длину около 70 км и ширину от 10 до 20 км.

Поскольку рассматриваемое поле течений является климатическим, полученные значения скоростей представляют собой некоторую вероятную оценку величины и направления вектора скорости. Поэтому можно предположить существование противотечения в определенные периоды года. Для подтверждения этой гипотезы была проанализированы результаты серии численных расчетов с реальным атмосферным воздействием и на сетке с более высоким разрешением.

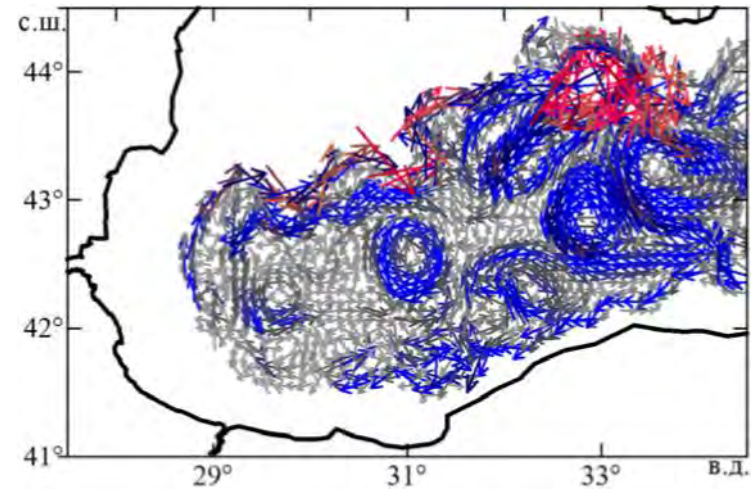
Исследование полей скорости, полученных с высоким горизонтальным разрешением и учетом реального атмосферного воздействия за 2006, 2010, 2013 гг., также показало существование течения антициклонической направленности на глубинах ниже 1000 м (рис.2). Для всех временных интервалов выявлены следующие характерные особенности. В виде непрерывного узкого потока, локализованного в северо-восточной части моря примерно между $34,5$ и 41° в.д., противотечение наблюдалось с конца мая по август. Его формирование начиналось в апреле южнее м.Меганом, где значительное сужение свала глубин приводит к увеличению скорости течений. Ширина течения составляла 5 – 8 км со средней скоростью 7 см/с. Максимальные скорости до 10 см/с наблюдались на свале глубин южнее Керченского п-ова и к югу от берегов Абхазии (рис.2, а) в июле и августе. Наибольшей интенсивности противотечение достигало в период ослабления основного циклонического круговорота, когда средняя скорость ОЧТ была 25 – 30 см/с. С увеличением глубины в северо-восточной части моря значение скорости уменьшалось до 4 – 5 см/с.

В слое 1500 – 1700 м обнаружены элементы противотечения в форме отдельных струй. Для 2006 и 2013 гг. на горизонте 1500 м наиболее ярко были выражены течения на свале глубин, примыкающем к северо-западному шельфу. Направленный на северо-восток поток со скоростями около 8 см/с наблюдался здесь с марта по июнь (рис.2, б). В поле скорости на глубине 1700 м в апреле – мае и августе – сентябре 2006 г. в южной части моря воспроизведено течение шириной около 5 км со скоростями в стрекне до 7 см/с, направленное на юго-запад (рис.2, в). Анализ карт течений за 2006 и 2010 гг. на горизонтах 1000 и 1500 м показал, что, в отличие от климатического расчета, противотечение периодически возникало и в зимние сезоны. В ноябре и декабре 2006 г. и в декабре 2010 г. на свале глубин у берегов северного Кавказа скорость противотечения достигала 4 – 5 см/с, а ширина потока местами увеличивалась до 10 – 12 км.

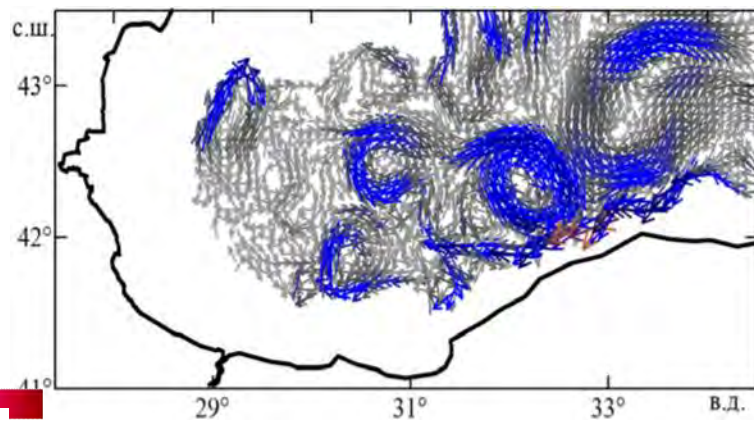
Выводы. В климатическом поле скорости на горизонтах ниже 1000 м в весенне-летний период существует противотечение, имеющее антициклоническую направленность. Оно формируется в районе болгарского побережья и достигает южной части моря, распространяясь на восток вдоль свала глубин. В расчетах с реальными атмосферными полями и на более мелкой сетке эта особенность также обнаружена. Кроме того, при учете реального форсинга противотечение воспроизводилось и в холодный период года.



a



б



в

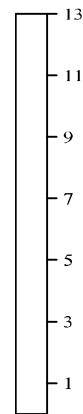


Рис. 2. Течения Черного моря (см/с), полученные с реальным форсингом: 24 июля 2006 г. на горизонте 1100 м (*a*), 23 мая 2013 г. на горизонте 1500 м (*б*), 20 августа 2006 г. на горизонте 1700 м (*в*).

Согласно расчету климатических полей, противотечение наиболее интенсивно в районе свала глубин северо-восточной части Черного моря. В марте – июле оно наблюдается под основным пикноклином на горизонтах 300 м и глубже. Целостность течения периодически нарушается мезомасштабными вихрями, формирующимися мористее свала глубин, ширина потока составляет около 20 км, а скорости достигают 4 см/с. По расчетам на 2006, 2010, 2013 гг. скорости течения выше климатических, в среднем они составили 7 см/с, а ширина потока меньше.

Представленные оценки сопоставимы с доступными натурными данными. Так, на полигоне Южного отделения Института океанологии РАН в районе Геленджика существование противотечения на глубинах 300 – 350 м было выявлено по результатам *CTD*-измерений в июне 1998 г. и июле 2004 г. [11]. А глубоководная съемка *ADCP*-зондом в июне 2011 г. напрямую показала наличие противотечения под ОЧТ в слое 500 – 900 м [12].

Отметим, что полученные результаты носят предварительный характер, так как численный эксперимент является только свидетельством о наличии такого течения. Для подтверждения полученных выводов необходимы прямые инструментальные измерения.

Работа выполнена по теме госзадания 0827-2014-0011 «Исследования закономерностей изменения состояния морской среды на основе оперативных наблюдений и данных системы диагноза, прогноза и реанализа состояния морских акваторий» (шифр «Оперативная океанография»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демьяшев С.Г., Коротаев Г.К. Численная энергосбалансированная модель бароклинных течений океана на сетке *C* / Численные модели и результаты калибровочных расчетов течений в Атлантическом океане.– М.: ИВМ РАН, 1992.– С.163-231.
2. Demyshev S.G., Ivanov V.A., Markova N.V. Analysis of the Black-Sea climatic fields below the main pycnocline obtained on the basis of assimilation of the archival data on temperature and salinity in the numerical hydrodynamic model // *Physical Oceanography*.– 2009.– v.19, № 1.– P.1-12.
3. Demyshev S.G., Dymova O.A. Numerical analysis of the mesoscale features of circulation in the Black Sea coastal zone // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*.– 2013.– v.49, № 6.– P.603-610.
4. Neumann G. Die absolute Topographie des physikalischen Meeresniveaus und die Oberflächenströmungen des Schwarzen Meeres // *Ann. D. Hydr. Und Marit. Meteorol.*– Heft.IX.– 1942.– P.265-282.
5. Булгаков С.Н., Коротаев Г.К., Уайтхэд Дж.А. Роль потоков плавучести в формировании крупномасштабной циркуляции и стратификации вод моря. Часть 1: теория // *Изв. АН. Физика атмосферы и океана*.– 1996.– т.32, № 4.– С.548-556.
6. Архипкин В.С., Косарев А.Н., Гиттиус Ф.Н., Мигали Д.И. Сезонная изменчивость климатических полей температуры, солёности и циркуляции вод Черного и Каспийского морей // *Вестник Московского университета. Серия 5 «география»*.– 2013.– № 5.– С.33-44.
7. Лукьянова А.Н., Багаев А.В., Пластун Т.В., Маркова Н.В., Залесный В.Б., Иванов В.А. Исследование глубоководной циркуляции Черного моря по результатам численного моделирования и натурным данным: Численные эксперименты

на основе модели ИВМ РАН и сравнение с данными Банка данных МГИ РАН // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря.– Севастополь, 2016.– вып.3.– С.9-14.

8. *Korotaev G., Oguz T., Riser S.* Intermediate and deep currents of the Black Sea obtained from autonomous profiling floats // *Deep-Sea Res. II.*– 2006.– v.53.– P.1901-1910.
9. *Герасимова С.В., Лемешко Е.Е.* Оценка скоростей глубоководных течений по данным ARGO // *Системы контроля окружающей среды.*– Севастополь, 2011.– вып.15.– С.187-196.
10. *Маркова Н.В., Багаев А.В.* Оценка скоростей глубоководных течений в Черном море по данным дрейфующих буев – профиломеров Argo // *Морской гидрофизический журнал.*– 2016.– № 3.– С.26-39.
11. *Демьяшев 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.
12. *Островский А.Г., Зацепин А.Г., Соловьев В.А., Цибульский А.Л., Швоев Д.А.* Автономный мобильный аппаратно-программный комплекс вертикального зондирования морской среды на заякоренной буйковой станции // *Океанология.*– 2013.– т.53, № 2.– С.1-10.

Материал поступил в редакцию 12.02.2016 г.
После доработки 07.10.2016 г.

N.V.Markova, O.A.Dymova, S.G.Demyshev

NUMERICAL EXPERIMENTS ON THE BLACK SEA DEEP-WATER CIRCULATION RESEARCH WITH THE MARINE HYDROPHYSICAL INSTITUTE OCEAN MODEL

Simulating results of the Black Sea deep-water current reconstruction are analyzed. Calculations are provided on the basis of the nonlinear z-coordinate Marine Hydrophysical Institute ocean model with taking into account the climatic atmospheric forcing and atmospheric reanalysis data for 2006, 2010 and 2013. In the simulated velocity fields at the depths more than 1000 m the current is detected to extend along the continental slope in the direction opposite to the Rim Current (countercurrent). In the climatic fields the countercurrent exists during the spring and summer in the north Black Sea. In the experiments with real atmospheric forcing the countercurrent is found as well, it exists as separate streams in various continental slope areas and at all seasons.

KEYWORDS: simulation modelling, deep circulation, climatic currents, countercurrent, Black Sea