

О.А.Дымова, Н.А.Миклашевская, Н.В.Маркова

*Морской гидрофизический институт РАН, г.Севастополь***ОСОБЕННОСТИ ГЛУБОКОВОДНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ
ЧЕРНОГО МОРЯ ЛЕТОМ 2013 Г.**

Приведены результаты прогностического численного эксперимента по моделированию циркуляции Черного моря в летний период 2013 г. Для моделирования используются гидродинамическая модель Морского гидрофизического института и атмосферный форсинг *ERA-Interim*. Проведено сравнение наблюдаемой и моделируемой температуры и солёности. Наибольшее внимание уделено структуре глубоководной циркуляции Черного моря. Детально изучены особенности поля течений на глубинах ниже основного пикноклина. Подтверждено, что поле глубинных скоростей содержит вихревые образования и течения, качественно и количественно отличающиеся от поверхностных. По результатам расчета выявлены вихри, которые на поверхности моря обнаруживаются нерегулярно, тогда как от нижней границы основного пикноклина (на глубинах 150 – 300 м) их структура прослеживается отчетливо и сохраняется до дна без ослабления скорости. Кроме того, летом 2013 г. в некоторых районах вдоль континентального склона Черного моря формируются квазипериодические узкие глубинные течения, имеющие антициклоническую направленность (противотечения).

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *моделирование, глубоководная циркуляция, течения, противотечения, вихри, температура, солёность, измерения, Черное море*

doi: 10.22449/2413-5577-2019-1-40-47

Введение. Четкого представления о характере глубоководной циркуляции Черного моря и ее мезомасштабной структуре до сих пор не сложено. В целом известно, что общая структура глубоководной циркуляции не идентична поверхностной. Циклонические течения и круговороты в восточной и западной частях моря, характерные для поверхностного слоя, там не поддерживаются, а превалируют более мелкие динамические структуры. Скорости течений значительно слабее, чем на поверхности. Описание отдельных динамических структур (вихрей, течений) представлено главным образом в работах, основанных на результатах научных экспедиций [1, 2].

В отдельных вопросах, касающихся пространственно-временной изменчивости глубоководных гидрофизических полей Черного моря, мнения различных исследователей противоречивы. В настоящее время большинство авторов придерживаются точки зрения, что общее направление глубинной циркуляции является циклоническим. Однако в некоторых работах по изучению глубоководных течений были сделаны предположения о существовании циркуляции, обратной поверхностной. В дальнейшем прямые измерения глубинных течений [3] подтвердили эти выводы. В [4, 5] показана возможность существования противотечения на глубинах основного пикноклина по результатам лабораторных экспериментов и оценкам скорости на основе

© О.А.Дымова, Н.А.Миклашевская, Н.В.Маркова, 2019

Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2019. вып.1. С.40-47.

натурных данных. В то же время, при анализе траекторий профилирующих буев [6, 7] наличия подобных противотечений установлено не было.

Детализация динамики Черного моря на больших глубинах позволит не только внести вклад в теоретические представления, но и расширить понимание гидрофизических процессов в морской среде в целом. Представленная работа фокусируется на изучении глубоководной циркуляции Черного моря и выполняется на основе численного моделирования. В настоящее время численное моделирование является наиболее доступным и информативным методом получения данных о трехмерных гидрофизических полях, позволяющим восстановить их структуру с хорошей дискретностью в пространстве и времени.

Расчет циркуляции Черного моря проводился с использованием численной модели Морского гидрофизического института (МГИ) [8]. Расчетная сетка имеет разрешение 1,6 км по горизонтали, 27 горизонтов по вертикали. В качестве атмосферного форсинга используются данные реанализа *ERA-Interim* [9], который включает в себя потоки тепла, влаги и скорость приводного ветра. Коррекция рассчитываемого поля температуры путем ассимиляции температуры поверхности моря или любыми другими методами не выполняется. Модель воспроизводит трехмерные поля температуры, солёности, скорости и ряд других параметров морской среды.

Моделирование проводилось для периода с мая по сентябрь 2013 г. Для этого периода были доступны данные глубоководных судовых наблюдений температуры и солёности к юго-западу от Крымского п-ова (76-й рейс НИС «Профессор Водяницкий») и данные девяти буев *ARGO*, проводивших профилирование до горизонта 2000 м [10]. Карта расположения станций, где были выполнены рассматриваемые профили, представлена на рис. 1.

Сравнение натуральных и модельных данных. Полученные в результате моделирования поля температуры и солёности сравнивались с соответствующими

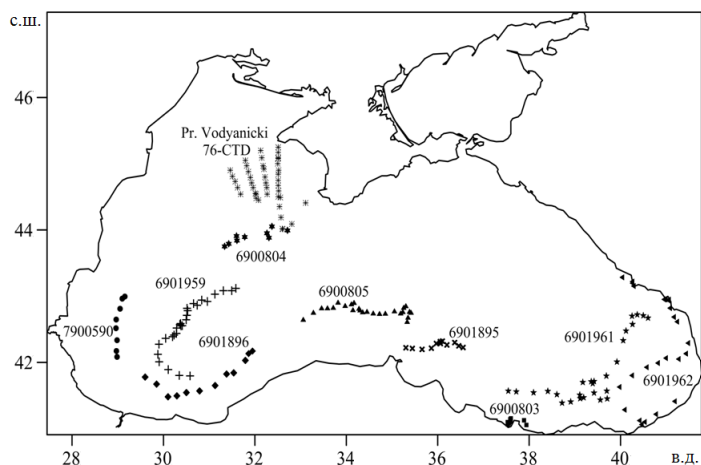


Рис. 1. Карта глубоководных станций, выполненных в 76-м рейсе НИС «Профессор Водяницкий» (19 – 23 сентября 2013 г.) и буями *ARGO* (май – сентябрь 2013 г.). Цифрами и символами обозначены номера и траектории буев *ARGO* соответственно.

Т а б л и ц а . Средние и среднеквадратические (СКО) отклонения температуры и солёности от данных измерений летом 2013 г.

глубина, м	отклонение температуры, °С		отклонение солёности, ‰	
	среднее	СКО	среднее	СКО
0 – 5	– 4,7	1,0366	0,106	0,0975
5 – 30	0,94	0,9518	0,087	0,129
30 – 100	0,87	0,1721	0,308	0,1476
100 – 300	0,169	0,0669	0,256	0,1445
300 – 800	0,005	0,0203	– 0,008	0,0596
800 – 1500	– 0,031	0,0423	0,014	0,0197

щими данными натурных наблюдений. Всего рассмотрено 193 профиля (из них 42 – данные 76-го рейса НИС «Профессор Водяницкий», 151 – полученные с помощью буев *ARGO*). Для количественной оценки результатов расчета были определены средние и среднеквадратические отклонения модельных значений температуры и солёности от измеренных, которые представлены в таблице. Знак «минус» означает, что модельные параметры выше измеренных.

Для поверхностного слоя 0 – 5 м имеются только локальные данные судовых наблюдений к юго-западу от Крыма. Здесь среднее отклонение составляет – 4,7° С для температуры и 0,106 ‰ для солёности. В данном случае высокая погрешность моделирования поверхностной температуры обусловлена наличием в районе измерений области пониженных значений температуры (по данным спутниковых наблюдений), которая не воспроизведена моделью вследствие отсутствия усвоения *SST*. Для нижележащих горизонтов – по результатам всех наблюдений – максимальные различия между модельными и натурными данными имеют место в слое 5 – 30 м для температуры (0,94° С) и в слое 30 – 100 м для солёности (0,308 ‰). На глубинах 300 – 1500 м модельные и измеренные данные наиболее близки. Здесь средние отклонения на порядок меньше, чем в верхних слоях, и не превышают 0,031° С для температуры и 0,014 ‰ для солёности. Таким образом, установлено вполне удовлетворительное качество воспроизведения моделью термохалинной структуры глубинных вод Черного моря для рассматриваемого летнего периода.

Структура глубоководной циркуляции. Ситуация с отсутствием измерений скорости на глубинах более 300 м является, к сожалению, типичной. Непосредственных измерений скорости течений при выполнении глубоководных судовых наблюдений не производилось, а с помощью буев *ARGO* они не предусмотрены конструктивно. Поэтому особенности глубоководной циркуляции в период с мая по сентябрь 2013 г. в данной работе рассматриваются только на основе результатов моделирования. При этом установленная достаточно низкая погрешность воспроизведения численной моделью глубинных температуры и солёности позволяет предположить хорошее качество реконструкции согласованного с ними поля течений. Примеры модельных полей течений на горизонтах 5, 300 и 1700 м для конца июня и начала августа представлены на рис.2 и 3 соответственно.

По результатам моделирования поля скорости было получено, что в рассматриваемый теплый период 2013 г. Основное черноморское течение (ОЧТ) сформировано как единый циклонический круговорот, распространяющийся над свалом глубин. Его максимальные скорости в поверхностном слое превышают 40 см/с, средние скорости составляют 20 – 25 см/с. В результате меандрирования ОЧТ справа от стрежня формируются преимущественно антициклонические мезомасштабные вихри, которые со временем смещаются по направлению течения. Основные районы их образования – центральная часть Анатолийского побережья и район Сухуми (м.Пицунда). ОЧТ отчетливо прослеживается до горизонта 500 м. На этой глубине в конце мая в западной и южной частях моря его ширина составляет порядка 35 км, скорости 8 – 10 см/с. У северной и восточной границ бассейна оно несколько слабее, шириной 20 – 22 км с характерными скоростями 6 – 8 см/с. Здесь же выявлено эпизодическое уменьшение скорости течения до 4 см/с.

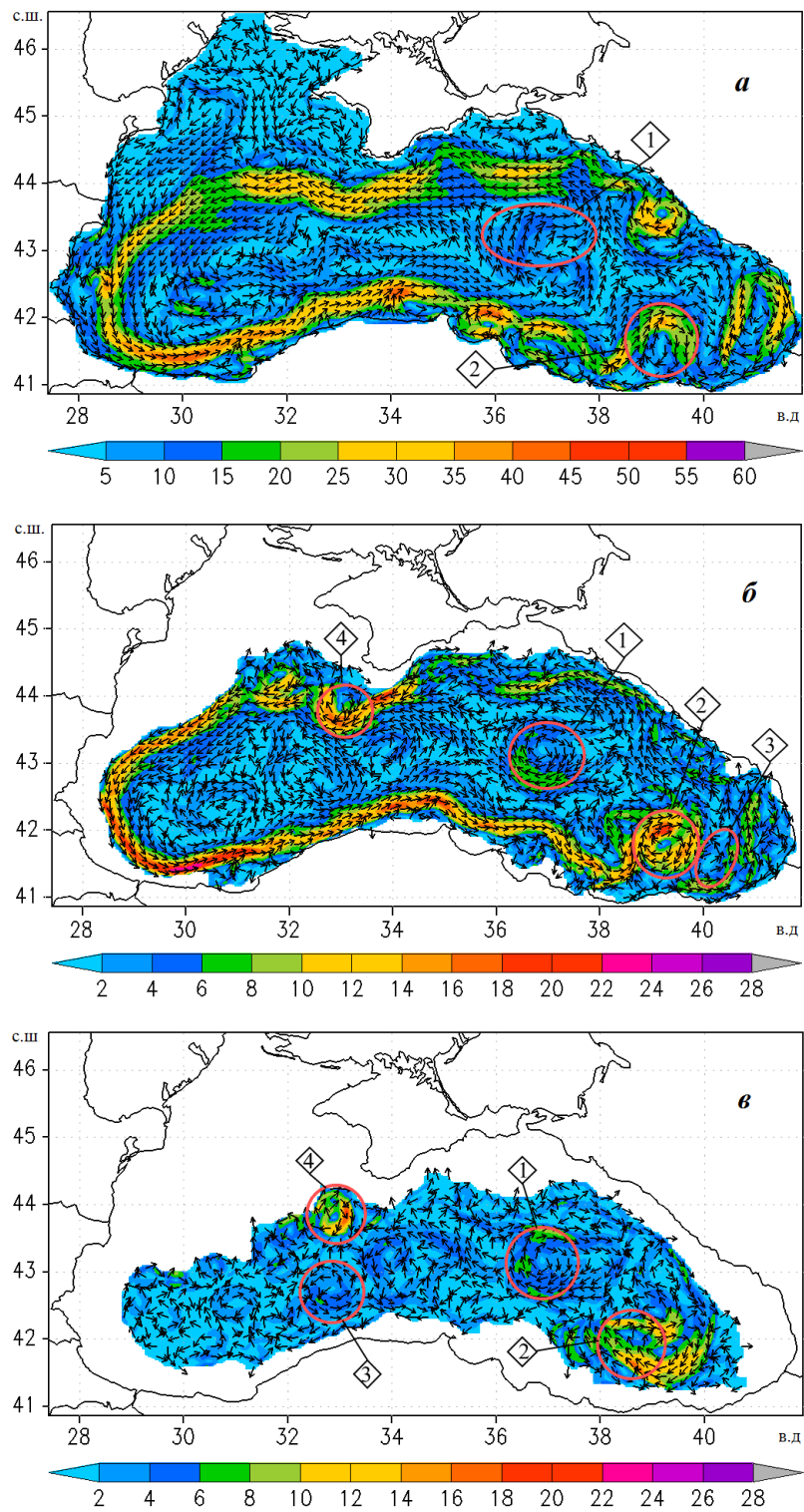
В центре восточной части моря прослеживается антициклонический вихрь диаметром примерно 1° (рис.2; 3, область 1), центр которого меняет положение от 38° в.д. в мае до 36° в.д. в начале сентября. За 3,5 месяца вихрь вытягивается в зональном направлении и смещается к западу. Наиболее развитой стадии он достигает к концу июля и сохраняет свои размеры и скорости до конца августа. В верхних слоях антициклон прослеживается нерегулярно. Начиная с горизонта 150 м, вихрь отчетливо визуализируется до глубины 2100 м. Размеры его на глубинах более 900 м превосходят размеры в верхней части в 1,5 – 2 раза и составляют порядка 2° . Скорости на горизонтах до 900 м не превышают 8 см/с, на больших глубинах они усиливаются до 10 – 12 см/с. В конце сентября, на момент окончания расчета, на горизонтах выше 500 м данный антициклон диссипирует, а в более глубоких слоях преобразуется в систему двух антициклонических вихрей.

Со второй декады июля северо-восточнее рассмотренного антициклона на горизонтах 200 м и более начинает формироваться циклонический вихрь (рис.3, б, в, область 1а). Его центр ко второй декаде августа смещается на полградуса к югу. Циклон постепенно увеличивается в размерах, достигая к двадцатым числам августа размеров антициклона, а к началу сентября превышает их. На нижних горизонтах, в силу орографических особенностей, размеры данного циклона меньше, чем в вышележащих слоях.

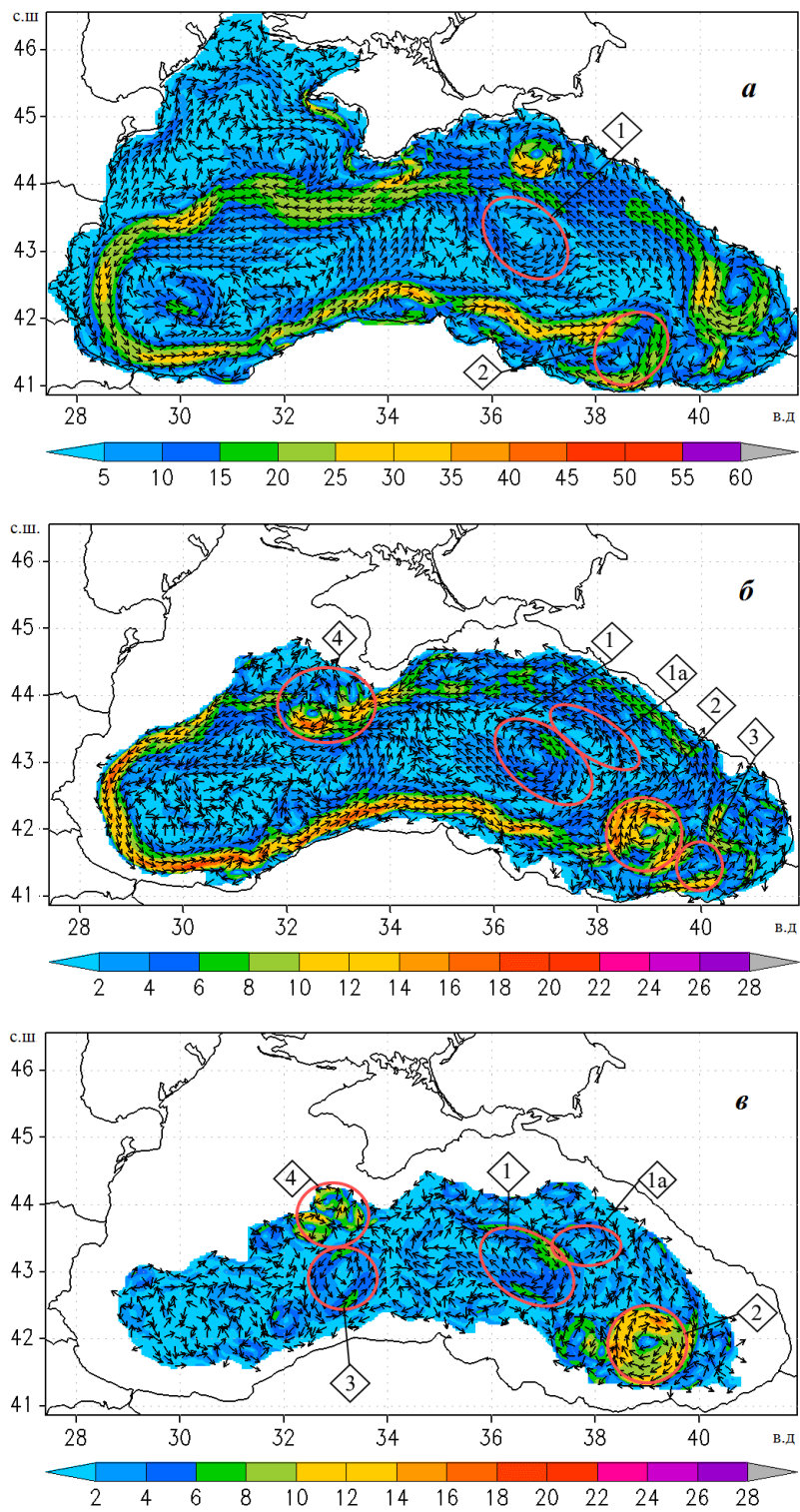
В конце мая – начале июня в юго-восточной части Черного моря в районе Трабзона (между 39° и 40° в.д.), начиная с глубины 150 м, наблюдается устойчивый антициклонический круговорот, который к сентябрю усиливается и смещается на запад (до 38° в.д.). Он прослеживается до горизонта 1700 м. Скорости в вихре составляют 10 – 12 см/с по всей его глубине (рис.2; 3, область 2).

В слое от поверхности до 500 м справа от рассматриваемого антициклона периодически образуется циклонический вихрь (рис.2, б; 3, б, область 3) размером порядка 1° , центр которого находится в районе $41,5^{\circ}$ с.ш., 40° в.д. Развитие этого вихря в слое основного пикноклина на глубинах 50 – 150 м приводит к тому, что расположенный восточнее Батумский антициклон смещается на север примерно на 1° .

В западной части моря, начиная с глубины 500 м и до дна, на протяжении всего времени интегрирования существует устойчивый циклонический



Р и с . 2 . Поля скорости течений на горизонтах 5 м (*а*), 300 м (*б*) и 1700 м (*в*) 26 июня 2013 г.



Р и с . 3 . Поля скорости течений на горизонтах 5 м (а), 300 м (б) и 1700 м (в) 8 августа 2013 г.

круговорот размером порядка 1° с характерными скоростями 4 – 6 см/с на горизонтах 500 – 900 м и 4 – 8 см/с в нижних слоях. В процессе своей эволюции он сначала разделяется, а затем объединяется с соседними более мелкими вихревыми образованиями (рис.2, в; 3, в, область 3).

Особенность рассмотренных выше вихрей состоит в том, что они четко прослеживаются от нижней границы основного пикноклина до дна, сохраняя свою структуру с глубиной. На поверхности эти вихревые структуры могут трансформироваться и определяются нерегулярно, что можно связать со значительным влиянием атмосферных процессов на верхние слои моря. При этом их максимальные скорости в глубинных слоях даже возрастают (примерно на 25 – 50 %). Эти вихри образуются и развиваются в центральной части моря, в отличие от прибрежных антициклонических вихрей, формирующихся между ОЧТ и берегом [11].

В районе 44° с.ш., 32° в.д. периодически генерируется антициклонический вихрь (Севастопольский антициклон) со скоростями 15 – 20 см/с. На глубине 300 м его центр смещен на полградуса к югу относительно положения на поверхности моря (рис.2, б, область 4). Начиная с горизонта 200 м, структура поля скорости в этой области изменяется. Во второй половине июля здесь образуется система из трех более мелких вихрей (рис.3, б, в, область 4) – циклонического и двух антициклонических, – которая прослеживается до дна (1700 м). Скорости в циклоне, расположенном севернее, достигают 6 – 8 см/с, в антициклонах 10 – 14 см/с, усиливаясь у дна до 14 – 16 см/с.

На глубинах около 1000 м наблюдается узкое струйное течение антициклонической направленности, распространяющееся вдоль континентального склона. Оно наиболее интенсивно в конце мая – июне в северо-восточной части – от Южного берега Крыма до побережья Кавказа в районе Сухуми, а также вдоль побережий Турции и Болгарии. Его ширина на данном горизонте не превышает 5 км. Средняя скорость составляет 6 – 8 см/с, а с конца июня ослабевает до 4 см/с. Течение вдоль Кавказского берега носит квазипериодический характер, появляясь на 3 – 4 недели, затем исчезая на срок от 4 до 10 дней.

Заключение. Сравнение данных моделирования полей температуры и солености с данными натурных наблюдений показало их удовлетворительное согласование на глубинах ниже основного пикноклина. В модельном поле течений выявлено наличие вихревых структур разного знака. Установлено, что большая часть глубоководных вихрей в поверхностном слое визуализируется нерегулярно, а на глубинах под постоянным пикноклином их структура отчетливо прослеживается до дна. Орбитальные скорости вихрей составляют около 5 – 10 см/с и существенно не уменьшаются с глубиной. В течение лета эти вихри перемещаются в пределах $1 - 1,5^\circ$ как в зональном, так и меридиональном направлениях относительно места их образования. Также выявлены узкие антициклонические течения (противотечения) вдоль континентального склона на глубинах около 1000 м.

Работа выполнена в рамках госзадания по теме № 0827-2019-0003.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Oguz T., Latun V.S., Latif M.A., et al.* Circulation in the surface and intermediate layers of the Black Sea // *Deep-Sea Res.*– 1993.– 40(8).– P.1597-1612.

2. Морозов А.Н., Лемешко Е.М. Методические аспекты использования акустического доплеровского измерителя течений (ADCP) в Черном море // Морской гидрофизический журнал.– 2006.– № 4.– С.31-48.
3. 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.
4. Булгаков Н.П., Булгаков С.Н. Проявление противотечения в Черном море в полях плотности воды и гидростатического давления // Морской гидрофизический журнал.– 1995.– № 4.– С.63-76.
5. Булгаков С.Н., Коротаев Г.К., Уайтхед Дж.А. Роль потоков плавучести в формировании крупномасштабной циркуляции и стратификации вод моря. Ч.1, 2 // Изв. АН СССР. Сер. Физика атмосферы и океана.– 1996.– т.32, № 4.– С.548-564.
6. Korotaev G., Oguz T., Riser S. Intermediate and deep currents of the Black Sea obtained from autonomous profiling floats // Deep-Sea Res. II.– 2006.– 53(17-19).– P.1901-1910.
7. Маркова Н.В., Багаев А.В. Оценка скоростей глубоководных течений в Черном море по данным дрейфующих буй-профилемеров Argo // Морской гидрофизический журнал.– 2016.– № 3.– С.26-39.
8. 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.
9. Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J., et al. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system // Quart. J. Roy. Meteorol. Soc. 2011.– 137(656).– P.553-597.
10. ARGO data management [Электронный ресурс].– URL: <http://www.ARGOfdata.mgt.org/> (accessed 29.06.2018).
11. Тумов В.Б. Морфометрические параметры и гидрофизические характеристики прибрежных антициклонических вихрей в Черном море // Метеорология и гидрология.– 2002.– № 4.– С.67-73.

Материал поступил в редакцию 07.12.2018 г.
После доработки 20.02.2019 г.

O.A.Dymova, N.A.Miklashevskaya, N.V.Markova

PARTICULARIES OF THE BLACK SEA DEEP-WATER CIRCULATION IN SUMMER 2013

The results of a prognostic numerical experiment on simulation of the Black Sea circulation are given for summer 2013. The Marine Hydrophysical Institute hydrodynamical model and ERA-Interim atmospheric forcing are used for the modeling. The observed and simulated temperature and salinity is compared. The deep Black Sea circulation structure notices attention. Features of the velocity fields at the depths below the main pycnocline are studied in detail. It is confirmed that the field of deep currents contains eddy formations and flows that qualitatively and quantitatively differ from the surface ones. There are a number of deep-water eddies irregularly detected at the sea surface. But their structure is clearly visualized near the low boundary of the main pycnocline (at depths of 150 – 300 m) and conserved down to the bottom without velocity weakening. As well, in summer 2013, quasi-periodic narrow deep currents propagating anticyclonically (undercurrents) are generated in some regions along the Black Sea continental slope.

KEYWORDS: simulation, deep circulation, currents, undercurrents, eddies, temperature, salinity, measurements, the Black Sea