

Циркуляция вод северной части Черного моря в летний сезон 2016 года (по материалам 87-го рейса НИС «Профессор Водяницкий»)

Ю. В. Артамонов, Е. А. Скрипалева*, А. В. Федирко,
С. А. Шутов, Р. О. Шаповалов, С. В. Щербаченко

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

**E-mail: sea-ant@yandex.ru*

Поступила в редакцию 31.03.2017 г. После доработки 11.09.2017 г.

Представлены результаты анализа циркуляции вод в северной части Черного моря по данным съемки 87-го рейса НИС «Профессор Водяницкий» в июле 2016 г. Показано, что в пределах исследуемой акватории в период съемки преобладают потоки западного направления, которые являются проявлением Основного Черноморского течения (ОЧТ). Широтное положение геострофического стрежня ОЧТ по данным съемки близко к его климатическому положению. В западной части полигона ОЧТ разделяется на три ветви. Северная ветвь проходит над шельфом, центральная – над свалом глубин, южная – в открытом море над большими глубинами. Севастопольский антициклон имеет крайне ассиметричную вертикальную мощность со слабо развитой северной периферией над шельфом и интенсивной южной периферией над свалом глубин. В центральной части полигона отмечается усиление ОЧТ, при этом прослеживается одна интенсивная струя. На востоке полигона зафиксированы две ветви ОЧТ: интенсивная северная ветвь над свалом глубин и прибрежным шельфом и мористая ветвь, которая имеет относительно небольшую скорость и ослабевает в восточном направлении. Восточнее м. Ай-Тодор в верхнем слое наблюдается антициклонический круговорот, а под ним в слое 50–100 м выявлен циклонический разворот течений.

Ключевые слова: Черное море, Основное Черноморское течение, Севастопольский антициклонический круговорот, циркуляция вод, пространственно-временная изменчивость.

Для цитирования: Циркуляция вод северной части Черного моря в летний сезон 2016 года (по материалам 87-го рейса НИС «Профессор Водяницкий») / Ю. В. Артамонов [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2018. Т. 34, № 1. С. 57–70. doi:10.22449/0233-7584-2018-1-57-70

Water circulation in the northern Black Sea in summer, 2016 (based on the data obtained in the 87th cruise of the R/V “ProfessorVodyanitsky”)

Yu. V. Artamonov, E. A. Skripaleva, A. V. Fedirko,
S. A. Shutov, R. O. Shapovalov, S. V. Shcherbachenko*

Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia

**e-mail: sea-ant@yandex.ru*

Represented are the results of water circulation in the northern Black Sea analyzed based on the data of the surveys carried out in the 87th cruise of R/V “Professor Vodyanitsky” in July, 2016. It is shown that during the survey, within the water area under study the westward flows which are the manifestation of the Rim Current (RC) are predominant. Based on the survey data, the latitudinal location of the Rim Current geostrophical deep stream is close to its climatic position. In the western part of the polygon, the Rim Current is divided into three branches. The northern branch is located over the shelf, the central one – over the continental slope, and the southern one – over the deep-sea regions. The Sevastopol anticyclone is characterized by extremely asymmetric vertical development: its northern periphery over the shelf is weak, whereas the southern periphery over the continental slope is intensive. In the central part of the polygon the Rim Current intensifies, at that one intensive stream is traced. In the eastern part of the polygon two branches of the Rim Current are observed: the intensive northern one over the continental slope and the coastal shelf, and the one located closer to the deep-sea regions (its velocity is rather low and it weakens moving eastward). In the upper layer to the east off the cape Ai-Todor, the anticyclonic gyre is observed; whereas within the 50–100 m below it, the cyclonic turn of the flows is revealed.

Keywords: Black Sea, Rim Current, Sevastopol anticyclonic gyre, water circulation, spatial variability.

For citation: Artamonov, Yu.V., Skripaleva, E.A., Fedirko, A.V., Shutov, S.A., Shapovalov, R.O. and Shcherbachenko, S.V., 2018. Water circulation in the northern Black Sea in summer, 2016 (based on the data obtained in the 87th cruise of the R/V “ProfessorVodyanitsky”). *Morskoy Gidrofizicheskiy Zhurnal*, 34(1), pp. 57-70. doi:10.22449/0233-7584-2018-1-57-70 (in Russian).

Введение. История развития океанографических исследований в Черном море свидетельствует о том, что наиболее интенсивные работы в этом направлении проводились со второй половины 70-х примерно до середины 90-х гг. [1]. Доминирующий вклад в получение экспериментальных данных о Черном море внес Морской гидрофизический институт (МГИ) АН УССР. Океанографические съемки выполнялись на научных судах МГИ «Академик Вернадский», «Михаил Ломоносов», «Профессор Колесников» [2–4]. Особенно результативной была вторая половина 80-х и начало 90-х гг., когда исследования выполнялись по международным программам *HydroBlack*, *CoMSBlack*, *NATO TU Black Sea* и др. [5–10].

После 1995 г. из-за экономических и финансовых трудностей крупномасштабные синоптические съемки в Черном море прекратились. На фоне уменьшения количества экспедиционных измерений важную роль стали играть дрейфтерные технологии. Наибольшее количество дрейфтерных экспериментов по изучению течений Черного моря проведено с помощью буев типа ЛОБАН (легкий одноразовый буй с автоматической навигацией), лагранжевых *SVP*- и *SVP-B* дрейфтеров и дрейфующих буев-профиломеров *Argo* [11–14].

Некоторая активизация океанографических исследований МГИ наметилась с лета 2007 г., когда начались исследования на малотоннажных судах НИС «Эксперимент», ЭС «Сапфир», МГС «Риони». В 2010 г. после длительного перерыва вступило в строй НИС «Профессор Водяницкий». Работы проводились в основном в прибрежных районах северо-западного шельфа, о-ва Змеиного, устья Дуная, на акваториях, прилегающих к Белгород-Днестровскому и Днепро-Бугскому лиманам, в северной части Векового разреза Херсонес – Босфор, в районе Севастопольского антициклона [15–17]. Вследствие маломерности судов выполнение работ в значительной степени зависело от погодных условий. Съемки, как правило, выполнялись нерегулярно, только при благоприятном ветро-волновом режиме, в основном в теплое время года, и охватывали небольшие участки акватории моря. В результате возникало большое количество вопросов при интерпретации распределений фактических гидрологических параметров на небольших полигонах и сопоставлении этих распределений с климатическими полями, полученными по архивным базам среднемесячных данных с большим шагом пространственной сетки. Для поверхности моря остроту проблемы снижало привлечение спутниковых данных с высоким пространственно-временным разрешением. Анализ восстановления полей течений Черного моря по спутниковым данным наиболее полно представлен в работе [18]. Тем не менее, спутниковые данные не дают информацию о глубинных слоях моря, которую можно получить только контактными методами в ходе выполнения съемок. В связи с этим при планировании экспедиционных исследований на 2016 г. было предложено возобновить регулярное выполнение крупномасштабных океанографических съемок, позволяющих за относительно короткий промежуток времени охватить измерениями большие участки акватории Черного моря.

Первая такая съемка была выполнена в июле 2016 г. в 87-м рейсе НИС «Профессор Водяницкий». Исследования проводились в рамках Государственного задания ФГБУН МГИ по проектам «Фундаментальная океанология», «Климат» и «Оперативная океанография». Основной задачей гидрологических работ было получение экспериментальных данных о распределениях

скоростей течений и термохалинных характеристик с целью интерпретации условий формирования особенностей гидрохимических, оптических и биологических характеристик морской воды. Отметим, что в ходе этой съемки инструментальные измерения течений впервые были произведены на обширной акватории, охватывающей шельфовую и глубоководную часть моря.

В настоящей работе по материалам выполненной съемки представлены результаты анализа циркуляции вод. Сопоставлялись структуры течений, полученных динамическим методом по данным гидрологических измерений, по инструментальным измерениям и по модельным расчетам [19].

Материалы и методика. Работы проводились с 30 июня по 18 июля 2016 г. в северной части Черного моря в пределах экономической зоны России. Схема расположения и номера станций и разрезов 87-го рейса НИС «Профессор Водяницкий» показаны на рис. 1. На каждой станции измерялись гидрологические характеристики от поверхности до дна с помощью комплекса *CTD SBE 911plus*, зональная и меридиональная составляющие скорости течений в верхнем слое от 5–10 до 300 м – с помощью акустического измерителя *Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP)*.

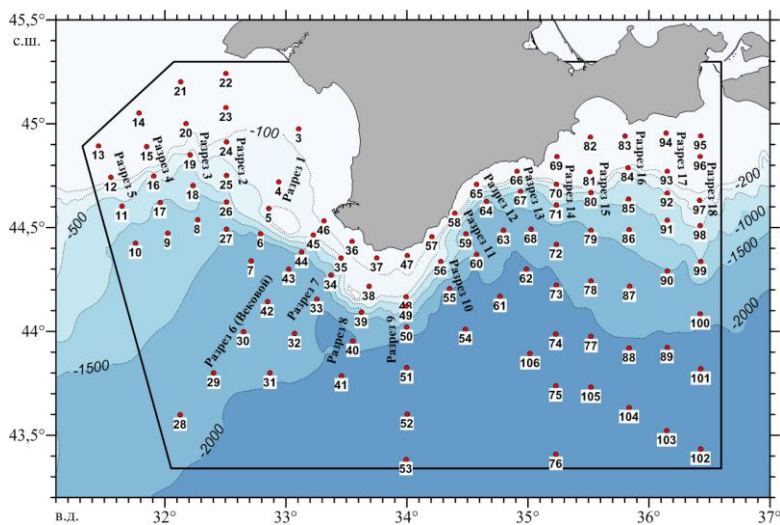


Рис. 1. Схема расположения, номера станций и разрезы, выполненные в 87-м рейсе НИС «Профессор Водяницкий». Пунктирные линии – основные изобаты, станции отмечены красными точками

Fig. 1. The layout and numbers of the stations and sections of the 87th cruise of R/V *Professor Vodyanitsky*. Dotted lines are the main isobaths; the stations are marked with red dots

Для сравнения структуры течений, полученной по материалам экспедиции, с климатической циркуляцией вод использовались среднесезонные данные температуры и солености с помесечным осреднением из массива гидрологических измерений Банка океанографических данных (БОД) МГИ [20]. Геострофические скорости рассчитывались относительно поверхности 300 дбар по данным съемки и климатическим данным. Распределения векторов геострофических течений на горизонте 1 м и инструментально измеренных

течений на горизонте 10 м по данным съемки сопоставлялись с распределениями векторов модельных течений на поверхности из массива [19]. Этот массив содержит среднесуточные значения составляющих скорости течений в узлах регулярной сетки с шагом $0,125 \times 0,125^\circ$. Для построения карты векторов выбирались значения модельной скорости в узлах, наиболее приближенных к координатам гидрологических станций, за период времени, в течение которого выполнялись измерения на этих станциях. Затем значения скоростей модельных, геострофических и инструментально измеренных течений приводились в узлы регулярной сетки с шагом $0,1 \times 0,1^\circ$, после чего проводилось сравнение пространственных распределений векторов этих течений на полигоне. Кроме того, было выполнено сопоставление структуры зональных течений по разным методам на меридиональных профилях с дискретностью $0,5^\circ$ долготы между 32 и $36,5^\circ$ в. д. Чтобы количественно оценить согласованность полученных разными методами горизонтальных полей зональных и меридиональных составляющих скоростей течений между этими полями, рассчитывались значения коэффициентов линейной корреляции.

Основные результаты. Согласно климатическим данным [20], период проведения съемки 87-го рейса НИС «Профессор Водяницкий» (июль) характеризуется следующими особенностями циркуляции вод. Центральную часть района исследований пересекает течение западного направления – Основное Черноморское течение (ОЧТ) (рис. 2). На врезках рис. 2 представлены графики климатического сезонного цикла зональной геострофической скорости в стрежне ОЧТ и его широтного положения на меридианах $31,5$ (1), $32,5$ (2), 34 (3), $34,25$ (4), $36,25^\circ$ в. д. (5). Видно, что в западной части полигона (меридианы 1, 2) в сезонном цикле с апреля по сентябрь скорости в стрежне ОЧТ уменьшаются, т. е. время наблюдений приходится на период интенсивного сезонного ослабления ОЧТ. Климатические скорости в стрежне ОЧТ в этот период составляют соответственно 12 – 13 см/с и 13 – 14 см/с (рис. 2, врезки). В центральной части полигона (меридианы 3, 4) наблюдается общее усиление ОЧТ, при этом в сезонном цикле в июле – августе скорости в стрежне ОЧТ достигают минимума и составляют соответственно 16 – 17 и 12 – 13 см/с. На востоке района съемки ближе к Керченскому проливу (меридиан 5) ОЧТ ослабевает, и в период исследований климатические скорости в его стрежне не превышают 8 – 9 см/с. Широтное положение стрежня ОЧТ изменяется по мере продвижения на восток: отмечается его смещение к северу, качественно отражающее особенности рельефа дна. Климатическая широта положения стрежня ОЧТ на меридианах 1–5 в июле составляет соответственно $43,85$; $43,9$; 44 ; 44 и $44,2^\circ$ с. ш.

Анализ циркуляции вод на основе данных выполненной съемки показал: по результатам геострофических и модельных расчетов и инструментальных измерений циркуляция вод на полигоне представлена в основном потоками западного направления (ОЧТ), при этом их скорость существенно изменялась по пространству (рис. 3), что качественно согласуется с климатическими данными. Широтное положение геострофического стрежня ОЧТ, совпадающего с максимумом зональной скорости, по данным съемки совпадало с его климатическим положением и на меридианах 2–5 составляло соответственно $43,9$;

43,8; 44 и 43,9° с. ш. (рис. 4). Вместе с тем наблюдались некоторые отличия динамики вод от климатической картины, которые могут быть связаны с межгодовой или синоптической изменчивостью циркуляции вод. По данным съемки, ОЧТ сильно меандрировало, иногда разделяясь на отдельные ветви. Местами меандры ОЧТ формировали антициклонические и циклонические круговороты, что проявлялось в виде разнонаправленных потоков на меридиональных распределениях зональной скорости (рис. 4).

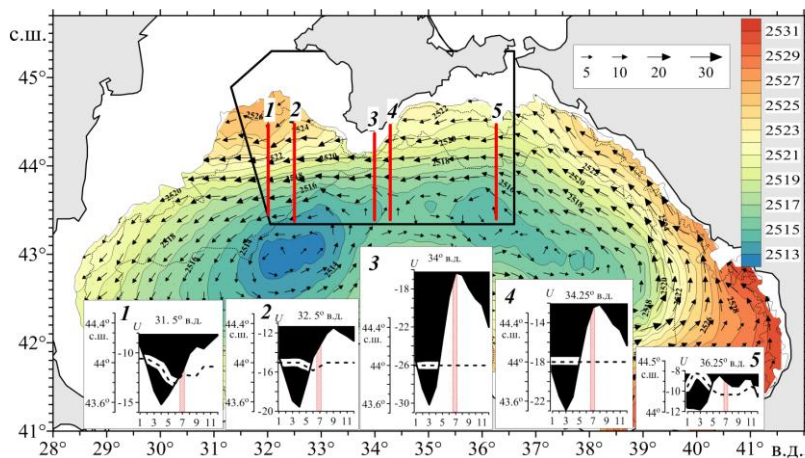


Рис. 2. Динамическая топография и векторы геострофических течений (см/с) на горизонте 1 м относительно 300 дбар в июле по данным БОД МГИ [20]. На врезке – климатический сезонный цикл зональной составляющей геострофической скорости U в стрессе ОЧТ (черная заливка) и положения стресса (штриховые линии) на меридианах 1–5 (красные прямые), период съемки выделен красной штриховкой

Fig. 2. Dynamic topography and vectors of geostrophic currents (cm/s) on the horizon of 1 m relative to 300 dbar in July, according to the data of the MHI ocean data bank [15]. In the inset – the climatic seasonal cycle of the zonal component of the geostrophic velocity U in the RC core (black fill) and the position of the core (dashed lines) on the meridians 1–5 (red lines), the survey period is highlighted by red shading

Разделение ОЧТ на отдельные ветви наиболее четко выражено в западной части полигона (рис. 3). К юго-западу от Гераклеийского п-ова над шельфом по инструментальным измерениям хорошо проявлялась прибрежная северная ветвь, которая следовала в северо-западном направлении. По модельным расчетам она была выражена слабее. Геострофические расчеты, в силу исключения шельфовой зоны с глубинами менее 300 м, прибрежную ветвь не фиксировали. Другая часть вод ОЧТ направлялась на запад вдоль свала глубин, и в районе 32–33° в. д. формировалась отдельная струя, которая была названа центральной ветвью ОЧТ. Эта ветвь прослеживалась в виде экстремума на распределениях зональной скорости вдоль меридианов 32 и 32,5° в. д. (рис. 4) и представляла южную периферию антициклонического круговорота. Согласно установившейся терминологии, этот антициклон был назван Севастопольским (СА) [1, 5, 21, 22]. Он располагался над шельфом и свалом глубин между изобатами 100 и 1500 м и хорошо проявлялся по данным инструментальных измерений на распределениях векторов течений (рис. 3, б)

и зональной скорости вдоль 32; 32,5 и 33° в. д. (рис. 4). Геоострофические расчеты фиксировали только южную периферию этого круговорота (рис. 3, *a*). По модельным данным к западу от Крымского п-ова выделялись два антициклонических круговорота, при этом положение каждого из них заметно отличалось от положения СА по инструментальным данным и геоострофическим расчетам. Один круговорот располагался на шельфе над изобатами 50–100 м между 32 и 32,5° в. д., второй – в районе свала глубин над изобатами 500 и 1500 м между 32,5 и 33° в. д. (рис. 3, *в*). На меридиональных профилях наблюдалось несовпадение положения экстремумов зональной скорости по инструментальным измерениям и модельным данным (рис. 4). Таким образом, циркуляция вод в районе СА по инструментальным данным и по модели воспроизводилась по-разному.

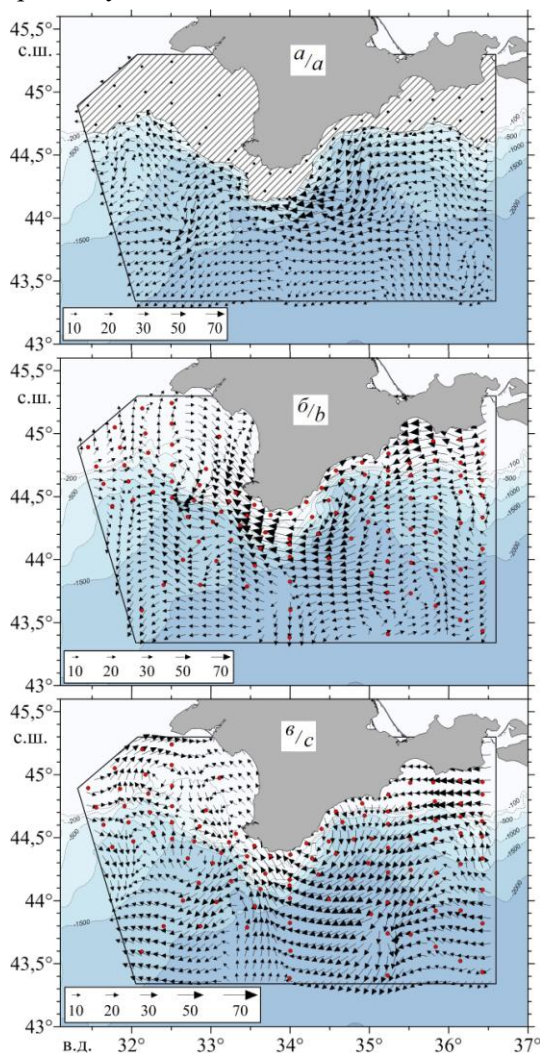


Рис. 3. Векторы течений (см/с): геоострофических на горизонте 1 м относительно 300 дбар по данным съемки (*a*), инструментально измеренных на горизонте 10 м (*б*), модельных на поверхности (*в*)

Fig. 3. Vectors of the currents (cm/s): the geostrophic ones at 1 m horizon relative to 300 dbar from survey data (*a*), the instrumentally measured – at 10 m (*b*) horizon, the modeled – on the surface (*c*)

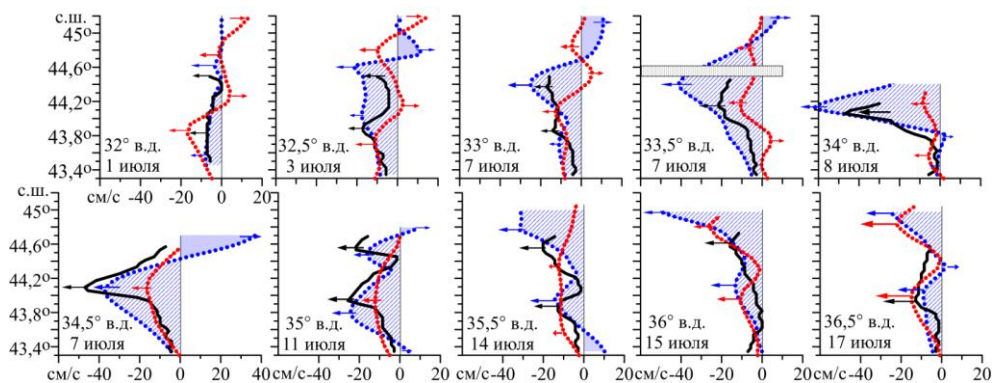


Рис. 4. Распределения зональной составляющей скорости течений вдоль разных меридианов: геострофической – черная сплошная линия, инструментально измеренной – синий пунктир, модельной – красный пунктир, стрелки – стрежни потоков

Fig. 4. Distributions of the zonal component of the current velocity along different meridians: the geostrophic one – black solid line, the instrumentally measured – blue dotted line, the model – red dotted line, arrows denote the stream cores

К северо-востоку от СА на мелководье, примерно на долготе м. Евпаторийского, северная прибрежная ветвь ОЧТ взаимодействовала с восточной периферией СА. На карте распределения модельных векторов в этом районе отмечался слабо выраженный циклонический круговорот (рис. 3, в), а распределение зональных скоростей вдоль 33° в. д. показывало два разнонаправленных потока, свидетельствующих о циклонической направленности течений в этом районе (рис. 4). Инструментальные измерения вследствие большого расстояния между станциями в этом районе этот циклонический круговорот не фиксировали (рис. 3, б).

К югу от Севастопольского антициклона над глубинами 500–1500 м по всем типам данных наблюдался циклонический меандр ОЧТ (рис. 3). Его северной периферией одновременно служила южная граница СА.

В юго-западной части полигона над большими глубинами фиксировалось усиление скорости течений, проявляющееся в виде еще одного экстремума на меридиональных распределениях зональной скорости, что указывало на присутствие здесь еще одной ветви ОЧТ – южной (рис. 3, 4). Восточное продолжение этой ветви прослеживалось до свала глубин у юго-западных берегов Крыма.

В центральной части полигона южнее берегов Крыма по всем типам данных наблюдалась общая интенсификация ОЧТ (рис. 3), что соответствовало климатическому усилению ОЧТ в этом районе (рис. 2). По геострофическим расчетам и инструментальным измерениям в меридиональной структуре ОЧТ на 34° в. д. четко выделялась одна интенсивная струя (рис. 4). По модельным расчетам здесь проявлялись два слабых экстремума зональной составляющей скорости, при этом отмечалось заметное усиление меридионального компонента (рис. 3, в).

Восточнее 35° в. д. по инструментальным и модельным данным прослеживались две ветви ОЧТ – интенсивная прибрежная над шельфом и свалом глубин и более слабая в мористой части полигона (рис. 3, б, в; 4). Между мысами Ай-Тодор и Меганом над шельфом и свалом глубин наблюдался антициклонический круговорот. Наиболее четко он был выражен по данным инструментальных измерений (рис. 3, б; 4), по геострофическим и модельным

расчетам выделялась только его юго-восточная периферия (рис. 3, *a, в*). Еще одним заметным элементом циркуляции, полученным по натурным данным и хорошо согласующимся с инструментальными измерениями (рис. 3, *б*), был циклонический круговорот на юго-востоке акватории съемки. На распределении скорости вдоль $35,5^\circ$ в. д. этот круговорот выявлялся в виде разнонаправленных потоков в южной части профиля (рис. 4).

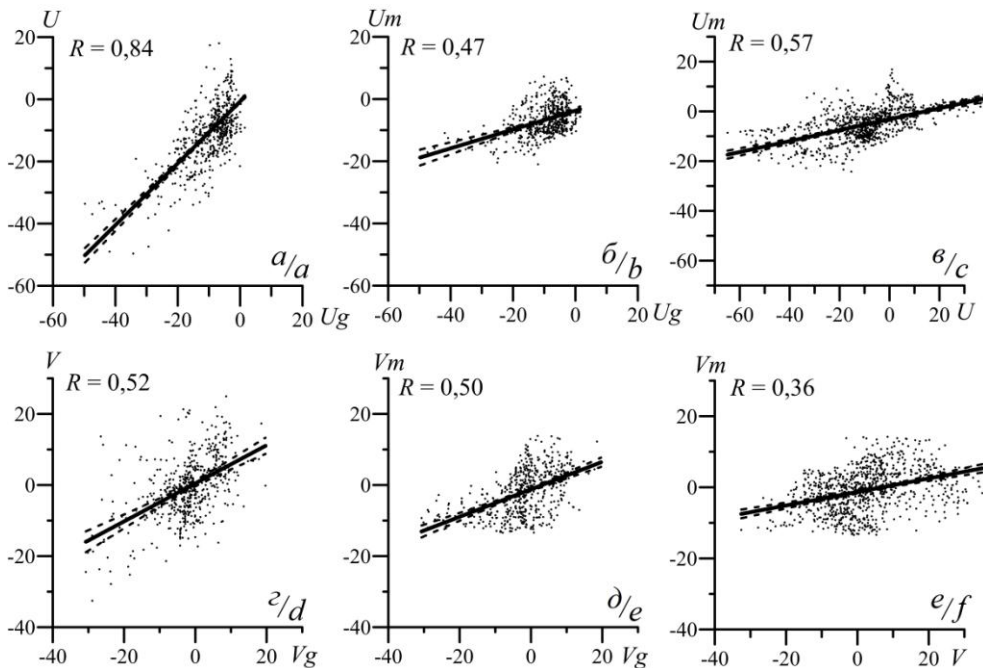


Рис. 5. Графики линейной связи между скоростями течений по инструментальным измерениям (U, V) и геострофическим расчетам (Ug, Vg) (*a, з*), по модельным (Um, Vm) и геострофическим расчетам (*б, д*), по инструментальным измерениям и модельным расчетам (*в, е*). Зональная составляющая – фрагменты *a – в*, меридиональная – *з – е*. Штриховые линии – границы 95%-го доверительного интервала

Fig. 5. Graphs of the linear relationship between the current velocities according to the instrumental measurements (U, V) and geostrophic calculations (Ug, Vg) (*a, d*), model (Um, Vm) and geostrophic calculations (*b, e*), instrumental measurements and model calculations (*c, f*). The zonal component is fragments *a – c*, the meridional one – *d – f*. Dashed lines mark the boundaries of the 95 % confidence interval

Выполненный выше анализ показал, что результаты инструментальных измерений течений, геострофических и модельных расчетов не всегда согласуются между собой. Количественные оценки согласованности горизонтальных полей зональных U и меридиональных V составляющих скоростей течений показали, что значения коэффициентов корреляции R между скоростями по инструментальным измерениям и геострофическим расчетам составляют: для зональной составляющей – 0,84, для меридиональной – 0,52 (рис. 5, *a, з*). Согласованность между модельными и геострофическими скоростями уменьшается, значения R составляют для зонального компонента 0,47, для меридионального – 0,5 (рис. 5, *б, д*). Несколько повышается согласованность ($R \sim 0,57$)

между зональными компонентами скорости по инструментальным измерениям и модельным расчетам (рис. 5, *в*), а между меридиональными компонентами она практически отсутствует ($R \sim 0,36$) (рис. 5, *е*). Таким образом, согласованность между скоростями течений по инструментальным измерениям и геострофическим расчетам заметно выше, чем по другим методам. Вместе с тем, геострофические расчеты, в отличие от инструментальных данных, в силу интегрального подхода грубо разрешают вертикальную структуру течений. Кроме того, динамический метод не применим для расчета течений на мелководье. Необходимо также отметить, что горизонтальные распределения векторов течений были получены объективной интерполяцией фактических значений в узлы регулярной сетки с радиусом влияния, превышающим среднее расстояние между фактическими разрезами. В результате на картах некоторые особенности общей схемы циркуляции могут быть сглажены.

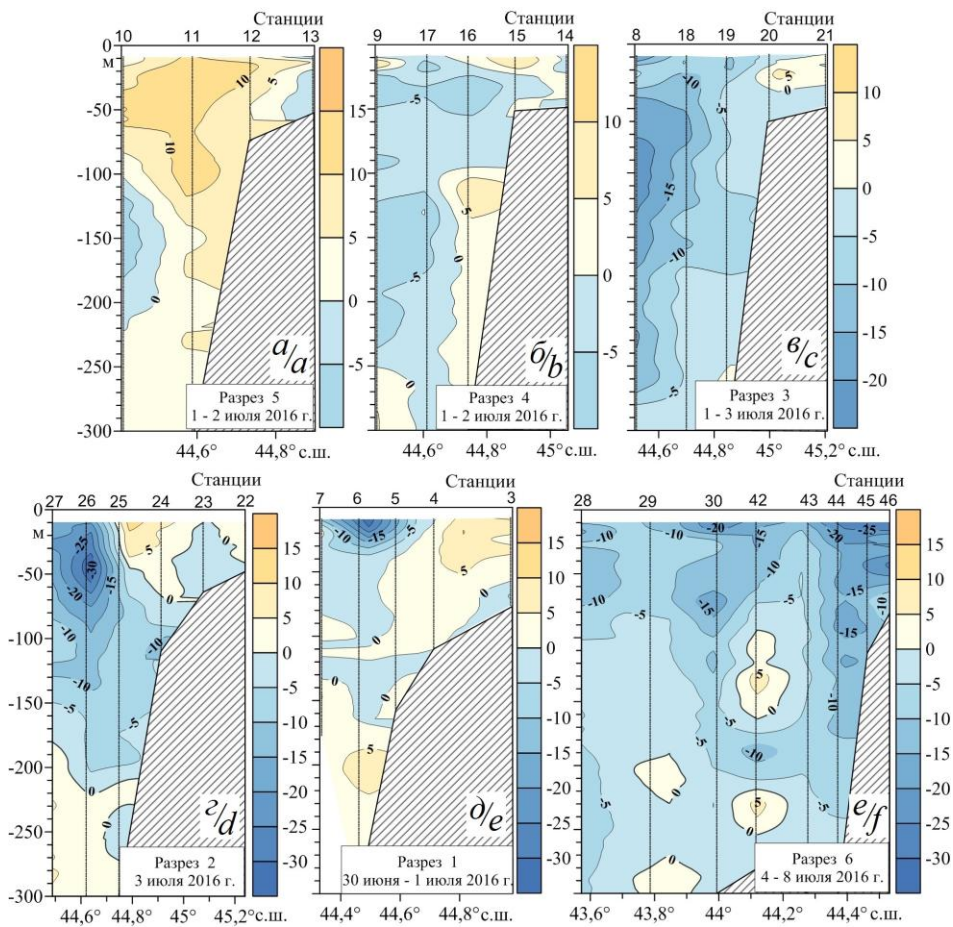


Рис. 6. Вертикальные распределения зональных скоростей инструментально измеренных течений (см/с) в слое 0–300 м на разрезах 5 (*a*), 4 (*б*), 3 (*в*), 2 (*г*), 1 (*д*), 6 (*е*). Положение разрезов показано на рис. 1

Fig. 6. Vertical distributions of zonal velocities of the instrumentally measured currents (cm/s) in the 0–300 m layer on the sections 5 (*a*), 4 (*b*), 3 (*c*), 2 (*d*), 1 (*e*) and 6 (*f*). Position of the sections is shown in Fig. 1

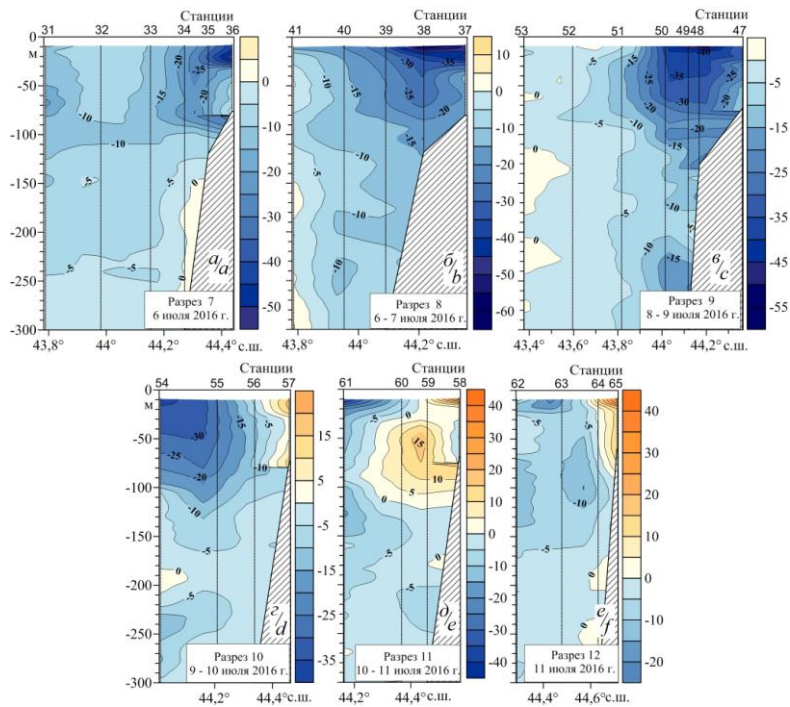


Рис. 7. То же, что на рис. 6, на разрезах 7 (а), 8 (б), 9 (в), 10 (г), 11 (д), 12 (е)
Fig. 7. The same as on Fig. 6 in the sections 7 (a), 8 (b), 9 (c), 10 (d), 11 (e), 12 (f)

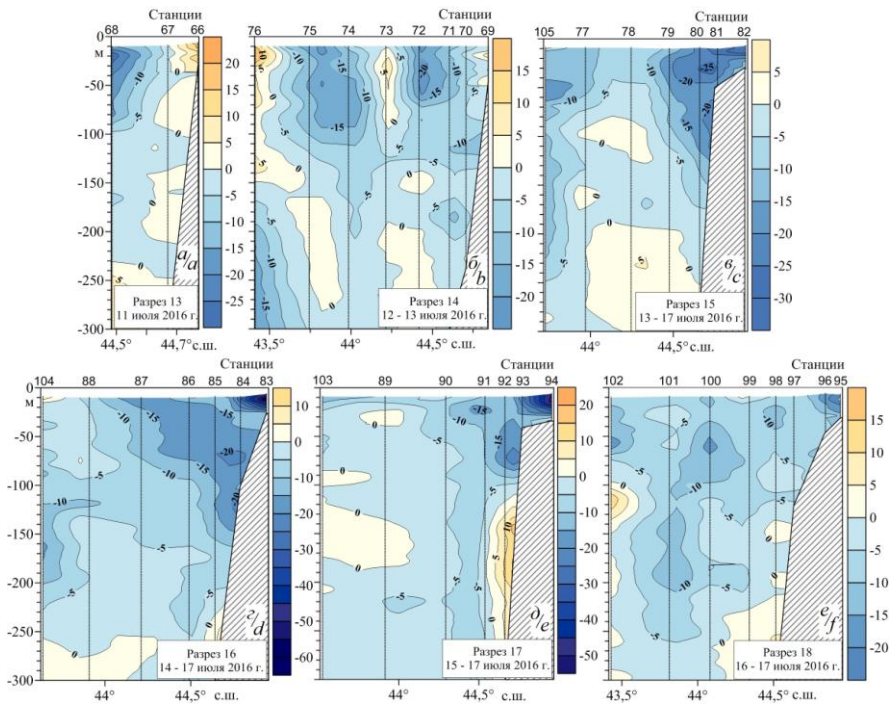


Рис. 8. То же, что на рис. 7, на разрезах 13 (а), 14 (б), 15 (в), 16 (г), 17 (д), 18 (е)
Fig. 8. The same as on Fig. 7 in the sections 13 (a), 14 (b), 15 (c), 16 (d), 17 (e), 18 (f)

В связи с вышесказанным, далее по инструментальным измерениям течений уточняется вертикальная структура основных элементов циркуляции на каждом из выполненных разрезов (рис. 6–8). Согласно горизонтальному распределению векторов течений (рис. 3, б), к юго-западу от Гераклейского п-ова происходило разделение потока ОЧТ на отдельные ветви. На выполненных в этом районе разрезах 7 (рис. 7, а) и 6 (Херсонес – Босфор) (рис. 6, е) четко выделялись две ветви ОЧТ. Более интенсивная северная ветвь проходила над прибрежным шельфом и свалом глубин. Максимум ее скорости фиксировался над шельфом в поверхностном слое и на разрезе 7 составлял 45 см/с (рис. 7, а), на разрезе 6 – 35 см/с (рис. 6, е). С глубиной значения скорости быстро уменьшались и у дна на шельфе не превышали 10–15 см/с. Над материковым склоном по изотахе 10 см/с северная ветвь ОЧТ прослеживалась до 175 м на разрезе 6 и до 100–110 м на разрезе 7. Южная ветвь ОЧТ отмечена в мористой части разрезов с ядрами скорости до 25 см/с в верхнем 15-метровом слое на разрезе 6 и до 15 см/с в слое 50–70 м на разрезе 7. Вертикальная мощность этой ветви по изотахе 10 см/с составляла 100–120 м.

На западных разрезах 1–3, имеющих меньшую протяженность в мористом направлении, фиксировалась только центральная ветвь ОЧТ, которая располагалась в их южной части (рис. 6, в – д). Над шельфом и свалом глубин наблюдался поток восточного направления, максимум скорости которого располагался в верхнем 20-метровом слое и не превышал 5–10 см/с. Эти разрезы пересекали Севастопольский антициклон (рис. 3, б), и слабый восточный прибрежный поток представлял собой его северную периферию. Южной периферией СА служила центральная ветвь ОЧТ. На разрезе 1 ядро ее скорости (15–20 см/с) располагалось в верхнем 20-метровом слое, а по изотахе 10 см/с эта ветвь прослеживалась до глубины не более 30 м (рис. 6, д). На разрезе 2 (рис. 6, з) ядро скорости центральной ветви ОЧТ (25–35 см/с) находилось в слое 20–60 м, по изотахе 10 см/с эта ветвь выявлялась до глубин 125–140 м. На разрезе 3 максимум ее скорости ослабевал до 20 см/с и заглублялся до 75–130 м, при этом по изотахе 10 см/с она наблюдалась до глубины 270 м (рис. 6, в). Заглубление максимума скорости центральной ветви ОЧТ свидетельствует о том, что СА имел ассиметричную вертикальную мощность со слабо развитой северной периферией.

На крайнем западе полигона (разрезы 4 и 5) отмечалось дальнейшее ослабление течений (рис. 6, а, б). На разрезе 4 (рис. 6, б) поток западного направления занимал большую часть площади сечения с двумя слабыми ядрами скорости (до 5 см/с) на глубинах 25–50 м и 100–200 м. Над прибрежным шельфом в поверхностном слое и в районе свала глубин в слое 100–130 м прослеживались слабые потоки (до 5–10 см/с) восточного направления. На разрезе 5 поток ОЧТ проявлялся в его южной части в виде слабого ядра скорости (до 5 см/с) в слое 100 – 200 м (рис. 6, а). Основная часть разреза была занята потоком восточного направления с размытым ядром скорости (до 10 см/с) в верхнем 100-метровом слое. На шельфе глубже 15 м наблюдалось слабое западное течение (до 5 см/с), что свидетельствовало о присутствии здесь циклонического меандра.

В центральной части полигона (разрезы 8–10) фиксировалось общее усиление ОЧТ, при этом в пределах разрезов прослеживалась только одна интенсивная

струя ОЧТ (рис. 7, б – з). На разрезах 8 и 9 она прижималась к границе шельфа. Максимальные скорости в ядре ОЧТ достигали 60–65 см/с. Несколько восточнее, на разрезе 10, скорости в ядре уменьшались до 40 см/с, а само ядро смещалось в мористую часть. Максимальная глубина течения по изотаксе 10 см/с наблюдалась на разрезе 8 и достигала почти 250 м. Восточнее она постепенно уменьшалась до 175 м на разрезе 9 и до 125 м на разрезе 10.

На разрезе 10 (рис. 7, з) и далее на восток на разрезах 11–13 (рис. 7, д, е; 8, а), где прибрежный шельф заметно сужается, основная струя ОЧТ располагалась над большими глубинами и в целом ослабевала. Ближе к берегу проходило течение восточного направления, которое формировало прибрежную периферию антициклонического круговорота, хорошо выделяющегося на карте горизонтального распределения векторов течений (рис. 3, б). В пределах этого восточного течения наблюдались два ядра скорости – интенсивное приповерхностное (до 25–35 см/с) и на глубинах 50–75 м более слабое подповерхностное (до 10–15 см/с). На разрезе 11 подповерхностное ядро скорости восточного потока смещалось в мористую часть, а ближе к берегу в слое 25–75 м отмечался слабый поток западного направления (5–10 см/с), что свидетельствует о циклоническом развороте течений на этих глубинах (рис. 7, д). Возможно, что такая сложная структура потоков в этом районе связана с набеганием струи ОЧТ на выступ, образуемый рельефом дна примерно на траверзе м. Аю-Даг.

На восточных разрезах 14–18, которые имели большую протяженность в сторону открытого моря, снова были зафиксированы две струи ОЧТ. Ядро скорости более интенсивной северной ветви располагалось в верхнем 50-метровом слое. Скорость увеличивалась от 20 см/с на разрезе 14 до 50–60 см/с на разрезах 16 и 17, а у восточной границы полигона (разрез 18) снова уменьшалась до 30 см/с (рис. 8, б – е). По мере продвижения на восток от разреза к разрезу северная ветвь ОЧТ смещалась на шельф. Мористая струя ОЧТ имела относительно небольшие скорости ~ 15–20 см/с и еще больше ослабевала в восточном направлении. На разрезах 14 и 15 ядро скорости по изотаксе 15 см/с располагалось в верхнем 100-метровом слое, а на разрезе 16 по изотаксе 10 см/с – в слое 120–200 м. На разрезе 17 южная ветвь не прослеживалась, а на крайнем восточном разрезе 18 снова проявлялась в виде относительно слабого (до 10 см/с) потока в слое 50–200 м.

Выводы. Анализ особенностей циркуляции вод в северной части Черного моря по результатам съемки 87-го рейса НИС «Профессор Водяницкий» показал, что в пределах полигона преобладали потоки западного направления, которые являлись проявлением ОЧТ.

В западной части полигона ОЧТ разделялась на три ветви. Северная ветвь располагалась над шельфом, центральная ветвь проходила над свалом глубин и образовывала южную периферию СА, южная ветвь наблюдалась в открытом море над большими глубинами. Выявлено, что СА в период съемки имел крайне ассиметричную вертикальную мощность со слабо развитой северной периферией над шельфом и более интенсивной южной периферией над свалом глубин.

В центральной части полигона отмечено общее усиление ОЧТ, при этом прослеживалась одна интенсивная струя ОЧТ. На востоке полигона зафиксированы

две ветви ОЧТ. Северная ветвь по мере продвижения на восток от разреза к разрезу постепенно смещалась на шельф и усиливалась. У восточной границы полигона она снова ослабевала. Мористая струя ОЧТ имела относительно небольшую скорость, которая уменьшалась в восточном направлении, а сама ветвь заглублялась.

Восточнее м. Ай-Тодор над шельфом и свалом глубин зафиксирован антициклонический круговорот. Под ним в слое 50–100 м наблюдался циклонический разворот течений.

Сравнение результатов съемки с климатическими данными показало, что влияние синоптической и межгодовой изменчивости циркуляции вод сформировало некоторые отличия структуры течений в июле 2016 г. от климатической циркуляции. По данным измерений были выделены несколько ветвей ОЧТ, зафиксированы четко выраженный СА и антициклон у юго-восточных берегов Крыма, замкнутый циклонический круговорот на юго-востоке полигона.

Работа выполнена в рамках государственного задания по темам № 0827-2015-0001 «Фундаментальные исследования процессов в системе океан-атмосфера-литосфера, определяющих пространственно-временную изменчивость природной среды и климата глобального и регионального масштабов», № 0827-2014-0010 «Комплексные междисциплинарные исследования океанологических процессов, определяющих функционирование и эволюцию экосистем Черного и Азовского морей, на основе современных методов контроля состояния морской среды и грид-технологий».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Иванов В. А., Белокопытов В. Н.* Океанография Черного моря. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. 209 с.
2. *Батраков Г. Ф.* Экспедиционные исследования на НИС «Михаил Ломоносов». Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2007. 421 с.
3. *Батраков Г. Ф.* Экспедиционные исследования на НИС «Академик Вернадский». Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008. 424 с.
4. *Батраков Г. Ф.* Экспедиционные исследования на НИС «Профессор Колесников». Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2010. 220 с.
5. *Латун В. С.* Антициклонические вихри в Черном море летом 1984 г. // Морской гидрофизический журнал. 1989. № 3. С. 27–35.
6. Black Sea oceanography: Results from the 1988 Black Sea Expedition / J. W. Murray (ed.) // Deep-Sea Res. A. 1991. Vol. 38, suppl. 2A. P. S655-S1266.
7. Mesoscale circulation and thermohaline structure of the Black Sea observed during HydroBlack '91 / T. Oguz [et al.] // Deep-Sea Res. I. 1994. Vol. 41, iss. 4. P. 603–628. [https://doi.org/10.1016/0967-0637\(94\)90045-0](https://doi.org/10.1016/0967-0637(94)90045-0)
8. *Oguz T., Besiktepe S.* Observations on the Rim Current structure, CIW formation and transport in the western Black Sea // Ibid. 1999. Vol. 46, iss. 10. P. 1733–1753. [https://doi.org/10.1016/S0967-0637\(99\)00028-X](https://doi.org/10.1016/S0967-0637(99)00028-X)
9. Creation the new database in the framework of NOAA ESDIM project “Rescue of Black Sea hydrological data for regional classification and studies of seasonal and interannual variability” / A. M. Suvorov [et al.] // Scientific and policy challenges towards an effective management of the marine environment. Emphasis on the Black Sea and the Mediterranean regions: International Conference, Varna, Bulgaria, 12–18 October 2003: Abstracts. Albena, Bulgaria, 2003. P. 381.
10. *Иванов В. А., Косарев А. Н., Тужилкин В. С.* К истории экспедиционных океанографических исследований Черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2004. Вып. 10. С. 9–16.

11. Циркуляция вод и характеристики разномасштабных течений в верхнем слое Черного моря по дрейфтерным данным / В. М. Журбас [и др.] // *Океанология*. 2004. Т. 44, № 1. С. 34–48.
12. Drifter monitoring of Black Sea in 2001/2002: [электронный ресурс] / V. N. Eremeev [et al.] // *Research, Applications and Developments Involving Data Buoys: Presentations at the DBCP Technical Workshop*. DBCP Technical Document No. 22. 2003. URL: <https://www.wmo.int/pages/prog/amp/mmop/documents/dbcp/Dhcp22/DBCP22.zip> (дата обращения: 09.09.2017).
13. Statistical description of the Black Sea near-surface circulation using drifters in 1999–2003 / P.-M. Poulain [et al.] // *Deep-Sea Res. I*. 2005. Vol. 52, iss. 12. P. 2250–2274. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2005.08.007>
14. Korotaev G., Oguz T., Riser S. Intermediate and deep currents of the Black Sea obtained from autonomous profiling floats // *Deep-Sea Res. II*. 2006. Vol. 53, iss. 17–19. P. 1901–1910. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2006.04.017>
15. Джиганишин Г. Ф., Полонский А. Б. Кинематическая структура и мезомасштабная изменчивость Основного Черноморского течения вблизи побережья Крыма (по данным инструментальных измерений в сентябре 2008 года) // *Морской гидрофизический журнал*. 2011. № 1. С. 25–35.
16. Исследования гидрологической структуры вод в северной части Черного моря в августе 2011 г. (по материалам 69-го рейса НИС «Профессор Водяницкий») / Ю. В. Артамонов [и др.] // *Геолого-океанологические исследования континентальной окраины Крыма и прилегающей котловины Черного моря* / Под ред. Е. Ф. Шнюкова. – Киев : ОМГОР НАНУ, 2012. С. 87–104.
17. Гидрологические условия в западной части Черного моря в ноябре 2015 года (по материалам 81-го рейса НИС «Профессор Водяницкий») / Ю. В. Артамонов [и др.] // *Морской гидрофизический журнал*. 2016. № 4. С. 64–78. doi:10.22449/0233-7584-2016-4-64-78
18. Stanev E. V., Le Traon P.-Y., Peneva E. L. Sea level variations and their dependency on meteorological and hydrological forcing: Analysis of altimeter and surface data for the Black Sea // *J. Geophys. Res.* 2000. Vol. 105, iss. C7. P. 17203–17216. doi:10.1029/1999JC900318
19. Архив данных по Черному морю: [сайт]. URL: http://dvs.net.ru/mp/data/main_ru.shtml (дата обращения: 07.09.2016).
20. Банк океанографических данных МГИ НАН Украины: Информационные ресурсы и доступ к данным / Е. Г. Андриющенко [и др.]. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2010. 59 с.
21. Овчинников И. М., Титов В. Б. Антициклоническая завихренность течений в прибрежной зоне Черного моря // *Доклады АН СССР*. 1990. Т. 314, № 5. С. 1236–1239.
22. Белокопыттов В. Н., Никольский Н. В. Устойчивые антициклонические вихри у южного и западного побережья Крыма // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2015. Вып. 1. С. 47–53.

Сведения об авторах:

Артамонов Юрий Владимирович, ведущий научный сотрудник отдела океанографии ФГБУН МГИ (Севастополь, Россия), доктор географических наук, SPIN-код: 9350-8966, artam-ant@yandex.ru.

Скрипалева Елена Александровна, старший научный сотрудник отдела океанографии ФГБУН МГИ (Севастополь, Россия), кандидат географических наук, ORCID:0000-0003-1012-515X, sea-ant@yandex.ru.

Федирко Александр Викторович, младший научный сотрудник отдела океанографии ФГБУН МГИ (Севастополь, Россия), SPIN-код: 2496-1715, vault102@gmail.com.

Шутов Сергей Аркадьевич, ведущий инженер-исследователь отдела гидрофизики шельфа ФГБУН МГИ (Севастополь, Россия), shutov_sa@mhi-ras.ru.

Шапавалов Ростислав Олегович, старший инженер-исследователь отдела гидрофизики шельфа ФГБУН МГИ (Севастополь, Россия), gos787@mail.ru.

Щербаченко Сергей Владимирович, инженер отдела гидрофизики шельфа ФГБУН МГИ (Севастополь, Россия), shcherbachenko_sv@mhi-ras.ru.