

## Особенности течений на северо-западном шельфе Черного моря по результатам численного моделирования

В. Л. Дорофеев, Л. И. Сухих 

*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия*

 *l.sukhikh@gmail.com*

Поступила в редакцию 28.12.2020 г., после доработки – 11.02.2021 г.

*Цель.* Цель работы – на основе результатов реанализа изучить особенности течений на северо-западном шельфе Черного моря и проанализировать причины, вызывающие эти особенности.

*Методы и результаты.* Для анализа течений на северо-западном шельфе используются результаты выполненного авторами ранее физического реанализа полей Черного моря, а именно массивы гидродинамических полей на регулярной сетке продолжительностью 21 год (с 1992 по 2012 г.). Поверхностные течения на северо-западном шельфе Черного моря направлены в основном на юго-запад. Вдоль западного берега в течение всего года (за исключением летних месяцев, когда воздействие ветра ослабевает) образуется интенсивное компенсационное течение, направленное к югу. Воды возле западного берега сильно горизонтально стратифицированы, что вызвано поступлением пресной воды со стоками рек. В зимний сезон эта стратификация проявляется наиболее ярко, а летом горизонтальный градиент плотности уменьшается. Горизонтальная плотностная стратификация приводит к тому, что, начиная с глубины примерно 20 м, градиент давления меняет знак и появляется вдольбереговое струйное противотечение, направленное к северу.

*Выводы.* В результате проведенных исследований показано, что циркуляция вод на северо-западном шельфе Черного моря определяется главным образом следующими факторами: потоками воды через границу шельфа, обусловленными ветром; сильной горизонтальной стратификацией вод возле западного берега, вызванной стоком рек. В результате того, что течения на поверхности моря направлены в основном на юго-запад, у западного берега образуется компенсационное течение, направленное к югу. Вследствие сильной горизонтальной стратификации, вызванной стоком рек, в подповерхностном слое возле западного берега образуется противотечение, направленное к северу. При экстремально высоких потоках морской воды на шельф противотечение может отсутствовать.

**Ключевые слова:** Черное море, циркуляция, реанализ, северо-западный шельф, противотечение

**Благодарности:** работа выполнена при поддержке проекта № 0827-2021-0002.

*Для цитирования:* *Дорофеев В. Л., Сухих Л. И.* Особенности течений на северо-западном шельфе Черного моря по результатам численного моделирования // Морской гидрофизический журнал. 2021. Т. 37, № 4. С. 460–472. doi:10.22449/0233-7584-2021-4-460-472

# Features of Currents on the Black Sea Northwestern Shelf Based on the Numerical Simulation Results

V. L. Dorofeyev, L. I. Sukhikh ✉

*Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia*  
✉ [l.sukhikh@gmail.com](mailto:l.sukhikh@gmail.com)

*Purpose.* The work is aimed at studying the features of currents on the Black Sea northwestern shelf based on the reanalysis results, and at analyzing the reasons of these features.

*Methods and Results.* To analyze the currents on the northwestern shelf, applied were the results of physical reanalysis of the Black Sea fields performed by the authors earlier, namely, the arrays of hydrodynamic fields on a regular grid with the 21-year duration (1992–2012). Surface currents on the northwestern shelf of the Black Sea are directed mainly to the southwest. Throughout the whole year (except for the summer months when the wind effect weakens), an intensive compensatory current directed to the south is formed along the western coast. The waters near the western coast are highly horizontally stratified that is caused by fresh water inflowing with the river runoffs. In winter seasons, the stratification is most pronounced, whereas in summer, the horizontal density gradient decreases. The horizontal density stratification leads to the following: starting from the depth ~ 20 m, the pressure gradient changes its sign and the along-coastal jet countercurrent directed to the north, occurs.

*Conclusions.* The performed studies have shown that the water circulation on the Black Sea northwestern shelf is determined mainly by the following factors: the wind-induced water flows across the shelf boundary and strong horizontal water stratification near the western coast resulted from the river runoffs. As the currents on the sea surface are directed mainly to the southwest, the compensatory current directed to the south is formed near the western coast. Due to the strong horizontal stratification resulted from the river runoffs, a countercurrent directed to the north is formed in the subsurface layer near the western coast. In case the seawater flows to the shelf are extremely high, the countercurrent may be absent.

**Keywords:** Black Sea, circulation, reanalysis, northwestern shelf, countercurrent

**Acknowledgements:** the work was carried out at the support of project No. 0827-2021-0002.

**For citation:** Dorofeyev, V.L. and Sukhikh, L.I., 2021. Features of Currents on the Black Sea Northwestern Shelf Based on the Numerical Simulation Results. *Physical Oceanography*, [e-journal] 28(4), pp. 426-437. doi:10.22449/1573-160X-2021-4-426-437

## Введение

Северо-западный шельф (СЗШ) является самой большой мелководной частью Черного моря. Его площадь составляет 16 % всей площади бассейна. При этом большая часть пресных вод, поступающих в Черное море с речным стоком (примерно 65 %), приходится на СЗШ, куда впадают крупнейшие реки Европы, такие как Дунай, Днепр и Днестр. Значение этого региона для формирования термохалинной и биогеохимической структуры вод Черного моря определяется в основном большим количеством биогенов, которые выносятся со стоками рек (вместе с пресной водой) и с помощью течений разносятся по всей акватории Черного моря. Антропогенная нагрузка от рек, впадающих в северо-западный регион Черного моря, влияет на состояние всей морской экосистемы. Вследствие значительного поступления пресной воды и небольшой глубины циркуляция вод на СЗШ имеет свои особенности по сравнению с глубоководной частью бассейна. Поверхностные течения в районе СЗШ изучались во множестве работ как по данным натурных измерений, так и с помощью математического моделирования. С помощью численного моделирования

в рамках модели однородного моря была рассмотрена, в частности, циркуляция на СЗШ, вызванная ветровым воздействием [1]. В более поздних работах с помощью полных моделей исследовались схемы течений на СЗШ, учитывающие такой важный фактор, как сток рек (например, в работах [2, 3]). Так, в работе [2] были обнаружены подповерхностные противотечения как элементы циркуляции вод на СЗШ. В данной работе исследуется структура течений на СЗШ на основе результатов выполненного ранее ретроспективного анализа (реанализа) гидродинамических полей Черного моря [4], анализируется роль ветрового воздействия и речного стока – основных факторов, формирующих структуру циркуляции.

### Материалы и метод исследования

В представленной работе были использованы результаты реанализа, полученные в результате численного интегрирования уравнений модели циркуляции Черного моря с ассимиляцией данных спутниковых измерений. В качестве модели циркуляции использовалась одна из версий созданной в МГИ модели циркуляции Черного моря [5]. Модель основана на системе примитивных уравнений, имеет пространственный шаг 4,8 км, что позволяет адекватно описывать как крупномасштабные, так и синоптические процессы. Модель содержит 35 расчетных уровней, ступающих к морской поверхности. Вертикальная турбулентная диффузия и вязкость параметризуются с помощью коэффициентов, зависящих от глубины и времени. Кроме того, для расчета проникающего коротковолнового излучения включена оптическая модель [6]. В местах втока рек и проливов задавались среднемесячные климатические значения расходов.

Атмосферные поля, полученные из данных реанализа *ERA-Interim (ECMWF)* [7], использовались в качестве граничных условий для уравнений модели циркуляции на свободной поверхности моря: напряжение трения ветра (каждые 6 часов), потоки тепла и пресной воды, а также солнечная радиация (каждые 12 часов). Пространственное разрешение этих полей первоначально составляло  $0,75^\circ$ . Для дальнейшего использования при интегрировании уравнений модели циркуляции они были интерполированы на сетку модели.

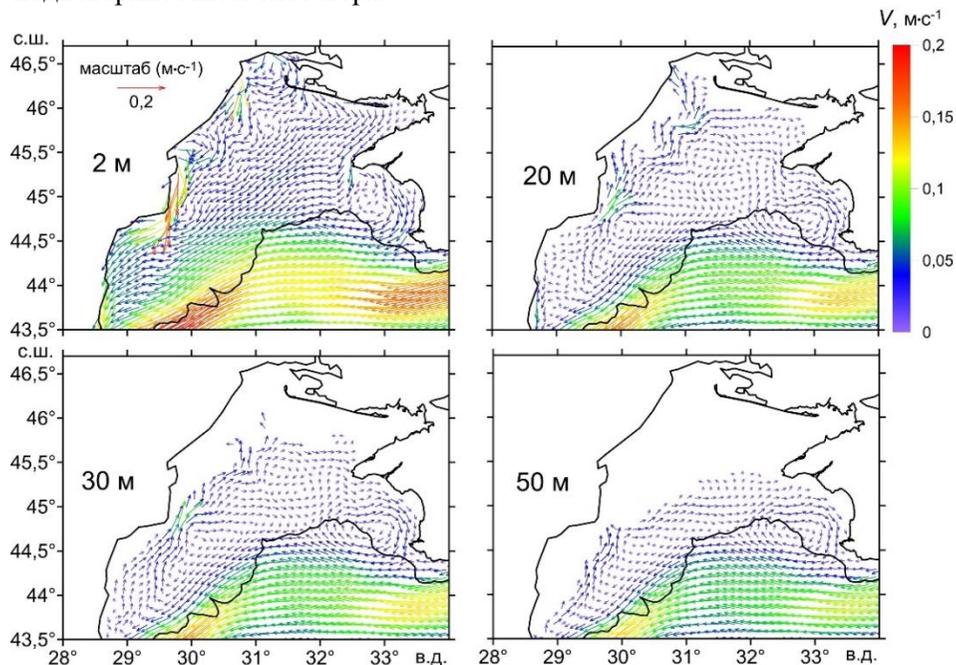
При проведении реанализа важна ассимиляция данных измерений. В этой работе для ассимиляции использовались данные температуры поверхности моря (ТПМ), аномалии высоты возвышения уровня и среднегодовые профили температуры и солености. ТПМ для 1993–2009 гг. брали из архивов *GHRSSST* и *NODC*, а для 2010–2012 гг. – из архива *OSI TAC*. Для ассимиляции данных об аномалии уровня моря использовались все доступные данные спутниковой альтиметрии за период реанализа, представленные архивами *NASA*, *AVISO* и *SL TAC*. Среднегодовые профили температуры и солености были подготовлены В. Н. Белокопытовым на основе всех имеющихся за рассматриваемый период гидрографических съемок и данных всплывающих буев.

Результаты реанализа представляют собой трехмерные гидродинамические поля на регулярной сетке, охватывающие период в 21 год. Так как в работе основное внимание уделяется общим закономерностям циркуляции на СЗШ, то были рассмотрены в основном среднемесячные поля, по которым были получены среднемесячные климатические (то есть осредненные за 21 год) поля.

## Результаты

Циркуляция вод поверхностного слоя Черного моря хорошо изучена. В основном она имеет циклонический характер (например, [1]), что обусловлено преобладанием положительных значений вертикальной компоненты поля завихренности напряжения трения ветра над регионом. Наиболее выраженной особенностью циркуляции в верхнем слое моря является Основное Черноморское течение (ОЧТ), которое формирует крупномасштабный циклонический круговорот. В летний сезон интенсивность ветрового воздействия ослабевает и, как результат, уменьшается энергия поверхностных течений. В это время картина циркуляции становится менее упорядоченной, разбиваясь на ряд вихрей. Такая схема циркуляции, разумеется, является упрощенной.

Поведение ОЧТ вблизи восточной кромки шельфа, где оно меняет направление, является определяющим для формирования течений на СЗШ. Иногда интенсивная струя ОЧТ заходит частично на шельф, а иногда отходит от его кромки. В первом случае образуется мощный поток воды из глубоководной части моря на СЗШ, который существенно влияет на циркуляцию вод в шельфовой зоне. На основе результатов реанализа [8] показано, что поток воды в поверхностном слое моря через кромку шельфа, проходящую вдоль изобаты 200 м, в основном направлен из глубоководной части бассейна на шельф. Направление потока воды через кромку шельфа (вместе с ветровым воздействием) является одним из ключевых факторов, определяющих циркуляцию на СЗШ в поверхностном слое. В то же время наличие возле западного берега большого количества распресненной воды, обусловленного стоком рек (главным образом Дуная), существенно влияет на формирование картины течений в подповерхностном слое моря.



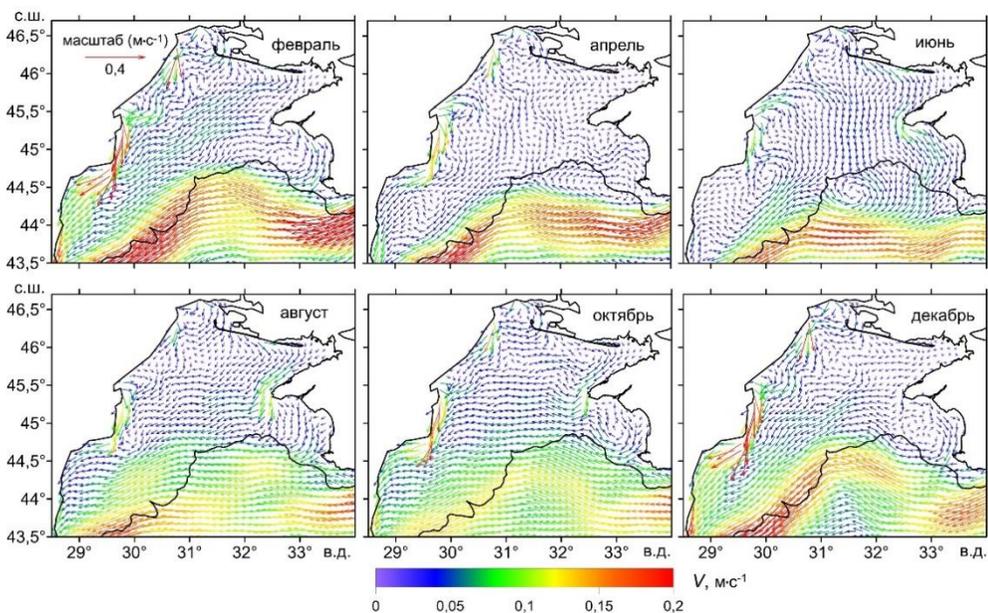
Р и с. 1. Карты средних за весь период течений на СЗШ на разных горизонтах

Fig. 1. Maps of the currents (average over the whole period) on the NWS at different horizons

Рассмотрим среднюю циркуляцию вод на СЗШ в поверхностном слое моря на разных горизонтах, полученную осреднением за 21 год (рис. 1).

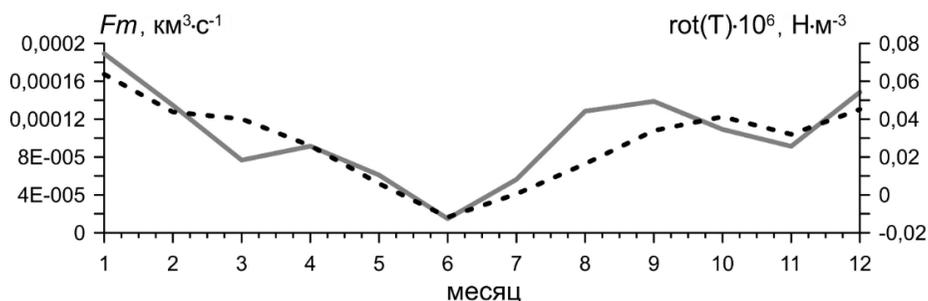
На поверхности моря на большей части СЗШ течения направлены на юго-запад, что обусловлено влиянием ОЧТ, струя которого частично заходит на шельф, и воздействием ветра. Поток воды прижимается к западному берегу, что вызывает интенсивное компенсационное вдольбереговое течение, направленное на юг. Помимо ОЧТ и вдольберегового течения хорошо видно проявление Севастопольского антициклона. В подповерхностном слое картина меняется. На горизонтах ниже 20 м струя ОЧТ и Севастопольский антициклон проявляются отчетливо, но вдольбереговое течение меняет направление на противоположное. Причем это противотечение наблюдается вплоть до горизонта 50 м.

Сезонный цикл изменения поверхностной циркуляции на СЗШ представлен на рис. 2 в виде карт течений для шести месяцев. В зимнее время (декабрь и февраль) струя ОЧТ интенсивна и частично заходит на шельф. Севастопольский антициклон прижат к западному крымскому берегу. На основной части шельфа поверхностное течение направлено на юго-запад. Вдоль западного берега моря хорошо видно интенсивное вдольбереговое течение, направленное на юг. В апреле и июне струя ОЧТ восточнее  $31^\circ$  в. д. отходит от кромки шельфа. Севастопольский антициклон на апрельской карте течений не идентифицируется, а на июньской карте он расположен далеко от крымского берега. Вдольбереговое струйное течение в апреле заметно лишь в южной части, а в июне оно как таковое отсутствует. В августе и октябре ОЧТ размыто и его интенсивность падает.



**Рис. 2.** Карты среднемесячных климатических поверхностных течений на СЗШ  
**Fig. 2.** Maps of the monthly average climatic surface currents on the NWS

Таким образом, в те месяцы, когда струя ОЧТ заходит на СЗШ, а это наблюдается в основном в зимний сезон, хорошо видно направленное на юг интенсивное вдольбереговое течение, компенсирующее поступление на шельф воды из глубоководной части Черного моря. В те месяцы, когда ОЧТ отходит от кромки шельфа или его интенсивность не велика, вдольбереговое течение либо слабо, либо отсутствует. В работе [8] показано, что поток массы воды в верхнем слое моря через кромку СЗШ, ограниченную изобатой 200 м, определяется расположением струи ОЧТ, которое, в свою очередь, зависит от завихренности поля напряжения трения ветра над западной частью Черного моря. На рис. 3 приведены среднемесячные климатические значения соответствующих величин.

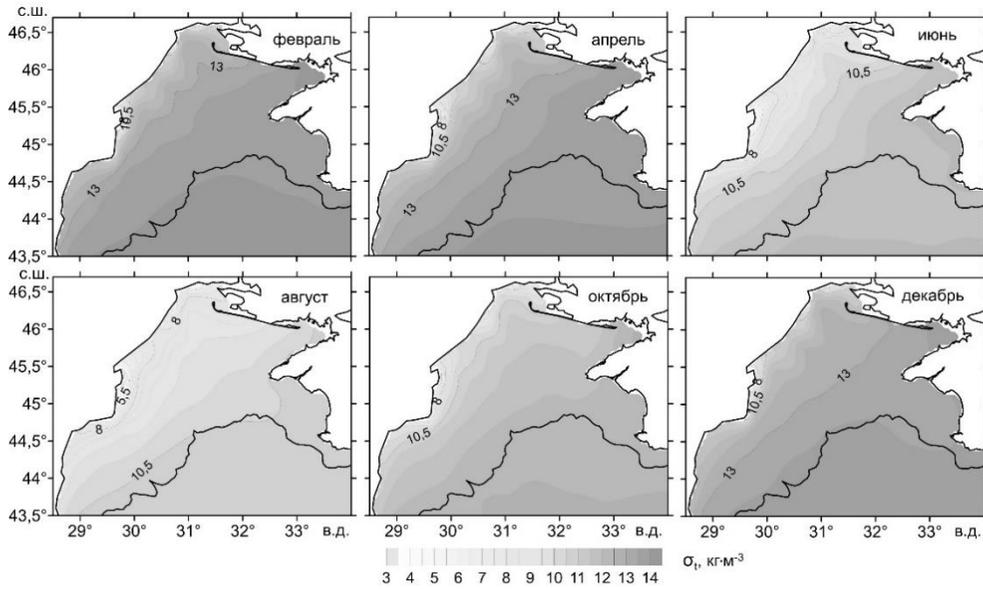


**Р и с. 3.** Среднемесячные климатические значения потоков массы воды на СЗШ через сечение вдоль изобаты 200 м (сплошная линия) и завихренности поля напряжения трения ветра над западной частью Черного моря (штриховая линия)

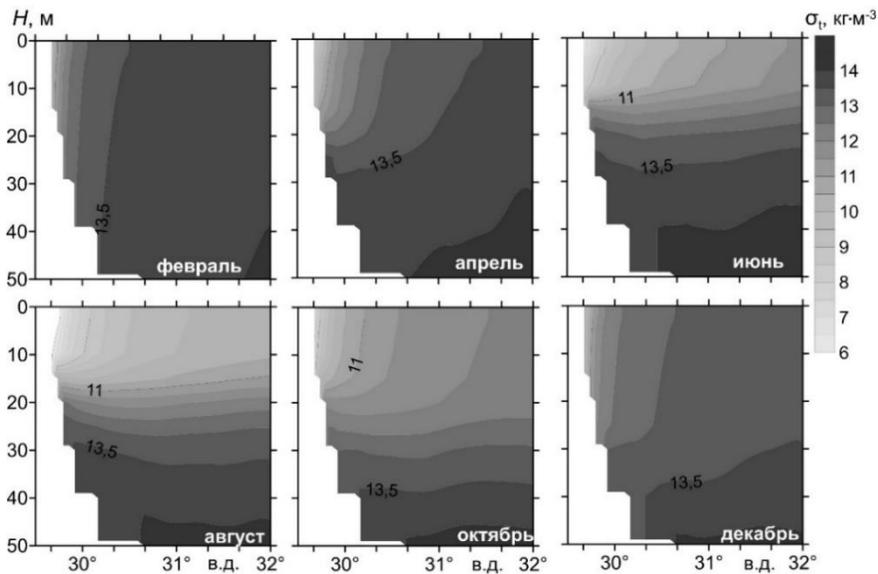
**F i g. 3.** Monthly average climatic values of water mass fluxes on the NWS through the section along the 200 m isobath (solid line) and vorticity of the wind stress field over the western part of the Black Sea (dashed line)

Видна хорошая корреляция значений потока массы жидкости с завихренностью поля ветра. Чем больше значение завихренности, тем больше поток воды через боковое сечение шельфа, соответственно, интенсивнее вдольбереговое компенсационное течение на юг. В июне завихренность поля напряжения трения минимальна, соответственно, поток воды на шельф также минимален, и, как видно на рис. 2, вдольбереговое течение, направленное на юг, на климатической карте отсутствует.

Наличие большого количества распресненной воды, обусловленного стоками рек, является характерной особенностью СЗШ Черного моря. На рис. 4 представлены среднемесячные климатические карты распределения плотности поверхностной воды, полученные по результатам реанализа. Поступление большого количества пресной воды вызывает сильную горизонтальную плотностную стратификацию. Наиболее выражено горизонтальная стратификация проявляется в зимний период, когда поверхностные течения, вызываемые ветровым воздействием, прижимают опресненные воды к западному побережью. Летом площадь опресненных вод увеличивается, а горизонтальный градиент плотности уменьшается.



**Р и с. 4.** Карты распределения среднемесячных климатических поверхностных значений плотности  $\sigma_t = (\rho - \rho_0)$ ,  $\rho_0 = 1000 \text{ кг/м}^3$   
**Fig. 4.** Maps of distribution of the monthly average climatic surface density  $\sigma_t = (\rho - \rho_0)$ ,  $\rho_0 = 1000 \text{ кг/м}^3$



**Р и с. 5.** Зональные сечения среднемесячных климатических значений плотности  $\sigma_t$  вдоль 45° с. ш.  
**Fig. 5.** Zonal sections of the monthly average climatic density  $\sigma_t$  along 45° N

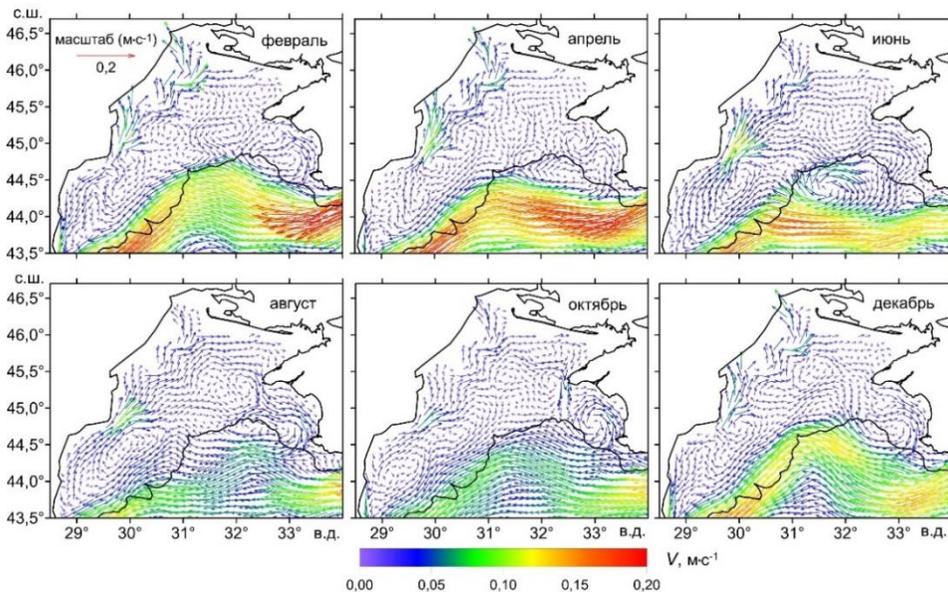
Помимо циркуляции, это связано еще и с тем, что в июне сток рек максимален. Как видно на рис. 4, общий уровень плотности летом существенно ниже, что вызвано влиянием температуры на плотность морской воды. Вертикальное распределение плотности воды у берега показано на рис. 5 в виде раз-

резов по 45° с. ш. Плотность сильно стратифицирована по горизонтали. Особенно хорошо это видно в феврале. В этом месяце плотность морской воды почти однородна в вертикальном направлении из-за интенсивного перемешивания, вызванного сильным ветром и тепловой конвекцией. Летом горизонтальный градиент плотности уменьшается, но появляется заметная вертикальная стратификация. Такие особенности распределения плотности в прибрежной зоне СЗШ приводят к тому, что течения на глубине существенно отличаются от течений в поверхностном слое моря.

На рис. 6 представлены карты течений на глубине 20 м на СЗШ для тех же месяцев, что и на рис. 2. В районе морской границы шельфа на всех представленных картах на глубине 20 м, как и в поверхностном слое моря, наблюдаются течения, направленные на юго-запад, что является проявлением ОЧТ. На всех картах также виден Севастопольский антициклон. Существенной отличительной особенностью картины течений на глубине 20 м является направленное на север вдольбереговое течение, противоположное направлению вдольберегового течения в поверхностном слое. Причем это течение на глубине 20 м наблюдается во все месяцы. Наличие вдольберегового течения, направленного на север, является результатом горизонтальной плотностной стратификации вод, вызванной поступлением в поверхностный слой большого объема пресных вод с речным стоком. Отклонение давления от среднего на горизонте определяется формулой

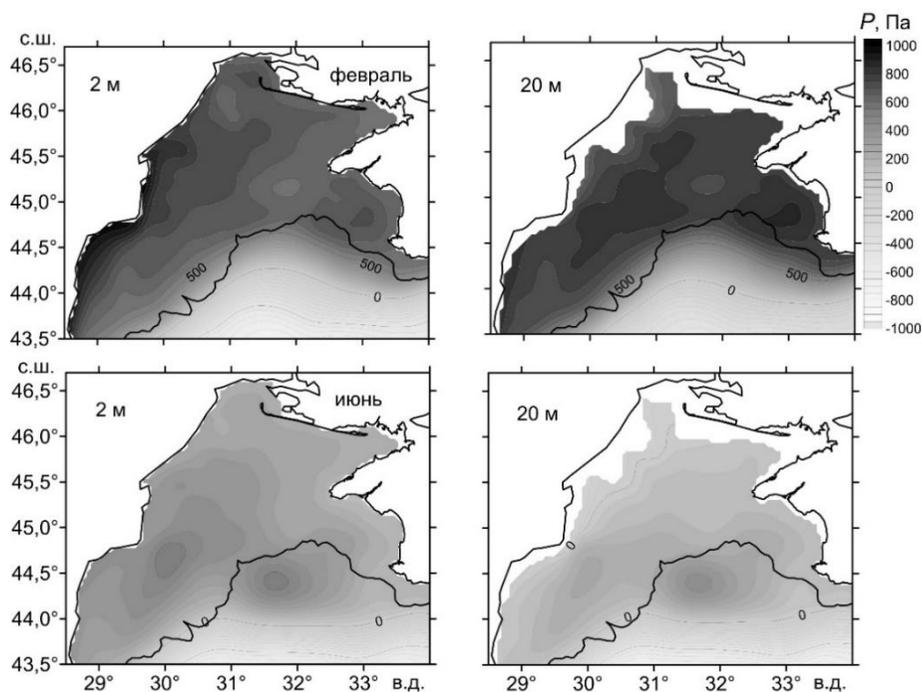
$$P = \rho_s g \zeta + g \int_0^z (\rho(x, y, z') - \rho^*(z')) dz', \quad (1)$$

где  $\rho_s$  – плотность воды на поверхности моря;  $\zeta$  – возвышение свободной поверхности;  $\rho^*(z)$  – средняя плотность на горизонте;  $\rho(x, y, z)$  – плотность морской воды;  $g$  – ускорение свободного падения.



**Рис. 6.** Карты среднемесячных климатических течений на горизонте 20 м

**Fig. 6.** Maps of the monthly average climatic currents on the horizon 20 m



**Р и с. 7.** Карты распределения среднемесячных климатических значений давления на верхнем горизонте и на глубине 20 м для февраля (сверху) и июня (снизу). Показано отклонение от среднего на соответствующем горизонте (Па)

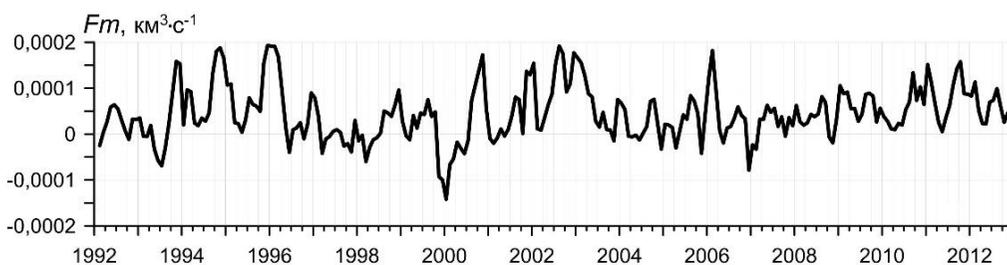
**Fig. 7.** Distribution of the monthly average climatic values of pressure on the upper horizon and at the 20 m depth for February (above) and June (below). The deviation from the mean on the corresponding horizon is shown (Pa)

Давление, таким образом, определяется двумя слагаемыми. Первое – вклад возвышения свободной поверхности, второе – вклад интегральной плотности воды на заданном горизонте. На поверхности моря работает только первое слагаемое. Поэтому, когда поверхностные течения направлены к западному берегу (см. рис. 1, 2), уровень свободной поверхности возле него повышается. Как результат, у берега давление становится выше и образуется течение, направленное к югу. С увеличением глубины рассматриваемого горизонта, на величину давления начинает влиять второй член, зависящий от плотности воды. Из-за сильной горизонтальной стратификации, вызванной пресными водами у берега, второй член в выражении (1) работает таким образом, что градиент этой части давления направлен от берега. На некоторой глубине вклад второго слагаемого может стать преобладающим, и давление у берега будет ниже. В этом случае вдольбереговое течение будет направлено к северу. То есть наблюдается классическое противотечение, когда на поверхности вода течет в одну сторону, а на некоторой глубине – в противоположную. Эту ситуацию можно наблюдать на рис. 1 и 6. Чтобы проиллюстрировать описанное выше, на рис. 7 приведены распределения давления на верхнем горизонте (в этом случае оно определяется возвышением свободной поверхности) и на горизонте 20 м для двух месяцев: февраля и июня. В феврале на поверхности наблюдается интенсивное вдольбереговое течение, направленное на юг, 468

а в июне такое течение отсутствует. На глубине 20 м в обоих случаях наблюдается течение, направленное на север. На картах распределения давления в феврале на поверхности давление выше непосредственно возле берега, а в июне максимум давления смещен от берега. На горизонте 20 м максимум давления отстоит от береговой линии для обоих месяцев, что объясняется влиянием горизонтальной стратификации плотности.

До сих пор мы рассматривали наиболее существенные особенности течений на СЗШ и на основе среднемесячных климатических полей анализировали причины, вызывающие эти особенности. Основными факторами, влияющими на характер циркуляции в рассматриваемом районе, являются ветровое воздействие и распресненность прибрежных вод, вызванная речными стоками. Ключевым фактором, определяющим циркуляцию поверхностных вод на СЗШ, является поток массы жидкости через границу шельфа, проходящую по изобате 200 м. Этот поток в основном зависит от того, насколько далеко на шельф заходит струя ОЧТ. Поток массы, как показано выше (рис. 3), хорошо коррелирует с завихренностью поля напряжения трения ветра. Течение же в подповерхностном слое возле западного берега определяется преимущественно горизонтальной плотностной стратификацией. Однако, если рассматривать не климатические поля, а поля, соответствующие определенному моменту времени, то описанная выше схема может меняться. На рис. 8 приведена эволюция во времени потока массы жидкости в поверхностном слое моря через границу СЗШ вдоль изобаты 200 м. Значения потоков рассчитаны на основе полей, полученных при выполнении реанализа.

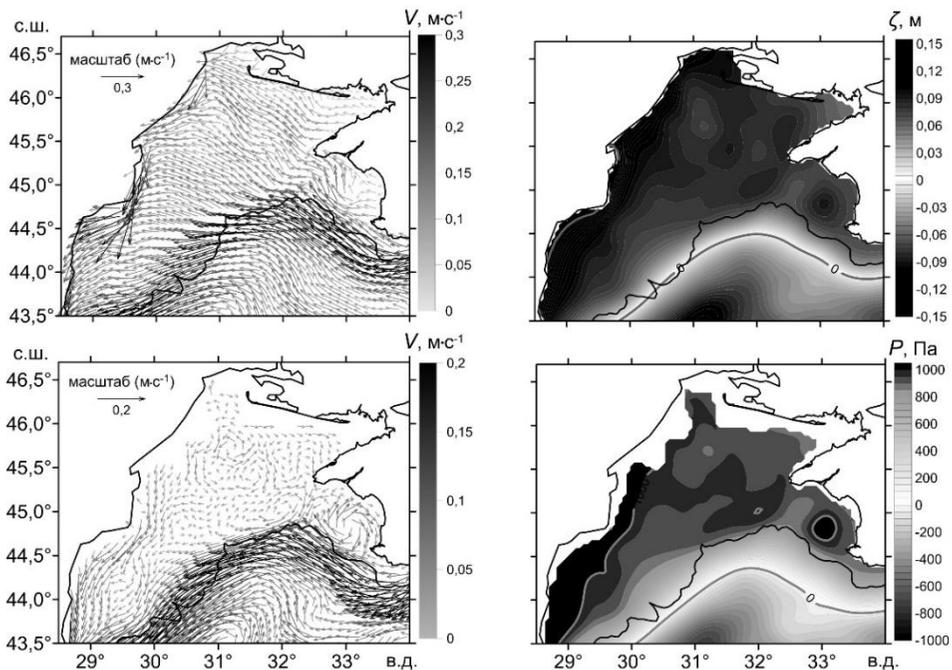
График на рис. 8 представляет среднемесячные значения, сглаженные скользящим средним с окном три месяца. Согласно приведенному графику поток воды в верхнем слое направлен в основном из глубоководной части моря на шельф. Рассмотрим примеры течений на СЗШ, соответствующие двум экстремальным значениям потока воды. Первый случай соответствует высокому значению потока на шельф (зима 1996 г.), а второй – с шельфа в глубоководную часть моря (зима 2000 г.).



**Р и с. 8.** Временная эволюция потоков массы воды на СЗШ через сечение вдоль изобаты 200 м  
**Fig. 8.** Time evolution of the water mass flows on the NWS through the section along the 200 m isobath

На рис. 9 представлены карты средних за сезон полей для первого случая. Верхний ряд соответствует верхнему горизонту, нижний ряд – горизонту 20 м. Слева показаны карты течений, а справа – карты возвышения свободной поверхности и аномалии давления на глубине 20 м. На картах течений, как на

поверхности, так и на горизонте 20 м, отчетливо видна мощная струя ОЧТ, которая проходит вдоль границы шельфа. Также на обоих горизонтах виден Севастопольский антициклон (на поверхности он не так сильно выражен из-за ветрового воздействия на поверхностные воды). Поверхностные течения направлены в сторону западного берега. В результате уровень моря возле него повышается до 15 см, а вдоль берега образуется струя интенсивного компенсационного течения, направленная на юг. На горизонте 20 м течения довольно слабы, но хорошо видна струя вдольберегового течения. При этом, в отличие от рассмотренных выше случаев климатических полей, это течение направлено к югу так же, как течение на поверхности. На карте аномалий давления видно, что давление максимально возле берега.

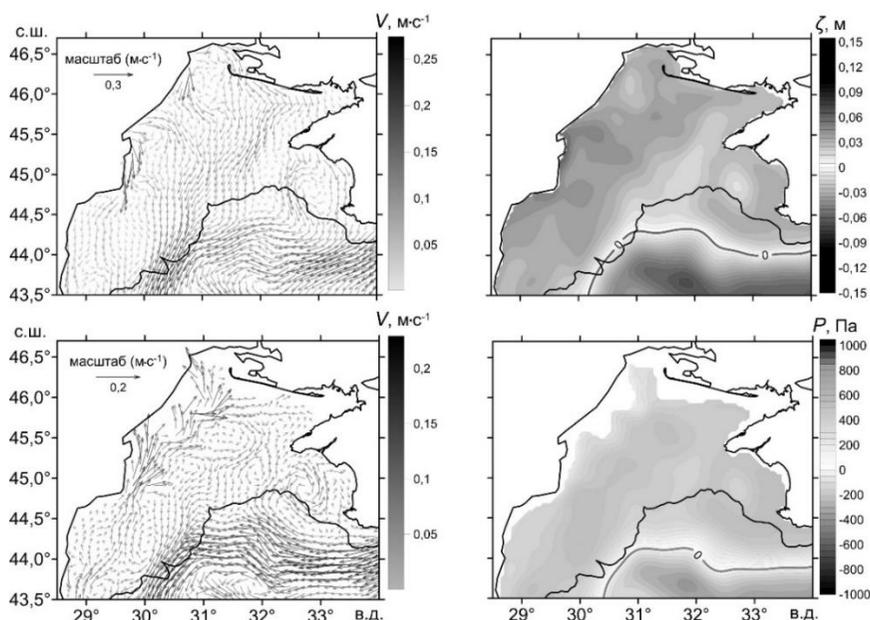


**Рис. 9.** Карты средних за сезон зимы 1996 г. течений на поверхности (слева сверху) и горизонте 20 м (слева внизу); распределение возвышения свободной поверхности (м) (справа сверху) и аномалии давления на горизонте 20 м (Па) (справа внизу)

**Fig. 9.** Maps of the mean currents for the 1996 winter season on the surface (above, on the left) and at the 20 m horizon (below, on the left); distribution of the free surface elevation (m) (above, on the right) and the pressure anomalies at the 20 m horizon (Pa) (below, on the right)

Таким образом, в случае аномально высокого значения потока воды из глубоководной части Черного моря на СЗШ подъем уровня у западного берега становится настолько большим, что с глубиной влияние горизонтальной плотностной стратификации не компенсирует в поле давления (второй член в правой части выражения (1)) эффект возвышения уровня моря (первый член в правой части выражения (1)). В результате и на горизонте 20 м, и на поверхности давление становится выше у берега, а вдольбереговое течение так же, как и течение на поверхности, направлено на юг.

На рис. 10 приведены поля для зимы 2000 г., когда, согласно графику на рис. 8, поток воды в верхнем слое был направлен с шельфа в глубоководную часть. Течения на шельфе в этом случае как на поверхности, так и на горизонте 20 м довольно слабы. Струя ОЧТ менее интенсивна и расположена ниже кромки шельфа. Соответственно, возвышение уровня у западного берега мало, а вдольбереговое течение на верхнем горизонте проявляется только на небольших участках. На горизонте 20 м хорошо видно вдольбереговое течение, направленное на север, а максимум давления расположен справа от берега. То есть в этом случае вклад горизонтальной стратификации в выражении (1) преобладает.



**Р и с. 10.** Карты средних за сезон зимы 2000 г. течений на поверхности (слева сверху) и горизонте 20 м (слева снизу) и распределение возвышения свободной поверхности (м) (справа сверху) и аномалии давления на горизонте 20 м (Па) (справа снизу)

**F i g. 10.** Maps of the mean currents for the 2000 winter season on the surface (above, on the left) and at the 20 m horizon (below, on the left); and distribution of the free surface elevation (m) (above, on the right) and the pressure anomalies at the 20 m horizon (Pa) (below, on the right)

### Заключение

На основе массива гидродинамических полей за 21 год, полученных в результате численного моделирования с ассимиляцией данных спутниковых измерений, был проведен анализ течений на СЗШ Черного моря. Из-за воздействия ветра поверхностные течения на СЗШ направлены в основном на юго-запад, что вызывает вдольбереговое течение, направленное на юг. Наиболее интенсивные течения в поверхностном слое наблюдаются в зимнее время. Соответственно, вдольбереговое течение наиболее интенсивно в этот сезон. Летом интенсивность течений падает и вдольбереговое течение может отсутствовать. С глубиной картина течений меняется. В частности, наблюдается вдольбереговое противотечение, направленное к северу. Следует заметить, что на климатических картах оно присутствует в течение всего года.

В работе показано, что вдольбереговое течение в подповерхностном слое, направленное на север, вызвано горизонтальной плотностной стратификацией, формирующейся в результате поступления пресной воды в поверхностный слой со стоком рек. Если на поверхности давление определяется возвышением свободной поверхности (как правило, максимальным возле берега), то с глубиной начинает влиять фактор неоднородности поля плотности, минимальной у берега. В результате на глубине 15–20 м градиент давления меняет знак. Соответственно, меняет знак вдольбереговое течение.

Описанная схема течений возле берега наблюдается не всегда. Возвышение уровня моря возле западной границы может достигать больших значений при экстремально высоких значениях потока воды через границу СЗШ вдоль изобаты 200 м. В результате вклад горизонтальной стратификации в градиент давления не компенсирует вклад от градиента уровня. В этом случае вдольбереговое течение не меняет своего направления с глубиной, а подповерхностное противотечение отсутствует.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Изменчивость гидрофизических полей Черного моря / [А. С. Блатов и др.] ; под ред. Б. А. Нелепо. Ленинград : Гидрометеиздат, 1984. 240 с.
2. Построение поля течений в Черном море на основе вихререзающей модели с ассимиляцией климатических полей температуры и солености / С. Г. Демьшев [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : МГИ, 2007. Вып. 15. С. 215–226.
3. Modelling the Danube-influenced north-western continental shelf of the Black Sea. I: Hydrodynamical processes simulated by 3-D and box models / J. M. Beckers [et al.] // Estuarine, Coastal and Shelf Science. 2002. Vol. 54, iss. 3. P. 453–472. doi:10.1006/ecss.2000.0658
4. *Дорофеев В. Л., Сухих Л. И.* Анализ изменчивости гидрофизических полей Черного моря в период 1993–2012 годов на основе результатов выполненного реанализа // Морской гидрофизический журнал. 2016. № 1. С. 33–48. doi:10.22449/0233-7584-2016-1-33-48
5. *Демьшев С. Г., Коротаев Г. К.* Численная энергосбалансированная модель бароклинных течений океана с неровным дном на сетке C // Численные модели и результаты калибровочных расчетов течений в Атлантическом океане. М. : ИВМ РАН, 1992. С. 163–231.
6. *Суслин В. В., Чурилова Т. Я.* Упрощенный метод расчета спектрального диффузного коэффициента ослабления света в верхнем слое Черного моря на основе спутниковых данных // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : МГИ, 2010. Вып. 22. С. 47–60.
7. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system / D. P. Dee [et al.] // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2011. Vol. 137, iss. 656. P. 553–597. doi:10.1002/qj.828
8. *Дорофеев В. Л., Сухих Л. И.* Исследование потоков компонентов морской экосистемы с северо-западного шельфа в глубоководную часть Черного моря // Морской гидрофизический журнал. 2020. Т. 36, № 5. С. 501–513. doi:10.22449/0233-7584-2020-5-501-513

*Об авторах:*

**Дорофеев Виктор Львович**, ведущий научный сотрудник, отдел динамики океанических процессов, ФГБУН МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, **ResearcherID: G-1050-2014**, viktor.dorofeev@mhi-ras.ru

**Сухих Лариса Ивановна**, научный сотрудник, отдел динамики океанических процессов, ФГБУН МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **ResearcherID: M-4381-2018**, l.sukhikh@gmail.com