

Завихренность напряжения трения ветра на поверхности Черного моря при различных ветровых режимах

© 2017 М. В. Шокуров, И. Г. Шокурова*

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

**E-mail: igshokurova@mail.ru*

Поступила в редакцию 06.03.2017 г. После доработки 17.05.2017 г.

Анализируется изменчивость величины и пространственного распределения завихренности напряжения трения ветра в Черном море в зависимости от направления преобладающего над морем приземного воздушного потока. Используются данные о скорости ветра на высоте 10 м реанализа *ERA Interim* Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды за период 1979 – 2015 гг. с пространственным разрешением $0,75^\circ \times 0,75^\circ$ и временным разрешением 6 ч. Получено, что при северо-западном, северном и северо-восточном ветрах средняя по морю завихренность является циклонической в течение всего года, при юго-западном и западном – антициклонической. В среднем за год наибольшую повторяемость имеют северо-восточный и северный ветры, наименьшую – южный и юго-восточный. С учетом повторяемости ветра наибольший вклад в создание циклонической завихренности вносят ситуации с северо-восточным ветром, антициклонической – с западным.

Ключевые слова: Черное море, направление ветра, повторяемость направления ветра, завихренность напряжения трения ветра.

DOI: 10.22449/0233-7584-2017-6-13-26

Введение

Ветер и потоки плавучести на поверхности моря являются главными факторами, определяющими интенсивность крупномасштабной циркуляции в Черном море [1 – 3]. Воздействие ветра на морскую поверхность приводит к образованию дрейфовых течений, а пространственная неоднородность в поле ветра сопровождается возникновением экмановской вертикальной скорости, изменением возвышения морской поверхности и образованием градиентных течений. Завихренность ветра является количественной характеристикой пространственной неоднородности поля ветра, поэтому анализ годовой и межгодовой изменчивости величины завихренности важен для понимания причин изменчивости крупномасштабной циркуляции и вертикального обмена в море.

Физические механизмы, определяющие завихренность ветра и ее сезонную изменчивость, анализировались в [2, 4]. Показано, что кроме фоновой завихренности, создаваемой крупномасштабной средней циркуляцией атмосферы, существуют дополнительные источники, связанные с термическим и динамическим орографическими эффектами за счет гор [4, 5], а также муссонный эффект, обусловленный сезонными изменениями контрастов температуры между морем и окружающей сушей [2, 4, 6]. Муссонный эффект оказывает значительное влияние на сезонные колебания завихренности ветра [2, 4]. Зимой положительная разность между потоками тепла в атмосферу из

моря и от окружающей суши генерирует циклоническую (положительную) завихренность ветра за счет конвергенции в атмосферном пограничном слое [2, 4]. Летом ситуация обратная – отрицательная разность между потоками тепла генерирует антициклоническую (отрицательную) завихренность. В среднем за год в формировании завихренности ветра преобладающим является динамический орографический эффект [4].

Количественные оценки сезонной изменчивости завихренности напряжения трения ветра в Черном море по данным различных реанализов, а также анализ ее пространственного распределения выполнены в [4, 7 – 11]. Оценки величины завихренности и особенности ее распределения различаются в зависимости от пространственного разрешения реанализа. По всем оценкам в среднем за год над Черным морем преобладает положительная завихренность ветра, что наряду с другими внешними воздействиями (сток рек и потоки тепла) поддерживает циклонический характер крупномасштабной циркуляции в море. Зависимость средней по морю завихренности ветра от его направления по среднемесячным данным о ветре реанализа *ERA-40 European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)* рассматривалась в [12]. В этой работе с применением метода нейронных сетей были выделены 6 характерных типовых полей ветра над морем. Выделение преобладающего направления ветра над морем и типизация, в соответствии с этим направлением, синоптических ситуаций крупномасштабной циркуляции атмосферы выполнены в [13].

Целью настоящей работы является анализ роли направления преобладающего над морем приземного воздушного потока в формировании величины и пространственного распределения завихренности напряжения трения ветра. При этом предполагается, что направление потока обусловлено распределением атмосферного давления, сформированного в результате совместного действия всех механизмов, указанных выше. Для поставленной цели проводится выявление преобладающего направления ветра и выполняется его сопоставление с величиной и распределением завихренности, которые фиксируются при данном направлении. Наряду со средней завихренностью, создаваемой ветром определенного направления, рассматривается завихренность с учетом повторяемости ветра – накопленная завихренность, вычисляемая суммированием по числу сроков с определенным направлением ветра. Знак и величина накопленной завихренности характеризуют вклад ветра каждого направления в создание вертикальной скорости на нижней границе экмановского слоя.

Данные и методы их обработки

Используются данные о скорости ветра на высоте 10 м над уровнем моря реанализа *ERA-Interim* с пространственным разрешением $0,75^\circ \times 0,75^\circ$ за период 1979 – 2015 гг. (38 лет) с интервалом 6 ч [14] (54056 временных сроков).

Для каждого 6-часового срока по данным, попадающим на акваторию моря (рис. 1), рассчитывались напряжение трения ветра, его завихренность и преобладающее направление. Напряжение трения ветра вычислялось по аэродинамической формуле $\tau = \rho_a C_d |\mathbf{V}| \mathbf{V}$ (Н/м²), где ρ_a – плотность возду-

ха (кг/м^3); $C_d = 1,3 \cdot 10^{-3}$ – безразмерный коэффициент сопротивления морской поверхности; $\mathbf{V} = (u, v)$ – скорость ветра (м/с). Завихренность напряжения трения ветра

$$\text{rot}_z \boldsymbol{\tau} = \partial \tau_y / \partial x - \partial \tau_x / \partial y \quad (\text{Н/м}^3) \quad (1)$$

вычислялась в узлах сетки, являющихся центрами квадратов, в вершинах которых находятся исходные данные по ветру (рис. 1).

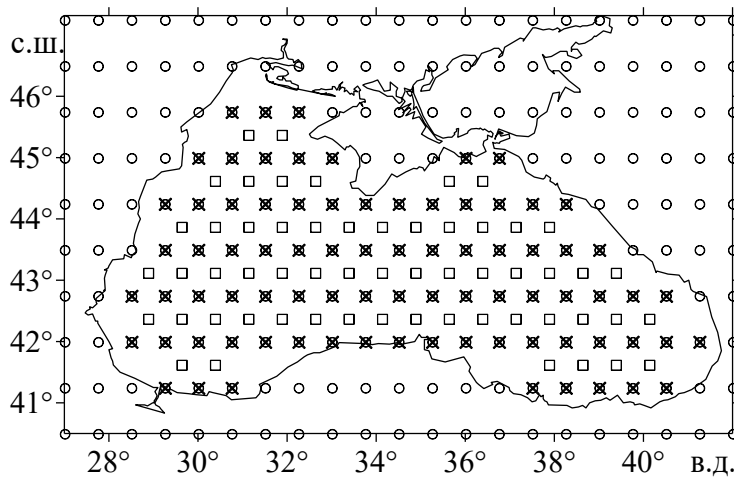


Рис. 1. Расположение узлов сетки: с данными по ветру – \circ , по акватории моря – \times , со значениями завихренности – \square

Преобладающее над акваторией направление ветра определялось для каждого временного срока путем осреднения компонент вектора скорости $\mathbf{V} = (u, v)$ по акватории моря. Полученное направление привязывалось к одному из основных географических направлений φ ($\varphi = 1, \dots, 8$): северному (С), северо-восточному (СВ), восточному (В), юго-восточному (ЮВ), южному (Ю), юго-западному (ЮЗ), западному (З), северо-западному (СЗ). Таким образом, для каждого 6-часового срока полю завихренности ставилось в соответствие направление преобладающего ветра.

Завихренность напряжения трения ветра в зависимости от направления преобладающего ветра с учетом сезонной изменчивости вычислялась следующим образом. Совокупность полей завихренности всех сроков N была разделена на группы (компози́ты), соответствующие каждому из направлений ветра φ для каждого месяца m ($m = 1, \dots, 12$). Количество сроков в каждой группе равно $N_{\varphi, m}$ ($N = \sum_{\varphi, m} N_{\varphi, m}$).

Для каждой группы в узлах сетки вычислялись:

– средняя по числу сроков $N_{\varphi, m}$ завихренность

$$\text{rot}_z \boldsymbol{\tau}(\varphi, m) = \overline{\text{rot}_z \boldsymbol{\tau}}^{N_{\varphi, m}} \quad (\text{Н/м}^3), \quad (2)$$

– суммированная по числу сроков $N_{\varphi,m}$ накопленная завихренность

$$(\text{rot}_z \tau(\varphi, m))_A = T \sum_{N_{\varphi,m}} \text{rot}_z \tau \quad (\text{H} \cdot \text{с} / \text{M}^3), \quad (3)$$

где T (с) – интервал между сроками (6 ч). Далее по полученным полям рассчитывались средние по акватории значения.

При вычислении завихренности в зависимости от направления ветра без учета сезонного хода совокупность полей завихренности всех сроков разделялась на 8 групп, соответствующих каждому направлению ветра φ . Число сроков в каждой группе равно N_φ ($N = \sum_\varphi N_\varphi$). Для этих групп в каждой

точке сетки вычислялись средняя по числу сроков завихренность $\text{rot}_z \tau(\varphi)$ и суммированная по числу сроков накопленная завихренность $(\text{rot}_z \tau(\varphi))_A$.

Аналогично рассчитывались значения модуля скорости ветра в зависимости от его направления – $V(\varphi, m)$ и $V(\varphi)$.

Среднемесячные значения завихренности напряжения трения ветра $\text{rot}_z \tau(m)$ и модуля скорости ветра $V(m)$ рассчитывались осреднением по числу сроков N_m ($N = \sum_m N_m$), соответствующих каждому месяцу m .

Повторяемость $P(\varphi)$ ветра каждого направления φ вычислялась в процентах от общего числа сроков. В среднем за год повторяемость ветра определялась как $P(\varphi) = N_\varphi 100 / N$, по месяцам – как $P(\varphi, m) = N_{\varphi,m} 100 / N_m$.

Зависимость пространственного распределения завихренности напряжения трения ветра от направления преобладающего ветра анализировалась на основе составления групп (композигов) с определенным направлением ветра φ для зимнего (декабрь – февраль) и летнего (июнь – август) сезонов.

Результаты

Средняя по акватории завихренность напряжения трения ветра. Сезонный ход средней по акватории завихренности напряжения трения ветра $\text{rot}_z \tau(m)$ (рис. 2, а) характеризуется усилением циклонической завихренности в зимние месяцы с максимумом в феврале ($3,6 \cdot 10^{-8}$ Н/м³), ослаблением весной и сменой завихренности на антициклоническую летом в одном месяце – июне ($-0,5 \cdot 10^{-8}$ Н/м³). В мае и июле значения завихренности близки к нулю, но имеют положительный знак. В среднем за год преобладает циклоническая завихренность ($1,6 \cdot 10^{-8}$ Н/м³).

Можно отметить, что при расчетах по данным с более высоким пространственным разрешением [9, 11], чем в настоящей работе, средняя по акватории завихренность положительная в течение всего года, по данным с более низким разрешением завихренность отрицательная во все летние месяцы [8, 10].

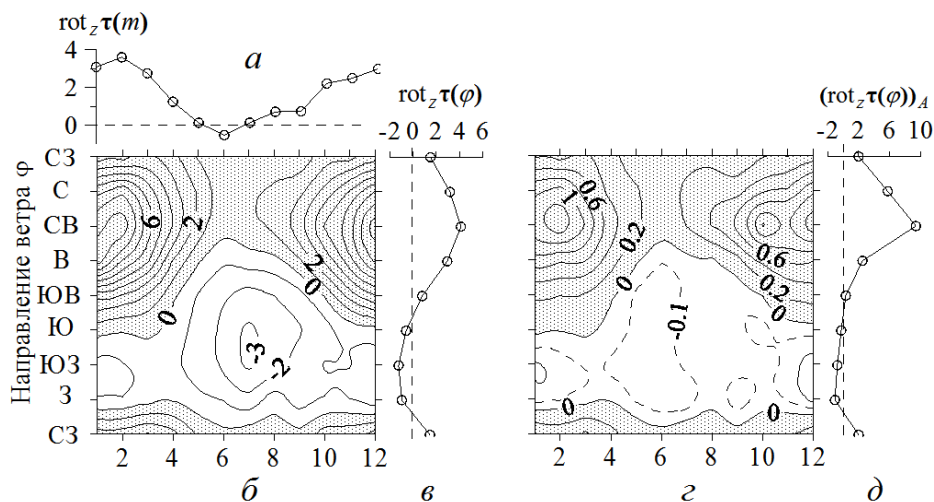


Рис. 2. Сезонный ход средней по морю завихренности напряжения трения ветра, $\times 10^{-8}$ Н/м³, (а); изменчивость завихренности, $\times 10^{-8}$ Н/м³, (б, в) и накопленной завихренности, Н·с/м³, (з, д) по месяцам (б, з) и в среднем за год (в, д) в зависимости от направления ветра

Диаграмма со значениями завихренности $\text{rot}_z \tau(\varphi, m)$ в зависимости от направления ветра по месяцам приведена на (рис. 2, б). При северном, северо-восточном и северо-западном ветрах завихренность напряжения трения ветра циклоническая в течение всего года, при северо-восточном ветре наблюдаются наибольшие значения. Максимальные значения циклонической завихренности ($9,6 \cdot 10^{-8}$ Н/м³) отмечаются при северо-восточном ветре в феврале и восточном – в январе.

При западном и юго-западном ветрах завихренность $\text{rot}_z \tau(\varphi, m)$ антициклоническая в течение всего года (рис. 2, б). Соответствующие ей максимальные по модулю отрицательные значения наблюдаются при юго-западном и южном ветрах в июле ($-3,2 \cdot 10^{-8}$ Н/м³). При восточном, юго-восточном и южном ветрах завихренность меняет знак в зависимости от сезона: зимой она циклоническая, летом – антициклоническая.

Зависимость завихренности $\text{rot}_z \tau(\varphi)$ от направления ветра без разделения на сезоны приведена на рис. 2, в. В среднем за год при северо-западном, северном, северо-восточном, восточном и юго-восточном ветрах средняя по акватории завихренность имеет положительный знак и является циклонической; при южном, юго-западном и западном ветрах завихренность отрицательная (антициклоническая). В среднем за год максимальная положительная завихренность достигается при северо-восточном ветре ($4,1 \cdot 10^{-8}$ Н/м³), максимальная по модулю отрицательная завихренность – при юго-западном ветре ($-1,2 \cdot 10^{-8}$ Н/м³).

Повторяемость преобладающего над морем направления ветра. Распределение по месяцам повторяемости ветра $P(\varphi, m)$ следующее (рис. 3, а). В декабре и январе наибольшую повторяемость имеют юго-западный и западный ветры, в феврале и марте – северо-восточный. Наименьшая повторяемость

емость в этот период у юго-восточного ветра. В апреле практически все ветры равнозначны по повторяемости. В мае ситуация похожая, но увеличивается повторяемость северо-восточного и западного ветров. С июня по октябрь повторяемость ветров с южной составляющей значительно уменьшается и составляет менее 10%. В июне увеличивается повторяемость западного, северо-западного и северного ветров. С июля по сентябрь высокая повторяемость у ветров с северной составляющей. В июле и августе повторяемость северного ветра составляет в среднем 30%, а северо-восточного в августе – более 30%. В октябре и ноябре наибольшая повторяемость у северо-восточного ветра.

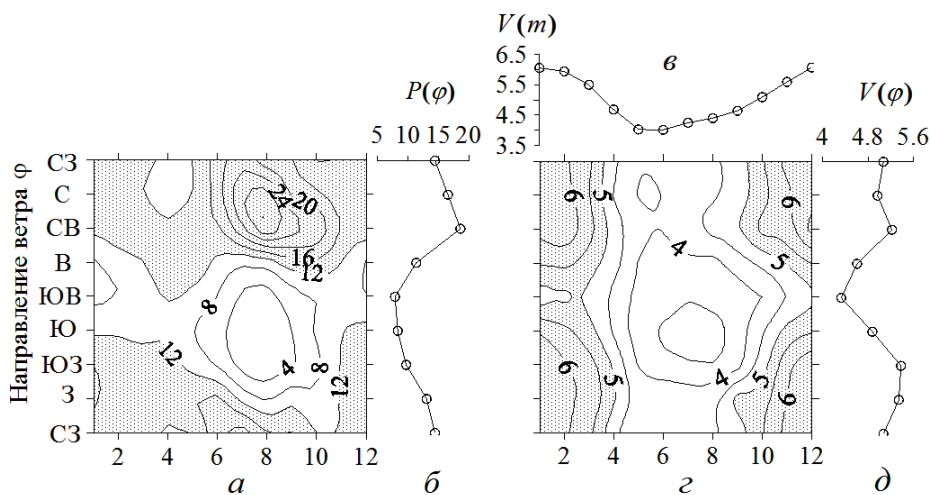


Рис. 3. Повторяемость направления ветра (%) по месяцам – а и в среднем за год – б; сезонный ход модуля скорости ветра (м/с) – в и его изменчивость в зависимости от направления ветра по месяцам – г и в среднем за год – д

В среднем за год (рис. 3, б) наибольшую повторяемость $P(\varphi)$ имеет северо-восточный ветер (18,6%), вторым по повторяемости является северный ветер (16,6%). Наименьшую повторяемость имеют южный и юго-восточный ветры (7,9 и 8,3% соответственно). Данные показатели хорошо согласуются с исследованиями [13,15].

Средняя по акватории накопленная завихренность напряжения течения ветра. Величина накопленной завихренности вычисляется суммированием по числу сроков с определенным направлением ветра. Таким образом учитывается повторяемость ветра каждого направления.

Сравнение диаграмм для средней $\text{rot}_z \tau(\varphi, m)$ (рис. 2, б) и накопленной $(\text{rot}_z \tau(\varphi, m))_A$ (рис. 2, г) завихренности показывает, что учет повторяемости ветра уточняет вклад каждого направления в создание завихренности в море. В январе при восточном ветре формируется высокая циклоническая завихренность (рис. 2, б), но его более низкая повторяемость по сравнению

с северо-восточным ветром (рис. 3, *a*) приводит к тому, что наибольший суммарный вклад в циклоническую завихренность вносят ситуации с северо-восточным ветром (рис. 2, *z*). Низкая повторяемость южного и юго-западного ветров в июле и августе также сопровождается их более низким вкладом в величину накопленной антициклонической завихренности, несмотря на то что в эти месяцы при ветрах данных направлений в среднем создается значительная антициклоническая завихренность (рис. 2, *b*). Поэтому в сезонной изменчивости (рис. 2, *a*) отрицательное значение завихренности наблюдается только в июне.

Зависимость накопленной завихренности ($\text{rot}_z \tau(\varphi)$)_A от направления ветра в среднем за год приведена на рис. 2, *d*. Высокая повторяемость северо-восточного ветра в течение всего года (рис. 3, *b*) приводит к тому, что его вклад в создание циклонической завихренности в Черном море заметно превышает вклад северного и восточного ветров и является основным. В среднем за год наибольшую антициклоническую завихренность создает юго-западный ветер (рис. 2, *e*), но за счет более высокой повторяемости западного ветра при нем отмечается наибольшая по модулю накопленная антициклоническая завихренность (рис. 2, *d*).

Модуль скорости ветра. Величина завихренности также тесно связана с величиной скорости ветра, так как при сильных ветрах сдвиг скорости за счет пространственной неоднородности ветра увеличивается. В Черном море вследствие его небольших размеров, смены подстилающей поверхности (над морем ветер сильнее, чем над сушей) и орографических эффектов вблизи берега величина сдвига увеличивается.

В сезонном цикле усиление ветра отмечается в зимние месяцы с максимумом в январе (6 м/с), ослабление – в летние с минимумом в июне (4 м/с) (рис. 3, *e*). Средняя по акватории скорость ветра в зависимости от его направления по месяцам $V(\varphi, m)$ (рис. 3, *z*) и в среднем за год $V(\varphi)$ (рис. 3, *d*) следующая.

В среднем за год наибольшая скорость достигается при северо-восточном, западном и юго-западном ветрах (рис. 3, *d*). Отметим, что при этих же ветрах создается максимальная по модулю циклоническая (северо-восточный ветер) и антициклоническая (западный и юго-западный ветер) завихренность. Скорость южного, юго-восточного и восточного ветров меньше скорости ветров других направлений (рис. 3, *d*). Это, по-видимому, связано с ослаблением скорости или изменением направления ветра вблизи берега за счет орографических эффектов, вызванных наличием высоких протяженных гор на восточном (Кавказские горы) и южном (Понтийские горы) побережьях Черного моря. Минимальная скорость в среднем за год у юго-восточного ветра. Этот ветер имеет наименьшую скорость и в течение всего года, кроме летних месяцев, когда низкая скорость отмечается у всех ветров с южной составляющей (рис. 3, *z*).

Сезонная изменчивость пространственного распределения завихренности напряжения трения ветра. В зимние месяцы (декабрь – февраль) почти вся акватория Черного моря занята областью с циклонической завихренностью (рис. 4). Высокие значения, составляющие более $8 \cdot 10^{-8} \text{ Н/м}^3$, отмечаются в восточной части моря, более $4 \cdot 10^{-8} \text{ Н/м}^3$ – в западной. В марте – апреле преобладает циклоническая завихренность, но ее величина снижается. С мая по сентябрь площадь областей с циклонической завихренностью уменьшается, с антициклонической – увеличивается. Их расположение имеет вид квадрупольной структуры, ранее отмеченной в [7]. В северо-восточной и юго-западной частях моря находятся области с циклонической завихренностью, в северо-западной и юго-восточной – с антициклонической. С июля в северо-восточной части моря и восточнее Босфора появляются участки со значениями циклонической завихренности более $8 \cdot 10^{-8} \text{ Н/м}^3$. Осенью размер всей области с циклонической завихренностью увеличивается. Размер областей с антициклонической завихренностью уменьшается, и они располагаются вдоль западного побережья моря и южного побережья в его юго-восточной части.

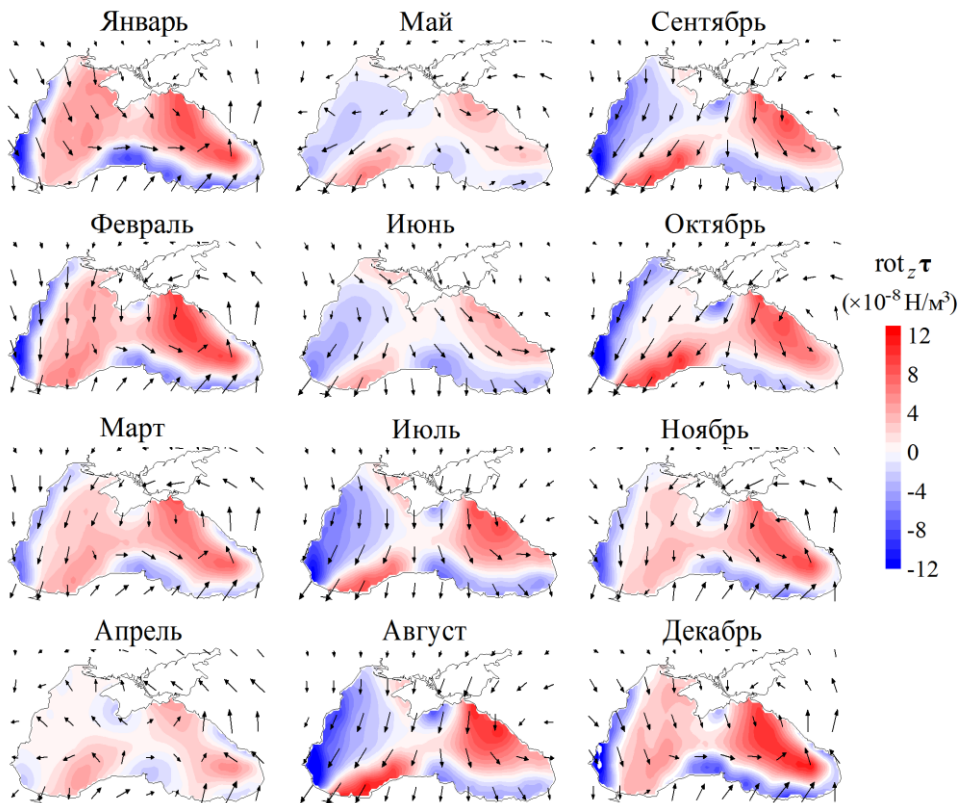


Рис. 4. Среднемесячные поля завихренности напряжения трения ветра

Следует отметить, что пространственное распределение завихренности напряжения трения ветра, вычисленное по данным различных реанализов, может существенно различаться [8]. Это связано как с пространственным разрешением данных, так и с различием параметризаций физических процессов в атмосферных моделях, по которым делается реанализ. Кроме того, длина ряда данных по времени может вносить изменения в детали пространственного распределения в связи с климатическими изменениями крупномасштабной атмосферной циркуляции.

Пространственное распределение, полученное в настоящей работе, близко к распределению из работы [8], вычисленному по данным реанализа *ECMWF* за период 1979 – 1993 гг. с пространственным разрешением $1,125^\circ \times 1,125^\circ$ [16]. Сравнение с распределением с высоким пространственным разрешением (25 км), полученным с использованием модели *HadRM3P* [9] и входных данных *ERA-40* (1958 – 2001 гг.) с разрешением $\sim 125 \times 125$ км [17], показывает отличие лишь в отдельных деталях.

Пространственное распределение завихренности напряжения трения ветра при ветрах разных направлений. На основе осреднения по ситуациям с определенным направлением ветра были построены поля пространственного распределения завихренности напряжения трения ветра $\text{rot}_z \tau(\varphi, m)$ (рис. 5). С учетом наличия годового хода в изменчивости пространственного распределения завихренности (рис. 4) поля строились отдельно для зимнего сезона – по объединенным данным за декабрь – февраль и для летнего сезона – по данным за июнь – август.

Для каждого направления ветра пространственное распределение завихренности имеет похожую структуру в оба сезона – положение участков с высокими значениями циклонической и антициклонической завихренности совпадает (рис. 5). Разница заключается в том, что летом области с циклонической завихренностью по размерам меньше зимних, с антициклонической – больше. Так, например, зимой при северном, северо-восточном и восточном ветрах большая часть акватории занята областью с циклонической завихренностью, летом эта область уменьшается (рис. 5, *a – в*). В летний сезон при южном и юго-западном ветрах почти вся акватория занята областью с антициклонической завихренностью (рис. 5, *д, е*).

При изменении направления ветра пространственное распределение завихренности меняется. А при смене ветра на противоположное направление положение участков с циклонической и антициклонической завихренностью меняется местами. Например, при северо-восточном ветре область с циклонической завихренностью занимает восточную, центральную и южную части моря, область с антициклонической завихренностью располагается вдоль западного и северо-западного побережий (рис. 5, *б*). При противоположном направлении (юго-западном ветре) ситуация обратная: область с антициклонической завихренностью расположена в восточной, центральной и южной частях моря, с циклонической – вдоль западного побережья и в районе северо-западного шельфа (рис. 5, *е*). Аналогичная смена знака завихренности напряжения трения ветра на поверхности моря наблюдается для каждого ветра при смене направления на противоположное.

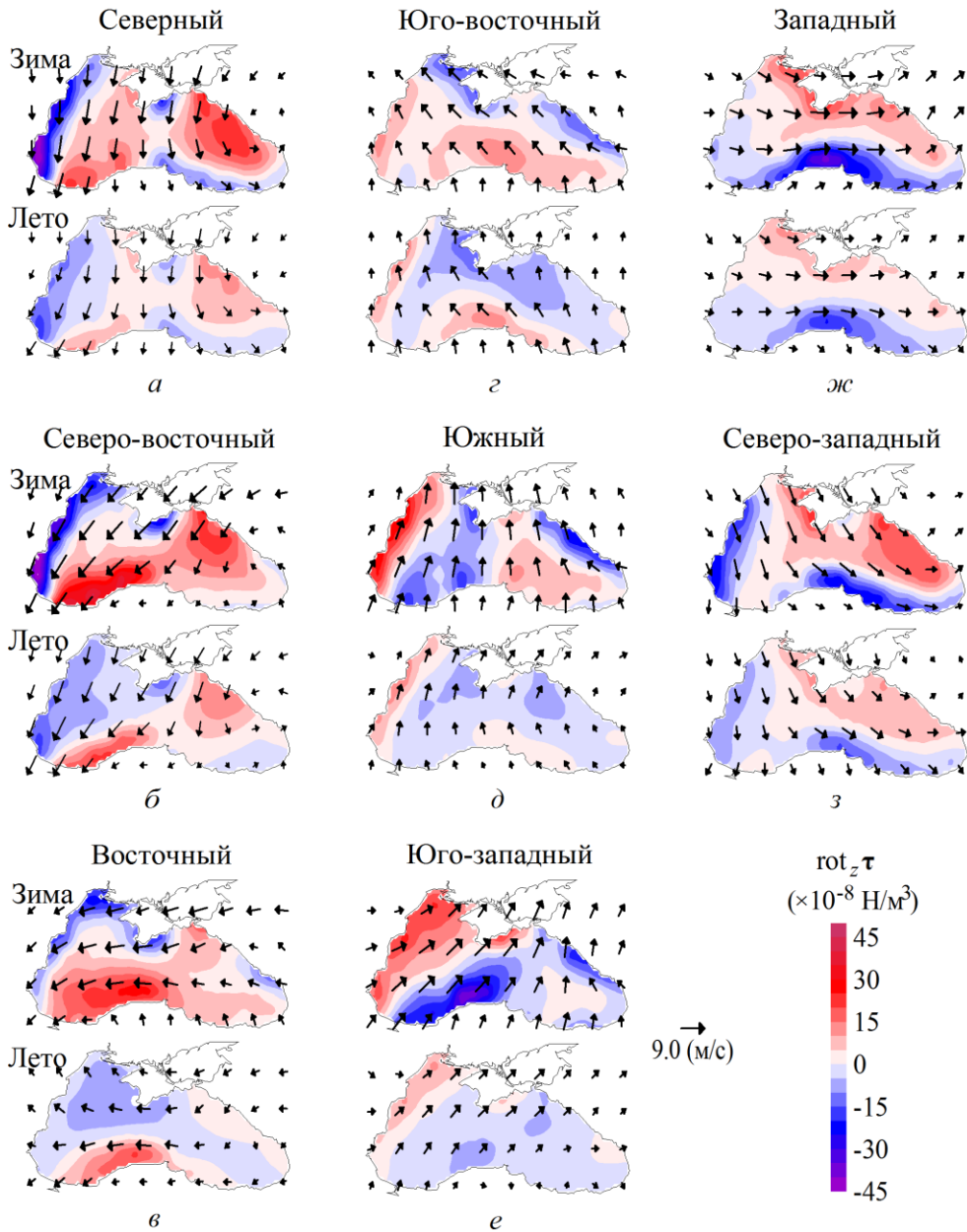


Рис. 5. Пространственное распределение $\text{rot}_z \tau$ ($\times 10^{-8} \text{ Н/м}^3$) и V (м/с) в зимний и летний сезоны в зависимости от направления ветра

Наиболее высокие значения циклонической завихренности отмечаются зимой при синоптических ситуациях с северным и северо-восточным ветрами. Области с высокими значениями локализованы в восточной части моря, а также вдоль побережья Турции, восточнее Босфора (рис. 5, а, б). Высокие значения антициклонической завихренности наблюдаются зимой при западном и юго-западном ветрах вдоль побережья Турции (рис. 5, е, ж).

Обсуждение

При ветре каждого направления на поверхности моря создается характерное для него поле завихренности напряжения трения ветра (рис. 5). Структура поля завихренности обусловлена как характером фоновой крупномасштабной атмосферной циркуляции, так и региональными особенностями, такими как конфигурация акватории моря и рельеф прилегающей к ней местности.

Каждому выделенному по основным географическим направлениям преобладающему над морем ветровому потоку соответствует типичная синоптическая ситуация крупномасштабной циркуляции атмосферы (фоновая циркуляция) [13]. Так, например, преобладающий над морем северо-восточный ветер обусловлен таким распределением крупномасштабного барического поля, при котором севернее Черного моря расположен обширный антициклон, а южнее – пониженное атмосферное давление [13]. Для юго-западного ветра распределение атмосферного давления обратное. Таким образом, смена направления преобладающего ветра является следствием изменения крупномасштабной синоптической ситуации.

На распределение и величину завихренности оказывают влияние региональные особенности [4, 5, 9]. Смена подстилающей поверхности море – суша создает дополнительный сдвиг скорости и усиливает завихренность. Кроме того, наличие орографических эффектов вблизи берега отражается на величине завихренности. Примером являются высокие значения завихренности напряжения трения ветра вдоль турецкого побережья с горным рельефом (Понтийские горы) – циклонической при северо-восточном и восточном ветрах и антициклонической – при юго-западном, западном и северо-западном (рис. 5, б, в, е – з). Наличие динамических и термических орографических эффектов при обтекании Кавказских гор [4, 5, 9] северным и северо-восточным ветрами сопровождается высокими значениями циклонической завихренности в восточной части моря (рис. 5, а, б). В сезонной изменчивости важную роль играет муссонный эффект [2, 4].

Анализ распределения завихренности напряжения трения ветра (рис. 5) при синоптических ситуациях с разным направлением ветра и учет его повторяемости и скорости (рис. 3) позволяет интерпретировать некоторые особенности пространственного распределения завихренности в сезонном цикле (рис. 4).

Сезонные поля завихренности являются результатом осреднения при ситуациях с разным направлением ветра, поэтому при их вычислении происходит осреднение завихренности с разным знаком. Это приводит к тому, что ее значения в средних сезонных полях невелики и не превышают $\pm 11 \cdot 10^{-8}$ Н/м³ (рис. 4), в то время как величины завихренности, создаваемые ветром определенного направления, достаточно велики – до $\pm 40 \cdot 10^{-8}$ Н/м³ (рис. 5). Но высокая повторяемость ветра определенного направления приводит к тому, что особенности распределения завихренности, характерные для данного направления, проявляются и в среднемесячных полях в виде участков с ее более высокими значениями.

Более высокая повторяемость северо-восточного ветра в феврале по сравнению с декабрем и январем (рис. 3, а) проявляется в том, что высокие

значения завихренности восточнее Босфора (рис. 5, б) отмечаются именно в феврале (рис. 4). Также высокая повторяемость северо-восточного ветра с июля по октябрь объясняет наличие в эти месяцы в полях сезонного цикла локальных областей с высокими значениями циклонической завихренности ($> 8 \cdot 10^{-8}$ Н/м³) в восточной части моря и вдоль южного побережья восточнее Босфора (рис. 4).

Высокие значения антициклонической завихренности, создаваемые западным ветром вблизи турецкого побережья (рис. 5, б), наиболее проявляются в январе, когда повторяемость этого ветра более высокая по сравнению с ветрами других направлений.

В апреле повторяемость ветров всех направлений практически одинакова (от 9,6% для северного ветра до 14,3% – для восточного) (рис. 3, а). Это сопровождается отсутствием областей с высокими значениями циклонической и антициклонической завихренности напряжения трения ветра в этом месяце (рис. 4).

В восточной части моря циклоническая завихренность, обусловленная северо-восточным ветром (рис. 5, б), имеющим высокую повторяемость в течение всего года (рис. 3, а), сохраняется круглый год (рис. 4).

Заключение

На основе выделения преобладающего направления ветра для каждого 6-часового срока, составления групп (композигов), соответствующих каждому направлению, и построения для них средних полей было проанализировано влияние ветрового режима на особенности поля завихренности напряжения трения ветра на поверхности Черного моря. Получено, что ветровой режим (направление ветра, его повторяемость и скорость) заметно отражается на величине завихренности напряжения трения ветра и играет важную роль в формировании особенностей ее пространственного распределения.

При синоптических ситуациях с преобладающими северо-западным, северным и северо-восточным ветрами средняя по морю завихренность напряжения трения ветра циклоническая в течение всего года, с юго-западным и западным ветрами – антициклоническая. Основной вклад в создание циклонической завихренности вносят ситуации с преобладающим северо-восточным ветром, антициклонической – с западным и юго-западным.

Пространственное распределение завихренности напряжения трения ветра также существенно зависит от его направления. При ветре каждого направления создается поле завихренности с характерными особенностями, которые сохраняются во все сезоны. В формирование особенностей пространственного распределения завихренности напряжения трения ветра в сезонном цикле значительный вклад вносит повторяемость ветра.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0827 – 2015 – 0001 «Фундаментальные исследования процессов в системе океан – атмосфера – литосфера, определяющих пространственно-временную изменчивость природной среды и климата глобального и регионального масштабов» (шифр «Климат»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Stanev E.V.* Understanding Black Sea Dynamics: Overview of Recent Numerical Modeling // *Oceanogr.* – 2005. – 18, No. 2. – P. 56 – 75. – doi:10.5670/oceanog.2005.42
2. *Коротаев Г.К.* О причине сезонного хода циркуляции Черного моря // *Морской гидрофизический журнал.* – 2001. – № 6. – С. 14 – 20.
3. *Kubryakov A.A., Stanichny S.V., Zatsepin A.G. et al.* Long-term variations of the Black Sea dynamics and their impact on the marine ecosystem // *J. Mar. Sys.* – 2016. – 163. – P. 80 – 94. – doi:10.1016/j.jmarsys.2016.06.006
4. *Ефимов В.В., Шокуров М.В., Барабанов В.С.* Физические механизмы возбуждения ветровой циркуляции внутренних морей // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* – 2002. – 38, № 2. – С. 247 – 258.
5. *Яровая Д.А., Шокуров М.В.* Мезомасштабные циклонические вихри, возникающие над Черным морем вблизи Кавказского побережья // *Морской гидрофизический журнал.* – 2012. – № 3. – С. 14 – 30.
6. *Григорьев А.В., Петренко Л.А.* Черное море как фактор влияния на атмосферные процессы в регионе // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.* – Севастополь: МГИ НАН Украины, 1999. – С. 17 – 26.
7. *Зацепин А.Г., Кременецкий В.В., Поярко С.Г. и др.* Влияние поля ветра на динамику вод Черного моря // *Комплексные исследования северо-восточной части Черного моря / Отв. ред. А.Г. Зацепин, М.В. Флинт.* – М.: Наука, 2002. – С. 91 – 105.
8. *Kara A.B., Hurlburt H.E., Wallcraft A.J. et al.* Black Sea Mixed Layer Sensitivity to Various Wind and Thermal Forcing Products on Climatological Time Scales // *J. Clim.* – 2005. – 18, No. 24. – С. 5266 – 5293. – doi:10.1175/JCLI3573R2.1
9. *Ефимов В.В., Анисимов А.Е.* Климатические характеристики изменчивости поля ветра в Черноморском регионе – численный реанализ региональной атмосферной циркуляции // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* – 2011. – 47, № 3. – С. 380 – 392.
10. *Полонский А.Б., Шокурова И.Г.* Многолетняя изменчивость завихренности касательного напряжения трения ветра над Черным морем по данным реанализа // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.* – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2011. – № 24. – С. 182 – 189.
11. *Kubryakov A.A., Stanichny S.V.* Seasonal and interannual variability of the Black Sea eddies and its dependence on characteristics of the large-scale circulation // *Deep-Sea Res. Part I: Oceanographic Research Papers.* – 2015. – 97. – P. 80 – 91. – doi:10.1016/j.dsr.2014.12.002
12. *Capet A., Barth A., Beckers J.-M. et al.* Interannual variability of Black Sea's hydrodynamics and connection to atmospheric patterns // *Deep Sea Res. Part II: Topical Studies in Oceanography.* – 2012. – 77. – P. 128 – 142. – doi:10.1016/j.dsr2.2012.04.010
13. *Чернякова А.П.* Типовые поля ветра Черного моря // *Сборник работ Бассейновой гидрометеорологической обсерватории Черного и Азовского морей.* – Л.: Гидрометеоздат, 1965. – Вып. 3. – С. 78 – 121.
14. *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, Iss. 656. – P. 553 – 597. – doi:10.1002/qj.828
15. *Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. IV. Черное море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия / Под ред. А.И. Симонова и Э.И. Альтмана.* – Л.: Гидрометеоздат, 1991. – 430 с.

16. Gibson J.K., Kållberg P., Uppala S. et al. ECMWF Re-Analysis Project Report Series: 1. ERA-15 Description (version 2). – UK: Reading, 1999. – 74 p. – URL: <https://www.ecmwf.int/en/elibrary/9584-era-description> (дата обращения: 11.05.2017).
17. Uppala S.M., Kållberg P.W., Simmons A.J. et al. The ERA-40 re-analysis // Quart. J. Roy. Meteorol. Soc. – 2005. – 131, Iss. 612. – P. 2961 – 3012. – doi:10.1256/qj.04.176

Wind stress curl over the Black Sea under different wind regimes

M. V. Shokurov, I. G. Shokurova*

Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia
*e-mail: igshokurova@mail.ru

Variability of magnitude and spatial distribution of the wind stress curl in the Black Sea depending on direction of the sea surface airflow prevailing over the sea is analyzed based on the data set on the wind at the 10 m height derived from the *ERA Interim* reanalysis (the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) for 1979 – 2015 with the spatial and temporal resolutions $0.75^\circ \times 0.75^\circ$ and 6 hr, respectively. It is revealed that at the north-west, north and north-east winds the average over the sea wind stress curl is cyclonic in course of the whole year, and at the south-west and west ones – it is anticyclonic. On the average, during a year the north-east and north winds are the most frequent, and the south and south-east winds are vice versa – very rare. Allowing for the wind frequency, the north-east winds make the most significant contribution to development of the cyclonic wind stress curl, whereas the west winds – to the anticyclonic one.

Keywords: Black Sea, wind direction, frequency of wind direction, wind stress curl.