

Влияние долговременных изменений крупномасштабного поля приземного давления на ветровой режим и завихренность напряжения трения ветра в Черном море

И. Г. Шокурова , А. А. Кубряков, М. В. Шокуров

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия
 igshokurova@mail.ru

Поступила в редакцию 22.07.2020 г., после доработки – 28.09.2020 г.

Цель. Изучается связь ветрового режима и завихренности напряжения трения ветра в Черном море с долговременными изменениями крупномасштабных полей приземного давления в зимние месяцы.

Методы и результаты. Используются данные о скорости ветра и приземного давления в январе – феврале из реанализа *NCEP/NCAR* за 1948–2018 гг. На основе 6-часовых данных определены синоптические условия, сопровождающиеся высокими и низкими значениями завихренности напряжения трения ветра в море. Синоптические ситуации, при которых обширный антициклон находится к северу и северо-востоку от моря, а область с низким давлением располагается к юго-западу от моря в Средиземноморском регионе, сопровождаются северо-восточными и восточными ветрами и преобладанием циклонической завихренности. Наоборот, прохождение циклонов к северу от моря и увеличение давления к юго-западу сопровождается западными и юго-западными ветрами и преобладанием антициклонической завихренности. Экстремально высокие среднемесячные значения циклонической завихренности наблюдались в годы, когда область, занимаемая Сибирским антициклоном, увеличивалась и расширялась в западном направлении, так что Черное море оказывалось на юго-западной периферии его отрога. Экстремально низкие значения антициклонической завихренности отмечались при расширении области Азорского антициклона на Средиземноморский регион. Изменения завихренности на мультideкадных временных масштабах показали связь с глобальными изменениями полей приземного давления и знака аномалий давления в низких широтах.

Выводы. Противоположный знак аномалий приземного давления к северо-востоку и юго-западу от моря сопровождается наиболее высокими значениями завихренности напряжения трения ветра.

Ключевые слова: Черное море, приземное давление, направление ветра, завихренность напряжения трения ветра, долговременная изменчивость

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания по темам № 0827-2019-0001 «Фундаментальные исследования процессов взаимодействия в системе океан – атмосфера, определяющих региональную пространственно-временную изменчивость природной среды и климата» и № 0555-2021-0006 «Разработка перспективных методов, программно-информационных и технических средств исследований гидрофизических, биогеохимических, оптических характеристик морской среды, в том числе методами дистанционного зондирования».

Для цитирования: Шокурова И. Г., Кубряков А. А., Шокуров М. В. Влияние долговременных изменений крупномасштабного поля приземного давления на ветровой режим и завихренность напряжения трения ветра в Черном море // Морской гидрофизический журнал. 2021. Т. 37, № 2. С. 179–194. doi:10.22449/0233-7584-2021-2-179-194

Influence of Long-Term Changes in the Large-Scale Sea Level Pressure Field on the Wind Regime and the Wind Stress Curl in the Black Sea

I. G. Shokurova , A. A. Kubryakov, M. V. Shokurov

Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia
 igshokurova@mail.ru

Purpose. The paper is aimed at studying the relationship between the wind regime and the wind stress curl in the Black Sea, on the one hand, and the long-term changes in the sea level pressure fields in winter months, on the other.

Methods and Results. The data on wind speed and sea level pressure in January – February from the NCEP/NCAR reanalysis for 1948–2018 are used. Based on the 6-hour data, the synoptic conditions accompanied by high and low values of the wind stress curl in the sea were determined. The synoptic situations in which a vast anticyclone is located north and northeast of the sea, and the area of low pressure – to the southwest of the sea in the Mediterranean region, are accompanied by the northeast and east winds, and by the cyclonic curl predominance. On the contrary, passing of the cyclones to the north of the sea and increase of pressure to the southwest are followed by the westerly and south-westerly winds, and by the anticyclonic curl predominance. Extremely high monthly mean values of the cyclonic curl were observed in those years, when the area occupied by the Siberian anticyclone increased and expanded westward, so that the Black Sea was on the southwestern periphery of its spur. Extremely low values of the anticyclonic curl were noted when the Azores anticyclone area expanded to the Mediterranean region. The wind stress curl changes on the multidecadal scales have shown its relation to the global changes in the field of the sea level pressure and the sign of the pressure anomalies at the low latitudes.

Conclusions. The opposite sign of the surface pressure anomalies taking place to the northeast and southwest of the sea is accompanied by the highest values of the wind stress curl.

Keywords: Black Sea, sea level pressure, wind direction, wind stress curl, long-term variability

Acknowledgements: The investigation was carried out within the framework of the state tasks No. 0827-2019-0001 “Fundamental studies of processes of interaction in the ocean – atmosphere system which determine the regional spatial-temporal variability of the natural environment and climate” and No. 0555-2021-0006 “Development of innovative methods and software, data processing and technical means of research of hydrophysical, biogeochemical, optical characteristics of the marine environment, including remote sensing methods”.

For citation: Shokurova, I.G, Kubryakov, A.A. and Shokurov, M.V., 2021. Influence of Long-Term Changes in the Large-Scale Sea Level Pressure Field on the Wind Regime and the Wind Stress Curl in the Black Sea. *Physical Oceanography*, [e-journal] 28(2), pp. 165-179. doi:10.22449/1573-160X-2021-2-165-179

Введение

Для задач анализа сезонной и многолетней изменчивости скорости течений и вертикального перемешивания в Черном море необходимы сведения об изменчивости внешнего ветрового форсинга [1]. Сезонный ход интенсивности циркуляции вод в Черном море в значительной степени зависит от величины завихренности ветра над его акваторией [2, 3]. Усиление циклонической завихренности ветра в зимний сезон приводит к усилению Основного Черноморского течения, имеющего циклонический характер, а ее ослабление летом сопровождается ослаблением скорости течения, распадом на два круговорота и отделением вихрей [4, 5]. Положительная связь между интенсивностью поверхностных течений и завихренностью ветра выявлена и для меж-

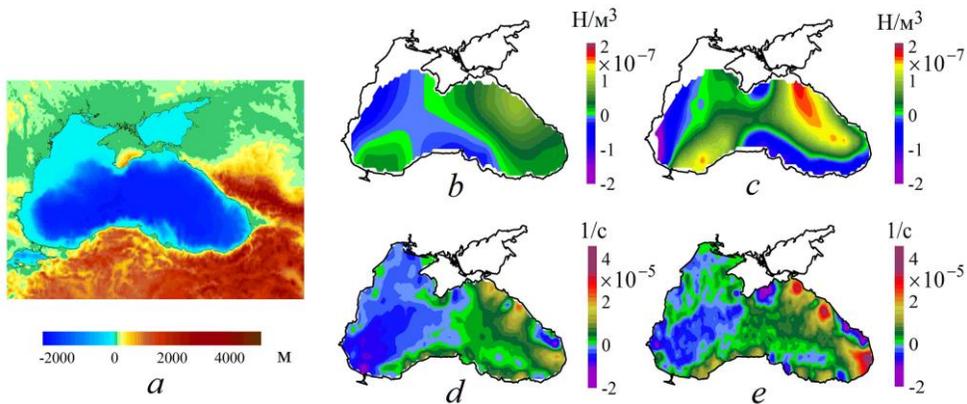
годовой изменчивости на основе анализа временных рядов кинетической энергии течений [6].

Величина и распределение завихренности ветра над морем определяются фоновой крупномасштабной синоптической ситуацией, а также региональными орографическими и термическими эффектами [3, 6–8]. Черное море может находиться в центре или на периферии крупномасштабных циклонов и антициклонов, движущихся с запада [9–11]. Кроме того, над морем могут проходить и усиливаться синоптические циклоны, сформировавшиеся в Средиземном море [9]. За счет региональных орографических эффектов, а в частности обтекания ветровым потоком Кавказских гор, возникают мезомасштабные циклонические образования, в основном формирующиеся в восточной части моря [12, 13]. Сезонные изменения контрастов потоков плавучести в атмосфере над морем и окружающей суши также вносят вклад в завихренность ветра. Зимой за счет более теплого моря этот контраст приводит к усилению циклонической завихренности [2, 3, 14, 15].

Статистический анализ данных по ветру показал наличие связи величины и пространственного распределения завихренности с направлением преобладающего над морем ветра [16–18]. Данная зависимость в значительной степени связана с небольшими размерами моря, наличием высоких протяженных гор на восточном и южном побережье Черного моря и гор на Крымском п-ове (рис. 1, *a*) [3, 8, 19]. Сдвиг скорости, возникающий при обтекании гор ветровым потоком, приводит к появлению неоднородности ветрового поля и возникновению завихренности. Обтекание Кавказских гор наиболее частыми в регионе северо-восточными ветрами приводит к тому, что в восточной части моря практически в течение всего года преобладает циклоническая завихренность ветра с наибольшими значениями в зимний сезон. Этот эффект отмечается в работах [7, 13, 17] по данным региональных моделей, реанализов [20, 21] и спутниковых скаттерометров [22, 23] независимо от разрешения данных (рис. 1, *b – e*). Преобладание циклонической завихренности в восточной части моря обнаруживается и при анализе ее долговременной изменчивости [24]. На величину завихренности также влияет величина скорости ветра за счет увеличения сдвига скорости при сильных ветрах [13].

В свою очередь, направление преобладающего над морем ветрового потока определяется положением крупномасштабных циклонов и антициклонов [9, 10]. В работе [9], выполненной с использованием синоптических карт за 10-летний период 1946–1955 гг., показано, что каждому направлению ветра соответствует определенное крупномасштабное распределение приземного атмосферного давления.

В настоящей работе ставится задача определения региональных особенностей связи между распределением приземного давления и завихренностью напряжения трения ветра в Черном море по данным за январь – февраль. Для этой цели анализируется цепочка связей: крупномасштабная синоптическая ситуация – направление ветра – завихренность напряжения трения ветра. Проводится анализ ситуаций, при которых возникают экстремальные значения завихренности. Анализируется междекадная изменчивость полей аномалий приземного давления.



Р и с. 1. Орография района Черного моря по данным *ETOPO2v2* (<https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/etopo2.html>) (a); среднемноголетнее распределение: завихренности напряжения трения ветра [17] по данным *NCEP/NCAR* за 1948–2018 гг. ($1,905 \times 1,875^\circ$) [20] (b) и *ERA Interim* за 1979–2016 гг. ($0,75 \times 0,75^\circ$) [21] (c), завихренности ветра [13] по данным *QuikSCAT* за 2000–2009 гг. ($12,5 \times 12,5$ км) [22] (d) и *ASCAT* за 2010–2016 гг. ($12,5 \times 12,5$ км) [23] (e)

F i g. 1. Orography of the Black Sea region based on the *ETOPO2v2* data [<https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/etopo2.html>] (a); multiyear mean distribution of: the wind stress curl [17] based on the *NCEP/NCAR* data for 1948–2018 ($1,905 \times 1,875^\circ$) [20] (b) and the *ERA Interim* data for 1979–2016 ($0,75 \times 0,75^\circ$) [21] (c), the wind curl [13] based on the *QuikSCAT* data for 2000–2009 ($12,5 \times 12,5$ км) [22] (d) and the *ASCAT* data for 2010–2016 ($12,5 \times 12,5$ км) [23] (e)

Выбор данных для исследования реанализа определялся требованием к продолжительности ряда. Как правило, длинные ряды данных реанализов имеют низкое пространственное разрешение. Предварительно проведенное сравнение [18] межгодовой изменчивости средней по акватории завихренности напряжения трения ветра, полученной по данным реанализов (с разным пространственным разрешением и разной длиной ряда) *NCEP/NCAR* ($1,905 \times 1,875^\circ$, с 1948 г.) [20] и *ERA Interim* ($0,75 \times 0,75^\circ$, с 1979 г.) [21], показало высокую согласованность результатов, что позволило использовать данные реанализа *NCEP/NCAR*.

Данные и методы исследования

В работе использовались следующие данные реанализа *NCEP/NCAR* за 1948–2018 гг. [20]:

- 6-часовые данные о скорости ветра на высоте 10 м над уровнем моря с пространственным разрешением $1,905 \times 1,875^\circ$ и 6-часовые данные о приземном давлении с пространственным разрешением $2,5 \times 2,5^\circ$ для области, ограниченной $30 - 60^\circ$ с. ш. и $10 - 60^\circ$ в. д., включающей Черноморский регион;
- среднемесячные данные о приземном давлении с пространственным разрешением $2,5 \times 2,5^\circ$ по всей территории Земли.

Для каждого 6-часового срока вычислялись напряжение трения ветра $\boldsymbol{\tau} = (\tau_x, \tau_y)$, его завихренность $\text{rot}_z \boldsymbol{\tau}$ и определялось направление преобладающего над морем ветра.

Напряжение трения ветра рассчитывалось по аэродинамической формуле $\tau = \rho_a C_d |\mathbf{V}| \mathbf{V}$, где ρ_a – плотность воздуха; C_d – безразмерный коэффициент сопротивления морской поверхности; $\mathbf{V} = (u, v)$ – скорость ветра (м/с). Коэффициент C_d вычислялся по формуле из [25].

Завихренность напряжения трения ветра $\text{rot}_z \boldsymbol{\tau} = \partial \tau_y / \partial x - \partial \tau_x / \partial y$ вычислялась в узлах сетки, являющихся центрами квадратов, в которых расположены исходные данные по ветру. Средние по акватории значения рассчитывались в области, ограниченной изобатой 50 м.

Направление преобладающего над морем ветра определялось путем осреднения компонент u и v вектора ветра $\mathbf{V} = (u, v)$ по данным, попадающим на акваторию моря. Направление полученного вектора привязывалось к одному из 8 основных направлений: северному (С), северо-восточному (СВ), восточному (В), юго-восточному (ЮВ), южному (Ю), юго-западному (ЮЗ), западному (З) и северо-западному (СЗ). Таким образом, каждому 6-часовому полю завихренности напряжения трения ветра и полю приземного давления было поставлено в соответствие определенное направление ветра.

Средние поля приземного давления, соответствующие ветрам основных географических направлений, вычислялись на основе группирования 6-часовых полей с определенным направлением ветра и их последующего осреднения. Также путем осреднения были вычислены соответствующие каждому направлению значения средней по морю завихренности напряжения трения ветра. Повторяемость ситуаций с ветром определенного направления рассчитывалась в процентах от общего числа ситуаций.

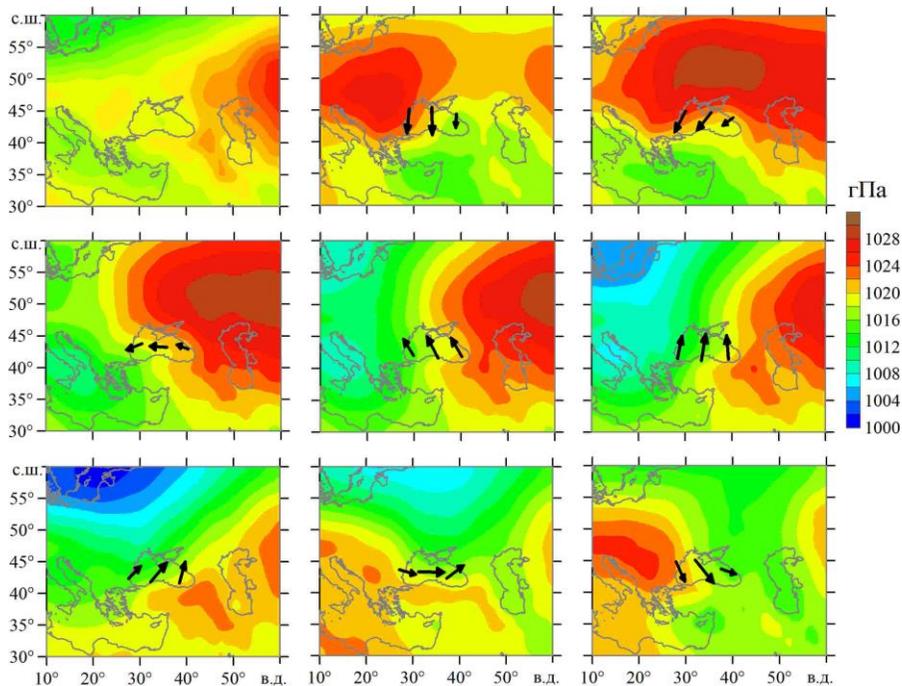
Статистическая значимость различия аномалий давления в отдельные временные периоды определялась на основе использования t -критерия Стьюдента для двух независимых выборок: $t = (x_1 - x_2) / \sqrt{(s_1^2 + s_2^2) / n}$, где x_1, x_2 – средние значения аномалий; s_1^2, s_2^2 – дисперсии; n – число лет в периодах.

Средние крупномасштабные поля давления, соответствующие ветрам основных направлений

Рассмотрим связь между преобладающим над Черным морем ветром и крупномасштабным распределением приземного давления с использованием данных с интервалом 6 ч.

Средние поля давления, вычисленные для каждого направления ветра, характеризуются определенным положением крупномасштабных антициклонов и циклонов (рис. 2). Ветры северного, северо-восточного и восточного направлений формируются на периферии антициклонов, расположенных к северо-западу, северу и северо-востоку от Черного моря соответственно. К югу и юго-западу от моря в это время располагается область низкого давления. Юго-восточные ветры формируются при расположении антициклона к востоку от Черного моря, а южные ветры – когда центр антициклона находится восточнее Каспийского моря. Западнее Черного моря в это время расположена область низкого давления. Юго-западный и западный ветровые потоки над морем обусловлены расположением над европейской территорией

обширных циклонов, в то время как к юго-востоку и к югу от моря находится область высокого давления. Расположение антициклонов на европейской территории к западу от Черного моря сопровождается северо-западными ветрами над морем.



Р и с. 2. Среднегодовое поле приземного давления (верхний левый рисунок) и средние поля давления, соответствующие ветрам основных географических направлений (обозначены стрелками) в январе – феврале

F i g. 2. Multiyear average sea level pressure field (top left figure) and average sea level pressure fields corresponding to the winds of the main geographic directions (indicated by the arrows) in January – February

Во всех перечисленных случаях море находится в зоне границы между областями с высоким и низким приземным давлением (рис. 2), а скорость ветра зависит от величины градиента давления.

Несмотря на то что средние поля приземного давления были построены по продолжительному ряду данных за январь – февраль 1948–2018 гг., полученные результаты хорошо согласуются с типами синоптических процессов, выделенными в [9, 10] по синоптическими картам за 10-летний период 1946–1955 гг. без разделения на сезоны. Таким образом, направление ветрового потока над морем определяется крупномасштабными синоптическими процессами, а полученные поля давления представляют собой типовые распределения, соответствующие ветрам основных географических направлений.

Связь завихренности напряжения трения ветра с ветровым режимом

Рассмотрим связь средней по акватории завихренности с направлением ветра на основе 6-часовых данных по скорости ветра.

В среднем наибольшие положительные значения завихренности (циклоническая завихренность) отмечаются при ветрах с восточной составляющей в векторе скорости (таблица). Максимальное значение наблюдается при северо-восточных ветрах, в основном за счет возникновения неоднородности в поле ветра при обтекании Кавказских и Понтийских гор [8, 17]. Наибольшая антициклоническая (отрицательная) завихренность бывает при ветрах с западной составляющей, с максимумом при западных ветрах, что также обусловлено орографией береговых районов. Близкая к нулю завихренность наблюдается при южном ветре.

Повторяемость направлений ветра, средняя по акватории завихренность напряжения трения ветра $\text{rot}_z \tau$ в январе – феврале и коэффициенты корреляции R между их временными рядами в 1948–2018 гг.

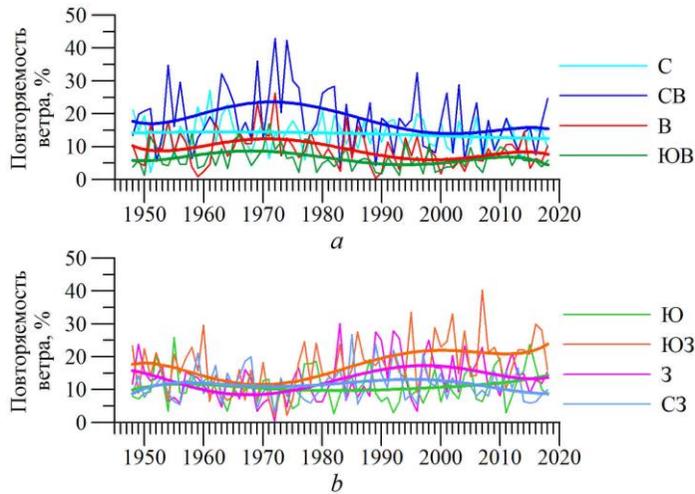
Winter wind directions frequency, basin-average wind stress curl $\text{rot}_z \tau$ in January – February, and correlation coefficients R between their time series in 1948–2018

Направление ветра / Wind direction	Повторяемость направлений ветра, % / Wind directions frequency, %	$\text{rot}_z \tau \times 10^{-7} \text{ Н/м}^3 /$ $\times 10^{-7} \text{ N/m}^3$	R
С / N	13,9	0,53	0,04
СВ / NE	18,2	1,81	0,77
В / E	9,1	1,72	0,75
ЮВ / SE	6,2	0,75	0,37
Ю / S	10,2	0,18	0,01
ЮЗ / SW	17,1	-0,48	-0,57
З / W	13,5	-0,87	-0,70
СЗ / NW	11,9	-0,47	-0,54
СВ + В / NE + E	27,3	1,78	0,87
ЮЗ + З / SW + W	30,6	-0,65	-0,77

Далее рассмотрим связь завихренности с повторяемостью ветров основных географических направлений на основе анализа их временных рядов.

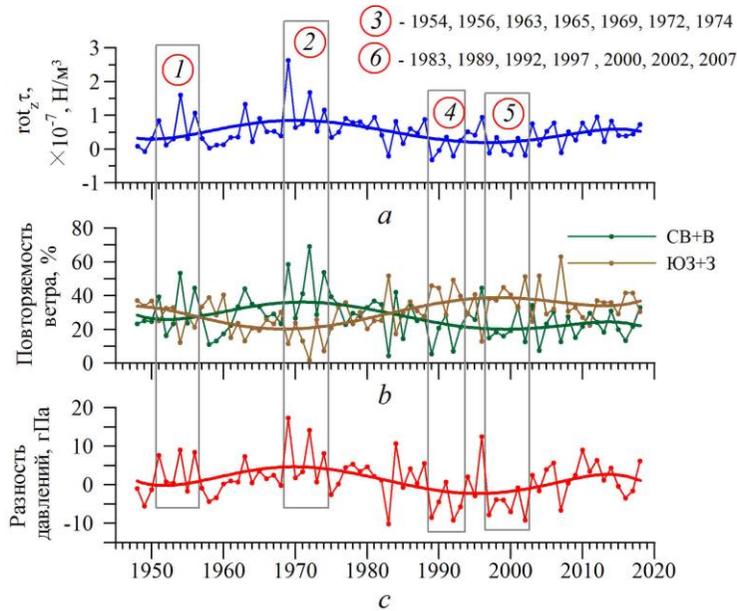
Межгодовая изменчивость повторяемости направлений ветра. Временные ряды средней за январь – февраль повторяемости ветров основных направлений показаны на рис. 3. Повторяемость ветров с восточной (рис. 3, *a*) и западной (рис. 3, *b*) компонентами в векторе скорости имеет противоположные тенденции изменчивости, а именно: повторяемость северо-восточных, восточных и юго-восточных ветров в рассматриваемый период была более высокой в 1960-е и в начале 1970-х гг. и менее высокой – с середины 1980-х гг. Обратная тенденция наблюдается для ветров с западной составляющей в векторе скорости. Повторяемость северных и южных ветров слабо меняется на длительных временных масштабах.

Межгодовая изменчивость завихренности напряжения трения ветра. Зимние межгодовые колебания средней по акватории завихренности (рис. 4, *a*) хорошо совпадают с изменчивостью суммарной повторяемости северо-восточных и восточных ветров и находятся в противофазе с суммарной повторяемостью юго-западных и западных ветров (рис. 4, *b*).



Р и с. 3. Межгодовая изменчивость повторяемости (%) направлений ветра в январе – феврале (сглаживающие кривые – полиномы 5-й степени)

F i g. 3. Interannual variability of wind directions frequency (%) in January – February (smoothing curves are the polynomials of the 5th degree)



Р и с. 4. Межгодовые изменения: средних по акватории значений завихренности напряжения трения ветра (*a*); суммарной повторяемости (%) северо-восточных и восточных (СВ + В) и юго-западных и западных (ЮЗ + З) ветров (*b*); разности значений приземного давления в районах *A* и *B* (см. рис. 5) (*c*) в январе – феврале (сглаживающие кривые – полиномы 5-й степени). Временные периоды 1951–1956 гг., 1969–1974 гг., 1989–1993 гг. и 1997–2002 гг. обозначены цифрами 1, 2, 4, 5 соответственно; наборы лет, указанных на рисунке сверху, обозначены цифрами 3 и 6

F i g. 4. Interannual changes of: the basin-average wind stress curl values (*a*); total frequency of occurrence (%) of the northeastern and eastern (NE + E), and southwestern and western (SW + W) winds (*b*); the difference in the surface sea level pressure values in regions *A* and *B* (see Fig. 5) (*c*) in January – February (smoothing curves are the polynomials of the 5th degree). Time periods 1951–1956, 1969–1974, 1989–1993 and 1997–2002 are indicated by numerals 1, 2, 4, 5, respectively; the years on the top of the figure – by numerals 3 and 6

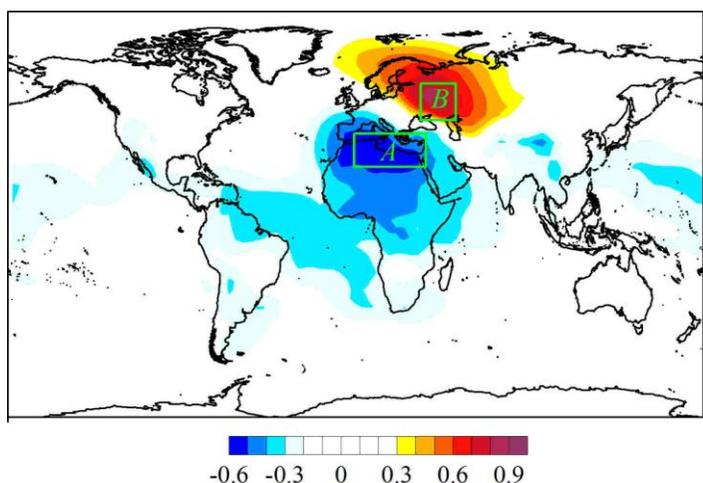
В середине 1950-х и с конца 1960-х до середины 1970-х гг. значения завихренности были более высокими по сравнению с периодом с конца 1980-х до начала 2000-х гг., что свидетельствует о наличии изменчивости на климатических масштабах.

Коэффициенты корреляции, вычисленные между временными рядами среднемесячных значений завихренности напряжения трения ветра и повторяемости ветров, имеют высокие положительные значения для северо-восточных (0,77) и восточных (0,75) ветров и высокие отрицательные значения для западных (-0,70) и юго-западных (-0,57) ветров (таблица). Коэффициенты корреляции с северным и южным ветрами близки к нулю. Расчет корреляции с суммарной повторяемостью восточных и северо-восточных, а также западных и юго-западных ветров привел к увеличению коэффициентов корреляции до 0,87 и -0,77 соответственно.

Таким образом, северные, северо-восточные, западные и юго-западные ветры вносят наибольший вклад в изменчивость завихренности напряжения трения ветра в Черном море.

Связь завихренности напряжения трения ветра с крупномасштабным полем давления

Для определения типов синоптических процессов, при которых происходит усиление или ослабление циклонической завихренности в море, строится карта пространственного распределения коэффициентов корреляции между среднемесячными рядами средней по морю завихренности напряжения трения ветра и рядами давления в узлах сетки $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ для января – февраля (рис. 5).



Р и с. 5. Распределение значимых на 99%-ном доверительном уровне коэффициентов корреляции между средней завихренностью напряжения трения ветра в Черном море и приземным давлением за 1948–2018 гг. в январе – феврале. Область $45\text{--}60^\circ$ с. ш., $34\text{--}50^\circ$ в. д. обозначена литерой А, область $25\text{--}40^\circ$ с. ш., $10\text{--}35^\circ$ в. д. – литерой В

F i g. 5. Distribution of the correlation coefficients significant at the 99%-confidence level between the time series of the wind stress curl in the Black Sea and the sea level pressure in January – February for 1948–2018. Region $45\text{--}60^\circ$ N and $34\text{--}50^\circ$ E is denoted by A, region $25\text{--}40^\circ$ N and $10\text{--}35^\circ$ E – by B

Область с положительными значениями коэффициента корреляции расположена к северу, северо-востоку от моря с центром в европейской части России, с отрицательными – на территории Средиземного моря и северной части Африканского континента. Максимальное значение положительной корреляции составляет 0,84, отрицательной –0,57. Этот результат хорошо согласуется с аналогичным расчетом, выполненным по данным *ERA Interim* в [13].

Полученное распределение соответствует типу синоптических процессов, сопровождающихся северо-восточными и восточными ветрами (рис. 2), при которых над морем в среднем преобладает циклоническая завихренность напряжения трения ветра (таблица). Распределение с обратным знаком корреляции соответствует ситуациям с западными и юго-западными ветрами (рис. 2), при которых в море в среднем преобладает антициклоническая завихренность. Учитывая, что высокие значения завихренности в среднем наблюдаются во вдольбереговых районах при обтекании гор ветровым потоком (рис. 1, *b – e*), можно отметить, что полученная связь значений завихренности с определенными синоптическими ситуациями и определенным направлением ветра в основном обусловлена орографическим фактором.

Временной ряд градиента давления, вычисленного как разность средних значений давления в районах с максимальными коэффициентами корреляции (обозначены литерами *A* и *B* на рис. 5), приведен на рис. 4, *с*. Его корреляция с завихренностью напряжения трения ветра в море составляет 0,9.

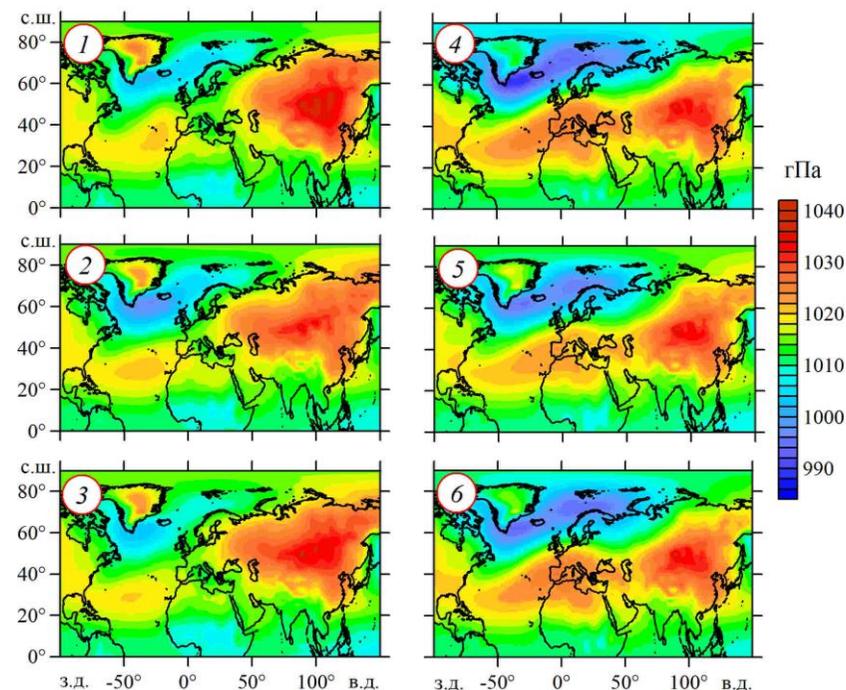
Барические поля при высоких и низких значениях завихренности напряжения трения ветра

Далее анализируются средние крупномасштабные поля давления, которым соответствуют экстремальные среднемесячные значения завихренности напряжения трения ветра. Из временного ряда завихренности на рис. 4, *а* были выбраны 2 периода, 1951–1956 и 1969–1974 гг., содержащие высокие значения завихренности, и 2 периода, 1989–1993 и 1997–2002 гг., содержащие низкие значения. Также были выбраны две совокупности лет с экстремально высокими (1954, 1956, 1963, 1965, 1969, 1972, 1974) и экстремально низкими (1983, 1989, 1992, 1997, 2000, 2002, 2007) значениями завихренности напряжения трения ветра. Для этих периодов и лет были построены средние поля давления в области 0–90° с. ш., 100° з. д. – 150° в. д. с центром в районе Черного моря (рис. 6). Использовались среднемесячные данные по давлению.

В периоды и годы с высокими значениями завихренности напряжения трения ветра (обозначены цифрами *1*, *2* и *3* на рис. 4 и 6) региональное распределение среднего приземного давления соответствует типам синоптических процессов с преобладанием над морем северо-восточных и восточных ветров (рис. 2).

В эти годы размеры и глубина квазистационарных барических центров над Северной Атлантикой (Азорский антициклон и Исландский циклон) уменьшаются, а область, занимаемая сезонным Сибирским антициклоном, увеличивается в северном направлении и расширяется к востоку и к западу, покрывая всю азиатскую и восточноевропейскую часть России (рис. 6). При такой барической обстановке Черное море находится на юго-западной пери-

ферии отрога Сибирского антициклона. Сюда под действием восточных ветров приносится холодный континентальный воздух из центра Евразии. Кавказские горы препятствуют их прямому проникновению к Черному морю, что способствует формированию резких градиентов температуры между морем и сушей к северу от восточной части моря и может сопровождаться усилением муссонного эффекта, вносящим дополнительный вклад в циклоническую завихренность.



Р и с. 6. Поле приземного давления в январе – феврале, осредненное за периоды: 1951–1956 гг. – 1, 1969–1974 гг. – 2, 1989–1993 гг. – 4, 1997–2002 гг. – 5 и годы: 1954, 1956, 1963, 1965, 1969, 1972, 1974 – 3, 1983, 1989, 1992, 1997, 2000, 2002, 2007 – 6

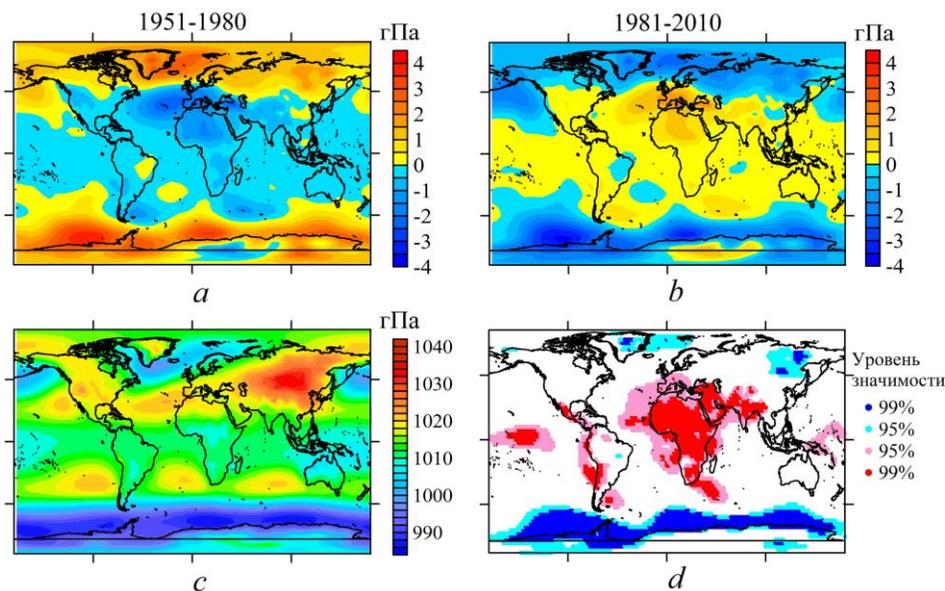
F i g. 6. Sea level pressure field in January – February averaged for the periods: 1951–1956 – 1, 1969–1974 – 2, 1989–1993 – 4, 1997–2002 – 5 and for the years: 1954, 1956, 1963, 1965, 1969, 1972, 1974 – 3, 1983, 1989, 1992, 1997, 2000, 2002, 2007 – 6

В периоды и годы с низкими значениями завихренности напряжения трения ветра (обозначены цифрами 4, 5 и 6 на рис. 4 и 6) наблюдается уменьшение области, занимаемой Сибирским антициклоном. Его северная граница смещается к югу, а на европейской части территории России давление уменьшается (рис. 6). Происходит расширение зоны влияния Исландского циклона на северную часть Европы, Азорского антициклона – на Средиземноморский регион. В такие периоды Черное море находится на восточной периферии отрога Азорского антициклона. Полоса высокого давления соединяет Азорский и Сибирский антициклоны, располагаясь к югу от моря. Данное распределение давления вызывает возникновение ветров с западной составляющей в векторе скорости (рис. 2). Они приносят в регион теплый воз-

дух с Атлантики, смягчая зимы, уменьшая градиенты температуры море – суша и тем самым ослабляя муссонный эффект.

Мультидекадная изменчивость крупномасштабных полей аномалий приземного давления

Для анализа причин климатической изменчивости завихренности рассматриваются 30-летние поля аномалий приземного атмосферного давления за 1951–1980 и 1981–2010 гг. (рис. 7, *a*, *b*) от среднемноголетнего поля (рис. 7, *c*). В рассматриваемый период наблюдалась смена знака аномалий в северной и южной частях обоих полушарий. Далее будем анализировать изменчивость в Северном полушарии.



Р и с. 7. Средние за 1951–1980 гг. (*a*) и 1981–2010 гг. (*b*) поля аномалий приземного давления и среднее за 1948–2018 гг. приземное давление (*c*) в январе – феврале; статистическая значимость различий аномалий давления между (*b*) и (*a*) на 99- и 95%-ных доверительных уровнях (розовым и красным цветами обозначена положительная разность аномалий, голубым и синим – отрицательная) (*d*)

Fig. 7. Mean for 1951–1980 (*a*) and 1981–2010 (*b*) fields of the sea level pressure anomalies and mean for 1948–2018 sea level pressure (*c*) in January – February; statistical significance of the differences in the pressure anomalies between (*b*) and (*a*) at the 99%- and 95%-confidence levels (pink and red show positive difference between the anomalies, blue and navy blue – negative one) (*d*)

В 1951–1980 гг. на обширной территории севернее 40–50° с. ш. преобладали положительные аномалии приземного давления, а область с отрицательными аномалиями занимала территорию южнее, до экватора (рис. 7, *a*). Это соответствует более частому прохождению антициклонов к северу от моря, в то время как число циклонов увеличивалось южнее моря (рис. 2). Данная ситуация сопровождалась увеличением повторяемости ветров с восточной составляющей в векторе скорости (рис. 3; 4, *b*) и увеличением положительной завихренности напряжения трения ветра (рис. 4, *a*).

В период 1981–2010 гг. в северной части Северного полушария преобладали отрицательные аномалии атмосферного давления, в южной – положительные (рис. 7, *b*). Данное распределение соответствует увеличению числа циклонов в северной части полушария и антициклонов – в южной (рис. 2). Это сопровождалось увеличением повторяемости ветров с западной составляющей в векторе скорости (рис. 3; 4, *b*) и ослаблением циклонической завихренности напряжения трения ветра (рис. 4, *a*).

Районы со значимыми отличиями между аномалиями давления в 1981–2010 и 1951–1980 гг. находятся в основном в низких и высоких широтах (рис. 7, *d*). В средних широтах различия аномалий для периодов с 30-летним осреднением не значимы. Учитывая этот факт и распределение коэффициентов корреляции между завихренностью и давлением (рис. 5), можно предположить, что изменчивость давления в средних широтах в основном определяет синоптическую изменчивость и отражается на межгодовых колебаниях завихренности в Черном море. В то же время изменчивость давления в низких широтах – в Средиземноморском регионе и на севере Африки (рис. 7, *d*) – вносит вклад не только в синоптическую, но и в климатическую мультideкадную изменчивость завихренности.

Полученная междекадная изменчивость атмосферного давления хорошо согласуется с результатами исследований трендов давления в Северном полушарии. Отрицательные тренды приземного давления в северной части Северного полушария (севернее Черного моря) и положительные в южной части получены по данным 1955–2004 гг. [26] и 1951–2011 гг. [27]. Черное море находится в средних широтах, и долговременные противоположные изменения давления к северу и югу от него сопровождаются сменой ветрового режима в соответствии с рис. 2.

Анализ штормтреков и числа циклонов в Северном полушарии для зимних месяцев также подтверждает полученные результаты. С середины 1970-х гг. происходило увеличение числа циклонов в высоких широтах и уменьшение в низких широтах Северного полушария по данным 1959–1997 гг. [28]. Уменьшение циклонов над территорией Турции отмечалось в 1979–1995 гг. [29]. Все это свидетельствует об уменьшении приземного давления к северу от Черного моря и увеличении – к югу в эти годы, что сопровождалось увеличением повторяемости ветров с западной составляющей скорости и ослаблением циклонической завихренности.

Заключение

В работе рассмотрена связь между долговременными изменениями крупномасштабного поля давления, ветрового режима и завихренности напряжения трения ветра в Черном море для зимних месяцев.

Распределение атмосферного давления определяет направление ветра над морем, а неоднородность поля скорости ветра сопровождается возникновением завихренности. Знак и величина завихренности зависят от направления ветра и, следовательно, от типа синоптических процессов в Черноморском регионе.

Межгодовая изменчивость завихренности напряжения трения ветра в море имеет высокие положительные коэффициенты корреляции с приземным

давлением на европейской территории России и отрицательные – с давлением в Средиземноморском регионе. Корреляция завихренности с разностью приземного давления в этих районах составляет 0,9. В периоды, когда к северу от моря преобладают положительные аномалии давления, а к югу и юго-западу отрицательные, увеличивается повторяемость северо-восточных и восточных ветров, что сопровождается усилением циклонической завихренности. При обратном распределении давления увеличивается повторяемость западных и юго-западных ветров и происходит усиление антициклонической завихренности.

Междекадная изменчивость завихренности показывает связь с изменчивостью атмосферного давления в низких широтах.

Для более полного изучения многолетней изменчивости завихренности и ветрового режима в море и их связи с изменчивостью барических полей необходимы дальнейшие исследования с использованием данных за другие сезоны года.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Stanev E. V.* Understanding Black Sea Dynamics: Overview of recent numerical modeling // *Oceanography*. 2015. Vol. 18, iss. 2. P. 56–75. <https://doi.org/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. *Ефимов В. В., Шокуров М. В., Барабанов В. С.* Физические механизмы возбуждения ветровой циркуляции внутренних морей // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2002. Т. 38, № 2. С. 247–258.
4. Seasonal, interannual, and mesoscale variability of the Black Sea upper layer circulation derived from altimeter data / G. Korotaev [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2003. Vol. 108, iss. C4. 3122. <https://doi.org/10.1029/2002JC001508>
5. *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 Research Part I: Oceanographic Research Papers*. 2015. Vol. 97. P. 80–91. doi:10.1016/j.dsr.2014.12.002
6. Long-term variations of the Black Sea dynamics and their impact on the marine ecosystem / A. A. Kubryakov [et al.] // *Journal of Marine Systems*. 2016. Vol. 163. P. 80–94. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2016.06.006>
7. *Ефимов В. В., Анисимов А. Е.* Климатические характеристики изменчивости поля ветра в Черноморском регионе – численный реанализ региональной атмосферной циркуляции // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2011. Т. 47, № 3. С. 380–392.
8. *Ефимов В. В., Юровский А. В.* Формирование завихренности поля скорости ветра в атмосфере над Черным морем // *Морской гидрофизический журнал*. 2017. № 6. С. 3–12. doi:10.22449/0233-7584-2017-6-3-12
9. *Чернякова А. П.* Типовые поля ветра Черного моря // *Сборник работ Бассейновой гидрометеорологической обсерватории Черного и Азовского морей*. Л. : Гидрометеорологическое издательство, 1965. Вып. 3. С. 78–121.
10. *Справочник по климату Черного моря / Под ред. А. И. Соркиной*. М. : Гидрометеоиздат, 1974. 406 с.
11. *Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. IV. Черное море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия / Под ред. А. И. Симонова и Э. Н. Альтмана*. СПб. : Гидрометеоиздат, 1991. 430 с.
12. *Яровая Д. А., Шокуров М. В.* Мезомасштабные циклонические вихри, возникающие над Черным морем вблизи Кавказского побережья // *Морской гидрофизический журнал*. 2012. № 3. С. 14–30.

13. Wind velocity and wind curl variability over the Black Sea from QuikScat and ASCAT satellite measurements / A. Kubryakov [et al.] // *Remote Sensing of Environment*. 2019. Vol. 224. С. 236–258. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.01.034>
14. 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.
15. Ефимов В. В., Анисимов А. Е. Численное моделирование влияния температурных контрастов суша – море на атмосферную циркуляцию в Черноморском регионе // *Морской гидрофизический журнал*. 2011. № 4. С. 3–12.
16. Interannual variability of Black Sea's hydrodynamics and connection to atmospheric patterns / A. Capet [et al.] // *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. 2012. Vol. 77–80. P. 128–142. doi:10.1016/j.dsr2.2012.04.010
17. Шокуров М. В., Шокурова И. Г. Завихренность напряжения трения ветра на поверхности Черного моря при различных ветровых режимах // *Морской гидрофизический журнал*. 2017. № 6. С. 13–26. doi:10.22449/0233-7584-2017-6-13-26
18. Shokurova I. G. Interannual variability of wind stress curl in the Black Sea and its response to changes in prevailing wind frequency // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. Vol. 386. 012014. doi:10.1088/1755-1315/386/1/012014
19. Ефимов В. В., Комаровская О. И. Возмущения, вносимые Крымскими горами в поля скорости ветра // *Морской гидрофизический журнал*. 2019. Т. 35, № 2. С. 134–146. doi:10.22449/0233-7584-2019-2-134-146
20. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project / E. Kalnay [et al.] // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 1996. Vol. 77, iss. 3. С. 437–472. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1996\)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2)
21. 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. <https://doi.org/10.1002/qj.828>
22. Point-Wise Wind Retrieval and Ambiguity Removal Improvements for the QuikSCAT Climatological Data Set / A. G. Fore [et al.] // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2014. Vol. 52, iss. 1. P. 51–59. doi:10.1109/TGRS.2012.2235843
23. Verhoef A., Portabella M., Stoffelen A. High-Resolution ASCAT Scatterometer Winds near the Coast // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2012. Vol. 50, iss. 7. P. 2481–2487. doi:10.1109/TGRS.2011.2175001
24. Полонский А. Б., Шокурова И. Г. Десятилетняя изменчивость характеристик пикноклина и геострофической циркуляции вод Черного моря в зимний период // *Метеорология и гидрология*. 2009. № 4. С. 75–92.
25. Large W. G., Pond S. Open Ocean Momentum Flux Measurements in Moderate to Strong Winds // *Journal of Physical Oceanography*. 1981. Vol. 11, iss. 3. P. 324–336. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1981\)011<0324:OOMFMI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1981)011<0324:OOMFMI>2.0.CO;2)
26. Bhend J., Whetton P. Consistency of simulated and observed regional changes in temperature, sea level pressure and precipitation // *Climatic Change*. 2013. Vol. 118. P. 799–810. <https://doi.org/10.1007/s10584-012-0691-2>
27. Gillett N. P., Fyfe J. C., Parker D. E. Attribution of observed sea level pressure trends to greenhouse gas, aerosol, and ozone changes // *Geophysical Research Letters*. 2013. Vol. 40, iss. 10. P. 2302–2306. <https://doi.org/10.1002/grl.50500>
28. McCabe G. J., Clark M. P., Serreze M. C. Trends in Northern Hemisphere Surface Cyclone Frequency and Intensity // *Journal of Climate*. 2001. Vol. 14, iss. 12. P. 2763–2768. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2001\)014<2763:TINHSC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2001)014<2763:TINHSC>2.0.CO;2)
29. Karaca M., Deniz A., Tayanç M. Cyclone track variability over Turkey in association with regional climate // *International Journal of Climatology*. 2000. Vol. 20, iss. 10. P. 1225–1236. [https://doi.org/10.1002/1097-0088\(200008\)20:10<1225::AID-JOC535>3.0.CO;2-1](https://doi.org/10.1002/1097-0088(200008)20:10<1225::AID-JOC535>3.0.CO;2-1)

Об авторах:

Шокурова Ирина Геннадьевна, научный сотрудник, отдел океанографии, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат географических наук, **Scopus Author ID: 25822860800**, **ORCID ID: 0000-0002-3150-8603**, **ResearcherID: C-8223-2016**, igshokurova@mail.ru

Кубряков Арсений Александрович, ведущий научный сотрудник, отдел дистанционных методов исследования, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0003-3561-5913**, **ResearcherID: F-8921-2014**, arskubr@mhiras.ru

Шокуров Михаил Викторович, ведущий научный сотрудник, отдел взаимодействия атмосферы и океана, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор физико-математических наук, **Scopus Author ID: 6602394600**, **ORCID ID: 0000-0003-1595-8281**, **ResearcherID: V-7160-2017**, shokurov.m@gmail.com