

Научная статья

УДК 551.513
EDN: DUPHMR

Продолжительные ветры над Черным морем и события атмосферного блокирования

Д. В. Башарин , И. Г. Шокурова*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия* dbasharin@rambler.ruПоступила в редакцию 22.01.2024; одобрена после рецензирования 21.06.2024;
принята к публикации 13.07.2024.

Аннотация

Цель. Целью работы является выделение и изучение случаев с продолжительными ветрами одного направления над акваторией Черного моря и анализ сопутствующих им условий в приземном слое атмосферы и средней тропосфере зимой (с декабря по март).

Методы и результаты. Рассматривались ситуации с экстремально продолжительными ветрами одного направления, когда преобладающий над морем ветер не менял направление в течение 5 сут и более. Анализ основывался на 6-часовых данных о скорости ветра на высоте 10 м, геопотенциальной высоте изобарической поверхности 500 гПа и приземном давлении из реанализа ERA5 Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды за 1979–2021 гг. За анализируемый период были выделены 10 случаев с продолжительными ветрами. Большинство случаев составили ситуации с северо-восточными ветрами. Также обнаружены по одному случаю с восточным, северным и юго-западным ветром. Разложение по эмпирическим ортогональным функциям для совокупности ситуаций с этими ветрами показало, что распределение первых мод полей геопотенциальной высоты и приземного давления имеет пространственную структуру с устойчивой областью высокого давления над европейской территорией. Вклад этих мод в общую изменчивость составил 65 и 47% соответственно. Анализ обнаруженных ситуаций с устойчивыми ветрами показал, что во всех случаях с северо-восточными ветрами в средней атмосфере наблюдался процесс блокирования в виде квазистационарного антициклона, который располагался над Северной Европой/Скандинавским п-овом. В случае с северным ветром обширный высотный антициклон находился на севере европейской части России. Расчеты индекса блокирования Тибальди и Молтени подтвердили, что рассмотренные случаи продолжительных северо-восточных ветров и северного ветра соответствуют условиям блокирования. Устойчивый восточный ветер наблюдался, когда обширный антициклон в средней тропосфере активно смещался с севера Скандинавского п-ова в юго-восточном направлении. В случае с продолжительным юго-западным ветром в средней тропосфере присутствовал квазистационарный субтропический гребень высокого давления наряду с интенсивным западным переносом в регионе Европы, что создавало над акваторией Черного моря устойчивый ветер.

Выводы. Результаты проведенного анализа свидетельствуют, что рассмотренные случаи с устойчивыми северо-восточными и северными ветрами над акваторией Черного моря связаны с блокирующими процессами в атмосфере Европейского региона.

Ключевые слова: Черное море, Европейский регион, устойчивые ветры, высота изобарической поверхности 500 гПа, атмосферное блокирование

Благодарности: работа выполнена в рамках темы государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ FNNN-2024-0014 «Фундаментальные исследования процессов взаимодействия в системе океан-атмосфера, формирующих изменчивость физического состояния морской среды на различных пространственно-временных масштабах».

Для цитирования: Башарин Д. В., Шокурова И. Г. Продолжительные ветры над Черным морем и события атмосферного блокирования // Морской гидрофизический журнал. 2024. Т. 40, № 5. С. 635–650. EDN DUPHMR.

© Башарин Д. В., Шокурова И. Г., 2024

Steady Winds over the Black Sea and Atmospheric Blocking Events

D. V. Basharin , I. G. Shokurova

Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia
 *dbasharin@rambler.ru*

Abstract

Purpose. The purpose of this paper is to identify and study the cases of long-lasting steady winds of one direction over the Black Sea, and to analyze the accompanying conditions in the surface atmosphere and middle troposphere in winter (December – March).

Methods and Results. The situations with extremely long-lasting steady winds of persistent direction, namely when the prevailing wind over the sea does not change its direction for 5 days or more are considered. The analysis is based on the 6-hour data on wind speed at the 10 m height, the 500 hPa geopotential height and the surface pressure from the ERA5 reanalysis of the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts for 1979–2021. Within the analyzed period, 10 cases of steady winds were identified. In most cases it was a north-eastern wind. At the same time there were 3 recorded cases of the eastern, northern and south-western winds. The empirical orthogonal function analysis performed for a set of steady wind cases shows that distribution of the first modes of the geopotential height and surface pressure fields has a spatial structure with a stable high-pressure area over the European territory. The contribution of these modes to the total variability is 65 and 47%, respectively. Analysis of the revealed situations with steady winds shows that in all the cases with northern and north-eastern winds, atmospheric blocking in a form of a quasi-stationary anticyclone was observed in the middle atmosphere over the Northern Europe/Scandinavian Peninsula. In the case of northern wind, an extensive high-altitude anticyclone was located over the northern part of the European Russia. The values of the Tibaldi and Molteni blocking index confirm the fact that the considered cases of long-lasting north-eastern and northern winds correspond to the blocking conditions over the European region. A steady eastern wind was observed when the extensive anticyclone in the middle troposphere was actively moving from the north of the Scandinavian Peninsula to the south-east. In the case of a long-lasting south-western wind, a subtropical high-pressure ridge as well as an intense western transfer in the European region took place in the middle troposphere that generated a steady wind over the Black Sea.

Conclusions. The analysis results indicate that the considered cases with steady north-eastern and northern winds over the Black Sea are related to the blocking processes in the atmosphere of the European region.

Keywords: Black Sea, European region, steady winds, 500 hPa geopotential height, atmospheric blocking

Acknowledgements: The work was carried out within the framework of state assignment of FSBSI FRC MHI on theme FN NN-2024-0014 “Fundamental studies of interaction processes in the ocean-atmosphere system that form the physical state variability of marine environment at various spatial and temporal scales”.

For citation: Basharin, D.V. and Shokurova, I.G., 2024. Steady Winds over the Black Sea and Atmospheric Blocking Events. *Physical Oceanography*, 31(5), pp. 593-608.

Введение

В последние годы наблюдается тенденция к росту общего числа и интенсивности региональных гидрометеорологических аномалий на фоне глобальных климатических изменений¹ [1, 2]. Это подтверждается актуальными данными и расчетами глобальных и региональных климатических моделей, способных воспроизводить наблюдаемые тенденции изменения климата² [3], в том числе в регионе Черного моря [4, 5].

Известно, что длительные аномальные явления в приземном слое атмосферы часто связаны с квазистационарными ситуациями в средней тропосфере вследствие ее блокирования с типичной продолжительностью 5 сут и более [1, 3, 5, 6]. Блокирующие ситуации, наблюдающиеся в атмосфере средних широт Северного полушария, приводят не только к интенсивным региональным аномалиям в гидрометеорологических полях Европейского региона [5, 7–9]. Блокирование часто сопровождается изменением качества воздуха, например, аномально пониженным содержанием озона, особенно выраженным над Скандинавией и Аляской [10]. Экстремальные условия и региональные аномалии (в том числе вследствие блокингов в атмосфере) приводят к множеству негативных последствий, в частности, к повышению смертности населения [10, 11]. Вот почему их изучению в Европейско-Черноморском регионе посвящены многочисленные работы, количество которых намного превышает ссылки, приведенные в данной статье.

В настоящее время под блокингом понимается ситуация в атмосфере средних широт, когда гребень струйного течения становится особенно большим и образует в потоке отдельный антициклонический вихрь, создающий крупномасштабный устойчивый погодный режим (блокинг), блокирующий распространение волн Россби [2, 12]. В результате квазистационарного положения блокирующего антициклона происходит перенаправление типичных траекторий циклонов. При этом часто регионально устойчивый западный поток локально сменяется меридиональным потоком с длительностью от нескольких дней до нескольких недель³ [6, 13, 14]. Структура блокинга может быть различной. Наиболее часто в исследованиях упоминаются блокинги омега-типа, по своей структуре напоминающие греческую букву Ω , когда в центре расположен обширный антициклон, обтекаемый циклонами [15, 16], и дипольные блокинги, состоящие из антициклона и циклона, расположенного южнее антициклона [17].

Согласно работам [13, 17–19], типичный регион наиболее активного блокирования располагается в полосе 50–60° с. ш. с его максимальным количеством на западе Европейского региона, Скандинавии. В этом регионе блокирование хорошо проявляется в обширных аномалиях геопотенциальной вы-

¹ Climate change 2021: the physical science basis / V. Masson-Delmotte [et al.] // Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. 2021. 2339 p. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>

² Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability / H. O. Pörtner [et al.] // IPCC Sixth Assessment Report. 2022. Netherlands, IPCC Publisher. 3675 p. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>

³ Regional climate extremes in Northern Eurasia associated with atmospheric blockings: Inter-annual variations and tendencies of change / I. I. Mokhov [et al.] // AGU Fall Meeting Abstracts. 2011. Vol. 2011. P. GC43F-06.

соты изобарической поверхности 500 гПа [20]. Учет такого распределения давления был использован при создании индексов блокирования [20], позволяющих по градиентам в поле геопотенциальной высоты определить наличие блокинга на конкретной долготе в конкретный срок. Для верификации расчетов режимов с блокированием в климатических моделях, реанализах и по данным наблюдений часто используют индекс блокирования Тибальди и Молтени⁴ [9, 18–22].

Несмотря на большое число работ, анализирующих связь региональных климатических аномалий в Европейском регионе России с блокирующими процессами в атмосфере, для региона Черного моря таких исследований мало, и в основном они посвящены температурным аномалиям или осадкам/засухам [3, 5, 23]. Исследования причин возникновения аномальных ситуаций с продолжительными устойчивыми ветрами и их связи с блокингами в средней тропосфере не проводились. В то же время ветровой режим является одним из важных условий хозяйственной деятельности и жизнедеятельности человека. Знание ветрового режима и учет направления ветра важны при строительстве гидротехнических сооружений [24], прогнозировании ветрового волнения, сгонно-нагонных явлений [25, 26], апвеллингов в регионе Черного моря и штормовых условий [27, 28]. Кроме того, ветровой режим в значительной степени определяет характер циркуляции вод и изменение толщины перемешанного слоя [29, 30], а также влияет на региональные погодные условия [31]. Особый интерес представляют случаи, когда направление ветра устойчиво сохраняется в течение достаточно длительного времени. Это обуславливает актуальность подобных исследований. Поэтому основная цель работы – выявление ситуаций с продолжительными ветрами над Черным морем для холодного периода года и определение связи возникновения таких событий с крупномасштабными процессами в приземном слое и средней тропосфере.

Материалы и методика

В работе использовались данные атмосферного реанализа *ERA5* ($0,25^\circ \times 0,25^\circ$) [32] за 1979–2021 гг.:

– 6-часовые данные о скорости ветра (м/с) на высоте 10 м над акваторией Черного моря;

– 6-часовые данные о приземном давлении (гПа) и о геопотенциале изобарической поверхности 500 гПа в районе, ограниченном координатами $35\text{--}75^\circ$ с. ш., 10° з. д. – 100° в. д.

Направление преобладающего над Черным морем ветра определялось для каждого 6-часового срока как направление вектора скорости, зональная и меридиональная компоненты которого получены на основе осреднения компонент скорости ветра по данным, попадающим на акваторию моря. Полученное направление сопоставлялось с одним из восьми основных географических направлений: северным (С), северо-восточным (СВ), восточным (В), юго-восточным (ЮВ), южным (Ю), юго-западным (ЮЗ), западным (З), северо-западным (СЗ).

⁴ *Davini P.* Atmospheric blocking and winter mid-latitude climate variability : Tesi di Dottorato. Venezia : Universita Ca' Foscari, 2013. 141 p.

Из полученного временного ряда были выделены случаи с экстремально продолжительными ветрами, когда направление ветра не изменялось в течение двадцати 6-часовых сроков (т. е. 5 сут) и более. Для выделенных ситуаций дополнительно рассчитывались среднее направление ветра по всем узлам сетки $\bar{\varphi}$ (°)

$$\bar{\varphi} = \frac{1}{NK} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^K \varphi_{ij}$$

и его отклонение φ^* (°) от направления географической привязки. Здесь φ_{ij} – направление ветра в каждом узле сетки; N – число узлов сетки по акватории моря; K – число 6-часовых сроков в ситуации с продолжительным ветром.

Для идентификации атмосферных условий, которые приводят к возникновению продолжительных ситуаций с устойчивыми ветрами, выполнялось разложение на эмпирические ортогональные функции (ЭОФ) полей геопотенциальной высоты изобарической поверхности 500 гПа и приземного давления для совокупности случаев с этими ветрами. Метод состоит в разложении начального поля $F(x, t)$ по некоторым функциям $X_n(x)$ с коэффициентами $T_n(t)$ ($n = 1 \dots N$, где N – число сроков с устойчивыми ветрами)⁵ [33]. При этом в основу определения неизвестных функций ставится лишь одно условие: сумма квадратов ошибок разложения по всем точкам данной совокупности поля должна достигать минимума для любого n .

Для проверки гипотезы о том, что возможной причиной возникновения ситуаций с продолжительными ветрами одного направления может быть блокирование в средней тропосфере, вычислялся индекс блокирования в даты случаев с такими ветрами. Расчет проводился по методике, предложенной Тибальди и Молтени [20]. Для каждой широты вычислялись северный $GHGN$ (north geopotential height gradient) и южный $GHGS$ (southern geopotential height gradient) градиенты (в м/°) между значениями геопотенциальной высоты изобарической поверхности 500 гПа:

$$GHGN = \left[\frac{Z(\phi_n) - Z(\phi_0)}{\phi_n - \phi_0} \right], \quad (1)$$

$$GHGS = \left[\frac{Z(\phi_0) - Z(\phi_s)}{\phi_0 - \phi_s} \right], \quad (2)$$

где $\phi_n = 80^\circ N + \delta$, $\phi_0 = 60^\circ N + \delta$, $\phi_s = 40^\circ N + \delta$, $\delta = -5^\circ, 0^\circ, +5^\circ$.

Блокирование имеет место в случае, когда хотя бы для одного значения δ выполняются условия $GHGS > 0$, $GHGN \leq -10$. Южный градиент $GHGS$ определяет меру интенсивности блокирования, в то время как северный градиент $GHGN$ исключает случаи ложного блокирования [20].

⁵ Björnsson H., Venegas S. A. A manual for EOF and SVD analyses of climatic data // CCGCR Report. 1997. Vol. 97, iss. 1. P. 112–134.

Предварительно временные ряды геопотенциальной высоты изобарической поверхности 500 гПа в каждой точке пространственной сетки сглаживались скользящим средним по 5 суткам (по двадцати 6-часовым срокам) для обеспечения поиска продолжительных событий блокирования.

Результаты и их обсуждение

Случаи с продолжительными ветрами одного направления над Черным морем. В холодный период года было выделено 10 случаев с экстремально продолжительными ветрами, когда преобладающее над морем направление ветра не менялось в течение 5 сут и более (двадцать и более 6-часовых сроков) (таблица). Из выделенных случаев в 7 ситуациях преобладал северо-восточный (СВ) ветер, в одном случае северный (С) ветер, в одном случае – восточный (В) и еще в одном случае – устойчивый юго-западный (ЮЗ) ветер. Направление ветра $\bar{\varphi}$ отклоняется от направления географической привязки в среднем на $-6,6^\circ$ (таблица). Самые частые случаи – это случаи с северо-восточными устойчивыми ветрами, они составили $\sim 62\%$ от всех выделенных ситуаций. Отметим, что северо-восточные ветры также имеют наибольшую за год повторяемость – 18% по многолетним данным [34, 35].

Характеристики случаев с продолжительными ветрами над регионом Черного моря Characteristics of long-lasting wind cases over the Black Sea region

Случай / Case	Дата / Date	Направление ветра / Wind direction	Продолжительность, сут / Duration, day	Φ^* , °	Индекс блокирования / Blocking index	max GHGS, м/° / max GHGS, м/°	V_{cp} , м/с / V_{mean} , м/с	V_{max} , м/с / V_{max} , м/с
1	11–16.03.1986	СВ / NE	5,75	-8,2	+	7,0	7,0	11,6
2	01–07.01.1993	СВ / NE	6,50	4,3	+	5,0	9,7	16,6
3	07–14.12.1995	СВ / NE	8,75	-7,8	+	7,0	6,4	11,9
4	23–28.12.1995	ЮЗ / SW	5,00	-4,9	-	<0	10,3	16,0
5	14–19.01.2001	СВ / NE	6,50	-7,3	+	5,0	7,7	13,6
6	28.11–03.12.2002	В / E	6,25	1,5	-	<0	6,3	16,7
7	07–12.02.2008	СВ / NE	5,75	-7,8	+	7,0	7,1	12,6
8	28.01–02.02.2012	С / N	5,25	-9,1	+	11,0	7,4	14,8
9	08–13.02.2017	СВ / NE	5,25	-10,2	+	8,0	6,5	16,9
10	22–27.03.2020	СВ / NE	5,25	-4,9	+	6,8	6,1	16,4

Известно, что события блокирования в средней тропосфере не являются редкими. Согласно [16, 21, 36], суммарное число дней с атмосферным блокированием в Европе в среднем за зимний сезон года составляет 33 дня, при этом наблюдается около трех независимых эпизодов блокирования. Мы выделили всего 10 случаев с экстремально продолжительными ветрами дли-

тельностью 5 и более суток. Однако случаев с устойчивыми ветрами меньшей продолжительности (напр., 3–4 сут) может быть больше. В то же время не все возможные ситуации с достаточно устойчивым направлением ветра над морем, вызванные процессами блокирования, можно обнаружить, так как региональные атмосферные процессы могут искажать направление ветра в отдельные сроки.

Отметим, что, согласно результатам расчетов [21], по ряду климатических моделей, представленных в рамках шестого оценочного доклада Межправительственной группы экспертов по изменению климата, в XXI столетии прогнозируется незначительное уменьшение среднего количества атмосферных блокингов в Европе в зимнее время ¹.

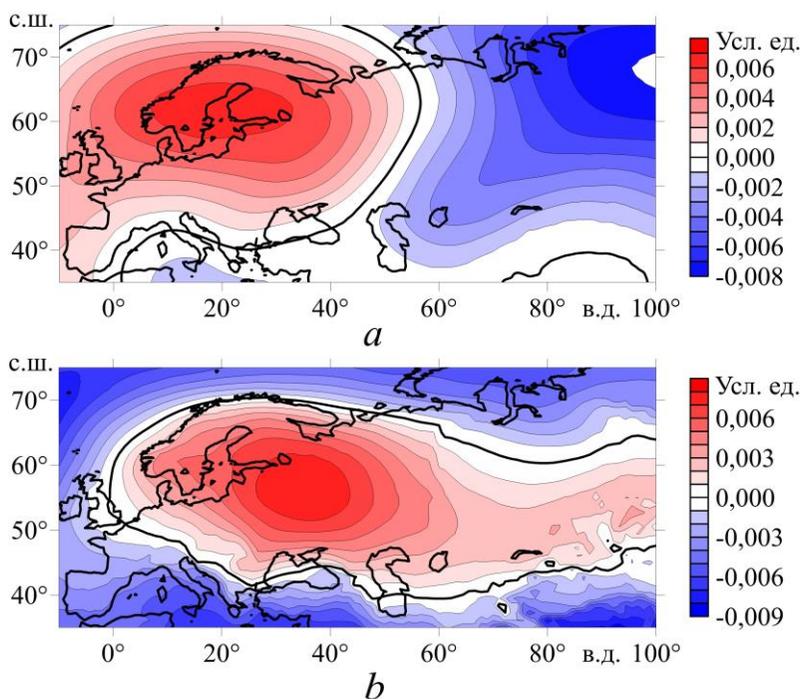
Крупномасштабные атмосферные условия для совокупности ситуаций с устойчивыми ветрами

Метод ЭОФ позволил выделить лидирующие пространственные моды для случаев с устойчивыми ветрами в Черном море. В итоге анализа была получена пространственная структура первой моды геопотенциальной высоты изобарической поверхности 500 гПа, содержащей 65% изменчивости (рис. 1, *a*). Распределение включает обширную область положительных аномалий геопотенциальной высоты, которая охватывает север Европы и простирается до Уральских гор/Каспийского моря. Центр антициклона располагается в районе Скандинавского п-ова, что характерно для положения блокирующего антициклона (блокинга).

Вклад следующих, со второй по пятую, пространственных мод геопотенциальной высоты изобарической поверхности 500 гПа заметно меньше, он составил 9, 7, 6 и 4% соответственно.

Разложение набора полей приземного давления на эмпирические ортогональные функции имеет похожие результаты. В пространственной структуре первой моды обширная область положительных аномалий приземного давления во все сезоны располагается над Центральной Европой и европейской частью Российской Федерации (рис. 1, *b*), при этом первая мода определяет 47% изменчивости поля приземного давления. Вклад последующих мод, со второй по пятую, поля приземного давления для всех случаев устойчивых ветров составил в холодный сезон 21, 9, 5 и 4% соответственно. Отметим, что в силу большей пространственно-временной изменчивости приземных полей вклад лидирующей первой моды меньше, чем аналогичный в средней тропосфере.

Распределение первой моды, полученное для приземного давления, в целом соответствует типовому полю давления, характерному для северных, северо-восточных и восточных ветров над акваторией Черного моря [34, 37]. Ветры таких направлений возникают на периферии крупномасштабного антициклона, располагающегося к северу, северо-востоку от Черного моря.



Р и с. 1. Распределение первых мод аномалий геопотенциальной высоты изобарической поверхности 500гПа (*a*) и поля приземного давления (*b*) для случаев с устойчивыми северными, северо-восточными и восточными ветрами в холодный период года

Fig. 1. Distribution of the first modes of the 500 hPa geopotential height anomalies (*a*) and the surface pressure field (*b*) for the cases of long-lasting northern, north-eastern and eastern winds in a cold season

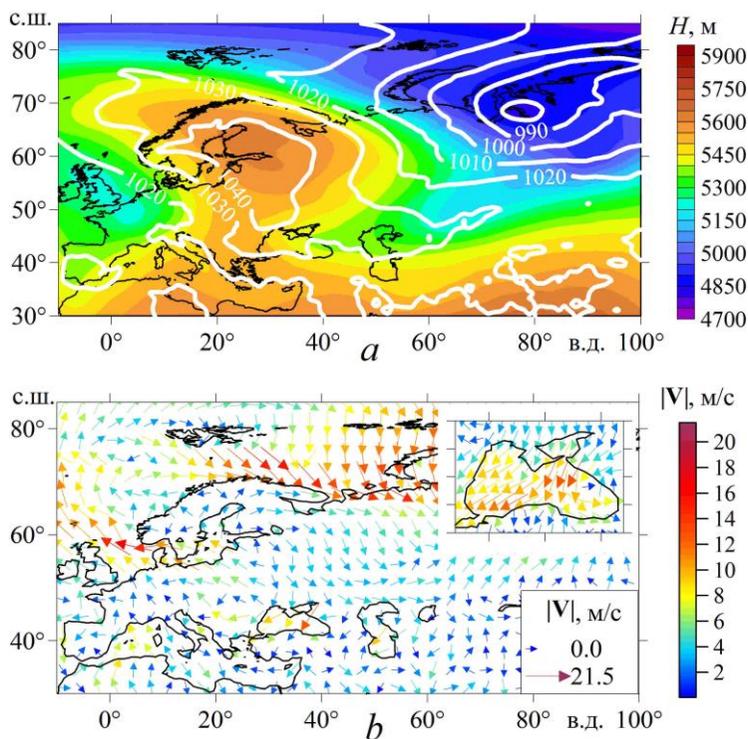
Известно, что для таких атмосферных условий зимой типичен вынос с высоких широт холодного/арктического воздуха на восточную/юго-восточную периферию антициклона⁴. Результаты [3] показывают, что блокирующие антициклоны, возникающие в регионе Центральной Европы, приводят к появлению отрицательных температурных аномалий воздуха вблизи северного побережья Черного моря. В то же время блокинги над северо-восточной частью Европы/Уралом формируют области положительных температурных аномалий, охватывающих Черноморский регион.

Атмосферные условия для случаев с устойчивыми ветрами разных направлений

Рассмотрим распределение геопотенциальной высоты изобарической поверхности 500 гПа в средней тропосфере и приземного давления, а также выполнение условий блокирования для обнаруженных случаев устойчивых ветров различных направлений.

Северо-восточный ветер. Атмосферные условия в средней тропосфере практически для всех случаев с продолжительным северо-восточным ветром над Черным морем (случаи 1–3, 5, 7, 9, 10, таблица) удовлетворяют условиям блокирования, определяемым индексом Тибальди и Молтени. Это самое мас-

совое количество случаев с продолжительными ветрами одного направления. Максимальный южный градиент геопотенциальной высоты изобарической поверхности 500 гПа, показывающий меру интенсивности блокирования, составляет 5–7 м/°. В этих случаях в распределении геопотенциальной высоты наблюдается малоподвижная блокирующая структура, имеющая омега-форму или близкую к ней (рис. 2).



Р и с. 2. Распределение геопотенциальной высоты изобарической поверхности 500 гПа, приземного давления (гПа, изолинии белого цвета) (а) и поля ветра на высоте 10 м (b) для 07.12.1995, 12:00 (случай с продолжительным северо-восточным ветром)

F i g. 2. Distribution of the 500 hPa geopotential height, surface pressure (hPa, white isolines) (a) and wind field at the 10 m height (b) for 12.07.1995, 12:00 (a case of long-lasting north-eastern wind)

Анализ полей геопотенциальной высоты показал, что в случаях 1 (11–16.03.1986) и 2 (02–07.01.1993) центр блокирующего антициклона устойчиво располагался над Восточной Европой. В случаях 3 (07–14.12.1995) и 9 (08–13.02.2017) блокирующий циклон доминировал над Скандинавским п-овом. В случаях 5 (14–19.01.2001), 7 (07–12.02.2008) и 10 (22–27.03.2020) центр блокирующего антициклона находился над северо-западной частью Европы. В случаях 2, 5, 10 область высокого давления медленно вытягивалась в восточном направлении, где также выполнялись условия блокирования (формулы (1) и (2)). В перечисленных случаях в приземном слое присутствовала область высокого давления, на юго-восточной периферии которой преобладали северо-восточные ветры [34, 37].

Как пример, иллюстрирующий случаи с устойчивым северо-восточным ветром, на рис. 2 приведено распределение аномалий геопотенциальной высоты поверхности 500 гПа (рис. 2, *a*) и распределение приземного давления (рис. 2, *b*) для случая 3, 07–14.12.1995 (таблица). Высотный блокирующий антициклон располагался над северной частью европейской территории России и Скандинавским п-овом. Структура блокинга в средней тропосфере имела хорошо выраженную форму в виде греческой буквы Ω с областями низкого давления у основания с восточной и западной стороны. В это время над акваторией Черного моря дул северо-восточный ветер с максимальной скоростью 12 м/с (рис. 2, *b*, таблица), а аномалии приземной температуры достигали минус 6–7 °С по данным сайтов <https://psl.noaa.gov/cgi-bin/data>, https://www1.wetter3.de/archiv_gfs_dt.html.

Северный ветер. Случай с продолжительным северным ветром (случай 8 из таблицы) обнаружен для периода 29 января – 2 февраля 2012 г. В это время происходило устойчивое блокирование западного переноса в средней тропосфере над Северной Атлантикой и Евразией, характеризующееся наиболее интенсивным, по сравнению со всеми другими случаями, южным градиентом (формула (2)) в поле геопотенциальной высоты изобарической поверхности 500 гПа (11 м/°). Процесс блокирования, начавшийся в третьей декаде января и продолжавшийся в феврале, сопровождался аномальными снегопадами и волнами холода в Европе и в европейской части России. Эти события описаны в многочисленных публикациях ⁶ [7, 38–40].

С середины января типичное западное перемещение атлантических циклонов над Центральной Европой нарушилось в результате усиления отрога Сибирского антициклона, вытягивающегося с юга Урала, его последующего продвижения на северо-запад и слияния с высотным гребнем над северо-восточной частью Атлантики [39, 40]. В нижнем слое тропосферы происходило экстремальное усиление положительных аномалий приземного давления [41]. К концу января – началу февраля обширный высотный блокирующий антициклон находился на севере европейской части России (рис. 3, *a*). На побережье Черного моря морозы сопровождался сильным ветром (рис. 3, *b*). В рассматриваемый период 29 января – 2 февраля 2012 г. над акваторией Черного моря дул северный ветер со средней скоростью 7,4 м/с и максимальными значениями до 15 м/с.

Противоположная ситуация сложилась в это время в Арктическом регионе. Происходящая в эти месяцы перестройка макромасштабной циркуляции создала благоприятные условия для интенсивной адвекции теплого воздуха из Западной Европы и из Атлантического океана в центральную область Арктического бассейна (рис. 3, *b*). В Арктическом регионе среднемесячные аномалии температуры воздуха превысили 15 °С [39]. Одновременно происходило вторжение полярного воздуха с севера Сибири на европейскую часть России, центральную и южную Европу (рис. 3, *b*), сопровождающееся сильными морозами. Одновременно волна холода наблюдалась и на востоке Азии [41].

⁶ *Grazzini F.* Cold spell prediction beyond a week: extreme snowfall events in February 2012 in Italy // ECMWF Newsletter. 2013. No. 136. P. 31–35.

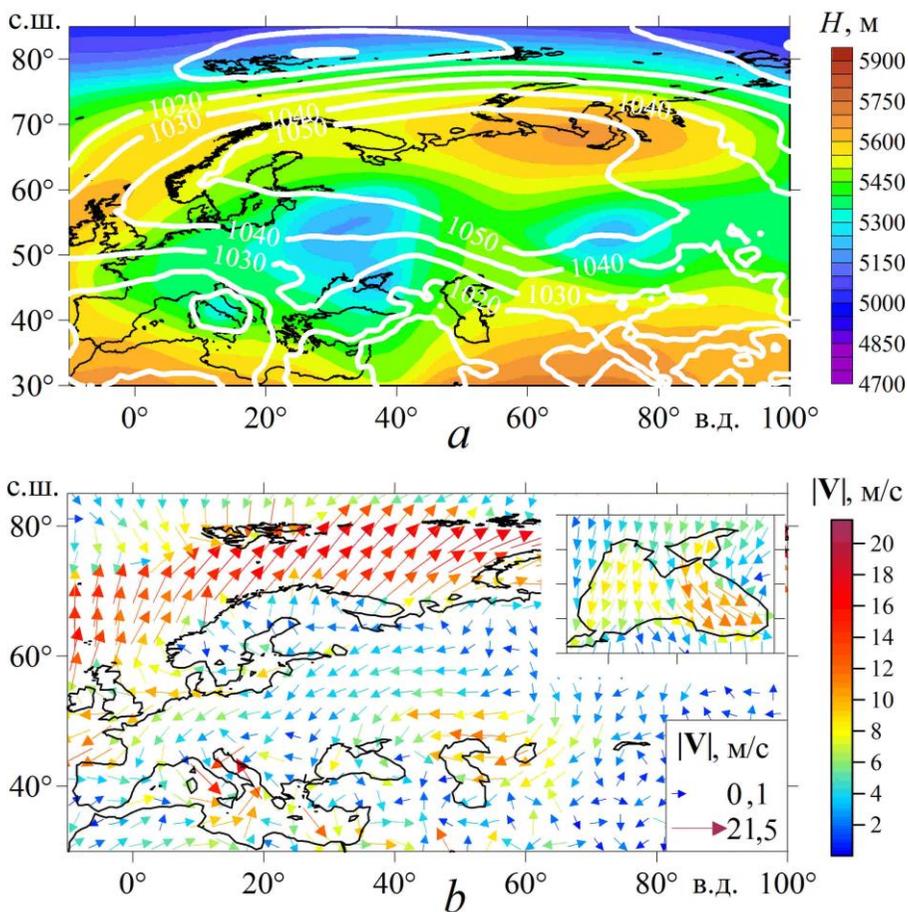
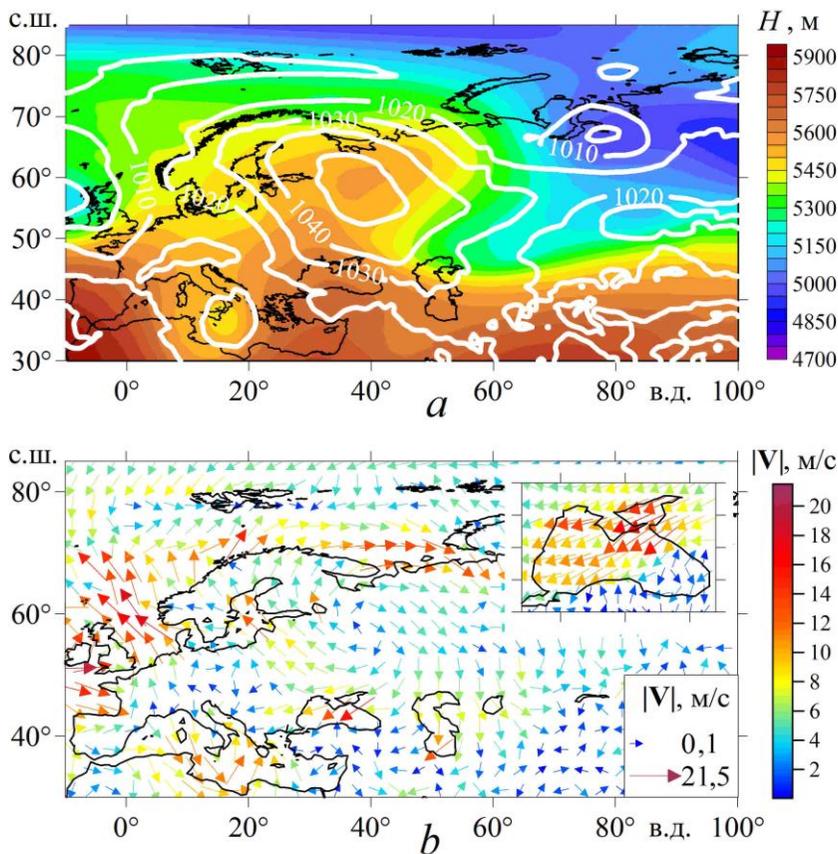


Рис. 3. То же, что на рис. 2, для 01.02.2012, 12:00 (случай с продолжительным северным ветром)
Fig. 3. The same as in Fig. 2, for 02.01.2012, 12:00 (a case of long-lasting northern wind)

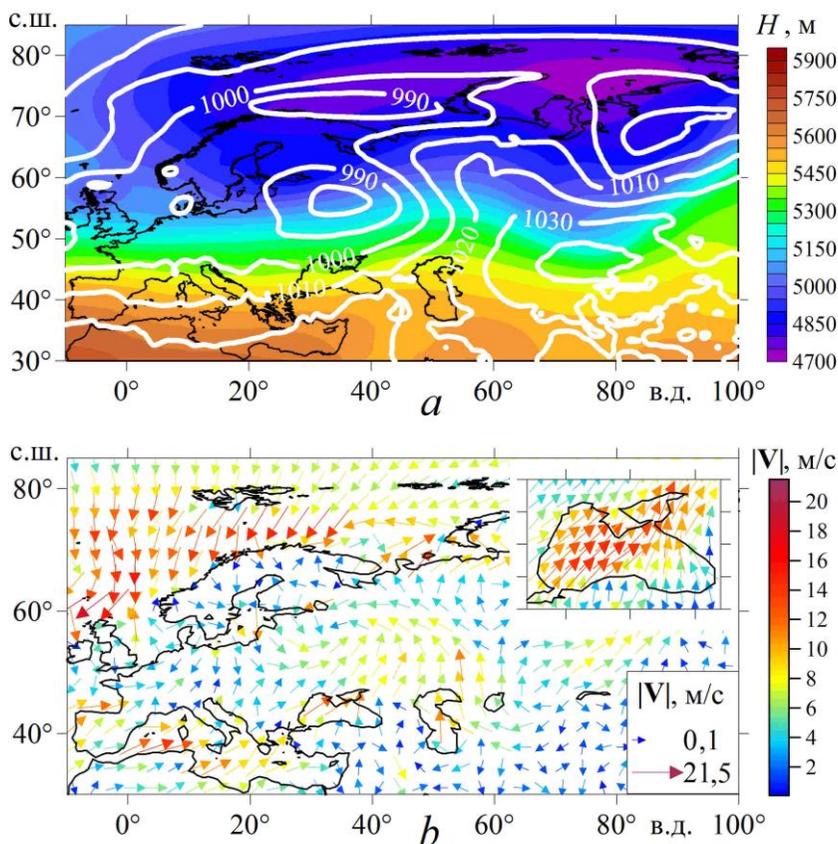
Восточный ветер. В случае с продолжительным восточным ветром (28.11–03.12.2002 г.) центр антициклона в средней тропосфере активно смещался начиная с 28 ноября в течение нескольких дней с севера Скандинавского п-ова в юго-восточном направлении, в центральную часть европейской территории России. Пространственная структура антициклона значительно видоизменялась. Так, напр., 1 декабря он соответствовал блокингу омега-типа (рис. 4, *a*), но быстро смещался и характеризовался южным градиентом меньше нуля, что не позволило идентифицировать его по критерию Тибальди и Молтени как блокирующий антициклон [20]. К концу периода антициклон располагался к северу/северо-востоку от Черного моря и далее постепенно двигался на восток. На его южной периферии, над акваторией Черного моря, преобладали восточные ветры (рис. 4, *b*). В целом над акваторией моря, по данным реанализа *ERA5*, в течение указанного периода преобладал устойчивый восточный ветер со средней скоростью $\sim 6,3$ м/с и максимальными значениями, достигающими 17 м/с.



Р и с. 4. То же, что на рис. 2, для 01.12.2002, 06:00 (случай с продолжительным восточным ветром)

Fig. 4. The same as in Fig. 2, for 12.01.2002, 06:00 (a case of long-lasting eastern wind)

Юго-западный ветер. Случай 4 с устойчивым юго-западным ветром зафиксирован в период 23–28 декабря 1995 г. (рис. 5). Можно заметить, что в выявленных нами случаях с устойчивыми ветрами этот год фигурирует дважды (таблица). Зима 1995–1996 гг. относится к самой затяжной во второй половине XX в. с повышенным числом экстремумов, что частично связывается с усилением блокинговой активности³ [14]. В течение этого периода начиная с 23 декабря холодная ложбина на северо-востоке Восточной Европы постепенно заполнялась, сдвигаясь на восток, а над югом Европы имел место интенсивный зональный перенос, который приносил атлантическое тепло в Черноморский регион. Этот перенос связан с прохождением циклона по северу Европы. Позднее, с 27 декабря над Черноморским регионом наблюдалось похолодание, связанное с прохождением холодного фронта другого подвижного циклона, который быстро перемещался по региону в восточном направлении. Кроме этого, на протяжении всего рассматриваемого периода присутствовал выраженный квазистационарный субтропический хребт высокого давления (рис. 5, *a*) и отмечался относительно высокий стабильный температурный градиент между севером и югом Европы.



Р и с. 5. То же, что на рис. 2, для 24.12.1995, 12:00 (случай с продолжительным юго-западным ветром)

Fig. 5. The same as in Fig. 2, for 24.12.1995, 12:00 (a case of long-lasting south-western wind)

Таким образом, можно заключить, что прохождение циклонов друг за другом по Европейскому региону, сопровождающееся интенсивным западным переносом воздушных масс, и стабильная полоса высокого давления в субтропических широтах (рис. 5, *a*) создавали над акваторией Черного моря условия для преобладания устойчивого юго-западного ветра (рис. 5, *b*). В целом над морем преобладал устойчивый юго-западный ветер со средней скоростью $\sim 10,3$ м/с при максимальных значениях, достигающих 16 м/с.

З а к л ю ч е н и е

В работе выделены и рассмотрены случаи с экстремально продолжительными ветрами над акваторией Черного моря в холодный период года (с декабря по март). Всего за 1979–2021 гг. было выделено 10 случаев ветров одного направления длительностью 5 сут и более. Для всех выделенных случаев были проанализированы атмосферные условия в приземном слое и средней тропосфере.

Для всех случаев с продолжительными северо-восточными ветрами и случая с северным ветром в атмосфере имели место события блокирования,

подтвержденные индексом блокирования. Как правило, присутствовал мало-подвижный высотный блокирующий антициклон, который располагался над северной частью Европы/Скандинавией или над севером европейской территории России, так что регион Черного моря оказывался на его юго-восточной периферии. В приземном слое такое положение антициклона сопровождалось северными и северо-восточными ветрами. Таким образом, атмосферные блокинги, в среднем располагающиеся над северной частью Европы, могут сопровождаться устойчивыми северо-восточными и северными ветрами над акваторией Черного моря.

Случай с юго-западным устойчивым ветром характеризуется отличительными атмосферными условиями по сравнению с предыдущими перечисленными случаями. В это время имел место интенсивный западный перенос при прохождении циклонов друг за другом по Европе. В субтропическом поясе присутствовал хорошо выраженный квазистационарный хребт высокого давления, и при этом существовал относительно высокий стабильный температурный градиент между севером и югом Европы. Такое распределение давления способствовало возникновению устойчивого юго-западного ветра над акваторией Черного моря.

В дальнейшем представляет интерес выявление и анализ событий с продолжительными ветрами для теплого времени года. Результаты данной работы могут быть использованы для изучения течений и ветровых волн в Черном море в периоды обнаруженных экстремально продолжительных ветров одного направления с применением численного моделирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Мохов И. И., Семенов В. А.* Погодно-климатические аномалии в российских регионах и их связь с глобальными изменениями климата // *Метеорология и гидрология*. 2016. № 2. С. 16–28. EDN VKQPRF.
2. Atmospheric blocking and weather extremes over the Euro-Atlantic sector – a review / L. A. Kautz [et al.] // *Weather and Climate Dynamics*. 2022. Vol. 3, iss. 1. P. 305–336. <https://doi.org/10.5194/wcd-3-305-2022>
3. Euro-Atlantic blocking events and their impact on surface air temperature and precipitation over the European region in the 20th century / G. Stankūnavičius [et al.] // *Climate Research*. 2017. Vol. 71, iss. 3. P. 203–218. <https://doi.org/10.3354/cr01438>
4. *Ginzburg A. I., Kostianoy A. G., Sheremet N. A.* Seasonal and interannual variability of the Black Sea surface temperature as revealed from satellite data (1982–2000) // *Journal of Marine Systems*. 2004. Vol. 52, iss. 1–4. P. 33–50. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2004.05.002>
5. The relationship between atmospheric blocking and temperature anomalies in Turkey between 1977 and 2016 / B. Efe [et al.] // *International Journal of Climatology*. 2020. Vol. 40, iss. 2. P. 1022–1037. <https://doi.org/10.1002/joc.6253>
6. *Barriopedro D., García-Herrera R., Trigo R. M.* Application of blocking diagnosis methods to general circulation models. Part I: A novel detection scheme // *Climate dynamics*. 2010. Vol. 35. P. 1373–1391. <https://doi.org/10.1007/s00382-010-0767-5>
7. *Luo D., Yao Y., Feldstein S. B.* Regime transition of the North Atlantic Oscillation and the extreme cold event over Europe in January–February 2012 // *Monthly Weather Review*. 2014. Vol. 142, iss. 12. P. 4735–4757. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-13-00234.1>
8. Large-scale flow and the long-lasting blocking high over Russia: Summer 2010 / A. Schneiderit [et al.] // *Monthly Weather Review*. 2012. Vol. 140, iss. 9. P. 2967–2981. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-11-00249.1>

9. *Мохов И. И.* Особенности формирования летней жары 2010 г. на европейской территории России в контексте общих изменений климата и его аномалий // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2011. Т. 47, № 6. С. 709–709. EDN ONFSBX.
10. The impact of synoptic weather on UK surface ozone and implications for premature mortality / R. Pope [et al.] // Environmental Research Letters. 2016. Vol. 11, iss. 12. 124004. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/12/124004>
11. *Wilby R. L.* A review of climate change impacts on the built environment // Built environment. 2007. Vol. 33, iss. 1. P. 31–45. <https://doi.org/10.2148/benv.33.1.31>
12. The jet stream and climate change / M. Stendel [et al.] // Climate Change. Elsevier, 2021. P. 327–357. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821575-3.00015-3>
13. *Хохлов В. Н., Романова А. В.* Повторяемость блокирующих ситуаций над Европой в начале 21-го века // Метеорология, климатология и гидрология. 2005. Т. 49. С. 82–88.
14. Interannual variations of the blocking high over the Ural Mountains and its association with the AO/NAO in boreal winter / C. Li [et al.] // Acta Meteorologica Sinica. 2012. Vol. 26, no. 2. P. 163–175. <https://doi.org/10.1007/s13351-012-0203-3>
15. A climatology of Northern Hemisphere blocking / D. Barriopedro [et al.] // Journal of Climate. 2006. Vol. 19, iss. 6. P. 1042–1063. <https://doi.org/10.1175/JCLI3678.1>
16. European temperature responses to blocking and ridge regional patterns / P. M. Sousa [et al.] // Climate Dynamics. 2018. Vol. 50. P. 457–477. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3620-2>
17. *Rex D. F.* Blocking action in the middle troposphere and its effect upon regional climate: part I // Tellus. 1950. Vol. 2, iss. 4. P. 275–301. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v2i4.8603>
18. The climatology of blocking anticyclones for the Northern and Southern Hemispheres: Block intensity as a diagnostic / J. M. Wiedenmann [et al.] // Journal of Climate. 2002. Vol. 15, iss. 23. P. 3459–3473. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2002\)015<3459:TCOBAF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2002)015<3459:TCOBAF>2.0.CO;2)
19. *Pelly J. L., Hoskins B. J.* A new perspective on blocking // Journal of the Atmospheric Sciences. 2003. Vol. 60, iss. 5. P. 743–755. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(2003\)060<0743:ANPOB>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(2003)060<0743:ANPOB>2.0.CO;2)
20. *Tibaldi S., Molteni F.* On the operational predictability of blocking // Tellus A. 1990. Vol. 42, iss. 3. P. 343–365. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0870.1990.t01-2-00003.x>
21. Impact of climate change on wintertime European atmospheric blocking / S. Bacer [et al.] // Weather and Climate Dynamics. 2022. Vol. 3, iss. 1. P. 377–389. <https://doi.org/10.5194/wcd-3-377-2022>
22. Блокнги в Северном полушарии и Евро-Атлантическом регионе: оценки изменений по данным реанализа и модельным расчетам / И. И. Мохов [и др.] // Доклады Академии наук. 2013. Т. 449, № 5. С. 582–586. EDN PYHRSD. <https://doi.org/10.7868/s0869565213110224>
23. *Кибальчич И. А., Полонский А. Б.* Циркуляционные индексы и температурный режим Восточной Европы в зимний период // Метеорология и гидрология. 2015. № 1. С. 5–17. EDN TCUSEV.
24. Оценка состояния морской среды при экстремальных штормовых условиях в некоторых районах нефтяных, газовых и газоконденсатных месторождений у черноморского побережья Крыма / С. В. Довгая [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2014. Вып. 28. С. 276–286. EDN VBFSZJ.
25. Quality of the wind wave forecast in the Black Sea including storm wave analysis / S. Myslenkov [et al.] // Sustainability. 2021. Vol. 13, iss. 23. 13099. <https://doi.org/10.3390/su132313099>
26. *Харитонова Л. В., Иванча Е. В., Алексеев Д. В.* Влияние штормовых нагонов и ветровых волн на морфодинамические процессы в районе Бакальской косы // Морской гидрофизический журнал. 2015. № 1. С. 79–90. EDN VBUSQN. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2015-1-79-90>
27. *Суркова Г. В., Колтерманн К. П., Кислов А. В.* О методе прогноза штормовых условий при изменениях климата // Вестник Московского университета. Серия 5 : География. 2012. № 6. С. 25–31. EDN PUZPIL.

28. *Surkova G., Arkhipkin V., Kislov A.* Atmospheric circulation and storm events in the Black Sea and Caspian Sea // *Open Geosciences*. 2013. Vol. 5, iss. 4. P. 548–559. <https://doi.org/10.2478/s13533-012-0150-7>
29. *Stanev E. V.* Understanding Black Sea Dynamics: Overview of Recent Numerical Modeling // *Oceanography*. 2005. Vol. 18, no. 2. P. 56–75. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2005.42>
30. Изменчивость толщины перемешанного слоя в Черном море и ее связь с динамикой вод и атмосферным воздействием / А. А. Кубряков [и др.] // *Морской гидрофизический журнал*. 2019. Т. 35, № 5. С. 449–468. EDN AIEJPU. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2019-5-449-468>
31. Анализ метеорологического режима в северо-западной части Черного моря по данным наблюдений на морской стационарной платформе / И. Г. Шокурова [и др.] // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2016. Вып. 2. С. 41–51. EDN WKTQON.
32. The ERA5 global reanalysis / H. Hersbach [et al.] // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2020. Vol. 146, iss. 730. P. 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
33. *Багров Н. А.* Аналитическое представление последовательности метеорологических полей посредством естественных ортогональных составляющих // *Труды Центрального института прогнозов*. 1959. № 74. С. 3–24.
34. *Иванов В. А., Белокопытов В. Н.* Океанография Черного моря. Севастополь : Морской гидрофизический институт РАН, 2011. 212 с. EDN XPERZR.
35. *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. EDN YLLPWM. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2017-6-13-26>
36. *Воскресенская Е. Н., Коваленко О. Ю.* Блокирующие антициклоны в Европейском регионе и их изменчивость в связи с событиями Эль-Ниньо // *Известия Российской академии наук. Серия географическая*. 2016. № 1. С. 49–57. <https://doi.org/10.15356/0373-2444-2016-1-49-57>
37. *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. EDN MQENUU. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2021-2-179-194>
38. *Demirtaş M.* The large-scale environment of the European 2012 high-impact cold wave: prolonged upstream and downstream atmospheric blocking // *Weather*. 2017. Vol. 72, iss. 10. P. 297–301. <https://doi.org/10.1002/wea.3020>
39. Блокирование западного переноса над Евразией зимой 2012 года и связанные с ним погодные аномалии / А. Д. Голубев [и др.] // *Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации*. 2013. № 349. С. 188–213. EDN RDJAMD.
40. Синоптические механизмы зимнего потепления в Арктике / Е. К. Семенов [и др.] // *Метеорология и гидрология*. 2015. № 9. С. 20–30. EDN UHOCSN.
41. *Wu B., Yang K., Francis J. A.* A cold event in Asia during January–February 2012 and its possible association with Arctic sea ice loss // *Journal of Climate*. 2017. Vol. 30, iss. 19. P. 7971–7990. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0115.1>

Об авторах:

Башарин Дмитрий Викторович, старший научный сотрудник, отдел океанографии, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат географических наук, **SPIN-код: 2145-1140**, **ResearcherID: J-9539-2018**, **Scopus Author ID: 6507420563**, **ORCID ID: 0000-0002-6389-8407**, dbasharin@rambler.ru

Шокурова Ирина Геннадьевна, старший научный сотрудник, отдел океанографии, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат географических наук, **SPIN-код: 7161-7467**, **ResearcherID: C-8223-2016**, **Scopus Author ID: 25822860800**, **ORCID ID: 0000-0002-3150-8603**, igshokurova@mail.ru