

Синоптические условия формирования шторма на Черном море в ноябре 2023 года и гидрометеорологический мониторинг на стационарной океанографической платформе

О. А. Шкаберда^{1, 2, ✉}, А. В. Гармашов¹, Ю. Н. Толокнов¹,
А. И. Коровушкин¹, Л. Н. Василевская³

¹ Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

² Военный инновационный технополис «ЭРА», Анапа, Россия

³ Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия
✉ olg3213@yandex.ru

Поступила в редакцию 08.07.2025; одобрена после рецензирования 20.08.2025;
принята к публикации 10.11.2025.

Аннотация

Цель работы. Проанализированы циркуляционные условия формирования и развития экстремального шторма в Черном море в ноябре 2023 г. и динамика штормового процесса по данным гидрометеорологического мониторинга на Черноморском гидрофизическом полигоне Морского гидрофизического института РАН.

Методы и результаты. Исследовались характеристики циклона 25–27 ноября 2023 г. и факторы, определившие его интенсивное развитие, на основе синоптических карт моделей *GFS*, *ICON* (разрешение 7 км), *GEM* и барической топографии (*Wetter3.de*), данных аэрологического зондирования и архивных инструментальных наблюдений. Установлено, что циклон относился к внетропическим с признаками взрывного циклогенеза (углубление на 25 гПа за сутки). Выявлены ключевые факторы интенсификации: термодинамические (передняя часть барической ложбины, высотная фронтальная зона, дивергенция потоков, температурный контраст в слое 500–1000 гПа); динамические (струйное течение с вертикальным градиентом скорости, межширотный температурный градиент, высокий барический градиент, совпадение направления ветра у земли и на высотах). Показано, что потепление климата и рост температуры воды Черного моря усиливают испарение, повышая вероятность экстремальных циклонов.

Выводы. Достаточно редкое сочетание крупномасштабных и синоптических атмосферных процессов над Черным и Эгейским морями в конце ноября 2023 г. привело к формированию глубокого взрывного внетропического циклона и развитию экстремального черноморского шторма. Непрерывные автоматические измерения на стационарной океанографической платформе Черноморского гидрофизического полигона Морского гидрофизического института РАН в условиях сильного и ураганного ветра скоростью до 40 м/с и высоты волн до ~ 7 м позволили проследить динамику штормового процесса с большей детальностью, чем это позволяют стандартные гидрометеорологические наблюдения. Полученные в экстремальных штормовых условиях экспериментальные данные имеют практическую ценность и найдут применение в различных прикладных исследованиях.

Ключевые слова: шторм, волнограф, экстремальные волны, экстремальный ветер, ветровое волнение, Черное море, температура воды, температура воздуха

Благодарности: работа выполнена в рамках темы государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ FNNN-2024-0014 и при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FZNS-2024-0037.

© Шкаберда О. А., Гармашов А. В., Толокнов Ю. Н., Коровушкин А. И., Василевская Л. Н., 2026

Для цитирования: Синоптические условия формирования шторма на Черном море в ноябре 2023 года и гидрометеорологический мониторинг на стационарной океанографической платформе / О. А. Шкаберда [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2026. Т. 42, № 1. С. 85–100. EDN PKWVHG.

Original article

Synoptic Conditions for Storm Formation in the Black Sea in November 2023, and Hydrometeorological Monitoring at the Stationary Oceanographic Platform

O. A. Shkaberda^{1,2, ✉}, A. V. Garmashov¹, Yu. N. Toloknov¹,
A. I. Korovushkin¹, L. N. Vasilevskaya³

¹ Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia

² Military Innovation Technopolis “Era”

³ Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia

✉ olg3213@yandex.ru

Abstract

Purpose. The purpose of the study is to analyze the circulation conditions for formation and development of the extreme storm in the Black Sea in November 2023, as well as the dynamics of storm process based on the hydrometeorological monitoring data obtained at the Black Sea hydrophysical subsatellite polygon of Marine Hydrophysical Institute, RAS.

Methods and Results. The characteristics of the Black Sea cyclone (November 25–27, 2023), and the factors that conditioned its intensive development were investigated using the synoptic charts both of the *GFS*, *ICON* (7-km resolution) and *GEM* models and baric topography (*Wetter3.de*). Besides, the data of aerological soundings and archival instrumental observations were also applied. It is established that the cyclone was an extratropical one with the signs of explosive cyclogenesis (deepening by 25 hPa per day). The following key intensification factors were revealed: thermodynamic ones (frontal zone of the baric trough, high-altitude frontal zone, divergence of flows, temperature contrast in the 500–1000 hPa layer); dynamic ones (jet stream with vertical velocity gradient, inter-latitudinal temperature gradient, high pressure gradient, coincidence of wind directions near the ground and at altitude. It has been shown that climate warming and rising of water temperature in the Black Sea enhance evaporation that, in its turn, increases the probability of extreme cyclones.

Conclusions. Rather rare combination of large-scale and synoptic atmospheric processes over the Black and Aegean seas in late November, 2023 has resulted in the formation of deep explosive extratropical cyclone and the development of extreme Black Sea storm. Continuous automated measurements performed under strong and hurricane wind speeds (up to 40 m/s) and wave heights (up to 7.14 m) at the stationary oceanographic platform of the Black Sea hydrophysical subsatellite polygon (MHI RAS) made it possible to track the storm dynamics in more details than the standard hydrometeorological observations can provide. The experimental data obtained under extreme storm conditions are of a practical significance and will be useful in various applied studies.

Keywords: storm, wave recorder, extreme waves, extreme wind, wind waves, Black Sea, water temperature, air temperature

Acknowledgments: The study was carried out within the framework of theme of state assignment of FSBSI FRC MHI FNNN-2024-0014 and supported by the Ministry of Science and Higher Education of Russian Federation, project No. FZNS-2024-0037.

For citation: Shkaberda, O.A., Garmashov, A.V., Toloknov, Yu.N., Korovushkin, A.I. and Vasilevskaya, L.N., 2026. Synoptic Conditions for Storm Formation in the Black Sea in November 2023, and Hydrometeorological Monitoring at the Stationary Oceanographic Platform. *Physical Oceanography*, 33(1), pp. 78-93.

Введение

Акватория и побережье Черного моря имеют ключевое значение для России как важный транспортный и стратегический узел, а также одна из основных курортных зон. Это определяет высокую потребность в достоверных метеорологических данных, особенно о ветре и волнении, которые необходимы как для гидрометеорологического обеспечения хозяйственной деятельности, так и для мониторинга состояния морских и прибрежных экосистем.

Для любых расчетов, связанных с параметрами волнения, большой проблемой остается отсутствие продолжительных рядов инструментальных наблюдений, поэтому характеристики волнения, как правило, получают на основе численного моделирования. Так, в настоящее время в Гидрометцентре России прогностические карты параметров ветрового волнения для Черного моря строятся на основе расчетов по спектральной модели *Wavewatch* III (версия 3.14) на сетке с разрешением 10×10 км. В качестве входных параметров используются оперативные прогностические метеорологические поля (скорость ветра, температура воды и воздуха, распространение ледового покрова), предоставляемые системами среднесрочного прогноза Гидрометцентра России и *NCEP/NOAA*. В число выходных прогностических параметров входят: зональная и меридиональная составляющие скорости ветра; высота, длина и период значительных волн, а также характеристики наиболее выраженной системы волн зыби¹ с заблаговременностью прогноза до 72 ч.

В последние годы на акватории Черного моря нередко фиксируются экстремальные волны высотой 7 м и более, что вызывает как научный, так и практический интерес. Наиболее часто сильное волнение наблюдается в юго-западной и северо-восточной частях моря [1]. Высокие штормовые волны в Черном море более вероятны в холодный период года. Их формированию способствует большая длина разгона по акватории моря и усиление ветров северо-восточного направления. В весенне-летний сезон ветры этих же направлений, как правило, слабее, что значительно снижает повторяемость штормового волнения [2]. Однако при благоприятных условиях могут развиваться штормовые волны значительной высоты – около 12 м, а в отдельных случаях и до 18 м [3]. Вероятность появления аномальных волн (по критерию $AI > 2$) в прибрежной зоне Черного моря в условиях глубокой воды составляет 3,3 % [4].

Прогноз ветровых волн с помощью прогностических моделей имеет большое практическое значение для различных отраслей, связанных с морем и прибрежными районами. Общие модели циркуляции, основанные на уравнениях гидродинамики и термодинамики, рассчитывают ветровые волны как результат взаимодействия атмосферных и океанских процессов, используя данные о гидрометеорологических параметрах [5].

Авторы работы [6], анализируя материалы шторма на Черном море 26–27 ноября 2023 г., пришли к выводу, что все модели значительно завышают расчетную высоту волн. Наиболее точными остаются инструментальные измерения и данные спутникового зондирования. При этом глобальные реанализы в условиях сильного ветра (> 12 м/с) систематически занижают его скорость

¹ URL: http://esimo.ru/dataview/viewresource?resourceId=RU_Hydrometcentre_69 (дата обращения: 10.10.2025).

на 1–4 м/с, а при слабом (< 4 м/с) – завышают [7]. Повышение точности измерений экстремальных волн критически важно для изучения динамики волнения и улучшения штормовых предупреждений.

Связь экстремальных штормов с ростом глобальной температуры воздуха подтверждается рядом источников ² [6–9]. С повышением температуры усиливается испарение, способствуя увеличению влагонасыщенности атмосферы ³, что, в свою очередь, приводит к развитию опасных штормовых циклонов. При прохождении циклона над теплой морской поверхностью неустойчивость атмосферы, обусловленная ростом влагосодержания и прогревом нижнего слоя тропосферы, способствует быстрому углублению циклонического вихря по механизму взрывного циклогенеза [10, 11].

Исследование ураганов в Мексиканском заливе позволило сделать вывод, что еще за несколько дней до усиления шторма фиксируются заметные возмущения влагосодержания атмосферы, сохраняющиеся даже после перемещения ураганов из залива на сушу [12]. Эта тема представляет интерес для изучения и в контексте Черного моря.

Ноябрьский шторм 2023 г. имеет особое значение для авторов этой статьи, так как во время его прохождения были получены уникальные данные с помощью аппаратуры для мониторинга гидрометеорологических параметров на океанографической платформе [13]. Для повышения надежности измерений в экстремальных условиях, когда традиционные струнные волнографы могут давать сбои [14], на платформе МГИ используются витые резистивные волнографы, позволяющие точно измерять высоты волн до 10 м.

В холодную часть года, особенно поздней осенью, Черное море является своеобразным региональным источником нагрева атмосферы. Это приводит к формированию барической ложбины в данном регионе, которая влияет на макроциркуляционные процессы. Именно в этот период в тыловой части высотной ложбины над прогретой поверхностью моря часто происходит адвекция холодного воздуха с севера. Возникающий температурный контраст между двумя средами создает условия для возникновения неустойчивости атмосферы, что становится причиной зарождения или углубления южных циклонов. Такие циклоны по своему происхождению и последствиям весьма близки к тропическим.

Как отмечал Б. П. Мультановский [15], Черное море является первой переходной ступенью от европейского режима к муссонной циркуляции Индийского океана и при определенных условиях здесь могут формироваться тропические штормы. Однако они довольно редки и обычно образуются в конце августа – начале сентября при температуре воды около 26 °С и выше. При более низких температурах воды формируются внетропические циклоны, внешне сходные с тропическими, с давлением в центре циклона до 950 гПа, сопровождающиеся штормовыми ветрами. Сильный сдвиг ветра и вторжение холодного воздуха поздней осенью способствуют развитию подобных циклонов.

² URL: <https://ocean.ru/index.php/novosti-left/novosti-instituta/item/3337-ekspert-verkhnij-sloj-chernogo-morya-poteplel-na-2-gradusa-za-30-let-silnye-shtormy-budut-chashche> (дата обращения: 10.04.2025).

³ *Братсерт У. Х.* Испарение в атмосферу. Теория, история, приложения / перевод с английского под ред. А. С. Дубова. Ленинград : Гидрометеиздат, 1985. 351 с.

Адвекция холодного арктического воздуха в это время года – частое явление, возникающее при меридиональном переносе и отрицательной фазе индекса Североатлантического колебания (NAO) [16]. Чем больше суммарная продолжительность вторжения арктического воздуха, тем значительнее объем поступающего сухого холодного воздуха и его влияние на метеоусловия Черноморского региона [17]. Именно при меридиональном переносе в последние десятилетия образуется все больше циклонов со штормовыми ветрами [18]. Такие возмущения развиваются в сильно вытянутых в меридиональном направлении барических ложбинах, перемещающихся в северном направлении. Меридиональный перенос влияет на локальное изменение вихря скорости, возрастающего с широтой, что в воздушной массе, движущейся на юг, приводит к возникновению циклонического вихря. Исследуемый циклон 26–27 ноября 2023 г. также образовался в условиях меридионального переноса воздушной массы.

Цель работы – оценка синоптических условий, способствовавших возникновению и развитию шторма в акватории Черного моря 26–27 ноября 2023 г., и анализ гидрометеорологических данных, полученных непосредственно во время его прохождения.

Аппаратура для гидрометеорологического мониторинга, материалы и методы

Динамика температурного, ветрового и волнового режимов в ноябре 2023 г. прослеживалась по данным за 10-минутный интервал (что составило 4303 сеанса), полученным на стационарной океанографической платформе Черноморского гидрофизического подспутникового полигона Морского гидрофизического института (МГИ) РАН (далее – платформа), расположенной в 600 м от берега, где глубина моря составляет около 30 м. Гидрометеорологические измерения осуществлялись в автоматическом режиме с помощью комплекса сбора гидрометеорологических данных (разработка МГИ), в состав которого входят датчик ветра малогабаритный ДВМ (измерение скорости ветра до 60 м/с), витой волнограф (измерение высот волн до 10 м, дискретность опроса 4 Гц), измерители температуры атмосферы и моря, относительной влажности, атмосферного давления [13, 19]. Волнограф, созданный специалистами отдела океанографии, оказался единственным прибором, который смог непрерывно и корректно регистрировать данные измерений в экстремальных штормовых условиях. Все данные прошли контроль качества с отбраковкой ненадежных фрагментов. Поскольку измерения скорости ветра проводились на высоте 21 м над уровнем моря, необходимо было привести их к стандартной высоте наблюдения (10 м). Для этого использовалась формула, предполагающая наличие логарифмического подслоя:

$$U_{10} = U_{21} \frac{\ln \frac{10 + z_0}{z_0}}{\ln \frac{21 + z_0}{z_0}},$$

где z_0 – параметр шероховатости.

Экспериментально установлено [20], что значения z_0 для морской поверхности в рассматриваемом регионе находятся в пределах 10^{-4} – 10^{-3} м, в нашей работе было взято среднее значение $z_0 = 5 \cdot 10^{-4}$ м.

Привлекались архивные данные береговых метеорологических станций с сайта РП5⁴ для сравнения с данными, полученными на платформе (температура воздуха и воды, атмосферное давление, направление и скорость ветра).

Поскольку определяющим фактором ветровых условий над Черным морем является структура барического поля, был проведен анализ синоптической ситуации и циркуляционных условий по ежедневным картам синоптических архивов американской *GFS*, немецкой *ICON* (высокое разрешение – 7 км) и канадской *GEM* числовых моделей (сайт *Ventusky* метеорологической компания *InMeteo*), а также по 4-срочным картам барической топографии с сайта *Wetter3.de* в период с 24 по 28 ноября 2023 г. Особое внимание уделялось характеристикам ветра, волн и разнице температур воды и воздуха как фактору, влияющему на развитие циклонической циркуляции и усиление ветрового волнения^{5,6}.

Использовались архивные данные аэрологического радиолокационного зондирования атмосферы на метеорологических станциях Стамбул (Картал), Турция, и аэропорт Ираклион, Греция, с сайта Университета Вайоминга⁷ за период 20–28 ноября 2023 г.

Детально рассматривалась атмосферная циркуляция, характеристики волн и ветра в период с 24 по 28 ноября 2023 г.

Результаты и обсуждение

25 ноября 2023 г. в 00:00 *UTC* над Средиземноморско-Черноморским регионом располагался широтно ориентированный полярный фронт с активной циклонической деятельностью, представленной вершиной волны над Керченским проливом, циклоном с давлением в центре 990 гПа западнее Стамбула и циклоном (990 гПа) над северной частью Эгейского моря, который являлся заключительным в серии фронтальных циклонов (рис. 1, *a*).

Поддержанию циклонической деятельности над теплой акваторией Эгейского моря способствовали благоприятные термодинамические факторы: передняя часть глубокой барической ложбины, интенсивная высотная фронтальная зона, дивергенция высотных потоков и температурный контраст между воздушными массами в слое 500–1000 гПа (рис. 1, *b*), а также характер барического поля, в котором тыловые изобары заключительного циклона объединяли циклоны, расположенные севернее, над средней полосой России.

Таким образом, характер барического поля указывал на возможное развитие активного макромасштабного процесса в тыловой части эгейского циклона. Большая часть Черного моря оказалась в теплом секторе, что обусловило относительно высокие температуры и ветры юго-западного направления. Среднемесячная температура воды по акватории моря в ноябре 2023 г. соста-

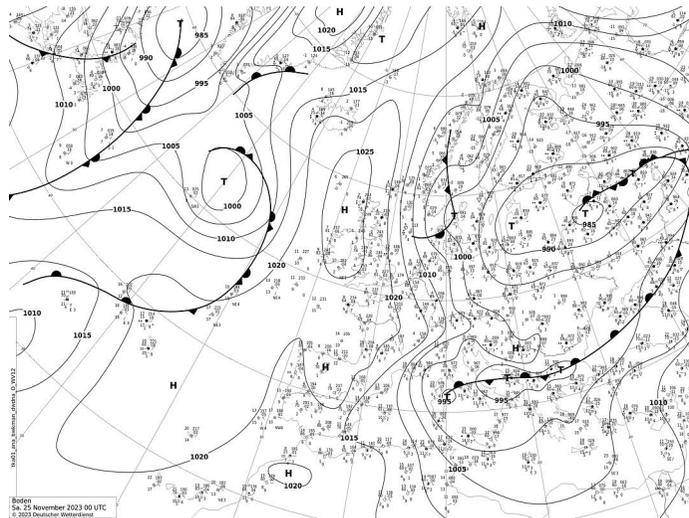
⁴ URL: <https://rp5.ru> (дата обращения: 29.04.2025).

⁵ URL: <https://www.ventusky.com> (дата обращения: 22.03.2025).

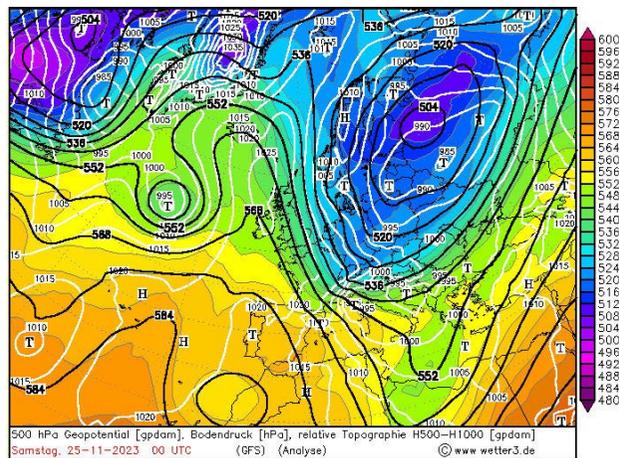
⁶ URL: <https://www.wetter3.de> (дата обращения: 22.03.2025).

⁷ Архив данных радиозондов Университета Вайоминга // University of Wyoming : официальный сайт. URL: <https://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.shtml> (дата обращения: 22.03.2025).

вила $16,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, что соответствует положительной аномалии около $2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ относительно климатических значений ноября за период 1950–2023 гг. и отклонению от тренда современного потепления около $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ [21].



a



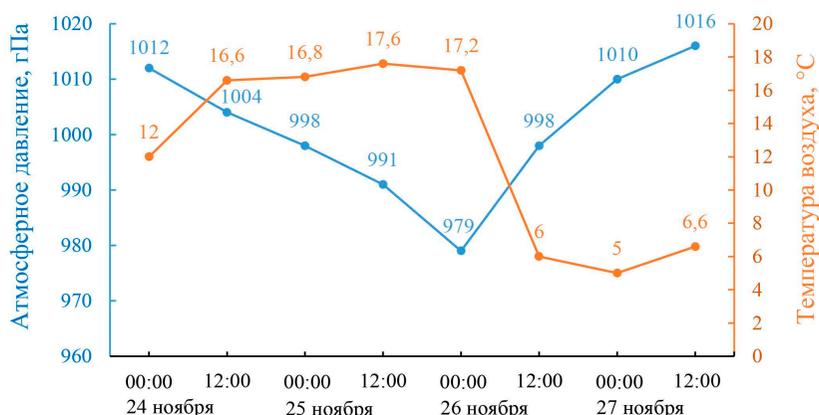
b

Р и с. 1. Приземная карта ⁶ 25.11.2023 г. в 00:00 UTC (*a*); карта относительной топографии ⁶ от $\frac{500\text{ мб}}{1000\text{ мб}}$ 24.11.2023 г. в 00:00 UTC (*b*)

F i g. 1. Surface weather map ⁶ for November 25, 2023, 00:00 UTC (*a*); relative topography map ⁶ от $\frac{500\text{ мб}}{1000\text{ мб}}$ for November 24, 2023, 00:00 UTC (*b*)

Спустя сутки, 26 ноября в 00:00 UTC (рис. 1, *a*), циклон, двигаясь со скоростью около 30 км/ч в северо-восточном направлении, сместился к юго-западному побережью Черного моря; его центр оказался почти над Стамбулом.

Радиолокационное зондирование атмосферы в этом пункте четко отражает изменение температуры, влажности и стратификации атмосферы за время прохождения циклонического вихря ⁸ (рис. 2).



Р и с. 2. Атмосферное давление P_a и температура воздуха T_a , по данным аэрологического радиозондирования атмосферы на метеорологической станции Стамбул за 24–27 ноября 2023 г.
Fig. 2. Atmospheric pressure and air temperature based on aerological radio-sounding data obtained at the Istanbul meteorological station, November 24–27, 2023

Давление в центре вихря понизилось до 975 гПа, толщина слоя атмосферы с положительной энергией неустойчивости составила около 300 гПа, а влагосодержание атмосферы достигало 24,4 мм (воздушная масса увлажнилась). По данным радиозондирования атмосферы на сайте университета Вайоминг ⁷ рассчитаны различные индексы (табл. 1), позволяющие оценить стабильность атмосферы.

Т а б л и ц а 1
 Table 1

Индексы для оценки стабильности атмосферы ⁷
Indices for assessing atmospheric stability ⁷

Индекс / Index	24.11.2023		25.11.2023		26.11.2023	
	00:00 UTC	12:00 UTC	00:00 UTC	12:00 UTC	00:00 UTC	12:00 UTC
SWEAT index	141,99	171,99	264,13	197,29	402,83	142,00
K-index	20,30	23,10	23,30	26,00	33,20	18,00
Vertical totals index	22,30	25,10	30,10	28,50	30,30	27,00
Total totals index	42,60	46,40	52,20	48,00	53,60	51,60
Convective inhibition	0,00	-75,39	-151,13	-112,41	-402,73	0,00
CINS using virtual temperature	0,00	-65,60	-123,06	-92,06	-405,84	-0,52

Примечание: красным цветом выделена сильная конвекция, синим – умеренная.
Note: strong convection is highlighted in red, moderate convection – in blue.

⁸ Архив данных индекса NOAA National Centers for Environmental Information : официальный сайт. США Вашингтон. URL: <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/nao/> (дата обращения: 05.06.2025).

Именно 24–26 ноября значения индексов соответствовали неустойчивости атмосферы, отражая степень конвективности и вероятность образования конвективной облачности с ливнями, грозами и даже смерчами (см. ячейку, выделенную серым цветом в табл. 1).

Над циклоническим вихрем фиксировалось струйное течение со значительным вертикальным градиентом скорости: максимальная скорость в верхней тропосфере в районе Стамбула достигала 41–48 м/с (рис. 3, *a*), а в районе аэропорта Ираклион – 50 м/с (рис. 3, *b*).

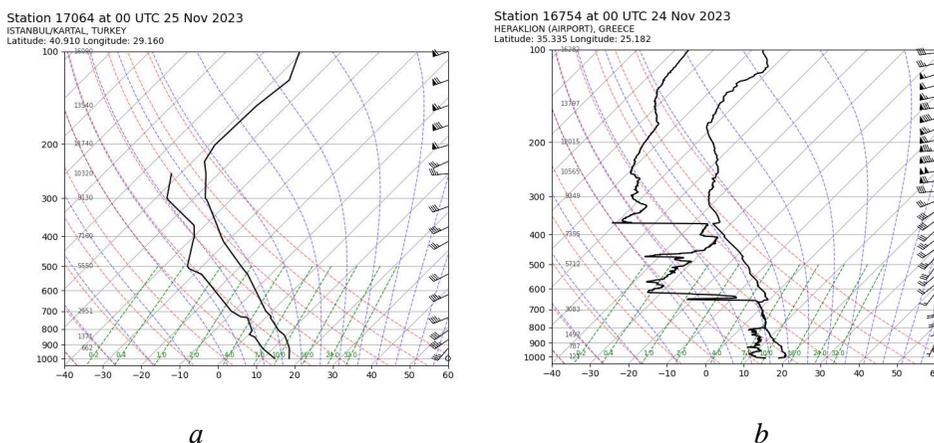


Рис. 3. Аэрологическая диаграмма ⁷: Стамбул (*a*); Ираклион (*b*)

Fig. 3. Aerological diagram ⁷: Istanbul (*a*); Heraklion (*b*)

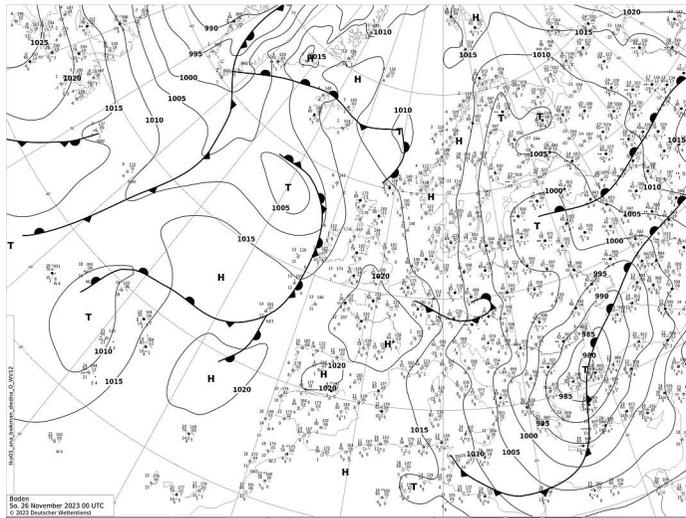
Близость струйного течения создала условия, при которых циклон получил дополнительную кинетическую энергию. При этом направление юго-западного ветра у земли и на высотах совпадало, что способствовало усилению ветра над морской акваторией.

В последующие сутки циклон смещался над Черным морем со скоростью 60 км/ч, затем несколько замедлил движение при выходе на континент, 27 ноября в 00:00 UTC давление в его центре достигло 979 гПа.

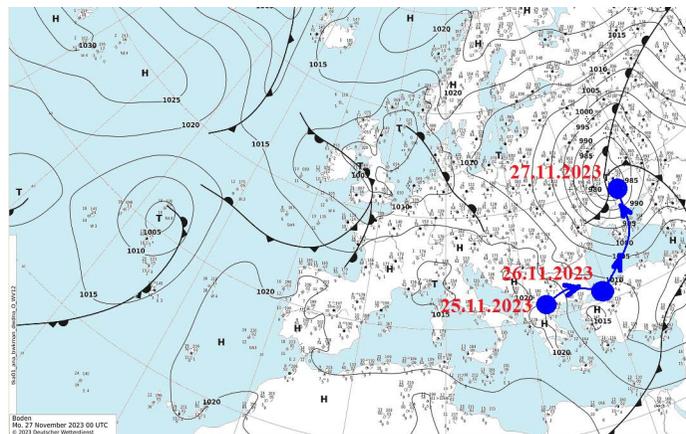
На рис. 4, *b* показана траектория движения циклона за 25–27 ноября – от момента образования и появления первой замкнутой изобары на приземной карте 25 ноября над Эгейским морем до момента его выхода 27 ноября к востоку от Днепра.

В целом циклон при выходе на Черное море представлял собой глубокий внетропический циклон с четко очерченным центром, морфологически сходным с тропическим циклоном. В первые сутки он углубился на 25 гПа, что позволяет отнести его к взрывному. Для таких циклонов характерны высокая скорость перемещения, быстрое углубление и трансформация в штормовые циклоны [11, 12]. Подобные «южные» циклоны, выходя на акваторию моря, получают возможность беспрепятственного разгона над поверхностью моря. В условиях бароклинной неустойчивости, для которой характерны вертикальный градиент скорости течений и межширотный градиент температуры, циклоны приобретают значительное ускорение. Соответственно, значительный барический градиент в области глубокого циклона обусловил возникновение

сильных (скоростью не менее 15 м/с) и ураганных (30–40 м/с) ветров. Так, в ночь на 26 ноября при выходе на южное побережье Черного моря максимальные скорости западо-юго-западного (ЗЮЗ) ветра превышали 30–40 м/с.



a



b

Р и с. 4. Приземная синоптическая карта 26.11.2023 в 00:00 UTC (*a*); траектория движения циклона (синие кружки и линия) 25–27 ноября 2023 г. на приземной топографической карте 27.11.2023 в 00:00 UTC (*b*)

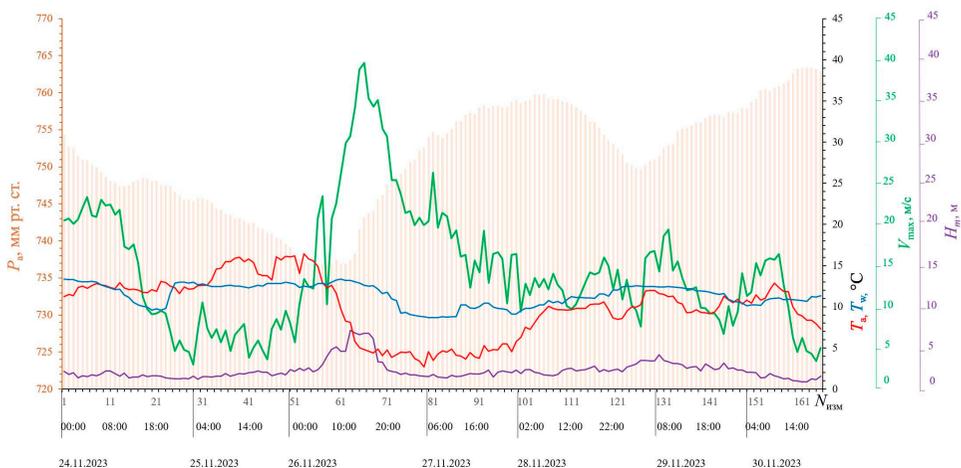
Fig. 4. Surface weather map for November 26, 2023, 00:00 UTC (*a*); trajectory of cyclone movement (blue circles and line) for November 25–27, 2023 overlaid on the surface topographic chart for November 27, 2023, 00:00 UTC (*b*)

Когда в первой половине суток 26 ноября центр циклона достиг Крымского п-ова, направление ветра сменилось на тыловое (северо-западное), что привело к мощной адвекции холодного арктического воздуха и резкому понижению температуры воздуха – в Стамбуле в течение полусуток похолодало на

11 °С до 6 °С (см. рис. 2). Этот процесс обусловлен меридиональной направленностью тыловых изобар и отрицательной фазой индекса Североатлантического колебания⁸, который в ноябре 2023 г. составил $-0,3$. Наибольшие скорости ветра наблюдались в центральной, западной частях и в теплом секторе циклона. В западной части акватории сформировалась область штормовых волн высотой до 3 м, а к 13:00 UTC с продвижением шторма на восток и ростом высоты и периода волн их высота достигла 5 м [22].

Под удар стихии попало почти все побережье Крымского п-ова: скорость ветра достигала 40 м/с, за сутки выпало до 33 мм осадков, была затоплена трасса Алушта – Феодосия, высота морских волн достигала 6–7 м. В Симферополе ветер повалил около 80 деревьев, были повреждены сотни линий электропередачи и газопровода, пострадали десятки людей, имелись погибшие^{9, 10}. Мощная штормовая циклоническая система принесла ураганные ветры, сильные дожди и локальные наводнения в прибрежных районах. На следующие сутки, 27 ноября, циклон покинул акваторию и продолжил движение на север, постепенно заполняясь.

Сочетание аппаратных и программных средств в системе сбора и обработки информации на платформе Черноморского гидрофизического подспутникового полигона МГИ позволило в режиме, близком к реальному времени, проследить развитие штормовых процессов [13, 19]. На рис. 5 показана динамика гидрометеорологических параметров, измеренных во время прохождения шторма.



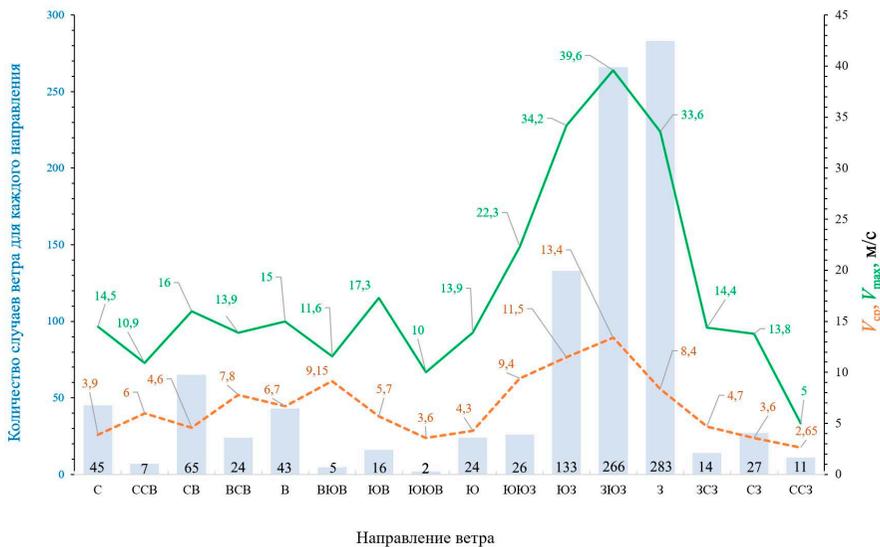
Р и с. 5. Динамика скорости ветра V_{\max} , высоты волны H_m , атмосферного давления P_a , температуры воздуха T_a и воды T_w за период 24–30 ноября 2023 г. ($N_{\text{изм}}$ – порядковый номер измерения)
Fig. 5. Dynamics of wind speed V_{\max} , wave height H_m , atmospheric pressure P_a , and air T_a and water T_w temperature for November 24–30, 2023 (N_{meas} is sequence number of measurement)

⁹ URL: <https://www.vedomosti.ru/society/articles/2023/11/28/1008025-po-yugu-rossii-proshel-sya-silneishii-shtorm>. (дата обращения 10.04.2025).

¹⁰ URL: <https://www.kp.ru/russia/novosti-turizma-v-rossii/uragan-v-krymu-poslednie-novosti-na-28-noyabrya-2023/>. (дата обращения 10.04.2025).

Схождение линий всех параметров к своим пиковым значениям в один временной интервал наглядно демонстрирует кульминацию шторма. Пик воздействия стихии на полуостров пришелся на первую половину суток 26 ноября, что подтверждается архивными синоптическими картами ⁶ и сообщениями в СМИ ^{9, 10}.

Минимальное атмосферное давление, равное 736,1 мм рт. ст. (981,4 гПа), зафиксировано на платформе 26 ноября в 06:50. Температура воздуха менее чем за сутки стремительно снизилась с 16,5 до 1,5 °С, в то время как температура воды в этот период достигла максимума в 13,4 °С (рис. 5). Максимум высоты волны около платформы зафиксирован на отметке 7,14 м. Преобладающие направления ветра в момент прохождения шторма над платформой – западное (З), ЗЮЗ и юго-западное (ЮЗ) с максимальными скоростями ветра 33,6; 39,6 и 34,2 м/с соответственно (рис. 6).



Р и с. 6. Повторяемость направления ветра, средняя V_{cp} и максимальная V_{max} скорости ветра, фиксируемые с 10-минутным интервалом на океанографической платформе в течение 24–30 ноября 2023 г.

Fig. 6. Repeatability of wind direction, average V_{cp} and maximum V_{max} wind speeds recorded at 10-min intervals at the oceanographic platform during November 24–30, 2023

Основным фактором, формирующим ветровое волнение, являются поля приводного ветра. Визуализация параметров ветрового волнения, выполненная ранее [23], позволяет оценивать морскую обстановку и прогнозировать состояние акватории Черного моря. Однако на практике прогноз волнения обычно строится на прогнозе скорости и направления ветра. При этом надежность такого метода ограничена, поскольку измерения ветра производятся на сети метеорологических станций и постов, находящихся на суше. На судах измерения производятся в весьма сложных условиях, зачастую с помощью ручного анемометра. Инструментальные измерения, выполненные на платформе в штормовых условиях, оказались уникальными и высокоинформативными, наглядно отражая синоптические условия развития шторма (см. рис. 5).

В табл. 2 представлены данные, полученные на прибрежных метеорологических станциях Крыма и платформе. Сравнительный анализ этих материалов показал, что максимальная и средняя скорости ветра, зарегистрированные на платформе, значительно превышают значения, полученные на метеорологических станциях. В отсутствие таких препятствий для ветра, как застройка, растительность и особенности рельефа, на открытой морской поверхности средняя и максимальная скорости ветра в два раза и более превышают данные измерений на суше.

Т а б л и ц а 2
T a b l e 2

Гидрометеорологические параметры на прибрежных метеорологических станциях Крыма и на платформе за период 24–28 ноября 2023 г.
Hydrometeorological parameters at the coastal meteorological stations in Crimea and at the platform for November 24–28, 2023

Параметр / Parameter	Плат- форма / Platform	Ялта / Yalta	Севасто- поль / Sevastopol	Керчь / Kerch	Феодо- сия / Feodosiya	Евпа- тория / Еврато- рија	Алушта / Alushta	Херсонес- ский маяк / Chersonesos light- house
$T_{a\text{ ср.}}, ^\circ\text{C} / T_{a\text{ в.}}, ^\circ\text{C}$	9,9	8,8	9,8	7,8	9,3	9,1	9	10,5
$T_{a\text{ макс.}}, ^\circ\text{C} /$ $T_{a\text{ мин.}}, ^\circ\text{C}$	16,9	14,2	17,3	15,8	16,2	14,2	14,9	16,5
$T_{a\text{ мин.}}, ^\circ\text{C} / T_{a\text{ мин.}}, ^\circ\text{C}$	1,5	2,4	3	-1,4	1,2	1,0	2,0	3,8
$T_w, ^\circ\text{C}$	11,4	11,9	–	8,8	12,5	11	13,4	–
$P_o, \text{мм рт. ст.} /$ $P_o, \text{мм Hg}$	749	744,2	750	748,4	745,6	748,2	744	750,2
$P_{o\text{ макс.}}, \text{мм рт. ст.} /$ $P_{o\text{ макс.}}, \text{мм Hg}$	759,8	754	760	756,7	756	759	754	760,3
$P_{o\text{ мин.}}, \text{мм рт. ст.} /$ $P_{o\text{ мин.}}, \text{мм Hg}$	736,1	732	736	734,1	733	733	731	736,2
$DD, \text{румбы} /$ $DD \text{ (points)}$	3 / W	3 / W	Ю3 / SW	Ю / S	Ю3 / SW	3 / W	С3 / NW	Ю3 / SW
$V_{\text{ср.}}, \text{м/с} / V_{\text{ав.}}, \text{м/с}$	13,6	2,8	8,9	6,4	4,1	5,3	3,2	7,6
$V_{\text{макс.}}, \text{м/с} /$ $V_{\text{макс.}}, \text{м/с}$	39,6	7	23	15	10	13	13	28
$H_{m\text{ макс.}}, \text{м} /$ $H_{m\text{ макс.}}, \text{м}$	7,14	–	–	–	–	–	–	5,7

П р и м е ч а н и е : $T_{a\text{ ср.}}$ ($T_{a\text{ макс.}}$, $T_{a\text{ мин.}}$) – температура воздуха средняя (максимальная, минимальная); T_w – температура воды; P_o ($P_{o\text{ макс.}}$, $P_{o\text{ мин.}}$) – атмосферное давление на уровне станции среднее (максимальное, минимальное); DD – направление ветра; $V_{\text{ср.}}$ и $V_{\text{макс.}}$ – скорость ветра средняя и максимальная; $H_{m\text{ макс.}}$ – максимальная высота волны.

N o t e : $T_{a\text{ av.}}$ ($T_{a\text{ max.}}$, $T_{a\text{ min.}}$) is average (maximum and minimum) air temperature; T_w is water temperature; P_o ($P_{o\text{ max.}}$, $P_{o\text{ min.}}$) is average (maximum and minimum) station-level atmospheric pressure; DD is wind direction; $V_{\text{av.}}$ and $V_{\text{max.}}$ are average and maximum wind speeds; $H_{m\text{ max.}}$ is maximum wave height.

Что касается данных о высоте волны и других характеристик волн, то непрерывная инструментальная регистрация в данном регионе осуществляется только на платформе. На гидрометеорологической станции Херсонесский маяк измерения тоже производятся, но стандартным полуинструментальным методом – посредством визуальных наблюдений по установленной в море вехе с делениями. Поэтому сравнить данные измерений с платформы можно только со спутниковыми данными, полученными ранее [7].

Крымский п-ов экранирует волны западного и северо-западного направлений, что приводит к понижению экстремальных волн в два раза и более в протяженной прибрежной акватории от южной оконечности полуострова до м. Чауда. Эти данные согласуются с результатами анализа ноябрьского шторма 2023 г. по акватории Черного моря, когда максимальные высоты и периоды волн превышали 9 м и 13 с соответственно [22].

Точность исследуемых характеристик зависит от метода их получения: визуального или инструментального. Эталонными тем не менее считаются инструментальные измерения, поскольку именно они используются для калибровки всех других методов¹¹. Поэтому данные, полученные на платформе, представляют значительную ценность для решения различных научных и прикладных задач.

Заключение

В результате анализа циркуляционных условий формирования и развития шторма в ноябре 2023 г. и изучения данных инструментальных измерений гидрометеорологического мониторинга на стационарной океанографической платформе Черноморского гидрофизического подспутникового полигона МГИ во время прохождения шторма, сделаны следующие выводы.

Циклон, наблюдавшийся 25–27 ноября 2023 г., является внетропическим, близким по характеру развития к взрывному циклогенезу, так как в первые сутки он углубился на 25 гПа и характеризовался высокой скоростью перемещения.

На его образование повлияли благоприятные термодинамические факторы:

- передняя часть глубокой барической ложбины;
- интенсивная высотная фронтальная зона;
- дивергенция высотных потоков;
- температурный контраст между воздушными массами в слое 500–1000 гПа.

На усиление циклона и на образование штормовых скоростей ветра и экстремальных волн повлияли:

- струйное течение со значительным вертикальным градиентом скорости над циклоническим вихрем, подпитывающее циклон кинетической энергией;
- межширотный градиент температуры, обусловленный мощной адвекцией холодного арктического воздуха на аномально теплую поверхность моря;
- значительный барический градиент;
- совпадение юго-западного направления ветра у земли и на высотах;
- беспрепятственный разгон воздушных потоков при выходе на поверхность моря.

¹¹ Толмачева Н. И. Методы и средства гидрометеорологических измерений : учебное пособие для метеорологов. Пермь : Пермский университет, 2011. 223 с.

Меридиональная направленность тыловых изобар и отрицательная фаза Североатлантического колебания обусловили меридиональный перенос холодной арктической воздушной массы.

Потепление климата и повышение температуры воды Черного моря способствует интенсификации испарения с поверхности океана, что, в свою очередь, может вести к увеличению частоты экстремальных циклонов с разрушительными последствиями.

Уникальные данные, полученные в экстремальных штормовых условиях на Черноморском гидрофизическом подспутниковом полигоне МГИ, обладают высокой научной ценностью. Они необходимы для верификации и совершенствования прогностических моделей, для инженерных расчетов при возведении сооружений в прибрежной зоне Крыма и для уточнения результатов расчетов, выполненных другими методами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wind waves in the Black Sea: results of a hindcast study / V. S. Arkhipkin [et al.] // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2014. Vol. 14, iss. 11. P. 2883–2897. EDN UFFOJV. <https://doi.org/10.5194/nhess-14-2883-2014>
2. Bernardino M., Rusu L., Guedes Soares C. Evaluation of extreme storm waves in the Black Sea // *Journal of Operational Oceanography*. 2021. Vol. 14, iss. 2. P. 114–128. EDN HRDYZU. <https://doi.org/10.1080/1755876x.2020.1736748>
3. Extreme wind waves in the Black Sea / B. V. Divinsky [et al.] // *Oceanologia*. 2020. Vol. 62, iss. 1. P. 23–30. EDN OWFSBU. <https://doi.org/10.1016/j.oceano.2019.06.003>
4. Запелов А. С., Гармашов А. В. Соотношение глубины впадины и высоты гребня поверхностных волн в прибрежной зоне Черного моря // *Морской гидрофизический журнал*. 2024. Т. 40, № 1. С. 78–86. EDN ZNPAZD.
5. Lobeto H., Menendez M., Losada I. J. Future behavior of wind wave extremes due to climate change // *Scientific Reports*. 2021. Vol. 11, no. 1. 7869. EDN HMWMUT. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-86524-4>
6. Wind and Wave Hindcast and Observations During the Black Sea Storms in November 2023 / M. V. Yurovskaya, M. V. Shokurov, V. S. Barabanov [et al.] // *Pure and Applied Geophysics*. 2024. Vol. 181. P. 3149–3171. EDN PRLQYX. <https://doi.org/10.1007/s00024-024-03592-z>
7. Сопоставление скорости ветра над Черным морем по спутниковым и метеорологическим данным / А. В. Гармашов [и др.] // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2016. Т. 52, № 3. С. 351–360. EDN WALSHV. <https://doi.org/10.7868/S0002351516030044>
8. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Core Writing Team, H. Lee, J. Romero (eds.). Geneva, Switzerland : IPCC, 2023. 184 p. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
9. Шерстюков Б. Г. Глобальное потепление и его возможные причины // *Гидрометеорология и экология*. 2023. № 70. С. 7–37. <https://doi.org/10.33933/2713-3001-2023-70-7-37>
10. Оценка количественных характеристик штормовых циклонов / А. В. Дикинис [и др.] // *Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета*. 2010. № 16. С. 51–58. EDN LUQXRA.
11. Ветров А. Л., Сергеев М. В. Применение аппаратно-программного комплекса для исследования циклонов умеренных широт на базе численной модели атмосферы WRF-ARW // *Вестник Пермского университета. Серия: Информационные системы и технологии*. 2010. № 2 (39). С. 15–21. EDN VZCUAE.
12. Гранков А. Г. О связи полей влажности атмосферы в Мексиканском заливе с процессами зарождения и развития ураганов // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2021. Т. 57, № 4. С. 495–506. EDN CIMABX. <https://doi.org/10.31857/S0002351521040052>

13. Аппаратура для мониторинга гидрометеорологических параметров на океанографической платформе в Качивели // Мониторинг прибрежной зоны на Черноморском экспериментальном подспутниковом полигоне / Ю. Н. Толокнов [и др.]. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2014. С. 150–154. EDN TZMZJT.
14. *Puckette P. T., Gray G. B.* Long-term performance of an AWAC wave gage, Chesapeake Bay, VA // Proceedings of the IEEE/OES/CMTC 9th Working Conference on Current Measurement Technology. IEEE, 2008. P. 119–124.
15. *Мультиановский Б. П.* Нордостовые штормы Черного моря и их значение для синоптики Европы // Известия Центрального Гидрометеорологического бюро. 1924. Вып. 3. С. 45–56.
16. *Лукин А. А., Нестеров Е. С.* Опасное ветровое волнение в Северной Атлантике при разных режимах атмосферной циркуляции // Метеорология и гидрология. 2011. № 12. С. 36–44. EDN OOCEJL.
17. *Холопцев А. В., Подпорин С. А., Курочкин Л. Е.* Арктические вторжения и метеоусловия в Азово-Черноморском регионе // Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. География. Геология. 2019. Т. 5, № 2. С. 322–331. EDN DDUXRK.
18. *Тушкин С. Н.* Сильные ветры Балтийского моря (анализ, статистика, типизация). Калининград, 1997. 96 с.
19. *Толокнов Ю. Н., Коровушкин А. И., Козлов К. Г.* Автоматизированный гидрометеорологический комплекс // Системы контроля окружающей среды. Севастополь, 1998. Вып. 1. С. 12–17.
20. *Соловьев Ю. П., Иванов В. А.* Предварительные результаты измерений атмосферной турбулентности над морем // Морской гидрофизический журнал. 2007. № 3. С. 42–61. EDN YOVLFR.
21. *Белокопытов В. Н., Жук Е. В.* Климатическая изменчивость термохалинных характеристик Черного моря (1950–2023 годы) // Морской гидрофизический журнал. 2024. Т. 40, № 6. С. 838–852. EDN VQXRRU.
22. Экстремальный Черноморский шторм в ноябре 2023 года / В. А. Дулов [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2024. Т. 40, № 2. С. 325–347. EDN ESLTYQ.
23. *Ефимов В. В., Комаровская О. И.* Атлас экстремального ветрового волнения Черного моря. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2009. 59 с.

Об авторах:

Гармашов Антон Викторович, старший научный сотрудник, отдел океанографии, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат географических наук, **ORCID ID: 0000-0003-4412-2483**, **ResearcherID: P-4155-2017**, **SPIN-код: 8941-9305**, ant.gar@mail.ru

Толокнов Юрий Николаевич, младший научный сотрудник, отдел океанографии, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), Web of Science **ResearcherID: AAC-7582-2022**, **Scopus Author ID: 6506442243**, **SPIN-код: 4535-6282**, toloknov@mhi-ras.ru

Коровушкин Алексей Иванович, ведущий инженер-исследователь, отдел океанографии, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **Scopus Author ID: 6508071074**, **SPIN-код: 3419-1433**, korovushkin@mhi-ras.ru

Шкаберда Ольга Анатольевна, ведущий инженер, отдел океанографии, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), научный сотрудник научно-исследовательского отдела, ФГАУ «Военный инновационный технополис «ЭРА» (353456, Краснодарский край, Анапский район, город Анапа, Пионерский пр-кт, д. 41), кандидат географических наук, **SPIN-код: 4373-2798**, olg3213@yandex.ru

Василевская Любовь Николаевна, доцент Департамента наук о Земле Института Мирового океана, Дальневосточный федеральный университет, ФГАОУ ВО ДВФУ (690922, Приморский край, город Владивосток, о. Русский, п. Аякс, д. 10), кандидат географических наук, **Scopus Author ID: 55374958100**, **SPIN-код: 7271-1037**, vasilevskaya.ln@dvfu.ru