

УДК: 551.589.6

DOI: 10.35595/2414-9179-2021-3-27-221–229

Е.Е. Лемешко¹

ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ ЦИКЛОНОВ НАД ЧЕРНЫМ МОРЕМ ПО ДАННЫМ АТМОСФЕРНЫХ РЕ-АНАЛИЗОВ

АННОТАЦИЯ

Исследуются особенности развития циклонов, которые могут вызывать генерацию штормовых нагонов в зависимости от траектории движения и параметров циклонов в Азово-Черноморском бассейне. В качестве тестовой ситуации взят экстремальный штормовой нагон в Таганрогском заливе и устье реки Дон 24.09.2014 г. По данным метеорологических наблюдений на постах и данных ре-анализа ERA5 об атмосферном давлении, скорости ветра и относительной завихренности на уровне 850 гПа изучаются особенности движения циклона, вызвавшего экстремальные повышения уровня моря: траектория движения, скорость движения циклона, диаметр, атмосферное давление в его центре, скорость ветра. Выделенные таким образом параметры данного циклона использовались для выделения треков циклонов по данным атмосферных ре-анализов (ERA-Interim и ERA-5)² за 2014–2020 гг. над Азово-Черноморским бассейном для исследования пространственно-временной изменчивости траекторий циклонов и её влияния на характеристики уровня моря в прибрежной зоне Крыма и Азовского моря. Предложен метод расчета треков движения циклонов, основанный на анализе относительной завихренности атмосферных полей ре-анализа на уровне 850 гПа. Далее для каждого циклона выделялась характерная область, для которой определялся минимум приземного атмосферного давления и максимум скорости ветра. Затем по координатам центра этой области строился путь (трек) движения циклона для Азово-Черноморского региона. В результате сформулированы критерии выделения циклонов, которые потенциально способны вызвать экстремальные штормовые нагоны, получены оценки пространственных характеристик циклонов и закономерности изменчивости уровня моря в прибрежной зоне Крыма при различных фазах движения циклонов над регионом.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: циклоны, уровень моря, атмосферный ре-анализ, Черное море.

Egor E. Lemeshko³

TRAJECTORIES OF CYCLONE PROPAGATION OVER THE BLACK SEA ACCORDING TO ATMOSPHERIC RE-ANALYSIS DATA

ABSTRACT

The features of the development of cyclones, which can cause the generation of storm surges, depending on the trajectory and parameters of cyclones in the Azov-Black Sea basin, are

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр "Морской гидрофизический институт РАН", ул. Капитанская, 2, 299011, Севастополь, Российская Федерация, *e-mail*: e.lemeshko@mhi-ras.ru

² Copernicus. Электронный ресурс: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-pressure-levels?tab=form> (дата обращения 30.04.2021)

³ Federal State Budget Scientific Institution Federal Research Center "Marine Hydrophysical Institute of RAS", Kapitanskaya Str. 2, 299011, Sevastopol, Russian Federation, *e-mail*: e.lemeshko@mhi-ras.ru

investigated. An extreme storm surge in the Taganrog Bay and the mouth of the Don River on September 24, 2014 was taken as a test situation. Based on the data of meteorological observations at the posts and ERA5 re-analysis data on atmospheric pressure, wind speed and relative vorticity at the level of 850 hPa, the peculiarities of the movement of the cyclone that caused extreme sea level rise are studied: the trajectory of movement, the speed of the cyclone, diameter, atmospheric pressure in its center, wind speed.

The parameters of this cyclone identified in this way were used to identify the tracks of cyclones according to the data of atmospheric re-analyses (ERA-Interim and ERA-5) for 2014–2020 over the Azov-Black Sea basin to study the spatio-temporal variability of cyclone trajectories and its influence on the characteristics of sea level in the coastal zone of the Crimea and the Azov Sea. A method for calculating of the cyclones movement tracks is proposed, based on the analysis of the relative vorticity of the atmospheric fields of re-analysis at the level of 850 hPa. Further, for each cyclone, a characteristic region was identified, for which the minimum surface atmospheric pressure and the maximum wind speed were determined. Then, according to the coordinates of the center of this area, the path (track) of the cyclone movement for the Azov-Black Sea region was calculated.

As a result, criteria for identifying cyclones that are potentially capable of causing extreme storm surges were formulated, estimates of the spatial characteristics of cyclones and patterns of sea level variability in the coastal zone of the Crimea were obtained at different phases of cyclone movement over the region.

KEYWORDS: cyclones, sea level, atmospheric re-analysis, Black Sea.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность проводимого исследования обуславливается необходимостью изучения физических закономерностей формирования различных типов интенсивной атмосферной циркуляции над акваторией Азово-Черноморского бассейна для задач диагноза и прогноза динамики приземной атмосферы и ее влияния на процессы в прибрежной зоне моря, а также установление взаимосвязи на межгодовых масштабах частоты сгонно-нагонных явлений в зависимости от повторяемости различных типов синоптических ситуаций.

Влияние климата сказывается на увеличении температуры воздуха, увеличении уровня Мирового океана, изменении количества осадков и влажности рек, на изменении частоты повторяемости типичных синоптических ситуаций над Азово-Черноморским бассейном, в том числе штормовой активности, что связано с межгодовой изменчивостью количества и интенсивности проходящих циклонов. Классификация синоптических ситуаций в условиях климатической изменчивости над восточно-европейским регионом, приводящих к сильным и устойчивым ветрам, представляется необходимой для выяснения связей между аномальными изменениями уровня моря, генерацией штормовых нагонов с конкретными типами атмосферных процессов.

В последнее время развиваются оригинальные подходы для типизации синоптических ситуаций, при которых возможны штормовые нагоны, их районирование и сопоставление с данными измерений уровня моря на постах, оценке интенсивности сгонно-нагонных явлений в уязвимых участках побережья в зависимости от характерных траекторий циклонов [Flaounas *et al.*, 2014; Lemeshko *et al.*, 2018; Rudeva *et al.*, 2014]. Результаты этих исследований затем активно используются для проведения численных экспериментов по моделированию ветрового волнения и сгонно-нагонных явлений, при оценке вероятности экстремальных повышений уровня моря в прибрежной зоне, при прогностических расчетах для проектирования гидротехнических и берегозащитных сооружений [Flaounas *et al.*, 2021; Bromwich *et al.*, 2008; Ulbrich *et al.*, 2009].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

При определенных скоростях и направлениях движения атмосферные циклоны становятся эффективными генераторами значительных повышений уровня моря. Проведена оценка интенсивности ветрового волнения и штормовых нагонов в Азовском море в зависимости от траектории движения циклонов. Для задач численного моделирования разработан алгоритм оценки и параметризации характеристик движения циклонов [Flaounas, 2014]. Предложен метод расчета треков движения циклонов, основанный на анализе относительной завихренности атмосферных полей ре-анализа ERA-Interim и ERA-5 на уровне 850 гПа. На каждом временном шаге (использовались данные с шагом в 1 час) идентифицировались центры циклонов, выделенные по максимумам относительной завихренности и окруженные замкнутыми контурами изолиний со значениями не менее $3 \times 10^{-5} \text{ c}^{-1}$ (рис. 1, 2). Далее для каждого циклона выделялась характерная область, для которой определялся минимум приземного атмосферного давления и максимум скорости ветра. Затем по координатам центра этой области строился путь (трек) движения циклона для региона, охватывающего Азово-Черноморский бассейн.

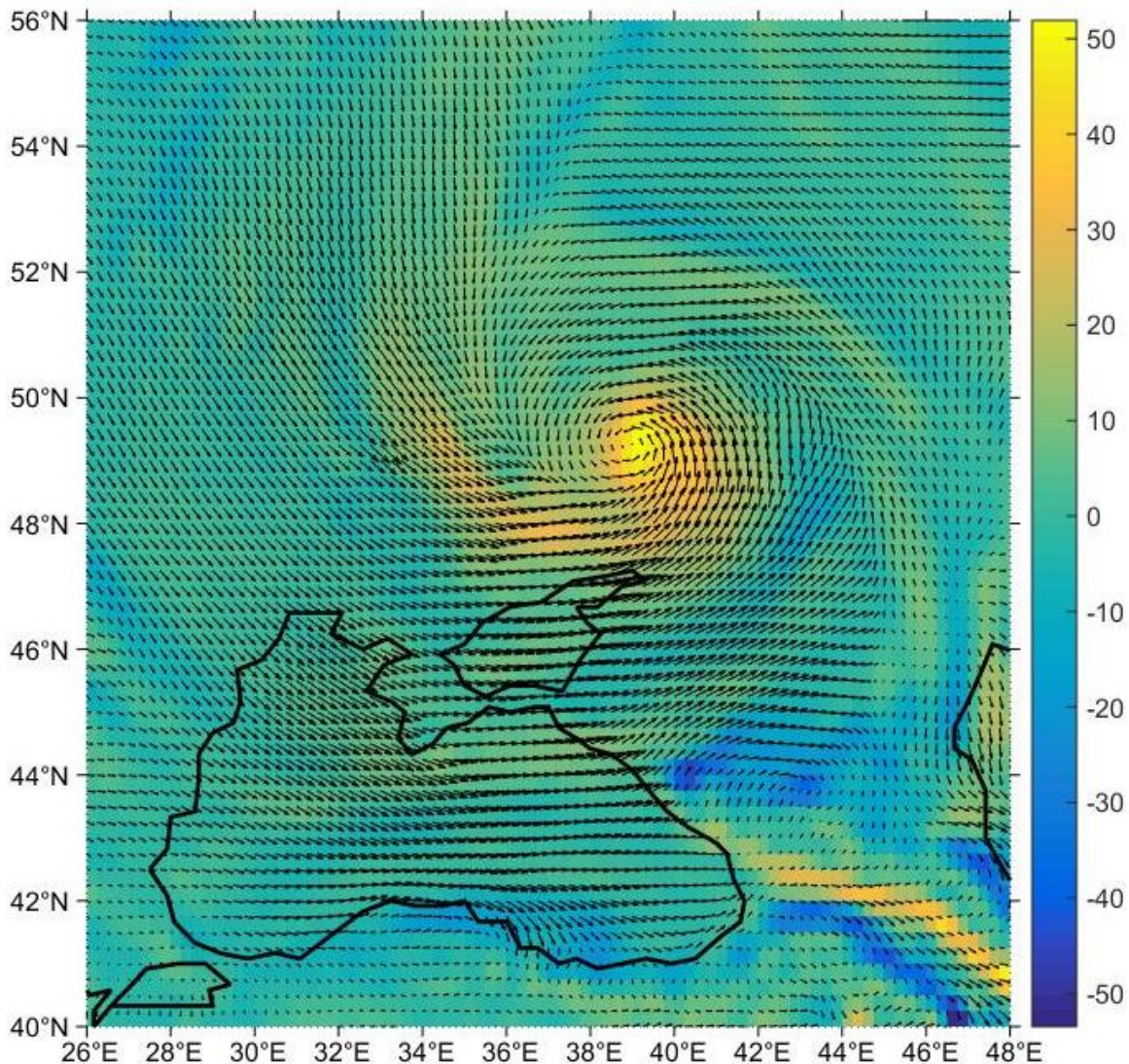


Рис. 1. Относительная завихренность на уровне 850 гПа и ветер на 10м 24.09.2014 в 12 ч.
 Fig. 1. Relative vorticity at the level of 850 hPa and the wind at 10m on September 24, 2014 at 12h

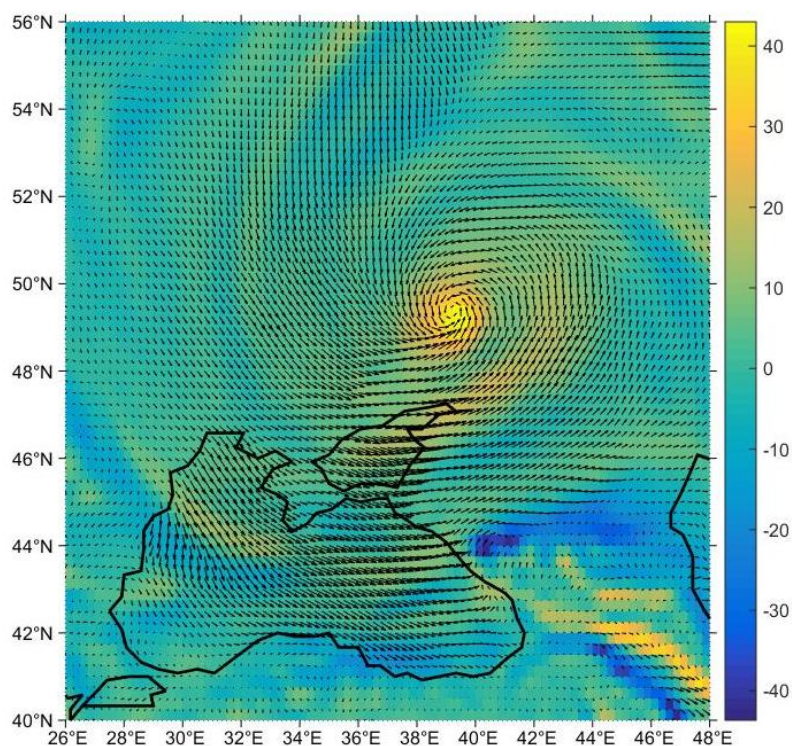


Рис. 2. Относительная завихренность на уровне 850 гПа и ветер на 10м 24.09.2014 в 21 ч.
 Fig. 2. Relative vorticity at the level of 850 hPa and the wind at 10m on September 24, 2014 at 21h

Приведена относительная завихренность на уровне 850 гПа за период 16-30.09.2014 (рис. 3), завихренность достигала максимальных значений 23–26.09.2014, когда был зарегистрирован экстремальный штормовой нагон в Таганрогском заливе. Для фильтрации «шумовых» циклонических образований применялся критерий – величина завихренности более $50 \times 10^{-5} \text{ c}^{-1}$ и время жизни циклона более 1 суток.

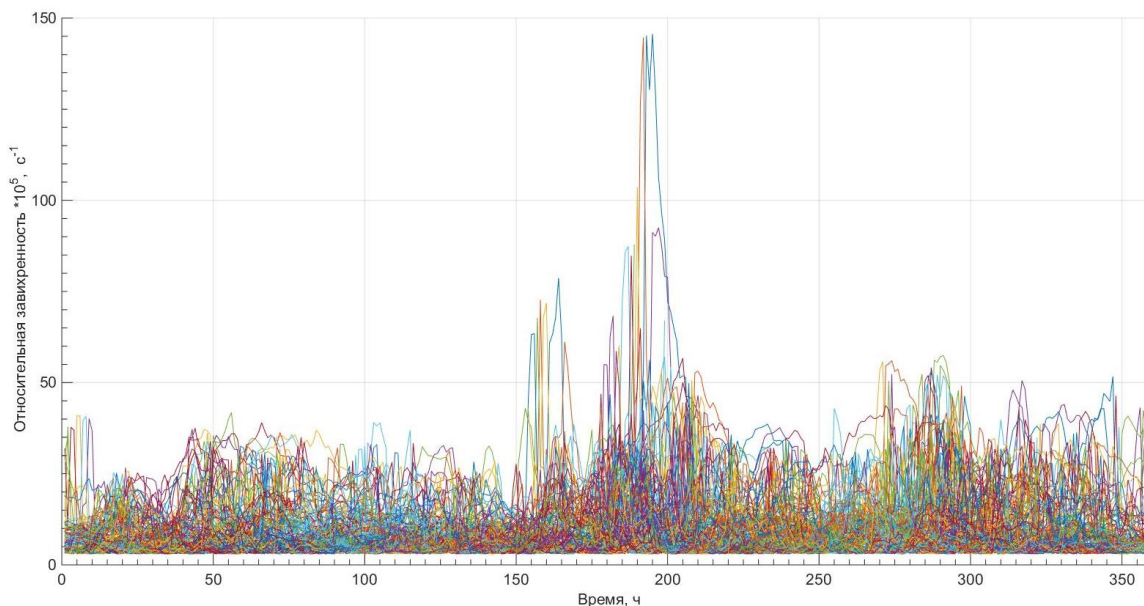


Рис. 3. Относительная завихренность на уровне 850 гПа за период 16–30.09.2014
 Fig. 3. Relative vorticity at the level of 850 hPa for the 16–30 September, 2014

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По обозначенному критерию был выделен трек движения циклона, приведшего к экстремальному штормовому нагону 24.09.2014 в Таганрогском заливе и устье Дона, скорость ветра составила 25 м/с, в порывах до 37 м/с, атмосферное давление в центре составило 990 гПа. Центр циклона 23.09.2014 находился над Крымом, траектория движения была направлена на северо-восток (рис. 4), 24.09.2014 циклон приостановил свое движение в течение 12 часов, что привело к усилению штормового нагона. В Таганрогском заливе уровень моря поднялся на 280 см и превысил отметку особо опасного явления 705 см (рис. 5).

За период 2014–2017 гг. были проанализированы поля приземного давления и относительной завихренности на уровне 850 гПа, рассчитаны характеристики циклонов и построены траектории их движения (табл. 1, рис. 6). Результаты систематизированы для задания полей ветра для численного моделирования штормовых нагонов.

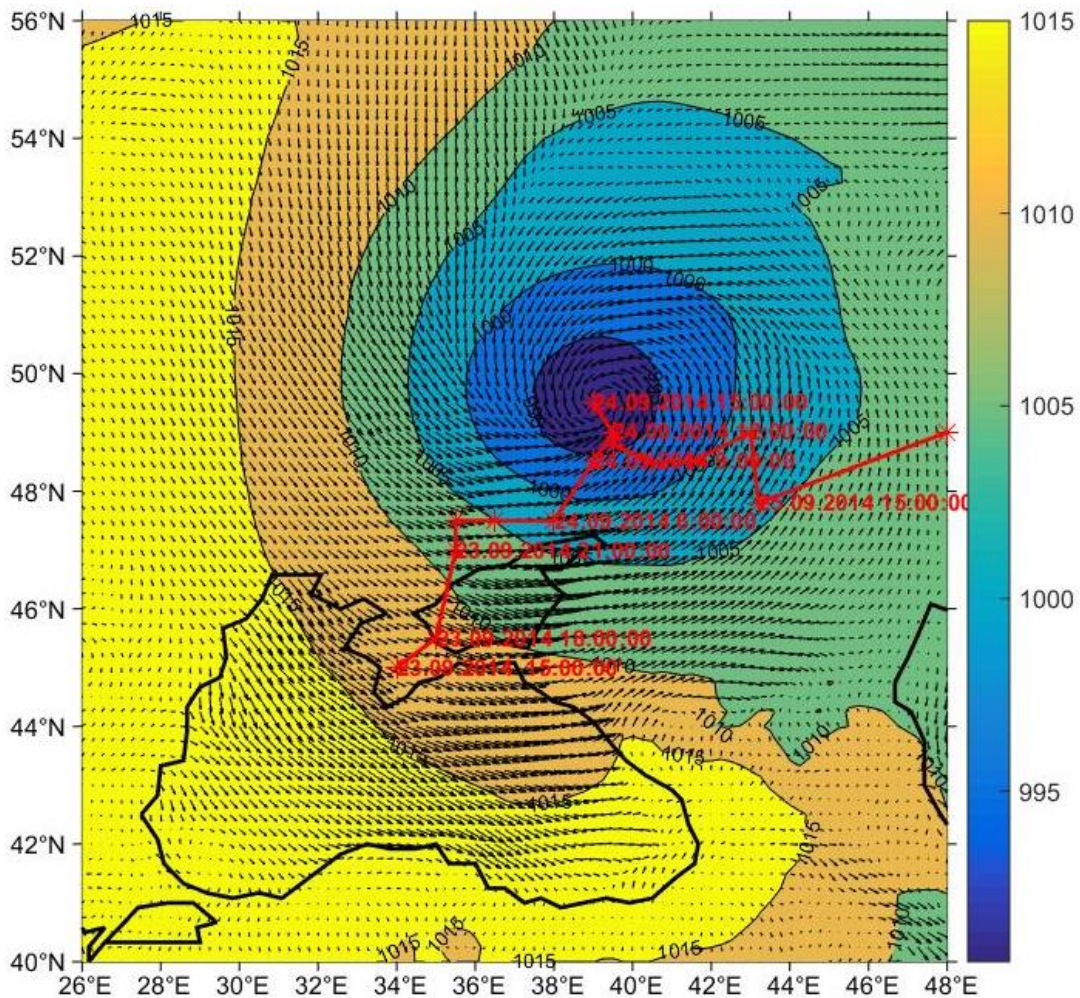


Рис. 4. Трек движения циклона, вызвавшего экстремальный штормовой нагон в Таганрогском заливе и устье Дона за период 23.09.2014–24.09.2014; приземное атмосферное давление (гПа) и скорость ветра

Fig. 4. Track of the cyclone movement that caused an extreme storm surge in the Taganrog Bay and the mouth of the Don for 09/23/2014–09/24/2014; surface atmospheric pressure (hPa) and wind speed

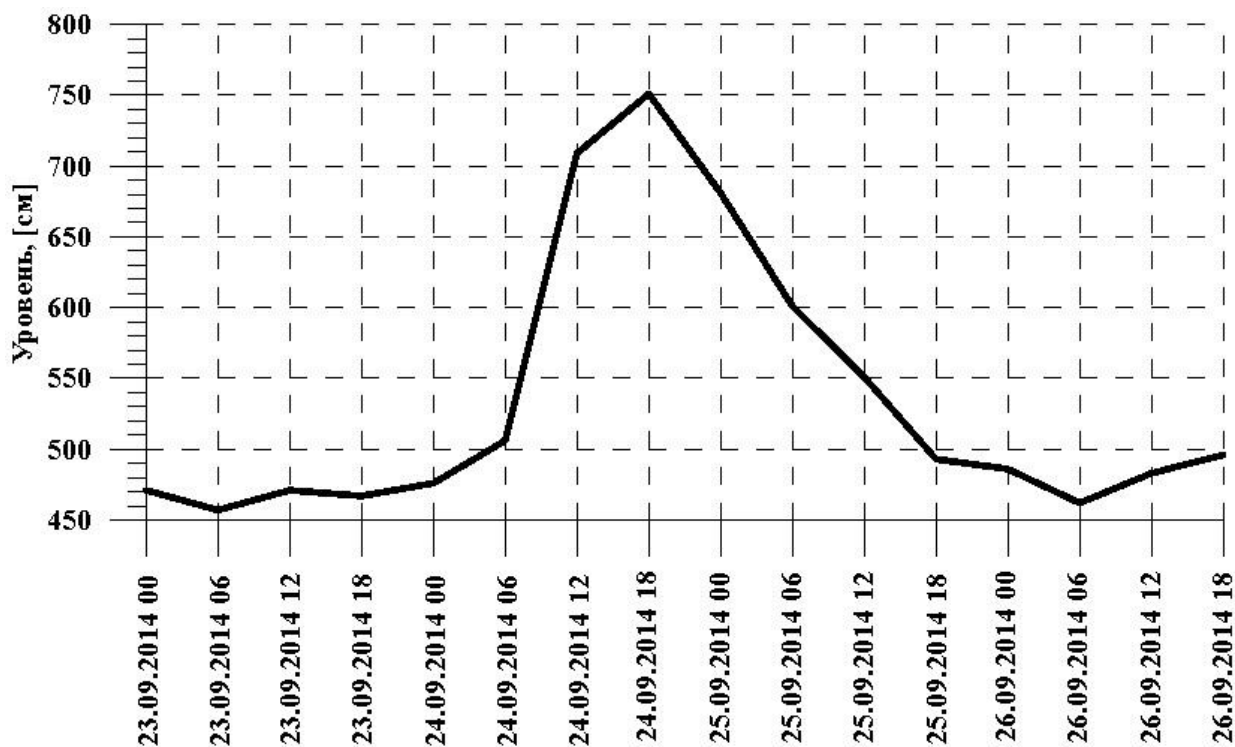


Рис. 5. Повышения уровня моря за период 23.09.2014–26.09.2014 в Таганрогском заливе, пост Таганрог относительно Балтийской системы высот

Fig. 5. Sea level rise for the period 09.23.2014–26.09.2014 in the Taganrog Bay, Taganrog tide-gauge regarding Baltic height system

Табл. 1. Траектории движения центра циклона (T1 □ T5) при радиусе циклона 300 км, скорости перемещения циклона 40 км/ч, перепаде давления между периферией и центром циклона 20 гПа

Table 1. Trajectories of the cyclone center (T1 □ T5) with a cyclone radius of 300 km, a cyclone movement speed of 40 km / h, and a pressure drop between the periphery and the cyclone center of 20 hPa

Тип траектории движения циклона	Начальная широта центра циклона, ° с. ш.	Начальная долгота центра циклона, ° в. д.	Угол наклона траектории, °
T1	46,25	29,25	0
T2	48,25	29,25	0
T3	44,25	29,25	0
T4	48,50	29,25	330
T5	44,25	29,25	30

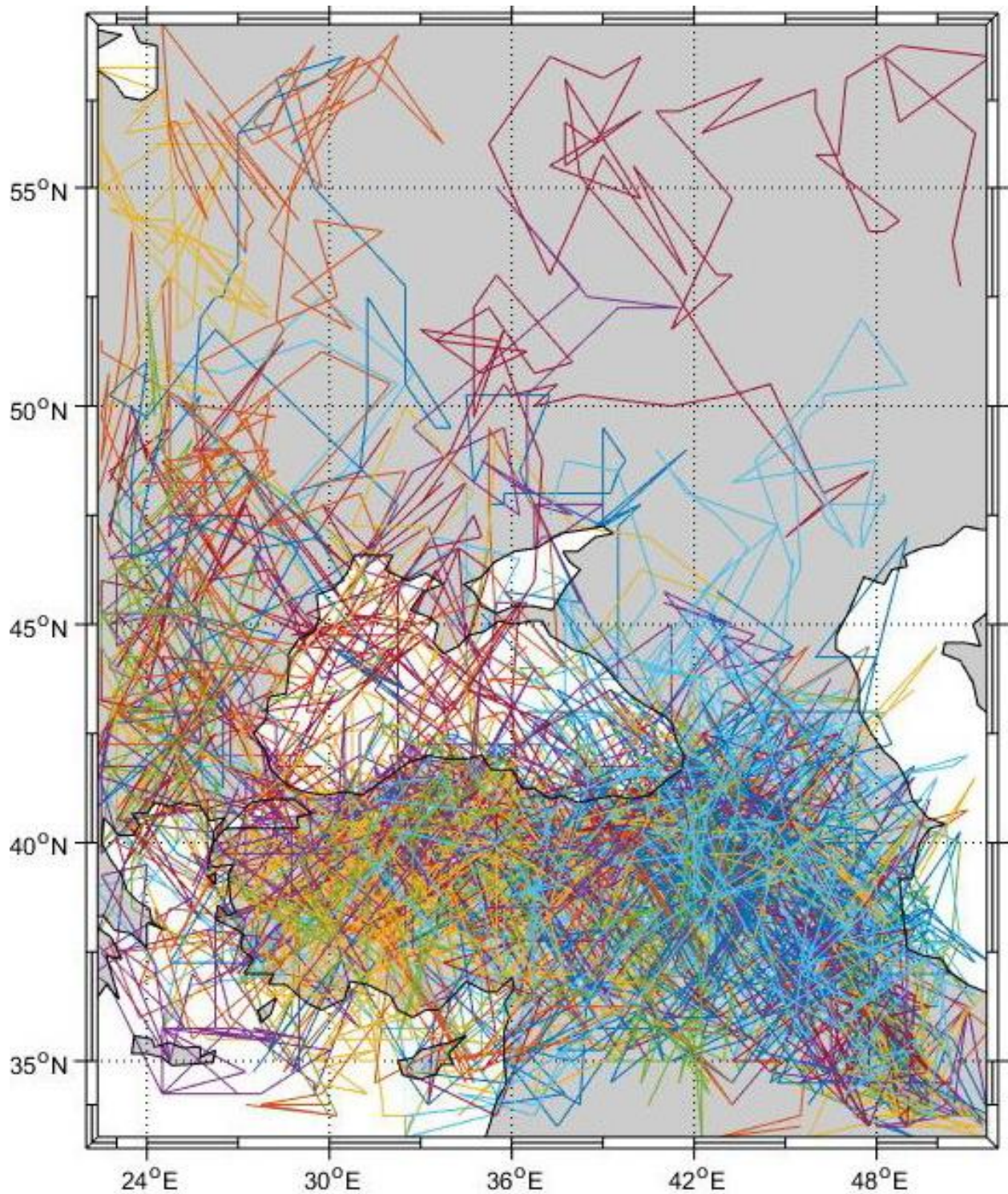


Рис. 6. Композитная карта треков движения циклонов, вызвавших штормовые сгоны/нагоны в Крыму и в Таганрогском заливе и устье Дона за период 2014–2017 гг.

Fig. 6. Composite map of the tracks of the movement of cyclones that caused storm surges / surges in Crimea and in Taganrog Bay and the mouth of the Don for the period 2014–2017

ВЫВОДЫ

Таким образом, на основании предложенного метода расчета треков движения циклонов, основанного на анализе относительной завихренности атмосферных полей ре-анализа ERA-Interim и ERA-5 на уровне 850 гПа были рассчитаны характеристики циклонов и классифицированы траектории их движения как сценарии для задания полей ветра для численного моделирования штормовых нагонов при различных фазах прохождения циклона. Для исследования подъемов уровня в Азовском море при различных типах ветрового воздействия анализировались данные береговых измерителей уровня моря.

Основой выбора параметров циклона являлись представленные оценки, согласно которым возникающие над Азово-Черноморским бассейном циклонические образования имеют характерный диаметр порядка 500–700 км, перепад давления составляет от 10 до 20 гПа, а скорость перемещения циклонов изменяется от 5 до 10 м/с.

Результаты работы могут быть использованы для численного моделирования штормовых нагонов для расчета особенностей пространственного распределения характеристик штормовых нагонов и ветрового волнения в Азовском море для различных траекторий перемещения циклона. Основные сведения о траекториях перемещения центра циклона, полученные в результате типизации синоптических полей и выделения треков движения циклонов, представлены в табл. 1. Угол наклона траектории отсчитывался относительно оси X, которая направлена против часовой стрелки на восток. Выбор начальной долготы центра циклона основан на допущении, что в начальный момент времени при любом значении начальной координаты по широте центра циклона зона пониженного давления располагалась за пределами Азовского моря. Выбранные траектории соответствуют варианту перемещения циклона с запада на восток в широтном направлении.

После анализа траектории прохождения циклона становится понятным развитие экстремального штормового нагона 24.09.2014 в Таганрогском заливе и дельте Дона: центр циклона находился севернее дельты на широте $\varphi_0 = 48,50$ °с.ш., имел характеристики близкие к сценарию T5: скорость ветра над дельтой была 25 м/с (в порывах до 37 м/с) и кроме того, циклон существенно замедлил скорость своего перемещения 24.09.2014, что привело к усилению штормового нагона.

В заключение, в работе была проведена оценка интенсивности ветрового волнения и штормовых нагонов в Крыму и Азовском море в зависимости от траектории движения циклонов. Для задач численного моделирования разработан алгоритм оценки и параметризации характеристик движения циклонов. Предложен метод расчета треков движения циклонов, основанный на анализе относительной завихренности атмосферных полей ре-анализа.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при поддержке Государственного задания № 0555-2021-0005. Автор выражает благодарность Dr. Emmanouil Flaounas за предоставленное программное обеспечение CycloTRACK (v1.0).

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was funded by the State Assignment No 0555-2021-0005. The author is grateful to Dr. Emmanouil Flaounas for the provided CycloTRACK software (v1.0).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bromwich D.H., Sheng-Hung Wang.* A review of the temporal and spatial variability of Arctic and Antarctic atmospheric circulation based upon ERA-40. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 2008. V. 44. No 3–4. P. 213–243. DOI: 10.1016/j.dynatmoce.2007.09.001.
2. *Flaounas E., Kotroni V., Lagouvardos K., Flaounas I.* CycloTRACK (v1.0): tracking winter extratropical cyclones based on relative vorticity: sensitivity to data filtering and other relevant parameters. *Geosci. Model Dev*, 2014. V. 7. No 4. P. 1841–1853. DOI: 10.5194/gmd-7-1841-2014.
3. *Flaounas E., Gray S.L., Teubler F.* A process-based anatomy of Mediterranean cyclones: from baroclinic lows to tropical-like systems. *Weather Clim. Dynam*, 2021. V. 2. No 1. P. 255–279. DOI: 10.5194/wcd-2-255-2021.
4. *Lemeshko E.E., Surkova G.V., Lemeshko E.M.* Structure and long-term dynamics of surface atmosphere of Azov-Black Sea region on the base of self-organizing map analysis. 24th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics Proc. SPIE, 2018. V. 10833. No 108337V. DOI: 10.1117/12.2504291.
5. *Rudeva I., Gulev S.K., Simmonds I., Tilinina N.* The sensitivity of characteristics of cyclone activity to identification procedures in tracking algorithms. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 2014. V. 66. No 1. DOI: 10.3402/tellusa.v66.24961.
6. *Ulbrich U., Leckebusch, G.C., Pinto J.G.* Extra-tropical cyclones in the present and future climate: a review. *Theor Appl Climatol*, 2009. V. 96. P. 117–131. DOI: 10.1007/s00704-008-0083-8.

REFERENCES

1. *Bromwich D.H., Sheng-Hung Wang.* A review of the temporal and spatial variability of Arctic and Antarctic atmospheric circulation based upon ERA-40. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 2008. V. 44. No 3–4. P. 213–243. DOI: 10.1016/j.dynatmoce.2007.09.001.
2. *Flaounas E., Kotroni V., Lagouvardos K., Flaounas I.* CycloTRACK (v1.0): tracking winter extratropical cyclones based on relative vorticity: sensitivity to data filtering and other relevant parameters. *Geosci. Model Dev*, 2014. V. 7. No 4. P. 1841–1853. DOI: 10.5194/gmd-7-1841-2014.
3. *Flaounas E., Gray S.L., Teubler F.* A process-based anatomy of Mediterranean cyclones: from baroclinic lows to tropical-like systems. *Weather Clim. Dynam*, 2021. V. 2. No 1. P. 255–279. DOI: 10.5194/wcd-2-255-2021.
4. *Lemeshko E.E., Surkova G.V., Lemeshko E.M.* Structure and long-term dynamics of surface atmosphere of Azov-Black Sea region on the base of self-organizing map analysis. 24th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics Proc. SPIE, 2018. V. 10833. No 108337V. DOI: 10.1117/12.2504291.
5. *Rudeva I., Gulev S.K., Simmonds I., Tilinina N.* The sensitivity of characteristics of cyclone activity to identification procedures in tracking algorithms. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 2014. V. 66. No 1. DOI: 10.3402/tellusa.v66.24961.
6. *Ulbrich U., Leckebusch, G.C., Pinto J.G.* Extra-tropical cyclones in the present and future climate: a review. *Theor Appl Climatol*, 2009. V. 96. P. 117–131. DOI: 10.1007/s00704-008-0083-8.