МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ИССЛЕДОВАНИЮ ЦИКЛОНИЧЕСКИХ СИСТЕМ, СООТВЕТСТВУЮЩИХ РАЗНЫМ ТИПАМ ИНТЕНСИВНЫХ ШТОРМОВ В СЕВЕРОЧЕРНОМОРСКОМ РЕГИОНЕ

**В.Н. Маслова, Е.Н. Воскресенская, А.В. Юровский, В.Ю. Журавский,
В.П. Евстигнеев, В.А. Наумова**

Институт природно-технических систем,
РФ, г. Севастополь, ул. Ленина, 28
E-mail: veronika_maslova@mail.ru

На основе массивов данных параметров циклонов, рассчитанных по четырёхсрочным данным реанализа NCEP / NCAR о поле геопотенциальной высоты 1000 и 500 гПа за 1952–2017 гг. с использованием методики М.Ю. Бардина, а также авторской методики объективного трекинга с помощью сплайн-интерполяции, показана схема распределения глубоких центров циклонов и их траекторий, сопровождающих разные типы штормов на северном побережье Черного моря с высотой волн не менее 5 м. Установлено, что типы штормов связаны с особенностями синоптических полей, когда центры глубоких циклонов сосредоточены к северу относительно побережья Черного моря (для западного типа 1б), северо-западу (для смешанного типа 2а), на северо-востоке (для смешанного типа 2б) и юго-востоке (для центрального типа 3).

Ключевые слова: типы атмосферной циркуляции, макропроцессы, экстремальные погодные условия, приземное атмосферное давление, высота геопотенциала 1000 и 500 гПа, вектор ветра.

Поступила в редакцию: 22.06.2020. После доработки: 24.08.2020.

Введение. Обладая колоссальными запасами энергии, перемещения циклонов могут сопровождаться экстремальными погодными условиями: сильными ветрами, шквалами, штормовой высотой волны и другими неблагоприятными погодными явлениями [1–3]. Поэтому исследование макропроцессов, приводящих к развитию штормовых условий, полезно проводить с учетом особенностей развития штормовых волн в прибрежной зоне [4]. Характеристики волнения являются своеобразным параметром шторма, «интегрирующим» величину скорости и продолжительности действия штормового ветра, устойчивости ветра вдоль волноопасных направлений и частоту таких событий. Задачу анализа основных синоптических процессов у поверхности земли, под влиянием которых формируется штормовая высота волн в Черноморском регионе, достаточно логично решать, применяя метод

диагноза макропроцесса у поверхности земли и анализа основных барических объектов. В данном случае в роли таких объектов выступают циклоны, под влиянием которых формируются условия развития штормов и соответствующих высот волн.

Определение типов атмосферной циркуляции впервые было выполнено в работе [5] в 2009 г. для случаев штормовой волны 3 м и более на Северо-западном и Крымском побережье Черного моря в период 1954–2008 гг.

Цель настоящей работы – исследовать приземные и среднетропосферные синоптические поля, расположение траекторий и центров глубоких циклонов для выделенных типов штормовых высот волн не менее 5 м.

Данные и методика. Для Черноморского региона в границах 37°–50° с.ш., 27°–45° в.д. были определены циклоны и их основные параметры с использовани-

ем 4-срочных данных реанализа NCEP / NCAR [6] за период 1951–2017 гг. (<https://psl.noaa.gov/data/reanalysis/reanalysis.shtml>) и методики М.Ю. Бардина [7] (далее методика 1), которая была апробирована наряду с другими методами идентификации и трекинга циклонов, например, в международном проекте IMILAST [8]. Циклон по методике 1 определялся как минимум в поле геопотенциальной высоты 1000 гПа, окруженный замкнутыми изогипсами с шагом 10 гпм. Глубина циклона оценивалась как разность высоты геопотенциальной поверхности между минимумом, найденным в узле сетки, и значением на внешней ограничивающей изогипсе. Площадь циклона вычислялась для фигуры, ограниченной последней замкнутой изогипсой. Чтобы учесть вклад площади циклона в его «силовые» характеристики, была получена интенсивность (или средняя глубина) циклона, которая представляет собой отношение интеграла глубины циклона к его площади.

Глубокие циклоны выделялись по критерию превышения порога верхнего квартиля 75% глубины (≥ 40 гпм) и интенсивности ($\geq 16,8$ гпм) циклонов по аналогии с методом, используемым для расчета экстремальных осадков [9] и статистических характеристик штормов по полю давления [10, 11].

Дополнительно в работе применена специально разработанная методика идентификации циклонов на основе сферической сплайн-интерполяции [12] (далее методика 2). Причиной этого послужил полученный нами результат: около 30% экстремальных штормов в регионе вызваны не крупными локальными циклонами, возникающими над Черным морем, некоторые из которых не могут быть определены с помощью методики 1 [7] из-за более грубого шага изогипс.

Алгоритм отслеживания циклона по методике 2 состоял из трех этапов: 1) нахождение минимума барического образования на грубой сетке; 2) перевод

полюса сферической системы координат в центр низкого давления и 3) сферическая сплайн-интерполяция [13] для получения геометрических характеристик циклона; объединение центров низкого давления в единое циклоническое событие на заданном расстоянии. Чтобы найти центры низкого давления, данные высоты геопотенциала на уровнях 1000 и 500 гПа пересчитывались в приземное атмосферное давление (П АД).

Процедура поиска центра низкого давления на грубой сетке была следующей: если при последовательном рассмотрении каждого узла сетки П АД увеличивалось в 4-х направлениях, то начальная точка определялась как минимум поля давления. Далее полюс сферической системы координат переводился в центр низкого давления, после чего выполнялась последующая интерполяция с использованием сферических сплайнов. Затем определялась замкнутая изобара в 36-ти направлениях от центра циклона. Таким образом, были рассчитаны средний радиус, градиент давления и площадь циклона. Глубина циклона была оценена как разность давления между его центром и последней замкнутой изобарой. В итоге идентифицированные центры низкого давления объединялись в один циклон, если расстояние между их центрами не превышало 500 км в каждый момент времени (6 часов).

Приемлемое качество обоих используемых методов подтверждается их сравнением. Плотность вероятности отклонений между центрами барических систем, выделенных по методикам 1 и 2, стремится к нулю при отклонениях более 500 км. Максимальная повторяемость отклонений между центрами циклонов наблюдается между 20–25 км.

Региональные проявления глубоких циклонов изучались для тех типов крупномасштабных штормовых атмосферных ситуаций, которые приводят к штормам на северном побережье Черного моря с

высотой волны не менее 5 м. Отмеченные типы штормовых атмосферных ситуаций были выделены в работе [5] на основе объективного метода кластерного анализа. Они представляют собой четыре типа меридиональной циркуляции: тип 1 (западный), тип 2 (смешанный), тип 3 (центральный) и тип 4 (восточный). Кроме того, были определены два подтипа (а и б) для типов 1 и 2 (западный и смешанный) с различными макросиноптическими условиями. Для подтипа 1а западного типа характерен в основном северо-западный перенос воздушных масс в регионе, а для подтипа 1б – северо-восточный / восточный. Аналогично смешанный тип 2 в зависимости от расположения хребтов давления относительно Азово-Черноморского бассейна представлен двумя подтипами: 2а, при котором перенос воздушных масс осуществляется на Черное море с юга, и 2б, для которого характерны северные / северо-западные направления переноса.

Для анализа закономерностей связи глубоких циклонов с типами штормовых атмосферных ситуаций рассматривались только те типы и подтипы, которые приводили к штормам с высотой волны не менее 5 м: 1б (13 событий), 2а (17 событий), 2б (10 событий) и тип 3 (5 событий). Даты выбранных событий были использованы в качестве временного диапазона для композитного анализа следующих характеристик:

1. центры циклонов в дни штормов по данным методики 1 [7];
2. полные траектории циклонов по данным методики 2 [12], центры которых находились над Черноморским регионом в даты штормов;
3. приземное атмосферное давление;
4. высота геопотенциальной поверхности 1000 гПа;
5. высота геопотенциальной поверхности 500 гПа;
6. вектор ветра на уровне 1000 гПа.

Композитные карты 3 – 6 характеристик были получены с привлечением

интерактивного сайта для составления среднесуточных композитов на основе данных реанализа NCEP / NCAR, доступного по ссылке

<https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/composites/day/>.

Результаты и обсуждение. Анализ композитных карт всех анализируемых характеристик проводился для тех дат, когда высота волн на северном побережье Черного моря была не менее 5 м для отмеченных выше четырех типов штормов (1б, 2а, 2б и 3). При этом карты положения центров циклонов и конфигурации полных траектории циклонов, обуславливающих такие штормы, были получены по массивам 1 и 2, соответственно.

Тип шторма 1б, представленный тринадцатью событиями) характеризуется в основном траекториями циклонов, пересекающими Черное море с юго-запада на северо-восток (рис. 1, а). В это время центры глубоких циклонов в дни штормов расположены вдоль этой линии и сосредоточены в северной части региона (рис. 1, б). Минимум приземного атмосферного давления (рис. 1, в) ниже 1010 гПа размещается к северу от Крыма, так же как и минимум высоты геопотенциальной поверхности 1000 гПа ниже 85 гПа (рис. 1, г), хотя последний слегка смещен на северо-восток. При этом на западе северного побережья Черного моря размещается ложбина высоты геопотенциальной поверхности 500 гПа (рис. 1, д) и максимальные градиенты вектора ветра на уровне 1000 гПа ССЗ румба (рис. 1, е).

При штормах типа 2а, представленных 17 событиями, положение траекторий циклонов (рис. 2, а) аналогично предыдущему случаю, вдоль той же оси с юго-запада на северо-восток, но со смещением на север / северо-запад, что особенно заметно для глубоких центров циклонов в дни штормов (рис. 2, б). Минимумы приземного атмосферного давления (рис. 2, в) и высоты геопотенци-

альной поверхности 1000 гПа (рис. 2, г) также занимают примерно те же районы, что и для типа 1б, но характеризуются существенно более низкими величинами: менее 1004 гПа для давления и 10 м для геопотенциальной высоты. На южной границе этих центров над северным побережьем Черного моря отмечаются наибольшие градиенты высоты геопотенциальной поверхности 500 гПа (рис. 2, д) и вектора ветра на уровне 1000 гПа (рис. 2, е) СЗ румба.

Траектории циклонов при типе 2б (10 событий) располагаются севернее Черного моря, наибольшая их плотность сконцентрирована к северо-востоку от северного побережья (рис. 3, а). При этом центры глубоких циклонов в дни штормов этого типа также расположены в северо-восточном секторе (рис. 3, б), в отличие от двух предыдущих типов (1б и 2а). Зона минимальных значений приземного атмосферного давления (рис. 3, в), высоты геопотенциала 1000 гПа (рис. 3, г) и 500 гПа (рис. 3, д) расположена к северо-востоку от северного побережья Черного моря, опускаясь ниже 1004 гПа для давления, 30 м для высоты геопотенциала 1000 гПа и 5200 м для высоты геопотенциала 500 гПа (достигая самых низких величин по сравнению с предыдущими типами 1б и 2а). Направление вектора ветра 1000 гПа (рис. 3, е) западного румба расположено вдоль всего северного побережья Черного моря.

Последний тип штормов, тип 3, включает наименьшее количество случаев, всего лишь 5 событий. Тем не менее, он характеризуется достаточно выраженной плотной частотой траекторий циклонов (рис. 4, а) и центров глубоких циклонов (рис. 4, б), сконцентрированных к юго-востоку от Черного моря в даты штормов этого типа. В этом районе также расположены области минимальных значений давления ниже 1011 гПа (рис. 4, в) и геопотенциальной высоты на уровне 1000 гПа ниже 90 м (рис. 4, г).

Минимальная геопотенциальная высота на уровне 500 гПа приурочена к территории над северо-западным шельфом Черного моря (рис. 4, д). Вектор ветра 1000 гПа у северного побережья Черного моря в основном восточного румба (рис. 4, е).

Принимая во внимание геометрию циклонов, а именно их площадь, по массиву данных методики 2, были получены композитные карты повторяемости циклонов как замкнутых систем, в отличие от учета только центров циклонов. Композиты, сгруппированные по анализируемому 4 типам штормов, показывают частоту прохождения всей области / площади циклона через определенную точку пространства. Максимальная частота прохождения циклонов для типа 1б расположена над Крымским полуостровом, для типа 2а к северу / северо-западу от побережья Черного моря, для типа 2б к северо-востоку от побережья и для типа 3 к югу / юго-востоку.

Эти результаты, полученные для типов штормов с высотой волн не менее 5 м, согласуются с результатами ранних исследований для отдельных случаев штормов в 1965–1969 гг. в работах [14, 15], где представлены барические поля и положение синоптических систем для различных направлений штормового ветра над Черным морем. Два типа штормовых полей атмосферного давления с положением циклонического центра к северу или югу от Черного моря были выделены в более современной работе [16]. Настоящее исследование на основе анализа сгруппированных по типам событий показало, что типы штормов с высотой волны не менее 5 м над северным побережьем Черного моря характеризуются типичным положением центров глубоких циклонов, расположенных относительно побережья моря на севере (тип 1б), северо-западе (тип 2а), северо-востоке (тип 2б) и юго-востоке (тип 3).

Рис. 1. Композитные карты в даты штормов западного типа 1б с высотой волн не менее 5 м: траектории циклонов, сопровождающих шторм (массив 2) (а); центры циклонов со значением глубины, гПм (массив 1) (б); давление на уровне моря, гПа (в); геопотенциальная высота на уровне 1000 гПа, гПм (г); геопотенциальная высота на уровне 500 гПа, гПм (д); вектор ветра на уровне 1000 гПа, м/с (е)

Fig. 1. Composite maps for the dates of Western type 1b storms with a wave height of at least 5 m: paths of cyclones accompanying the storms (array 2) (a); cyclone centers with a depth value, gpm (array 1) (b); pressure at sea level, GPa (c); geopotential height at 1000 GPa, gpm (d); geopotential height at 500 GPa, gpm (d); wind vector at 1000 GPa, m/s (e) period were chosen by WMO as a reference period for the long-term means not trends

Рис. 2. Композитные карты в даты штормов западного смешанного типа 2а с высотой волн не менее 5 м: траектории циклонов, сопровождающих шторма (массив 2) (а); центры циклонов со значением глубины, гпм (массив 1) (б); давление на уровне моря, гПа (в); геопотенциальная высота на уровне 1000 гПа, гпм (г); геопотенциальная высота на уровне 500 гПа, гпм (д); вектор ветра на уровне 1000 гПа, м/с (е)

Fig. 2. Composite maps in the dates of Western mixed type 2a storms with a wave height of at least 5 m: paths of cyclones accompanying the storms (array 2) (a); cyclone centers with a depth value, gpm (array 1) (b); pressure at sea level, GPa (C); geopotential height at 1000 GPa, gpm (d); geopotential height at 500 GPa, gpm (d); wind vector at 1000 GPa, m / s (e)

Рис. 3. Композитные карты в даты штормов смешанного типа 2б с высотой волн не менее 5 м: траектории циклонов, сопровождающих шторма (массив 2) (а); центры циклонов со значением глубины, гпм (массив 1) (б); давление на уровне моря, гПа (в); геопотенциальная высота на уровне 1000 гПа, гпм (г); геопотенциальная высота на уровне 500 гПа, гпм (д); вектор ветра на уровне 1000 гПа, м/с (е)

Fig. 3. Composite maps in the dates of mixed type 2B storms with a wave height of at least 5 m: paths of cyclones accompanying the storm (array 2) (a); cyclone centers with a depth value, gpm (array 1) (b); pressure at sea level, GPa (c); geopotential height at 1000 GPa, gpm (d); geopotential height at 500 GPa, gpm (d); wind vector at 1000 GPa, m / s (e)

Рис. 4. Композитные карты в даты штормов центрального типа 3 с высотой волн не менее 5 м: траектории циклонов, сопровождающих шторма (массив 2) (а); центры циклонов со значением глубины, гпм (массив 1) (б); давление на уровне моря, гПа (в); геопотенциальная высота на уровне 1000 гПа, гпм (г); геопотенциальная высота на уровне 500 гПа, гпм (д); вектор ветра на уровне 1000 гПа, м/с (е)

Fig. 4. Composite maps in the dates of the storms of the Central type 3 waves of at least 5 m: trajectories of cyclones accompanying storm (array 2) (a); centers of cyclones with the depth value of gpm (array 1) (b); pressure at sea level, hPa (b) geopotential height at 1,000 hPa gpm (г); geopotential height at 500 hPa, gpm (д); the wind vector at 1,000 hPa, m/s (e)

Выводы. Использование двух массивов характеристик циклонов, рассчитанных по данным реанализа NCEP/NCAR за 1952–2017 гг. по методике М.Ю. Бардина [7] и авторской методике объективного трекинга [12] позволило обеспечить достоверность результатов по характеристике циклонических систем, соответствующих четырем разным типам штормов с высотой волн на северном побережье Черного моря не менее 5 м. Получены пространственные особенности полей циклонической активности с учетом их глубины, траекторий и площади, а также расположение минимумов атмосферного давления и высоты геопотенциальной поверхности на 1000 гПа, ложбины геопотенциальной высоты на 500 гПа и направление вектора ветра над Крымским полуостровом. Показано, что при разных типах штормов указанные структуры циклонических систем и синоптических полей имеют особенности размещения относительно Черного моря. При западном типе 1б они располагаются на севере и характеризуются северным ветром, при смешанном типе 2а на северо-западе с северо-западным ветром, при смешанном типе 2б – на северо-востоке с западным ветром и при центральном типе 3 на юго-востоке и сопровождаются восточным ветром.

Работа выполнена частично при финансовой поддержке РФФИ и города Севастополь в рамках научного проекта № 18-45-920068.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Золина О.Г. Климатология циклонической активности в Северном полушарии и со связь с процессами взаимодействия океана и атмосферы: дис. ... канд. физ.-мат. наук. М. Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 2002. 297 с.
2. Lionello P., Bhend J., Buzzi A., Della-Marta P., Krichak S., Jansa A., Maheras P., Sanna A., Trigo I., Trigo R. Cyclones in the Mediterranean region: climatology and effects on the environment // *Developments in earth and environmental sciences*. Elsevier, 2006. P. 325–372.
3. Казначеева В., Шувалов С. Климатические характеристики средиземноморских циклонов // *Метеорология и гидрология*. 2012. № 5. С. 41–52.
4. Polonsky A., Evstigneev V., Naumova V., Voskresenskaya E. Low-frequency variability of storms in the northern Black Sea and associated processes in the ocean-atmosphere system // *Regional Environmental Change*. 2014. Vol. 14, № 5. P. 1861–1871. doi:10.1007/s10113-013-0546-z
5. Воскресенская Е., Наумова В., Евстигнеев М., Евстигнеев В. Классификация синоптических процессов штормов в Азово-Черноморском бассейне // *Научные труды УкрНИГМИ*. 2009. № 258. С. 189–200.
6. Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R. [et al.] The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 1996. Vol. 77, № 3. P. 437–471. doi:10.1175/1520-0477(1996)077<0437: tnyrp> 2.0.co;2
7. Бардин М.Ю. Изменчивость характеристик циклоничности в средней тропосфере умеренных широт Северного полушария // *Метеорология и гидрология*. 1995. Т. 11. С. 24–37.
8. Neu U., Akperov M.G., Bellenbaum N. [et al.] IMILAST: A Community Effort to Intercompare Extratropical Cyclone Detection and Tracking Algorithms // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2013. Vol. 94, № 4. P. 529–547. doi:10.1175/bams-d-11-00154.1
9. Haylock M.R., Goodess C.M. Inter-annual variability of european extreme win-

ter rainfall and links with mean large-scale circulation // *International Journal of Climatology*. 2004. Vol. 24, № 6. P. 759–776. doi:10.1002/joc.1033

10. Matulla C., Schoner W., Alexandersson H., von Storch H., Wang X.L. European storminess: late nineteenth century to present // *Climate Dynamics*. 2008. Vol. 31, № 2–3. P. 125–130. doi:10.1007/s00382-007-0333-y.

11. Alexandersson H., Tuomenvirta H., Schmith T., Iden K. Trends of storms in NW Europe derived from an updated pressure data set // *Climate Research*. 2000. Vol. 14, № 1. P. 71–73. doi:10.3354/cr014071

12. Журавский В.Ю., Воскресенская Е.Н. Технология выделения циклонов из массивов реанализа глобальных метеорологических полей // *Системы контроля окружающей среды*. 2018. Вып. 11 (31).

C. 74–78. DOI: 10.33075/2220-5861-2018-1-74-78

13. Wahba G. Spline interpolation and smoothing on the sphere // *Siam Journal on Scientific and Statistical Computing*. 1981. Vol. 2, № 1. P. 5–16. doi:10.1137/0902002

14. Чернякова А.П. Северовосточные штормы на Черном и Азовском морях при перемещении циклонов с Малой Азии на юго-восток Черного моря // *Труды Укр. НИГМИ*. 1958. № 12. С. 123–132.

15. Чернякова А.П. Типовые поля ветра Черного моря // *Сб. работ БГМО ЧАМ*. 1965. Т. 3, № 3. С. 25–27.

16. 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.

METHODOLOGICAL APPROACHES TO THE STUDY OF CYCLONIC SYSTEMS RELATED TO DIFFERENT TYPES OF INTENSE STORMS IN THE NORTH BLACK SEA REGION

V.N. Maslova, E.N. Voskresenskaya, A.V. Yurovsky, V.Yu. Zhuravsky, V.P. Evstigneev, V.A. Naumova

Institute of Natural and Technical Systems,
RF, Sevastopol, Lenin St., 28

On the basis of data sets of cyclone parameters calculated using daily four-term NCEP / NCAR reanalysis data sets NCEP / NCAR on the field of 1000 and 500 GPa geopotential height in 1952–2017 and M.Y. Bardin method, as well as the author's method of objective tracking by spline interpolation, a scheme of deep cyclone centers distribution and their trajectories related to different types of storms with a wave height of at least 5 meters at the Northern Black Sea coast is shown. It has been established that each storm type is characterized by the features of synoptic fields: the centers of deep cyclones are located to the North from the Black Sea coast (in the case of Western type 1b), to the Northwest (for mixed type 2a), to the Northeast (for mixed type 2b), and to the Southeast (for Central type 3).

Keywords: types of atmospheric circulation, macroprocesses, extreme weather conditions, sea level pressure, geopotential height 1000 and 500 hPa, wind vector.