

Детерминированность временной изменчивости повторяемости циклонов в Черноморско-Средиземноморском регионе

В.Н. Маслова, Е.Н. Воскресенская*

ФГБНУ «Институт природно-технических систем»,
Россия, 299011, Севастополь, ул. Ленина, 28

* Адрес для переписки: veronika_maslova@mail.ru

Реферат. В работе исследованы особенности сезонной изменчивости циклонической активности и оценен раздельный и совместный вклад квазипериодических климатических процессов межгодового-междесятилетнего масштаба в изменчивость частоты циклонов. Такие знания важны для диагноза и прогноза погодно-климатических аномалий. Параметры циклонов получены для Черноморского региона, Западного и Восточного Средиземноморья с использованием четырехсрочных данных высоты геопотенциала 1000 гПа из реанализа NCEP/NCAR за 1951-2017 гг. и методики М.Ю. Бардина.

Анализ пространственно-временного распределения климатических величин показал, что циклоническая активность повышается зимой, понижается летом, а в Черноморском регионе максимум повторяемости циклонов сдвинут на весну (апрель). Высокая циклоническая активность в течение всего года с наименьшей величиной дисперсии наблюдается в Западном Средиземноморье, а наибольший разброс параметров циклонов – в основном в Черноморском регионе. В Восточном Средиземноморье повторяемость циклонов зимой выше, а летом – ниже, чем в двух других рассматриваемых регионах, что обуславливает максимальную амплитуду годового хода.

С помощью коэффициентов детерминации показано, какая часть дисперсии частоты циклонов с запаздыванием 0-11 месяцев может быть объяснена изменчивостью известных квазипериодических климатических процессов межгодового-междесятилетнего масштаба.

Преобладающий вклад Североатлантического колебания, наряду с Арктическим и Восточноатлантическим колебаниями в отдельные месяцы, определен для частоты циклонов Черноморского региона (20-30% объясненной дисперсии частоты зимой). Около 10-15% дисперсии частоты объясняется вкладом Тихоокеанской десятилетней осцилляции, Скандинавского колебания, Средиземноморского колебания и колебания Тропики/Северное полушарие, а также Восточноатлантического-Западноросийского колебания весной и Полярно-Евразийского колебания в летне-осенний период.

В изменчивость частоты циклонов Западного Средиземноморья основной вклад вносят Скандинавское колебание (более 20% дисперсии весной), Восточноатлантическое-Западноросийское и Восточноатлантическое колебания (около 15% дисперсии), Средиземноморское и Западно-Средиземноморское колебания (10-15% дисперсии). Около 10% дисперсии среднегодовой

частоты вносят Тихоокеанско-Североамериканское и Западнотихоокеанское колебания; 5-10% дисперсии зимней частоты – Эль Ниньо – Южное колебание и колебание Тропики/Северное полушарие.

Изменчивость частоты циклонов Восточного Средиземноморья определяется в основном региональными средиземноморскими колебаниями, а весной – Полярно-Евразийским и Восточноатлантическим колебаниями. При этом 10-20% дисперсии годовой и зимней частоты циклонов обусловлено Тихоокеанско-Североамериканским, Восточно-Северотихоокеанским и Западнотихоокеанским колебаниями; 5-10% дисперсии весенней частоты – вклад Тихоокеанской десятилетней осцилляции и Атлантической междесятилетней осцилляции.

Анализ множественной линейной регрессии позволил оценить совместный вклад рассмотренных 15-ти климатических сигналов в изменчивость частоты циклонов, который даже с учетом только линейных синхронных проявлений составляет 60-70% объясненной дисперсии частоты в зимне-весенний период и для среднегодовых значений.

Ключевые слова. Климатология циклонов, сумма дней с циклонами, глубина циклонов, площадь циклонов, интенсивность циклонов, годовой ход, система океан – атмосфера, климатические моды, климатические сигналы.

Determinacy of temporal variability of cyclone frequency in the Black Sea-Mediterranean region

V.N. Maslova, E.N. Voskresenskaya*

Institute of Natural and Technical Systems,
28, Lenin str., 299011, Sevastopol, Russian Federation

*Correspondence address: veronika_maslova@mail.ru

Abstract. The paper investigates the features of seasonal variability of cyclonic activity and evaluates the separate and joint contribution of quasi-periodic climatic processes of interannual-multidecade scale to the variability of the frequency of cyclones. Such knowledge is important for the diagnosis and prediction of weather and climate anomalies. Cyclone parameters were obtained for the Black Sea region, the Western and Eastern Mediterranean using 6-hourly 1000 hPa geopotential height from the NCEP/NCAR reanalysis in 1951-2017 and the methodology of M.Y. Bardin.

The analysis of the spatiotemporal distribution of climatic values showed that cyclonic activity increases in winter, decreases in summer, and in the Black Sea region the maximum frequency of cyclones is shifted to spring (April). High cyclonic activity throughout the year with the lowest dispersion is observed in the Western Mediterranean, and the greatest variation in cyclone parameters is mainly in the Black Sea region. In the Eastern Mediterranean, the frequency of cyclones is higher in winter and lower in summer than in the other two regions, which determines the maximum amplitude of the annual course.

Using determination coefficients, it is shown how much of the variance of the frequency of cyclones can be explained by the variability of known quasi-periodic climatic processes of interannual-multidecade scale with a time lag of 0-11 months.

The predominant individual contribution of the North Atlantic Oscillation, along with the Arctic and East Atlantic oscillations in individual months, is determined for the frequency of cyclones in the Black Sea region (20-30% of the explained frequency variance in winter). About 10-15% of the frequency variance is explained by the separate contribution of the Pacific Decadal Oscillation, the Scandinavia pattern, the Mediterranean Oscillation and the Tropical/Northern Hemisphere pattern, as well as the East Atlantic/West Russia pattern in spring and the Polar/Eurasia pattern in summer and autumn.

The main contribution to the variability of the frequency of cyclones in the Western Mediterranean is made by the Scandinavia pattern (more than 20% of the variance in spring), East Atlantic/West Russia pattern and East Atlantic Oscillation (each about 15% of the variance), Mediterranean and Western Mediterranean oscillations (each 10-15% of the variance). About 10% of the variance of the average annual frequency is caused separately by the Pacific/North American and West Pacific patterns; 5-10% of the variance of the winter frequency is caused separately by the El Nino – Southern oscillation and Tropical/Northern Hemisphere pattern.

The variability of the frequency of cyclones in the Eastern Mediterranean is mainly determined by the regional Mediterranean patterns, and in spring by the Polar/Eurasia pattern and East Atlantic Oscillation. At the same time, 10-20% of the variance of the annual and winter frequency of cyclones is associated separately with the Pacific/North American, East Pacific-North Pacific and West Pacific patterns; 5-10% of the variance of the spring frequency is the individual contribution of the Pacific Decadal Oscillation and the Atlantic Multidecadal Oscillation.

The analysis of multiple linear regression allowed us to estimate the joint contribution of the considered 15 climatic patterns to the variability of the frequency of cyclones, which, even taking into account only linear synchronous manifestations, makes up 60-70% of the explained frequency variance in the winter-spring period and for annual averages.

Keywords. Climatology of cyclones, number of days with cyclones, depth of cyclones, area of cyclones, intensity of cyclones, annual course, ocean – atmosphere system, climatic modes, climatic signals.

Введение

Диагноз и прогноз погодно-климатических аномалий в условиях наблюдаемых климатических изменений представляют чрезвычайную важность и требуют изучения квазипериодической изменчивости параметров циклонической активности (Eichler et al., 2013; Harvey et al., 2020; Бардин и др., 2021; Бардин, Платова, 2022). В этой связи временную изменчивость циклонической активности важно изучать для диагноза, а затем и прогноза

погодно-климатических аномалий, в том числе с сезонной заблаговременностью (Лубков, Воскресенская, 2021; Лубков и др., 2022; Voskresenskaya et al., 2022).

Во временной изменчивости циклонической активности выделяются однонаправленные изменения (Alexandersson et al., 2000; McCabe et al., 2001; Eichler et al., 2013), которые связывают в основном с антропогенной деятельностью, и квазипериодическая изменчивость (Alpert et al., 2006; Nissen et al., 2010; Бардин и др., 2019; Бардин и др., 2021), обусловленная природными процессами в системе океан – атмосфера, индикаторами которых служат соответствующие индексы. Эти индексы определяют по чередующимся аномалиям барического поля в тропосфере (Barnston, Livezey, 1987; Hurrell, Deser, 2010) или поля аномалий температуры поверхности океана (Enfield, Mestas-Nuñez, 1999; Kerr, 2000; Mantua, Hare, 2002; Kerr, 2005). Основным механизмом региональных проявлений таких глобальных процессов заключается в изменении направления траекторий основных циклонов (Voskresenskaya, Polonskii, 1995). Преобладающим квазипериодическим процессом, определяющим климатические аномалии в Атлантико-Европейском регионе на межгодовом масштабе, считается Североатлантическое колебание (Rogers, 1990; Hurrell, Deser, 2010). При этом выделяется еще не менее десятка различных климатических сигналов, значимо проявляющихся в климатических аномалиях в разных частях этого региона (Barnston, Livezey, 1987).

Ранее в (Maslova et al., 2020; Maslova et al., 2021) было показано, что линейные тренды среднегодовой частоты циклонов Черноморско-Средиземноморского региона невелики и объясняют не более 10% изменчивости рядов, а именно в Черноморском регионе. В Западном Средиземноморье этот вклад составляет немногим более 5%, а в Восточном Средиземноморье – менее процента (Maslova et al., 2021). Оставшаяся преобладающая часть изменчивости характеризуется межгодовыми-междесятилетними квазипериодическими колебаниями (Maslova et al., 2020; Maslova et al., 2021).

Возникает вопрос: какая часть объясненной дисперсии частоты циклонов в Черноморско-Средиземноморском регионе обусловлена упомянутыми квазипериодическими климатическими процессами. Это позволит определить вклад разных индикаторов и выделить предикторы этой изменчивости. Оценка вклада предшествующих климатических сигналов важна для прогнозирования изменчивости статистических характеристик циклонов от нескольких месяцев до нескольких лет.

Цель настоящей работы – исследовать особенности временной квазипериодической изменчивости повторяемости циклонов в Черноморско-Средиземноморском регионе и оценить вклад в эту изменчивость глобальных процессов в системе океан-атмосфера.

Данные и методы

Временные ряды параметров циклонов (повторяемость, глубина, площадь) в Черноморско-Средиземноморском регионе были получены по четы-

рехсрочным данным реанализа NCEP/NCAR (Kalnay et al., 2018) за период 1951-2017 гг. с помощью методики объективной идентификации и трекинга М.Ю. Бардина (Бардин, 1995). Алгоритм методики определяет все локальные минимумы поля высоты геопотенциальной поверхности 1000 гПа, ограниченные замкнутыми изогипсами с шагом 10 гПм. Порог времени жизни циклона принимался равным 48 ч. Методика была выбрана для международного проекта IMILAST (Intercomparison of Mid Latitude Storm Diagnostic) (Neu et al., 2013), результаты которого доказывают её качество в сопоставлении с другими методами определения среднеширотной циклонической активности.

Массивы и временные ряды (месячные, сезонные и годовые) параметров циклонов анализировались отдельно для Черноморского региона (37°-50° с.ш., 27°-45° в.д.), Западного Средиземноморья (35°-47° с.ш., 6° з.д.-16° в.д.) и Восточного Средиземноморья (29°-41° с.ш., 16°-38° в.д.).

Повторяемость (частота) циклонов рассчитывалась как количество центров циклонических образований, обнаруженное в заданном регионе за определенный период, к общему числу проанализированных случаев (количеству дней в периоде, умноженному на 4 срока). Для более наглядной характеристики повторяемости циклонов были посчитаны суммы дней с циклонами (циклонодни) за определенный интервал времени. Площадь циклона определялась в пределах фигуры, ограниченной последней замкнутой изогипсой. Под глубиной циклона понимается разность геопотенциальных высот между найденным минимумом в узле сетки внутри первой замкнутой изогипсы и значением на внешней ограничивающей изогипсе. Для учета вклада площади циклона была получена интенсивность (или средняя глубина) циклона, представляющая собой отношение объема циклона (интеграла глубины) к его площади.

Корреляционный анализ связи параметров циклонов с индексами климатических сигналов проводился на основе временных рядов средних величин по месяцам, сезонам и для среднегодовых величин с помощью коэффициента корреляции Пирсона по формуле (1):

$$r = \frac{\text{cov}(x, y)}{\sigma_x \sigma_y}, \quad (1)$$

где r – коэффициент корреляции, а σ_x и σ_y – стандартные отклонения коррелированных рядов x и y .

Значимость коэффициентов корреляции определялась с использованием t – критерия Стьюдента по формуле (2):

$$t = \sqrt{\frac{r^2(n-2)}{1-r^2}}, \quad -1 < r < 1, \quad (2)$$

где t – критерий Стьюдента, r – коэффициент корреляции, а n – число значений ряда.

Коэффициент детерминации (r^2), определяемый по коэффициенту корреляции (r), использовался для оценки доли дисперсии параметров циклонов, объясняемой корреляционной связью с индексами климатических сигналов. Регрессионный анализ использовался для оценки совместного вклада далекодействующих индексов в изменчивость параметров циклонов.

Для анализа проявлений в циклонической активности привлекались среднетропосферные барические индексы внетропической зоны Северного полушария с веб-сайта <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/telecontents.shtml> (дата обращения 16 сентября 2024 года) следующих климатических колебаний:

- Североатлантическое колебание (САК). Индекс САК обозначен как NAO;
- Восточно-Атлантическое колебание (ВАК). Индекс ВАК – EA;
- колебание Восточная Атлантика/Западная Россия (ВА/ЗР). Индекс ВА/ЗР – EAWR;
- Скандинавское колебание (СКАНД). Индекс СКАНД – Scand;
- Полярное/Евразийское колебание (Пол/Евр). Индекс Пол/Евр – PolEur;
- Западно-Тихоокеанское колебание (ЗТК). Индекс ЗТК – WP;
- колебание Восток Тихого океана/Север Тихого океана (ВТ/СТ). Индекс ВТ/СТ – EPNP;
- Тихоокеанское/Североамериканское колебание (ТСА). Индекс ТСА – PNA;
- колебание Тропики/Северное полушарие (ТСП). Индекс ТСП – TNH.

Дополнительно был использован индекс Арктического колебания (АК). Индекс АК – АО характеризует барическое поле приземной тропосферы (с сайта https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily_ao_index/ao_index.html, дата обращения 16 сентября 2024 года). АК иначе называют кольцевой модой Северного полушария в работе (Thompson, Wallace, 2000). АК и САК характеризуются сильной корреляцией и общими центрами действия атмосферы в Северной Атлантике (Wallace, 2000). Влияние АК на региональный климат в Атлантико-Европейском регионе аналогично САК.

Кроме того, были использованы индексы, выделяемые по глобальной температуре поверхности океана (и приземному давлению), следующих климатических колебаний:

- Эль-Ниньо-Южное колебание (ЭНЮК). Индекс Южного колебания (ЮК, SOI) (с сайта <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/soi>, дата обращения 16 сентября 2024 года);
- Тихоокеанская десятилетняя осцилляция (ТДО). Индекс ТДО – PDO (с сайта <https://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/pdo/>, дата обращения 16 сентября 2024 года) (Mantua, Hare, 2002);
- Атлантическая междесятилетняя осцилляция (АМО). Индекс АМО (с сайта <https://psl.noaa.gov/data/timeseries/AMO/>, дата обращения 16 сентября 2024 года).

Также были использованы региональные индексы Средиземноморского колебания (СК, индекс МО) в соответствии с работой (Conte et al., 1989);

Dünkeloh, Jacobeit, 2003; Maheras et al., 1999) и Западно-Средиземноморского колебания (ЗСК, индекс WeMO) в соответствии с работой (Martin-Vide, Lopez-Bustins, 2006). Эти индексы представляют собой барические колебания между Алжиром и Каиром или Гибралтаром и Израилем для МО и между Лигурийским морем и заливом Кадис для WeMO.

Часть этих климатических индексов ортогональны, т.е. они не коррелируют между собой, а другая часть сигналов связаны. Для ортогональных индексов можно показать суммарный вклад климатических сигналов в изменчивость активности циклонов с помощью суммирования коэффициентов детерминации, рассчитанных как квадрат коэффициентов корреляции. Группы ортогональных индексов:

- NAO, EA, EA/WR, SCAND, POL/EUR, WP, EP-NP, PNA, TNH;
- ENSO, AMO, PDO.

Линейная и синхронная связь индексов между этими группами невысока. В отдельные месяцы/сезоны она может достигать умеренного уровня ($r \sim 0.4$). Индексы МО, WMO умеренно связаны в декабре и январе ($r = 0.42-0.45$). Индексы NAO и AO характеризуются сильной корреляционной связью с декабря по март ($r > 0.7$). В любом случае можно оценить суммарный вклад разных климатических сигналов (также связанных) в изменчивость активности циклонов с помощью анализа множественной линейной регрессии.

Результаты и обсуждение

Средняя многолетняя циклоническая активность и сезонная изменчивость

Для характеристики средней циклонической активности получены многолетние (за 1951-2017 гг.) годовые величины параметров циклонов в Черноморско-Средиземноморском регионе и их среднеквадратические отклонения (СКО). Результаты расчетов приведены в табл. 1. Можно сравнить регионы по циклонической активности, хотя следует сделать оговорку, что площади регионов немного отличаются.

Параметры, характеризующие повторяемость циклонов (частота и сумма дней с циклонами), примерно одинаковы в Черноморском регионе и восточной части Средиземного моря (СМ), а в западной части СМ немного выше (на ~ 20 дней за год). При этом наибольший разброс (СКО) величин относительно среднего значения отмечается в Черноморском регионе (34 дня с циклонами) и превышает примерно в 2 раза разброс в обеих частях Средиземного моря.

Параметры, отражающие «силу» циклона (глубина, интенсивность и площадь), в среднем за год максимальны в западной части СМ (к примеру, глубина более 30 гпм, площадь 0.97 млн км²) и минимальны в восточной части (площадь 0.78 млн км², глубина около 26 гпм). Таким же образом распределены между регионами и СКО площади циклонов (0.16 млн км² на западе СМ и 0.1 млн км² на востоке СМ). Однако, максимальные величины

СКО глубины и интенсивности циклонов наблюдаются в Черноморском регионе (4.41 гпм и 1.6 гпм).

Таблица 1. Многолетние годовые величины параметров циклонов (Ср.) и их стандартные отклонения (СКО) в Черноморском регионе (ЧР), западной (ЗСМ) и восточной (ВСМ) частях Средиземного моря за период 1951-2017 гг.

Table 1. Long-term annual values of cyclone parameters (Ср.) and their standard deviations (СКО) in the Black Sea region (ЧР), Western Mediterranean (ЗСМ) and Eastern Mediterranean (ВСМ) in 1951-2017

Параметр	ЧР		ЗСМ		ВСМ	
	Ср.	СКО	Ср.	СКО	Ср.	СКО
Частота	0.16	0.06	0.19	0.03	0.17	0.03
Сумма дней с циклонами	107	34	123	14	103	16
Площадь, млн км ²	0.81	0.13	0.97	0.16	0.78	0.1
Глубина, гпм	29.08	4.41	32.27	4.13	26.18	3
Интенсивность, гпм	11.1	1.6	12.3	1.5	10	1.1

Группы параметров циклонов, характеризующие повторяемость (частота и количество дней с циклонами) и «силу» циклонов (площадь, глубина и интенсивность), имеют схожий годовой ход в своих группах, поэтому для примера, в качестве представителей своих групп, на рис. 1 приведены графики количества дней с циклонами и площади циклонов.

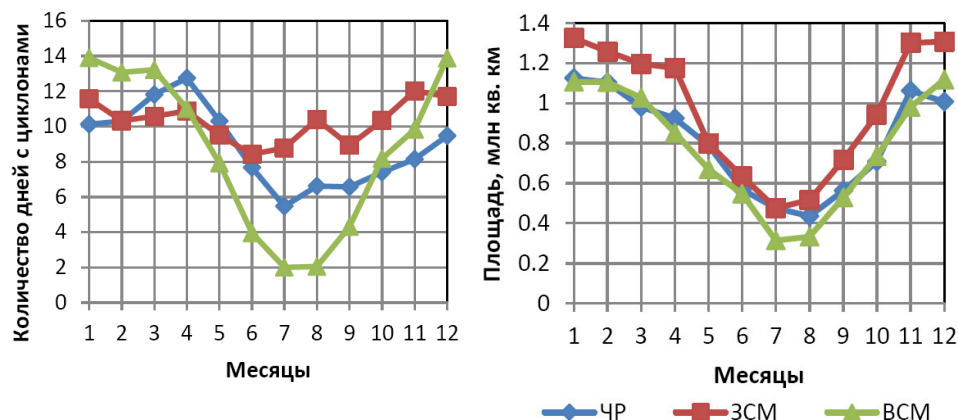


Рисунок 1. Внутригодовой ход количества дней с циклонами и площади циклонов в Черноморском регионе (ЧР), Западном Средиземноморье (ЗСМ) и Восточном Средиземноморье (ВСМ)

Figure 1. The annual course of the number of days with cyclones and the area of cyclones in the Black Sea region (ЧР), Western Mediterranean (ЗСМ) and Eastern Mediterranean (ВСМ)

Примечательно, что для рассмотренных регионов больше всего особенностей годового хода выделяется для повторяемости циклонов (частоты и количества дней с циклонами). Из общих особенностей можно выделить

лишь понижение величин в теплое полугодие и повышение в холодное. Различия, прежде всего, заметны в амплитуде годового хода, вычисляемой как разность наибольшей и наименьшей среднемесячной величины. Эта разница минимальна на западе СМ (3.6 дней с циклонами) и максимальна на востоке региона (почти 12 дней с циклонами), а в Черноморском регионе занимает промежуточное положение (немного более 7 дней с циклонами). Кроме того, месяцы наступления максимума и минимума величин тоже различны. В Черноморском регионе максимум повторяемости циклонов приходится на апрель, а минимум – на июль. На западе СМ максимум наступает в ноябре, минимум – в июне, при этом август характеризуется локальным максимумом. На востоке СМ максимум приходится на декабрь и январь, а минимум – на июль и август. Характер годового хода повторяемости циклонов в восточной части СМ похож на типичный годовой ход «силовых» параметров циклонов (площади, глубины и интенсивности).

Выделенные особенности сезонной изменчивости циклонической активности не противоречат работам (Trigo et al., 2002; Trigo et al., 1999). В одной части этих работ (Alpert et al., 1990; Campins et al., 2011; Flaounas et al., 2022; Lionello et al., 2016; Maheras et al., 2001) исследуется климатология циклонов Средиземного моря. Другая часть работ (Trigo et al., 2002; Trigo et al., 1999) посвящена исследованию областей образования и разрушения циклонов Средиземноморского бассейна и сезонности механизмов циклогенеза.

Например, в событиях циклогенеза в работе (Trigo et al., 2002), как и в повторяемости циклонов в настоящей работе, наблюдаются локальный максимум повторяемости циклонов на западе СМ в августе, летний минимум на востоке СМ, а также весенний максимум и летний минимум повторяемости циклонов в Черноморском регионе.

В годовом ходе площади, глубины и интенсивности циклонов во всех изучаемых регионах максимум приходится на зимние месяцы, а минимум – на летние с отличием в 1-2 месяца. На западе СМ максимум всех «силовых» параметров наблюдается в декабре и январе. На востоке СМ месяцы максимумов – это декабрь и январь, а также февраль для площади циклонов. В Черноморском регионе максимум по «силовым» параметрам приходится на январь и февраль. Минимум этих параметров циклонов достигается в Средиземноморских регионах в июле, а в Черноморском регионе – в августе.

При этом амплитуда годового хода глубины, интенсивности и площади циклонов приблизительно одинакова в Средиземноморских регионах (немного более 30 гпм глубины, 12 гпм интенсивности и 800 тыс. км² площади) и немного ниже (на ~25% по глубине и интенсивности и 12% по площади циклонов) в Черноморском регионе.

Другие параметры циклонов (частота и интенсивность) показаны в сезонном и годовом осреднении на рис. 2.

Зимой значимых различий циклонической активности между регионами почти не наблюдается. Это можно объяснить обострением межширотных градиентов температуры в зимний сезон, активизацией общей циркуляции атмосферы и средиземноморского зимнего фронта, что сглаживает региональ-

ные контрасты. Исключением является повышенная частота зимних циклонов в Восточном Средиземноморье, глубина которых значимо не отличается. Это можно объяснить тем, что восток Средиземноморского бассейна является основной областью выхода и разрушения циклонов Западного Средиземноморья (Trigo et al., 1999). Кроме того, зимой здесь действует активный центр циклогенеза над Эгейским морем, а также над Кипром и Средним Востоком (Trigo et al., 2002; Trigo et al., 1999).

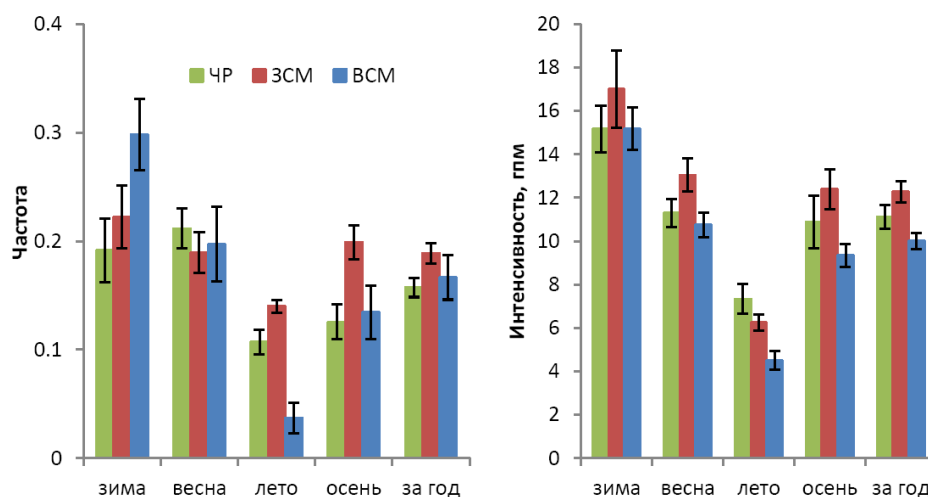


Рисунок 2. Сезонные и годовые средние многолетние (1951-2017 гг.) величины частоты и интенсивности циклонов в Черноморском регионе (ЧР), Западном Средиземноморье (ЗСМ) и Восточном Средиземноморье (ВСМ)

Плankи погрешностей соответствуют доверительному уровню 99%

Figure 2. Seasonal and annual average long-term values (1951-2017) of the frequency and intensity of cyclones in the Black Sea region (ЧР), Western Mediterranean (ЗСМ) and Eastern Mediterranean (ВСМ)

The error bars correspond to a confidence level of 99%

Летом отмечаются наибольшие региональные контрасты. Наименьшая циклоническая активность (по всем параметрам циклонов) наблюдаются в Восточном Средиземноморье. Наибольшая повторяемость циклонов отмечается в Западном Средиземноморье. Черноморский регион выделяется наибольшей интенсивностью циклонов. Это может быть связано с активизацией летнего внутримассового циклогенеза на юго-востоке Черного моря, а также над Средним Востоком (Trigo et al., 1999). Местные циклоны характеризуются субсиноптическими размерами и малой продолжительностью существования. В связи с этим можно предположить, что их вклад не проявляется в средней площади и повторяемости, зато заметен в интенсивности/глубине.

В переходные сезоны, весной и осенью, по многим параметрам циклонов преобладает циклоническая активность Западного Средиземноморья. Весной – по глубине, интенсивности и площади циклонов по сравнению с Восточным Средиземноморьем и Черноморским регионом. Осенью – по всем параметрам циклонов по сравнению с Восточным Средиземноморьем, по

частоте и площади циклонов по сравнению с Черноморским регионом. Именно в Западном Средиземноморье расположены активные центры циклогенеза над Генуэзским заливом, Атласскими горами, Пиренейским полуостровом (Trigo et al., 2002). Первые два центра циклогенеза производят наиболее интенсивные / глубокие, большие и долгоживущие циклоны Средиземноморского бассейна (Trigo et al., 1999).

В среднем за год преобладает циклоническая активность в Западном Средиземноморье: в сравнении с Черноморским регионом по всем параметрам циклонов, а в сравнении с Восточным Средиземноморьем по интенсивности, глубине и площади циклонов.

Следует обратить внимание, что ранее не было проведено такого анализа и сравнения циклонической активности по общей частоте, глубине, интенсивности и площади циклонов над крупными частями Черноморско-Средиземноморского региона, как в настоящей работе.

Рейтинг климатических сигналов, определяющих изменчивость частоты циклонов

Для характеристики основных индикаторов и предикторов изменчивости частоты циклонов в каждом регионе было проведено ранжирование синхронных и асинхронных линейных корреляций с индексами климатических сигналов для среднегодовой и сезонной частоты циклонов (рис. 3-8) и частоты по месяцам (не показано). Коэффициенты корреляции (r) от 0.2/0.25 значимы на уровне 90-95% и объясняют (r^2) от 4-6.25% дисперсии частоты циклонов.

В частоте зимних циклонов по месяцам проявляются дополнительно следующие сигналы. В декабре основной вклад вносят синхронное ВА/ЗР с отрицательной корреляцией, синхронное Западное СК с положительной корреляцией и ВА/ЗР весенне-летнего периода с положительной корреляцией. В январе основной вклад вносит АК (с отрицательной корреляцией), а также значимо проявляются тихоокеанские и евразийские колебания декабря. В частоте циклонов в феврале меньше, чем зимой, проявляется влияние зимнего СКАНД колебания, при этом значимо проявляются колебания (САК, ВА/ЗР, ЗСК) теплых месяцев года.

Весенние месяцы характеризуются следующими особенностями. Частота циклонов в марте отличается положительной корреляцией с тихоокеанскими индексами: ЮК августа, ЗТК апреля, ТСА июля. В марте дополнительно проявляется индекс ВА/ЗР ноября с отрицательной корреляцией и летний ВА/ЗР с положительной корреляцией. Летний индекс ВА/ЗР также проявляется и в апреле. Апрель характеризуется дополнительно отрицательной корреляцией с индексами АМО летне-осеннего периода. В частоте циклонов в апреле и мае проявляется индекс ВТ/СТ июля. Частота циклонов в мае характеризуется положительной корреляцией в основном с региональными индексами СК и ЗСК весеннего периода и отрицательной корреляцией с индексами ВАК октября и декабря и САК января и августа, при этом с тихоокеанскими индексами ТДО и ТСА обнаружена синхронная корреляция.

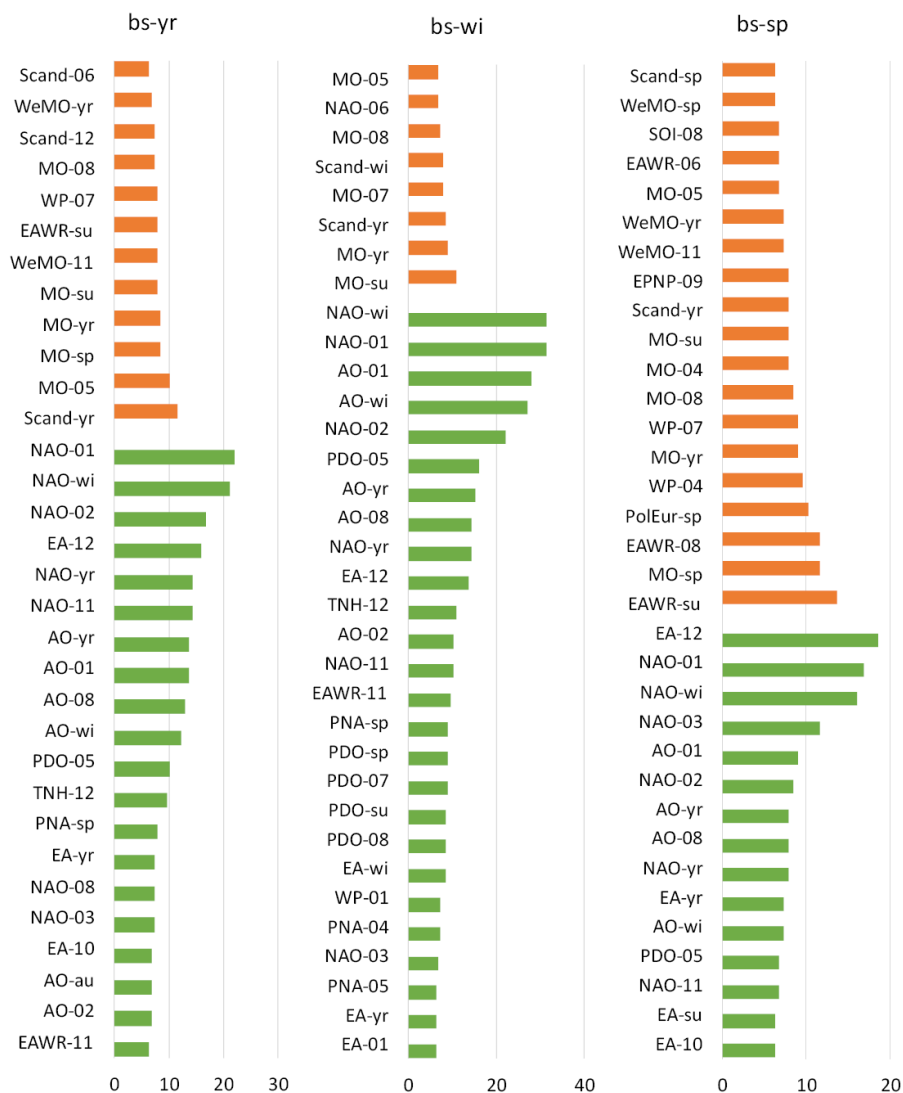


Рисунок 3. Ранжированные коэффициенты детерминации (r^2 , %) для среднегодовой (bs-yr), зимней (bs-wi) и весенней (bs-sp) частоты циклонов Черноморского региона с климатическими индексами (см. данные и методы) по месяцам (от 1 до 12), сезонам (зима – wi, весна – sp, лето – su, осень – au) и в среднем за год (yr)

Красным для коэффициентов корреляции $r > 0$, зеленым для $r < 0$

Figure 3. Ranked determination coefficients (r^2 , %) for the average annual (bs-yr), winter (bs-wi) and spring (bs-sp) frequency of cyclones in the Black Sea region with climatic indices (see data and methods) by month (from 1 to 12), seasons (winter – wi, spring – sp, summer – su, autumn – au) and annual averages (yr)

Red for correlation coefficients $r > 0$, green for $r < 0$

Основной вклад в повышение (понижение) среднегодовой и зимне-весенней частоты циклонов в Черноморском регионе (рис. 3) вносят ослабление (усиление) САК, АК и ВАК в основном в месяцы холодного полугодия, а также усиление (ослабление) среднегодового СКАНД колебания и регионального СК весенне-летнего периода. Кроме того, в частоте циклонов проявля-

ются индексы тихоокеанских сигналов: ТДО мая, ТСП за счет декабря, ТСА зимне-весеннего периода с отрицательной корреляцией и ЗТК апреля и июля с положительной корреляцией. При этом весной (к апрелю) уменьшается вклад годового индекса СКАНД, а проявляется основная связь (с положительной корреляцией) с другими евразийскими индексами: летним ВА/ЗР и весенним Пол/Евр.

Изменчивость частоты циклонов Черноморского региона в летне-осенний период (рис. 4) определяется в основном индексами САК и АО последнего месяца сезона (августа для лета и ноября для осени) с отрицательной корреляцией и индексом Пол/Евр с положительной корреляцией (индексом августа для лета; индексом мая для осени за счет сентября и ноября).

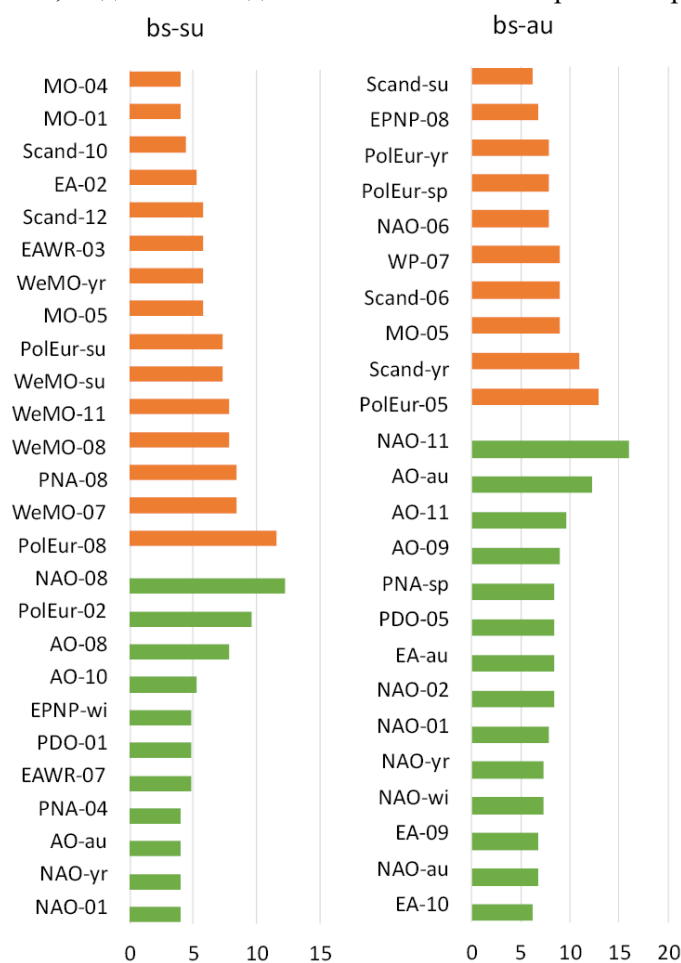


Рисунок 4. Ранжированные коэффициенты детерминации (r^2 , %) для частоты циклонов Черноморского региона летом (bs-su) и осенью (bs-au) с климатическими индексами (см. данные и методы) по месяцам (от 1 до 12), сезонам (зима – wi, весна – sp, лето – su, осень – au) и в среднем за год (yr)

Красным для коэффициентов корреляции $r > 0$, зеленым для $r < 0$

Figure 4. Ranked determination coefficients (r^2 , %) for the frequency of cyclones in the Black Sea region in summer (bs-su) and autumn (bs-au) with climatic indices (see data and methods) by month (from 1 to 12), seasons (winter – wi, spring – sp, summer – su, autumn – au) and annual averages (yr)

Red for correlation coefficients $r > 0$, green for $r < 0$

Определяющий перечень индексов для осенней частоты циклонов в Черноморском регионе (рис. 4) напоминает таковые для зимне-весеннего периода и среднегодовых величин (рис. 3), т.к. выделяются значимые отрицательные корреляции с синхронными осенними индексами САК, АО и ЕА, индексом ТДО мая и весеннего ТСА (в основном за счет октября) и положительные корреляции с годовым и летним индексом СКАНД, СК мая и ЗТК июля. Отличием осени от зимне-весеннего периода является повышение вклада весеннего и годового индекса Пол/Евр с положительной корреляцией (особенно в сентябре).

Летом (особенно в июле и августе) (рис. 4) также значительным является вклад индекса Пол/Евр (синхронного индекса с положительной корреляцией и индекса февраля с отрицательной корреляцией), а также с положительной корреляцией индекса ВА/ЗР марта (за счет июня) и синхронного индекса регионального ЗСК. Синхронная связь с ЗСК прослеживается с июля по октябрь. В июне частота циклонов определяется весенним ЗСК и СК с положительной корреляцией, а также весенним индексом ТСА с отрицательной корреляцией. Для летних месяцев также следует упомянуть положительную связь с индексом СКАНД, как синхронного, так и зимнего индекса.

В среднегодовой частоте циклонов Западного Средиземноморья (рис. 5) более всего проявляется с положительной корреляцией среднегодовой индекс СКАНД в основном за счет зимы, весны и сентября.

На одном уровне с положительной корреляцией проявляются ноябрьский индекс Пол/Евр (за счет летне-осеннего периода) и весенний и годовой индекс ЮК (за счет марта, апреля и ноября). С отрицательной корреляцией основной вклад вносят индексы ВА/ЗР (январский и зимний индекс за счет февраля и августа), ВАК (весенний и годовой индекс в основном за счет весны и с октября по декабрь), регионального СК (особенно для зимне-весеннего периода), зимние тихоокеанские индексы (ЗТ и ТСА) и годовой индекс АО (за счет периода с октября по май).

Общей чертой частоты циклонов Западного Средиземноморья по сезонам (рис. 5, 6) является отрицательная корреляция с синхронным индексом регионального СК (зимним, весенним индексами, индексом мая для весны, индексом ноября для осени) и положительная корреляция с индексом регионального ЗТК, как синхронного, так и с разными сдвигами.

Кроме региональных индексов, в сезонной частоте циклонов Западного Средиземноморья главным образом проявляются с положительной корреляцией индекс СКАНД зимой, весной и осенью и зимний индекс САК летом, а с отрицательной корреляцией индексы САК и АК зимой, ВАК и АК весной, летний САК осенью и апрельский ВА-ЗР летом.

В среднегодовой частоте циклонов Восточного Средиземноморья (рис. 7) с положительной корреляцией в большей мере проявляются среднегодовой индекс регионального СК (т.к. его синхронные отклики прослеживаются во все сезоны года и преобладают с ноября по январь), годовой и весенний индекс Пол/Евр (за счет переходных сезонов) и индекс СКАНД (за счет февраля), а также майские индексы региональных колебаний ЗКС и СК

(за счет асинхронных связей с частотой зимних и весенних циклонов). С отрицательной корреляцией в основном проявляются тихоокеанские индексы (весенний и майский индекс ТСА за счет весны, летний и июльский индекс ВТ-СТ за счет осени) и летне-осенний индекс АМО (за счет весны). Кроме того, меньший, примерно одинаковый вклад (с отрицательной корреляцией) вносят зимний индекс САК (за счет весны), январский индекс ЗТК (за счет осени) и февральский индекс регионального СК (за счет осени).

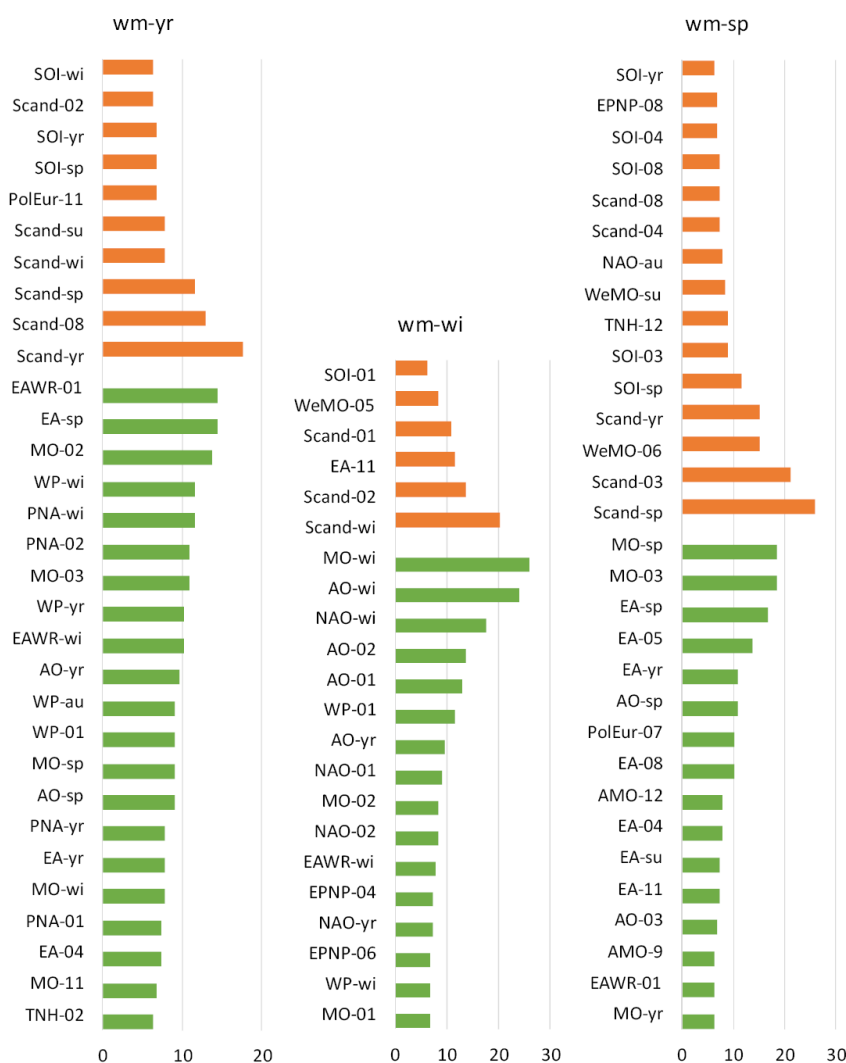


Рисунок 5. Ранжированные коэффициенты детерминации (r^2 , %) для среднегодовой (wm-yr), зимней (wm-wi) и весенней (wm-sp) частоты циклонов Западного Средиземноморья с климатическими индексами (см. данные и методы) по месяцам (от 1 до 12), сезонам (зима – wi, весна – sp, лето – su, осень – au) и в среднем за год (yr)
 Красным для коэффициентов корреляции $r > 0$, зеленым для $r < 0$

Figure 5. Ranked determination coefficients (r^2 , %) for the average annual (wm-yr), winter (wm-wi) and spring (wm-sp) frequency of cyclones in the Western Mediterranean region with climatic indices (see data and methods) by month (from 1 to 12), seasons (winter – wi, spring – sp, summer – su, autumn – au) and annual averages (yr)
 Red for correlation coefficients $r > 0$, green for $r < 0$

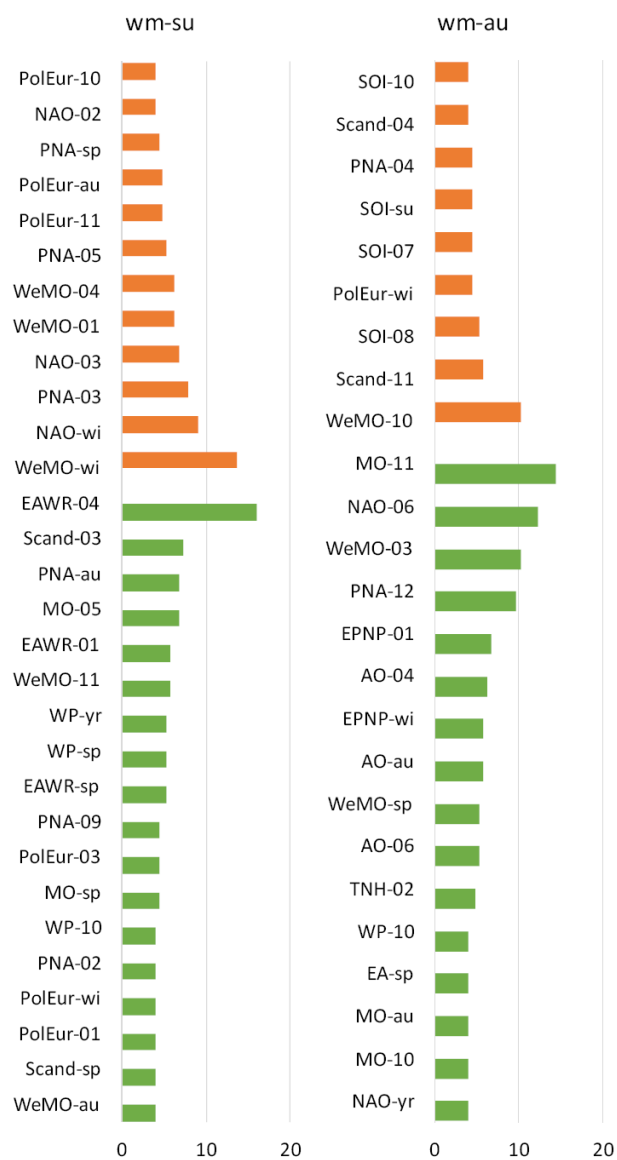


Рисунок 6. Ранжированные коэффициенты детерминации (r^2 , %) для частоты циклонов Западного Средиземноморья летом (wm-su) и осенью (wm-au) с климатическими индексами (см. данные и методы) по месяцам (от 1 до 12), сезонам (зима – wi, весна – sp, лето – su, осень – au) и в среднем за год (yr)

Красным для коэффициентов корреляции $r > 0$, зеленым для $r < 0$

Figure 6. Ranked determination coefficients (r^2 , %) for the frequency of cyclones in the Western Mediterranean region in summer (wm-su) and autumn (wm-au) with climatic indices (see data and methods) by month (from 1 to 12), seasons (winter – wi, spring – sp, summer – su, autumn – au) and annual averages (yr)

Red for correlation coefficients $r > 0$, green for $r < 0$

Особенностью сезонной частоты циклонов Восточного Средиземноморья (рис. 7, 8) является отсутствие преобладающих проявлений синхронных

индексов, за исключением положительной корреляции с региональными индексами весной и осенью и отрицательной корреляции с тихоокеанским индексом ЗТК зимой. При этом значительными являются проявления тихоокеанских индексов с разными сдвигами и разным знаком корреляции.

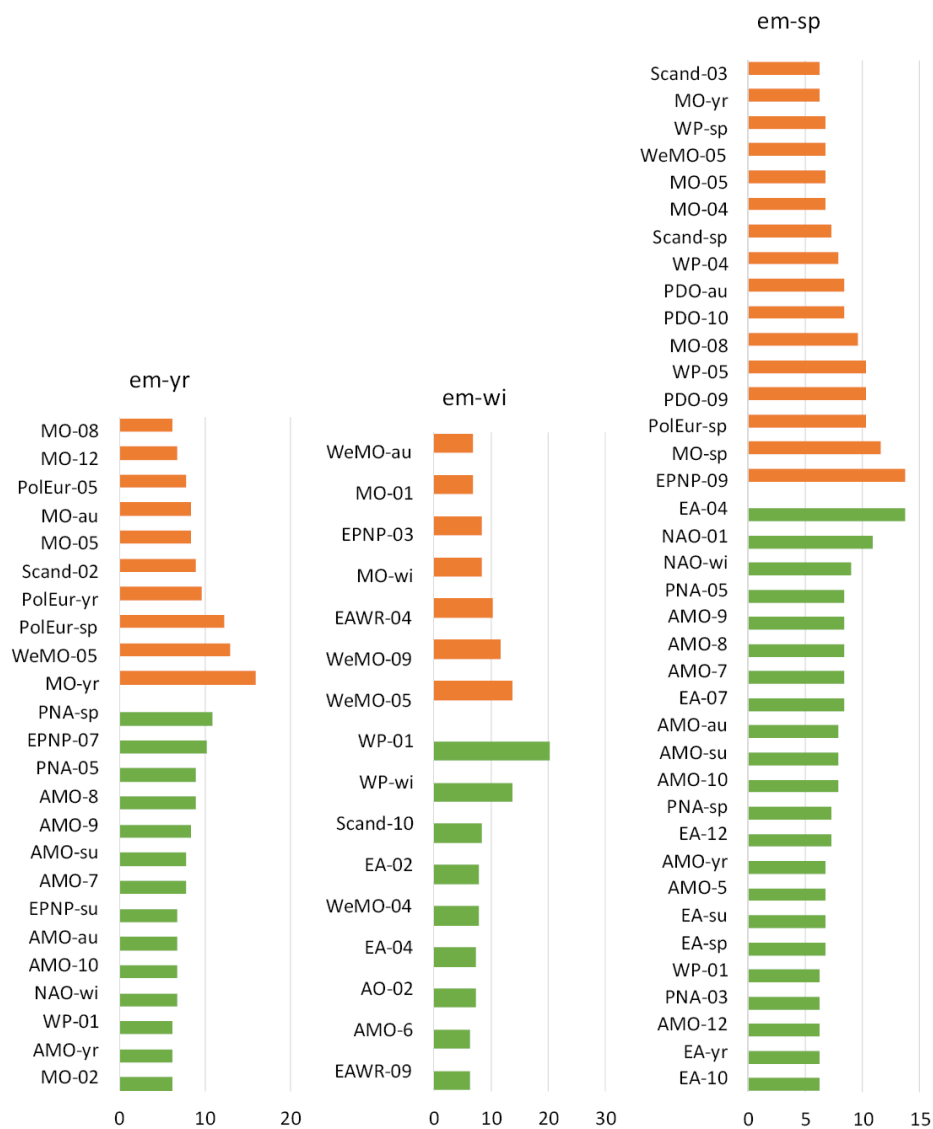


Рисунок 7. Ранжированные коэффициенты детерминации (r^2 , %) для среднегодовой (em-yr), зимней (em-wi) и весенней (em-sp) частоты циклонов Восточного Средиземноморья с климатическими индексами (см. данные и методы) по месяцам (от 1 до 12), сезонам (зима – wi, весна – sp, лето – su, осень – au) и в среднем за год (yr)
 Красным для коэффициентов корреляции $r > 0$, зеленым для $r < 0$

Figure 7. Ranked determination coefficients (r^2 , %) for the average annual (em-yr), winter (em-wi) and spring (em-sp) frequency of cyclones in the Eastern Mediterranean region with climatic indices (see data and methods) by month (from 1 to 12), seasons (winter – wi, spring – sp, summer – su, autumn – au) and annual averages (yr)
 Red for correlation coefficients $r > 0$, green for $r < 0$

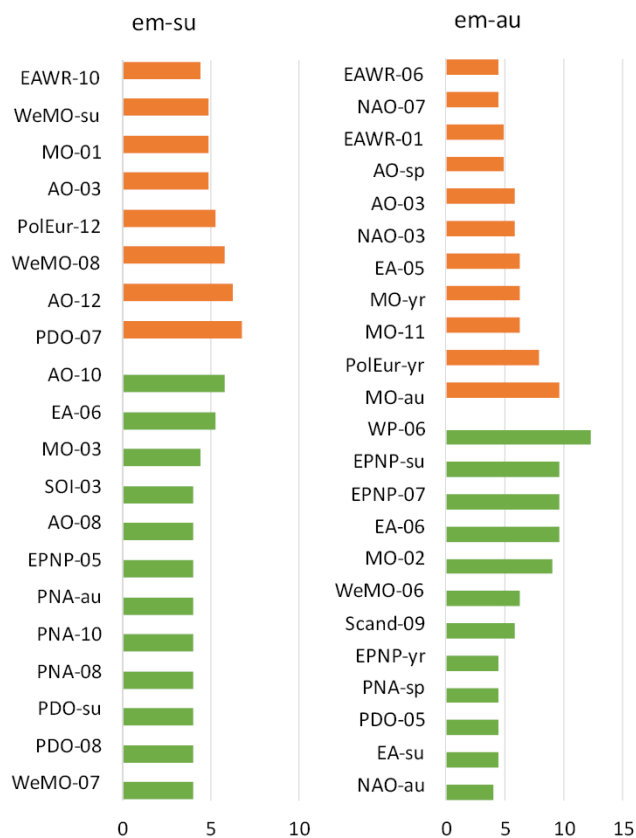


Рисунок 8. Ранжированные коэффициенты детерминации (r^2 , %) для частоты циклонов Восточного Средиземноморья летом (em-su) и осенью (em-au) с климатическими индексами (см. данные и методы) по месяцам (от 1 до 12), сезонам (зима – wi, весна – sp, лето – su, осень – au) и в среднем за год (yr)

Красным для коэффициентов корреляции $r > 0$, зеленым для $r < 0$

Figure 8. Ranked determination coefficients (r^2 , %) for the frequency of cyclones in the Eastern Mediterranean region in summer (em-su) and autumn (em-au) with climatic indices (see data and methods) by month (from 1 to 12), seasons (winter – wi, spring – sp, summer – su, autumn – au) and annual averages (yr)

Red for correlation coefficients $r > 0$, green for $r < 0$

Таким образом, временная изменчивость частоты циклонов определяется разным набором синхронных и асинхронных (предшествующих) климатических сигналов от месяца к месяцу. Кроме того, она является результатом их взаимодействия.

Обсуждение детерминированности межгодовой изменчивости

Основным межгодовым климатическим сигналом и главной модой изменчивости давления в Атлантико-Европейском регионе, как известно, считается Североатлантическое колебание (САК) (Hurrell, Deser, 2010). Полученные результаты в целом соответствуют известной схеме САК. В отрицательную фазу этого колебания циклоническая активность в южной части

Европы, включая исследуемый регион, усиливается, а в положительную фазу ослабевает в связи с чередованием барических аномалий в районе Исландского минимума и Азорского максимума. Однако преобладающий вклад САК в изменчивость частоты циклонов выделяется только для Черноморского региона, особенно в зимне-весенний период. В летне-осенний период преобладающие синхронные проявления САК в частоте циклонов выделяются в августе и ноябре. В то же время обнаружено, что вклад САК сравним с вкладом Арктического колебания (АК) и Восточноатлантического колебания (ВАК), которые также действуют в противофазе с частотой циклонов в изучаемом регионе. При этом с января по март вклад АК превышает вклад САК. А в декабре, октябре и апреле в частоте циклонов Черноморского региона синхронный вклад ВАК преобладает по сравнению с САК и АО.

Центры действия Арктического колебания, Североатлантического колебания и Восточноатлантического колебания расположены в основном над океаном и могут рассматриваться как “меридиональные структуры”, при которых аномалии атмосферного давления между центрами действия чередуются с севера на юг (Бардин и др., 2015). При этом происходит смещение широты западного переноса.

Арктическое колебание является ведущей модой давления в Северном полушарии, которая включает в себя как центры действия Североатлантического колебания, так и северной части Тихого океана (Thompson, Wallace, 2000; Wallace, 2000; Wallace, Gutzler, 1981). Характер его проявлений в циклонической активности аналогичен САК и даже сильнее его по корреляционным связям с частотой циклонов в Черноморском регионе в зимние месяцы.

Восточноатлантическое колебание является второй основной модой давления после САК над Североатлантическим регионом (Barnston, Livezey, 1987). Это колебание часто интерпретируется как смещенная на юго-восток мода САК, но с более сильными субтропическими связями через Азорский максимум. Полученные в настоящем исследовании результаты свидетельствуют о том, что ВАК проявляется в увеличении частоты циклонов в отрицательную фазу зимой и весной, особенно весной (апрель) в Черноморском регионе и над Западным Средиземноморьем.

Получается, что более масштабное Арктическое колебание в случае Черноморского региона приводит к большим откликам в частоте циклонов в зимние месяцы, чем Североатлантическое и Восточноатлантическое колебания, которые находятся ближе к региону. Причина этого требует более детального исследования и может быть связана с тем, что АК лучше проявляется в зонально усредненных характеристиках (Wallace, 2000). С другой стороны, полученные в настоящей работе отклики на САК и АК в циклонической активности значительной мере совпадают, подтверждая связь между этими двумя колебаниями (Thompson, Wallace, 2000; Wallace, 2000; Wallace, Gutzler, 1981).

С одной стороны, асинхронные проявления АК, САК, ВАК, по-видимому, можно объяснить корреляцией значений индексов по месяцам. Например, годовой индекс САК в основном обусловлен зимним индексом, а зимний, очевидно, коррелирует со значениями индекса в январе и феврале, а также

ноябре и марте. С другой стороны, в некоторые месяцы вклад асинхронных корреляций превышает вклад синхронных или значимые синхронные корреляции вообще не выделяются. Например, преобладающий вклад декабрьского индекса ВАК и январского индекса САК наблюдается в весенней частоте циклонов Черноморского региона (рис. 3). При этом синхронные проявления декабрьского индекса ВАК превышают проявления САК и АК в декабре и отмечаются в частоте циклонов в разные месяцы. Отложенные проявления зимних индексов САК, превосходящие синхронные проявления, обнаруживаются в частоте циклонов в апреле, мае, июне и октябре.

Для Средиземноморского региона, ожидаемо, частота циклонов наиболее сильно связана синхронно с региональными качелеобразными аномалиями давления на западе и востоке региона, представленными Средиземноморским колебанием. Значительные отклики на это колебание показаны, например, для осадков и температуры разных средиземноморских стран (Conte et al., 1989; Dünkeloh, Jacobeit, 2003; Maheras, Kutiel, 1999; Maheras et al., 1999). Еще более региональное Западное Средиземноморское колебание оказывает значительное влияние на местном уровне, в частности, на Пиренейском полуострове (Martin-Vide, Lopez-Bustins, 2006). Для циклонической активности по региону Западного Средиземноморья в целом аномалии компенсируются, и наибольшие синхронные проявления ЗСК обнаруживаются для Черноморского региона и региона Восточного Средиземноморья только в теплое полугодие. Последнее, вероятно, связано с тем, что индекс ЗСК отражает интенсивность и положение гребня Азорского максимума (Martin-Vide, Lopez-Bustins, 2006).

После регионального СК в частоте циклонов Средиземноморского региона выделяется синхронный вклад САК и АК зимой и ВАК весной. Как считается, отличия региональных проявлений САК и ВАК в Атлантико-Европейском регионе заключаются в том, что САК больше влияет на направление траекторий циклонов (Нестеров, 2013; Нестеров, 2003; Voskresenskaya, Polonskii, 1995), а ВАК – на их интенсивность (Михайлова, Юровский, 2016; Нестеров, 2009; Нестеров, 2016).

Другая группа рассмотренных климатических сигналов относится к Евразийскому региону: колебания Восточная Атлантика/Западная Россия, Скандинавское и Полярное/Евразийское колебание. В отличие от САК, ВАК и АО, эти евразийские колебания могут быть интерпретированы как “зональные волны” согласно работе (Бардин и др., 2015). В своей положительной фазе они связаны с центрами, блокирующими западный перенос и расположенными в зимне-весенний период над западной Европой для ВА/ЗР, в окрестности Скандинавского полуострова для СКАНД и над западной Россией для Пол/Евр (Barnston, Livezey, 1987). Соответственно, усиление циклонической активности в Черноморско-Средиземноморском регионе происходит при отрицательной фазе ВА/ЗР и положительных фазах СКАНД и Пол/Евр. Это подтверждается полученными результатами.

В настоящем исследовании обнаружен наибольший синхронный отклик (положительный) циклонической активности на Скандинавское колебание

весной и зимой, особенно для региона Западного Средиземноморья. Полярное/Евразийское колебание проявляется в весенний сезон в положительных откликах частоты циклонов Восточного Средиземноморья и Черноморского регионов. Отрицательные отклики на колебание Восточная Атлантика/Западная Россия обнаружены зимой в циклонической активности Западного Средиземноморья и Черноморского регионов.

Эти результаты согласуются с результатами работы (Бардин и др., 2015), которые показывают, что Скандинавское колебание характеризуется более сильными откликами зимой над Средиземным морем по сравнению с колебанием Восточная Атлантика/Западная Россия. В положительных фазах этих колебаний траектории циклонов обтекают блокирующие центры с севера и юга, а в противоположных (отрицательных) фазах в этих центрах наблюдается повышенная циклоническая активность.

Асинхронные отклики этих евразийских колебаний могут проявляться в частоте циклонов Черноморско-Средиземноморского региона как в следующем месяце, так и в следующем сезоне и через полгода, со сдвигом до 9 месяцев.

Межгодовые климатические колебания в северной части и тропиках Тихого океана, такие, как Западнотихоокеанское, Восток Тихого океана – Север Тихого океана, Тихоокеанское/Североамериканское, а также Тропики/Северное полушарие, проявляются как синхронно, так и с временной задержкой циклонической активности в Черноморско-Средиземноморском регионе. Их проявления в циклонах в указанном регионе ранее в других работах не рассматривались. Последнее, в частности, связано с проблемой определения цепочки физических механизмов передачи влияния из Тихого океана в Северную Атлантику и Черноморско-Средиземноморский регион.

Существует общепринятое представление о том, что такие механизмы осуществляются с помощью атмосферных мостов, в которых задействованы тепловые потоки, взаимодействие ячеек общей циркуляции атмосферы Уокера и Гадлея, волны Россби в океане и атмосфере, струйные течения в атмосфере, шторм-треки, циклоны и антициклоны (Rogers, 1990; Trenberth, Hurrell, 1994). Удалённое влияние климатических сигналов Тихого океана может осуществляться через североатлантические центры действия атмосферы (Voskresenskaya, Polonsky, 1993). Это подтверждается тем, что колебания ВТ/СТ, ТСА и ТСП характеризуются наибольшими откликами в циклонической активности в зонах главного североатлантического шторм-трека и Исландского минимума (Maslova et al., 2022).

Наши результаты показывают отрицательные синхронные отклики Западнотихоокеанского колебания в Средиземноморском регионе зимой, колебания ТСА весной, колебания ВТ/СТ в отдельные месяцы (наибольшие в ноябре). При этом проявления ВТ/СТ имеют разный знак в регионе Западного Средиземноморья (положительный) и регионе Черного моря (отрицательный). Что касается колебания ТСП, то наибольшие отклики (отрицательные) наблюдаются в декабре в Черноморском регионе и Восточном Средиземноморье.

Асинхронные проявления межгодовых климатических сигналов северной части Тихого океана выделяются в частоте циклонов Черноморско-Сре-

диземноморского региона как через несколько месяцев, так и сезонов. Раздельный вклад этих тихоокеанских сигналов в среднегодовую повторяемость циклонов Западного и Восточного Средиземноморья достигает более 10%. При этом для Восточного Средиземноморья зимой вклад ЗТК достигает 20%, и вообще по месяцам велика роль тихоокеанских, тропических и междесятилетних климатических сигналов.

Для (Эль-Ниньо) – Южного колебания в настоящей работе обнаружены также значимые синхронные положительные отклики в частоте циклонов весной в регионе Западного Средиземноморья. В отличие от предыдущих колебаний Тихого океана, ЭНЮК и его региональные проявления в Атлантико-Европейском регионе анализируются во многих исследованиях, например (Brönnimann et al., 2006; Fraedrich, Müller, 1992; Mariotti et al., 2002).

Временное запаздывание регионального отклика ЮК может достигать 9 месяцев, что соответствует времени развития зрелой фазы событий (Trenberth, Hurrell, 1994). Например, теплые аномалии температуры поверхности океана зимой при Эль-Ниньо проявляются в весенних осадках в Атлантико-Европейском регионе (Herceg Bulić, Kucharski, 2012). Как показывают полученные в настоящей работе результаты, такой же временной задержкой характеризуются отклики межгодовых тихоокеанских колебаний (ЗТК, ВТ/СТ, ТСА) в частоте циклонов Черноморско-Средиземноморского региона. В связи с тем, что ЭНЮК – основной глобальный климатический сигнал на межгодовом масштабе, это может свидетельствовать о том, что его влияние передается опосредованно с участием атмосферных центров действия Северотихоокеанского региона.

Асинхронные глобальные проявления ЭНЮК и соответствующие физические механизмы описаны во многих работах, например (Brönnimann, 2007; Herceg Bulić, Kucharski, 2012; Kumar, Hoerling, 2003; Polonsky et al., 2004). Влияние ЭНЮК может передаваться в Атлантико-Европейский регион как посредством взаимодействия с другими климатическими сигналами, например САК, так и в качестве ортогонального сигнала (King et al., 2023). САК, в свою очередь, влияет на ЭНЮК с помощью атмосферных барических мостов, включая Азиатский муссон и Индоокеанско-Тихоокеанские связи (Kucharski et al., 2016; Nakamura et al., 2015; Polonsky et al., 2004; Polonsky, Torbinsky, 2021; Voskresenskaya, Polonsky, 1993). Для получения более отчётливых региональных откликов ЭНЮК используют выделение разных типов событий (центральных и восточных) Эль-Ниньо и Ла-Нинья (Воскресенская, Михайлова, 2005; Гущина, Девиц, 2016; Михайлова, Воскресенская, 2010; Ding et al., 2017; Voskresenskaya et al., 2018; Zheleznova, Gushchina, 2016).

Обсуждение детерминированности междесятилетней изменчивости

Ранее проявления десятилетних-междесятилетних колебаний, Атлантической междесятилетней осцилляции (АМО) и Тихоокеанской десятилетней осцилляции (ТДО), рассматривались в циклонах над океанами, например, в работах (Бардин, Воскресенская, 2007; Полонский, 2008; Bardin, Voskresens-

кава, 2007; Polonskii, 2008). Также проводилось сравнение средних величин частоты циклонов в Черноморско-Средиземноморском регионе для разных фаз этих колебаний (Voskresenskaya, Maslova, 2012). Было показано, что циклоническая активность в Черноморско-Средиземноморском регионе в зимне-весенний период усиливается во время положительной фазы АМО и отрицательной фазы ТДО.

Метод композитного анализа, основанный на ранжированных индексах, использованный в этом исследовании, добавил к результатам, полученным ранее, оценки на основе линейной корреляционной связи. Обнаружено, что вклад АМО и ТДО может объяснять около 15% дисперсии частоты циклонов по месяцам. В Черноморском регионе вклад ТДО достигает 16% для частоты циклонов зимой и 10% для среднегодовой частоты циклонов.

Такие более заметные региональные проявления ТДО могут быть связаны с более южным смещением оси зонального переноса из Атлантики в Средиземное море во время отрицательной фазы ТДО, чем во время положительной фазы АМО, как показано в нашей работе (Maslova et al., 2017). С другой стороны, на исследуемом периоде положительная фаза АМО представлена разорванными отрезками в начале и в конце интервала. Это могло повлиять на чёткость определения региональных откликов.

Вообще АМО можно интерпретировать как междесятилетнюю моду САК, но, грубо говоря, с обратным знаком (Полонский, 2008). В противоположность межгодовой моде САК, при положительной фазе АМО атмосферные центры действия в Северной Атлантике смещаются преимущественно к югу (Peings, Magnusdottir, 2014; Polonskii, 2008). Таким образом, отклики на АМО в целом противоположны САК. Как показано нами в (Maslova et al., 2022) для АМО и ТДО, повышается плотность средних траекторий циклонов в субтропиках Северной Атлантики в положительную фазу АМО и над Восточным Средиземноморьем в отрицательную фазу ТДО. Это соответствует логике предыдущих исследований (Бардин, Воскресенская, 2007; Полонский, 2008; Bardin, Voskresenskaya, 2007; Polonskii, 2008; Voskresenskaya, Maslova, 2012).

Оценка суммарного вклада естественных квазипериодических факторов межгодового-междесятилетнего масштаба

Ранее в рамках данного направления исследования в работе (Maslova et al., 2010) был оценен суммарный вклад синхронного индекса САК и индекса ЮК, предшествующего на 2-7 месяцев, для параметров циклонов в изучаемом регионе. Было показано, что совместное влияние САК и ЭНЮК на межгодовом масштабе в отдельные зимние месяцы определяет в Черноморском регионе до 50% изменчивости частоты циклонов, в западной и восточной частях Средиземноморского региона до 30% изменчивости площади и до 25% изменчивости глубины циклонов.

В настоящей работе совместный вклад климатических сигналов в дисперсию частоты циклонов показан с помощью суммирования коэффициентов детерминации – квадратов коэффициентов синхронной линейной корреляции из рис. 3-8. Так, группа атмосферных ортогональных индексов (NAO, EA, EA/

WR, SCAND, POL/EUR, WP, EP-NP, PNA, TNH) вносит следующий суммарный вклад в дисперсию частоты циклонов:

- для Черноморского региона 52% зимой, 20% весной и 38% за год;
- для Западного Средиземноморья 58% и 42% зимой и весной, 43% в среднем за год;
- для Восточного Средиземноморья 14% зимой, 38% весной за счет марта и 10% в среднем за год.

Если заменить индекс NAO на индекс АК, то доля объяснённой дисперсии как правило возрастает на 5-10%.

Группа океанических ортогональных индексов (ENSO, AMO, PDO) с учетом линейного синхронного влияния объясняет 6% дисперсии среднегодовой частоты циклонов Средиземноморского региона за счет весны: 16% и 4% для Западного и Восточного Средиземноморья, соответственно.

Региональное Западное Средиземноморское колебание объясняет около 5% дисперсии частоты циклонов Черноморско-Средиземноморского региона в разные месяцы. Средиземноморское колебание отвечает примерно за 10% дисперсии частоты циклонов в регионе весной и зимой, достигая 20% в Западном Средиземноморье, а в отдельные зимние месяцы – около 30%.

После удаления линейного тренда рядов был проведен анализ множественной линейной регрессии частоты циклонов с оценкой вклада в дисперсию всех 15 индексов, включая индексы AMO и ТДО. Он позволил получить следующие результаты по доле объясненной дисперсии частоты циклонов:

- для Черноморского региона 60% зимой, 58% весной и 60% за год;
- для Западного Средиземноморья 70% зимой, 68% весной и 71% за год;
- для Восточного Средиземноморья 75% зимой, 70% весной, 73% за год.

Кроме того, был проведён анализ без удаления линейного тренда, но с учётом нелинейных связей, а именно с применением экспоненциальной трансформации. В этом случае доля объясненной дисперсии частоты циклонов для приведенного выше перечня возрастает до 97-98%.

Оценка суммарного вклада квазипериодических климатических процессов в изменчивость циклонической активности с помощью множественной линейной регрессии имеет ряд вопросов и допущений. Один из самых важных вопросов – вопрос о взаимодействии сигналов. Во-первых, взаимодействие сигналов нелинейное (Barnett, 1991; Timmermann, 2003). Во-вторых, характер его меняется (Nakamura et al., 2015; King et al., 2023), т.е. наблюдается нестационарность климата (Hlinka et al., 2014). При этом, оценку линейного взаимодействия можно интерпретировать как оценку снизу для современного климатического периода.

Заключение

С использованием четырехсрочных данных высоты геопотенциальной поверхности 1000 гПа из реанализа NCEP / NCAR за период 1951-2017 гг. и методики объективной идентификации и трекинга циклонов М.Ю. Бардина (Бардин, 1995) получены многолетние массивы характери-

стик параметров циклонов для трех составных частей Черноморско-Средиземноморского региона.

Анализ годового хода повторяемости, глубины, площади и интенсивности циклонов выявил их климатические черты отдельно для Черноморского региона, Западного и Восточного Средиземноморья. В общем характере годового хода с повышением величин в холодные месяцы и понижением в теплые месяцы отмечается ряд особенностей. В Черноморском регионе максимум повторяемости циклонов приходится не на зиму, как в Средиземноморских регионах, а на весну (апрель). В Западном Средиземноморье в августе наблюдается локальный максимум повторяемости циклонов.

Сравнение циклонической активности в регионах выявило высокую циклоническую активность в течение всего года с наименьшим разбросом в Западном Средиземноморье. Наибольший разброс параметров циклонов определен в основном для Черноморского региона. В Восточном Средиземноморье повторяемость циклонов зимой выше, а летом – ниже, чем в двух других регионах, что обуславливает наибольшую амплитуду годового хода.

С помощью коэффициентов детерминации показано, какая часть дисперсии частоты циклонов с запаздыванием от 0 до 11 месяцев может быть объяснена изменчивостью известных квазипериодических климатических процессов межгодового-междесятилетнего масштаба.

Преобладающий синхронный вклад Североатлантического колебания с отрицательной корреляцией, наряду с Арктическим и Восточноатлантическим колебаниями в отдельные месяцы, определен для частоты циклонов Черноморского региона (20-30% дисперсии частоты зимой). Около 10-15% дисперсии среднегодовой частоты объясняет раздельный вклад майского индекса Тихоокеанской десятилетней осцилляции (с отрицательной корреляцией), синхронного Скандинавского колебания (с положительной корреляцией), Средиземноморского колебания весенне-летнего периода (с положительной корреляцией) и декабрьского индекса Тропики/Северное полушарие (с отрицательной корреляцией), а также с разным опережением (с положительной корреляцией) индексов Восточноатлантического-Западноросийского колебания весной и Полярно-Евразийского колебания в летне-осенний период.

В изменчивость среднегодовой частоты циклонов Западного Средиземноморья основной вклад вносят синхронное Скандинавское колебание (с положительной корреляцией; более 20% дисперсии весной), январский индекс Восточноатлантического-Западноросийского колебания (с отрицательной корреляцией; около 15% дисперсии частоты), весеннее Восточноатлантическое колебание (с отрицательной корреляцией; около 15% дисперсии), Средиземноморское колебание в феврале и марте (с отрицательной корреляцией; 10-15% дисперсии), а также с разным опережением индекс Западно-Средиземноморского колебания (с положительной корреляцией; 10-15% дисперсии летне-осеннего периода). Около 10% дисперсии среднегодовой частоты – вклад (с отрицательной корреляцией) зимних индексов Тихоокеанско-Североамериканского и Западнотихоокеанского колебаний; 5-10% дисперсии зимней частоты –

вклад (с положительной корреляцией) весенне-летнего Эль Ниньо – Южного колебания и декабряского колебания Тропики/Северное полушарие.

Изменчивость частоты циклонов Восточного Средиземноморья определяется в основном синхронными региональными средиземноморскими колебаниями (с положительной корреляцией), а за счет весны – синхронными Полярно-Евразийским колебанием (с положительной корреляцией) и Восточноатлантическим колебанием (с отрицательной корреляцией). При этом 10-20% дисперсии годовой и зимней частоты циклонов обусловлено весенним Тихоокеанско-Североамериканским, июльским Восточно-Северотихоокеанским и январским Западнотихоокеанским колебаниями (с отрицательной корреляцией); 5-10% дисперсии весенней частоты – вклад сентябрьского-октябрьского индекса Тихоокеанской десятилетней осцилляции (с положительной корреляцией) и летне-осеннего индекса Атлантической междесятилетней осцилляции (с отрицательной корреляцией).

С помощью анализа множественной линейной регрессии оценен совместный вклад климатических сигналов в изменчивость частоты циклонов Черноморско-Средиземноморского региона. Доля объясненной дисперсии частоты циклонов с учетом только линейных синхронных проявлений рассмотренных 15-ти климатических сигналов составляет 60-70% в зимне-весенний период и для среднегодовых значений. Эту оценку суммарного линейного вклада климатических процессов в изменчивость циклонической активности можно интерпретировать как оценку к снизу для современного климатического периода.

Благодарности

Работа выполнена в рамках темы госзадания ИПТС «Фундаментальные и прикладные исследования закономерностей и механизмов формирования региональных изменений природной среды и климата под влиянием глобальных процессов в системе океан–атмосфера», номер гос. регистрации 124013000609-2.

Список литературы

Бардин, М. (1995) Изменчивость характеристик циклоничности в средней тропосфере умеренных широт Северного полушария, *Метеорология и гидрология*, т. 11, с. 24-37.

Бардин, М., Воскресенская, Е. (2007) Тихоокеанская декадная осцилляция и европейские климатические аномалии, *Морской гидрофизический журнал*, № 4, с. 13-23.

Бардин, М., Платова, Т. (2022) Волны холода в Европейской части России: структура, циркуляционные условия и изменения сезонных статистик, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 8, № 3, с. 5-30.

Бардин, М., Платова, Т., Самохина, О. (2015) Особенности изменчивости циклонической активности в умеренных широтах Северного полушария, свя-

занные с ведущими модами атмосферной циркуляции в Атлантико-Европейском секторе, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 2, с. 14-40.

Бардин, М., Платова, Т., Самохина, О. (2019) Изменчивость антициклонической активности в умеренных широтах Северного полушария, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 3, с. 32-58.

Бардин, М., Платова, Т., Самохина, О. (2021) Долгопериодные изменения повторяемости циклонов в умеренных широтах Северного полушария, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 7, № 2, с. 57-80.

Воскресенская, Е.Н., Михайлова, Н.В. (2005) Особенности изменчивости гидрометеохарактеристик Черноморского региона под влиянием разных типов Эль-Ниньо, *Системы контроля окружающей среды*, вып. 8, с. 262-267.

Горбатенко, В.П., Тунаев, Е.Л., Пустовалов, К.Н., Волкова, М.А., Нечепуренко, О.Е. (2020) Изменения циклогенеза над Западной Сибирью в 1976-2017 гг., *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 2, с. 35-57.

Гущина, Д., Девиц, Б. (2016) Явление Эль-Ниньо и его влияние на процессы в атмосфере и океане, *Труды Государственного океанографического института*, № 217, с. 184-208.

Коваленко, О., Бардин, М., Воскресенская, Е. (2017) Изменения характеристик экстремальности температуры воздуха в Причерноморском регионе и их изменчивость в связи с крупномасштабными климатическими процессами межгодового масштаба, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 2, с. 42-62.

Кононова, Н. (2015) Изменения циркуляции атмосферы Северного полушария в XX-XXI столетиях и их последствия для климата, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 1, с. 133-162.

Кононова, Н. (2018) Типы глобальной циркуляции атмосферы: результаты мониторинга и ретроспективной оценки за 1899-2017 гг., *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 3, с. 108-123.

Лубков, А., Воскресенская, Е. (2021) Метод нейронных сетей для климатического прогнозирования водности Чернореченского водохранилища, *Системы контроля окружающей среды*, № 2, с. 16-28.

Лубков, А., Воскресенская, Е., Сухонос, О. (2022) Прогноз выпадения осадков в районе Ай-Петри на основе модели искусственной нейронной сети, *Водные ресурсы*, т. 49, № 4, с. 517-526.

Михайлова, Н.В., Воскресенская, Е.Н. (2010) Атлантико-Европейские проявления событий Эль-Ниньо разных типов, *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*, № 23, с. 34-39.

Михайлова, Н.В., Юровский, А.В. (2016) Восточноатлантическое колебание: механизм и влияние на климат Европы в зимний период, *Морской гидрофизический журнал*, № 4 (190), с. 27-37.

Нестеров, Е. (2003) О фазах североатлантического колебания, *Метеорология и гидрология*, № 1, с. 64-74.

Нестеров, Е. (2009) О восточно-атлантическом колебании циркуляции атмосферы, *Метеорология и гидрология*, № 12, с. 32-40.

Нестеров, Е.С. (2013) *Североатлантическое колебание: атмосфера и океан*, Москва, Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации, 127 с.

Нестеров, Е. (2016) О влиянии североатлантического и восточно-атлантического колебаний на формирование опасного волнения в Северной Атлантике, *Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации*, т. 362, с. 83-91.

Нестеров, Е.С. (2018) Экстремальные циклоны над морями европейской части России, *Гидрометеорологические исследования и прогнозы*, № 1, с. 97-115.

Полонский, А. (2008) Атлантическая мультидекадная осцилляция и ее проявления в Атлантико-Европейском регионе, *Морской гидрофизический журнал*, № 4, с. 69-80.

Alexandersson, H., Tuomenvirta, H., Schmith, T., Iden, K. (2000) Trends of storms in NW Europe derived from an updated pressure data set, *Clim. Res.*, vol. 14, pp. 71-73.

Alpert, P., Baldi, M., Ilani, R., Krichak, S., Price, C., Rodó, X., Saaroni, H., Ziv, B., Kishcha, P., Barkan, J., Mariotti, A., Xoplaki, E. (2006) Chapter 2. Relations between climate variability in the Mediterranean region and the tropics: ENSO, South Asian and African monsoons, hurricanes and Saharan dust, *Developments in Earth and Environmental Sciences*, in P. Lionello, R. Malanotte-Rizzoli, R. Boscolo (eds.), Elsevier, pp. 149-177.

Alpert, P., Neeman, B.U., Shay-El, Y. (1990) Climatological analysis of Mediterranean cyclones using ECMWF data, *Tellus Dyn. Meteorol. Oceanogr.*, vol. 42, no. 1, 65.

Bardin, M.Yu., Voskresenskaya, E.N. (2007) Pacific decadal oscillation and European climatic anomalies, *Phys. Oceanogr.*, vol. 17, no. 4, pp. 200-208.

Barnett, T.P. (1991) The interaction of multiple time scales in the tropical climate system, *J. Clim.*, vol. 4, no. 3, pp. 269-285.

Barnston, A.G., Livezey, R.E. (1987) Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns, *Mon. Weather Rev.*, vol. 115, no. 6, pp. 1083-1126.

Brönnimann, S., Xoplaki, E., Casty, C., Pauling, A., Luterbacher, J. (2006) ENSO influence on Europe during the last centuries, *Clim. Dyn.*, vol. 28, no. 2-3, pp. 181-197.

Brönnimann, S. (2007) Impact of El Niño – Southern Oscillation on European climate, *Rev. Geophys.*, vol. 45, no. 3, 2006RG000199.

Campins, J., Genovés, A., Picornell, M.A., Jansà, A. (2011) Climatology of Mediterranean cyclones using the ERA-40 dataset, *Int. J. Climatol.*, vol. 31, no. 11, pp. 1596-1614.

Conte, M., Giuffrida, A., Tedesco, S. (1989) The Mediterranean oscillation: impact on precipitation and hydrology in Italy, *Conference on climate and water, Rome, Suom. akat. julk.*, pp. 121-137.

Ding, S., Chen, W., Feng, J., Graf, H.-F. (2017) Combined impacts of PDO and two types of La Niña on climate anomalies in Europe, *J. Clim.*, vol. 30, no. 9, pp. 3253-3278.

Dünkeloh, A., Jacobeit, J. (2003) Circulation dynamics of Mediterranean precipitation variability 1948-98, *Int. J. Climatol.*, vol. 23, no. 15, pp. 1843-1866.

Eichler, T.P., Gaggini, N., Pan, Z. (2013) Impacts of global warming on Northern Hemisphere winter storm tracks in the CMIP5 model suite, *J. Geophys. Res. Atmospheres*, vol. 118, no. 10, pp. 3919-3932.

Enfield, D.B., Mestas-Nuñez, A.M. (1999) Multiscale variabilities in global sea surface temperatures and their relationships with tropospheric climate patterns, *J. Clim.*, vol. 12, no. 9, pp. 2719-2733.

Flaounas, E., Davolio, S., Raveh-Rubin, S., Pantillon, F., Miglietta, M.M., Gaertner, M.A., Hatzaki, M., Homar, V., Khodayar, S., Korres, G., Kotroni, V., Kushta, J., Reale, M., Ricard, D. (2022) Mediterranean cyclones: current knowledge and open questions on dynamics, prediction, climatology and impacts. *Weather Clim. Dyn.*, vol. 3, no. 1, pp. 173-208.

Fraedrich, K., Müller, K. (1992) Climate anomalies in Europe associated with ENSO extremes, *Int. J. Climatol.*, vol. 12, no. 1, pp. 25-31.

Harvey, B.J., Cook, P., Shaffrey, L.C., Schiemann, R. (2020) The response of the Northern Hemisphere storm tracks and jet streams to climate change in the CMIP3, CMIP5, and CMIP6 climate models, *J. Geophys. Res. Atmospheres*, vol. 125, no. 23, e2020JD032701.

Herceg Bulić, I., Kucharski, F. (2012) Delayed ENSO impact on spring precipitation over North/Atlantic European region, *Clim. Dyn.*, vol. 38, no. 11-12, pp. 2593-2612.

Hlinka, J., Hartman, D., Vejmelka, M., Novotná, D., Paluš, M. (2014) Non-linear dependence and teleconnections in climate data: sources, relevance, nonstationarity, *Clim. Dyn.*, vol. 42, no. 7-8, pp. 1873-1886.

Hurrell, J.W., Deser, C. (2010) North Atlantic climate variability: the role of the North Atlantic Oscillation, *J. Mar. Syst.*, vol. 79, no. 3-4, pp. 231-244.

Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J. (2018) The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project, *Renewable energy*, Routledge, 1st edition, pp. 146-194.

Kerr, R.A. (2000) A North Atlantic climate pacemaker for the centuries, *Science*, vol. 288, no. 5473, pp. 1984-1985.

Kerr, R.A. (2005) Atlantic climate pacemaker for millennia past, decades hence? *Science*, vol. 309, no. 5731, pp. 41-43.

King, M.P., Keenlyside, N., Li, C. (2023) ENSO teleconnections in terms of non-NAO and NAO atmospheric variability, *Clim. Dyn.*, vol. 61, no. 5-6, pp. 2717-2733.

Kucharski, F., Parvin, A., Rodriguez-Fonseca, B., Farneti, R., Martin-Rey, M., Polo, I., Mohino, E., Losada, T., Mechoso, C.R. (2016) The teleconnection of the tropical Atlantic to Indo-Pacific sea surface temperatures on inter-annual to centennial time scales: a review of recent findings, *Atmosphere*, vol. 7, no. 2, 29.

Kumar, A., Hoerling, M.P. (2003) The nature and causes for the delayed atmospheric response to El Niño, *J. of Climate*, vol. 9, no.16, pp. 1391-1403.

Lionello, P., Trigo, I.F., Gil, V., Liberato, M.L.R., Nissen, K.M., Pinto, J.G., Raible, C.C., Reale, M., Tanzarella, A., Trigo, R.M., Ulbrich, S., Ulbrich, U. (2016) Objective climatology of cyclones in the Mediterranean region: a consensus view among methods with different system identification and tracking criteria, *Tellus Dyn. Meteorol. Oceanogr.*, vol. 68, no. 1, 29391.

Maheras, P., Flocas, H.A., Patrikas, I., Anagnostopoulou, Chr. (2001) A 40 year objective climatology of surface cyclones in the Mediterranean region: spatial and temporal distribution, *Int. J. Climatol.*, vol. 21, no. 1, pp. 109-130.

Maheras, P., Kutiel, H. (1999) Spatial and temporal variations in the temperature regime in the Mediterranean and their relationship with circulation during the last century, *Int. J. Climatol.*, vol. 19, no. 7, pp. 745-764.

Maheras, P., Xoplaki, E., Kutiel, H. (1999) Wet and dry monthly anomalies across the Mediterranean basin and their relationship with circulation, 1860-1990, *Theor. Appl. Climatol.*, vol. 64, pp. 189-199.

Mantua, N.J., Hare, S.R. (2002) The Pacific decadal oscillation, *J. Oceanogr.*, vol. 58, pp. 35-44.

Mariotti, A., Zeng, N., Lau, K.-M. (2002) Euro-Mediterranean rainfall and ENSO – a seasonally varying relationship, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 29, no. 12, 1621.

Martin-Vide, J., Lopez-Bustins, J. (2006) The western Mediterranean oscillation and rainfall in the Iberian Peninsula, *Int. J. Climatol.*, *J. R. Meteorol. Soc.*, vol. 26, no. 11, pp. 1455-1475.

Maslova, V.N., Voskresenskaya, E.N., Lubkov, A.S., Yurovsky, A.V., Zhuravskiy, V.Y., Evstigneev, V.P. (2020) Intense cyclones in the Black Sea region: change, variability, predictability and manifestations in the storm activity, *Sustainability*, vol. 12, no. 11, 4468.

Maslova, V.N., Voskresenskaya, E.N., Lubkov, A.S., Yurovsky, A.V. (2021) Temporal variability and predictability of intense cyclones in the Western and Eastern Mediterranean, *Atmosphere*, vol. 12, no. 9, 1218.

Maslova, V.N., Voskresenskaya, E.N., Lubkov, A.S., Zhuravskiy, V.Yu. (2022) Teleconnections in cyclonic activity in the Atlantic-European region, *Proceedings of the International Research Conference GREG 2022: Greenhouse Gas Emissions Today and in the Geological Past: Sources, impact on climate and environment*, Kazan, Kazan University, p. 32.

Maslova, V.N., Voskresenskaya, E.N., Lubkov, A.S. (2017) Multidecadal change of winter cyclonic activity in the Mediterranean associated with AMO and PDO, *Terr. Atmospheric Ocean. Sci.*, vol. 28, no. 6, pp. 965-977.

Maslova, V., Voskresenskaya, E., Bardin, M. (2010) Variability of the cyclone activity in the Mediterranean-Black Sea region, *J. Environ. Prot. Ecol.*, vol. 11, no. 4, pp. 1366-1372.

McCabe, G.J., Clark, M.P., Serreze, M.C. (2001) Trends in Northern hemisphere surface cyclone frequency and intensity, *J. Clim.*, vol. 14, no. 12, pp. 2763-2768.

Nakamura, T., Hara, M., Oshika, M., Tachibana, Y. (2015) Impact of the winter North Atlantic Oscillation (NAO) on the Western Pacific (WP) pattern in the following winter through Arctic sea ice and ENSO. Part II: multi-model evaluation of the NAO-ENSO linkage, *Clim. Dyn.*, vol. 45, no. 11-12, pp. 3547-3562.

Neu, U., Akperov, M.G., Bellenbaum, N., Benestad, R., Blender, R., Caballero, R., Coccozza, A., Dacre, H.F., Feng, Y., Fraedrich, K., Grieger, J., Gulev, S., Hanley, J., Hewson, T., Inatsu, M., Keay, K., Kew, S.F., Kindem, I., Leckebusch, G.C., Liberato, M.L.R., Lionello, P., Mokhov, I.I., Pinto, J.G., Raible, C.C., Reale, M., Rudeva, I., Schuster, M., Simmonds, I., Sinclair, M., Sprenger, M., Tilinina, N.D., Trigo, I.F., Ulbrich, S., Ulbrich, U., Wang, X.L., Wernli, H. (2013) IMILAST: a community effort to intercompare extratropical cyclone detection and tracking algorithms, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, vol. 94, no. 4, pp. 529-547.

Nissen, K.M., Leckebusch, G.C., Pinto, J.G., Renggli, D., Ulbrich, S., Ulbrich, U. (2010) Cyclones causing wind storms in the Mediterranean: characteristics, trends and links to large-scale patterns, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, vol. 10, no. 7, pp. 1379-1391.

Peings, Y., Magnusdottir, G. (2014) Forcing of the wintertime atmospheric circulation by the multidecadal fluctuations of the North Atlantic ocean, *Environ. Res. Lett.*, vol. 9, no. 3, 034018.

Polonskii, A.B. (2008) Atlantic multidecadal oscillation and its manifestations in the Atlantic-European region, *Phys. Oceanogr.*, vol. 18, no. 4, pp. 227-236.

Polonsky, A.B., Basharin, D.V., Voskresenskaya, E.N., Worley, S.J., Yurovsky, A.V. (2004) Relationship between the North Atlantic oscillation, Euro-

Asian climate anomalies and Pacific variability, *Pac. Oceanogr.*, vol. 2, no. 1-2, p. 52-66.

Polonsky, A., Torbinsky, A. (2021) The IOD–ENSO interaction: The role of the Indian Ocean current's system, *Atmosphere*, vol. 12, no. 12, 1662.

Rogers, J.C. (1990) Patterns of low-frequency monthly sea level pressure variability (1899-1986) and associated wave cyclone frequencies, *J. Clim.*, vol. 3, no. 12, pp. 1364-1379.

Thompson, D.W., Wallace, J.M. (2000) Annular modes in the extratropical circulation. Part I: Month-to-month variability, *J. Clim.*, vol. 13, no. 5, pp. 1000-1016.

Timmermann, A. (2003) Decadal ENSO amplitude modulations: A nonlinear paradigm, *Glob. Planet. Change*, vol. 37, no. 1-2, pp. 135-156.

Trenberth, K.E., Hurrell, J.W. (1994) Decadal atmosphere-ocean variations in the Pacific, *Clim. Dyn.*, vol. 9, pp. 303-319.

Trigo, I.F., Bigg, G.R., Davies, T.D. (2002) Climatology of cyclogenesis mechanisms in the Mediterranean, *Mon. Weather Rev.*, vol. 130, no. 3, pp. 549-569.

Trigo, I.F., Davies, T.D., Bigg, G.R. (1999) Objective climatology of cyclones in the Mediterranean region, *J. Clim.*, vol. 12, no. 6, pp. 1685-1696.

Voskresenskaya, E., Marchukova, O., Maslova, V., Lubkov, A. (2018) Interannual climate anomalies in the Atlantic-European region associated with La-Nina types, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Kazan, IOP Publishing, 012043.

Voskresenskaya, E., Maslova, V. (2012) Joint manifestations of PDO (Pacific Decadal Oscillation) and negative AMO (Atlantic Multidecadal Oscillation) phases in winter cyclonic activity, *J. Environ. Sci. Eng.*, vol. 1, no. 12A, 1325.

Voskresenskaya, E.N., Maslova, V.N., Lubkov, A.S., Zhuravskiy, V.Y. (2022) Present and future changes in winter cyclonic activity in the Mediterranean–Black Sea region in the 21st century based on an ensemble of CMIP6 models, *Atmosphere*, vol. 13, no. 10, 1573.

Voskresenskaya, E., Polonskii, A. (1995) Trends and interannual variability of parameters of large-scale air-sea interaction in the North Atlantic, *Oceanogr. Lit. Rev.*, vol. 12, no. 42, 1057.

Voskresenskaya, E., Polonsky, A. (1993) Air pressure fluctuations in the North Atlantic and their relationship with El Nino-southern oscillations, *Phys. Oceanogr.*, vol. 4, no. 4, pp. 275-282.

Wallace, J.M. (2000) North Atlantic Oscillation/annular mode: Two paradigms – one phenomenon, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, vol. 126, no. 564, pp. 791-805.

Wallace, J.M., Gutzler, D.S. (1981) Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter, *Mon. Weather Rev.*, vol. 109, no. 4, pp. 784-812.

Zheleznova, I., Gushchina, D.Y. (2016) Circulation anomalies in the atmospheric centers of action during the Eastern Pacific and Central Pacific El Niño, *Russ. Meteorol. Hydrol.*, vol. 41, pp. 760-769.

References

Bardin, M. (1995) *Izmenchivost' kharakteristik tsiklonichnosti v sredney troposfere umerennykh shirot Severnogo polushariya* [Variability of cyclonicity characteristics in the middle troposphere of the temperate latitudes of the Northern Hemisphere], *Meteorologiya i gidrologiya*, vol. 11, pp. 24-37.

Bardin, M., Voskresenskaya, E. (2007) *Tikhookeanskaya dekadnaya ostsillyatsiya i yevropeyskiye klimaticheskiye anomalii* [Pacific decadal oscillation and European climatic anomalies], *Morskoy gidrofizicheskiy zhurnal*, no. 4, pp. 13-23.

Bardin, M., Platova, T. (2022) *Volny kholoda v Yevropeyskoy chasti Rossii: struktura, tsirkulyatsionnyye usloviya i izmeneniya sezonnykh statistik* [Cold waves in the European part of Russia: structure, circulation conditions and changes in seasonal statistics], *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, vol. 8, no. 3, pp. 5-30.

Bardin, M., Platova, T., Samokhina, O. (2015) *Osobennosti izmenchivosti tsiklonicheskoy aktivnosti v umerennykh shirotakh Severnogo polushariya, svyazannyye s vedushchimi modami atmosferno tsirkulyatsii v Atlantiko-Yevropeyskom sektore* [Features of the variability of cyclonic activity in the temperate latitudes of the Northern Hemisphere associated with the leading modes of atmospheric circulation in the Atlantic-European sector], *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, vol. 2, pp. 14-40.

Bardin, M., Platova, T., Samokhina, O. (2019) *Izmenchivost' antitsiklonicheskoy aktivnosti v umerennykh shirotakh Severnogo polushariya* [Variability of anticyclonic activity in temperate latitudes of the Northern Hemisphere], *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, vol. 3, pp. 32-58.

Bardin, M., Platova, T., Samokhina, O. (2021) *Dolgoperiodnyye izmeneniya povtoryayemosti tsiklonov v umerennykh shirotakh Severnogo polushariya* [Long-period changes in the recurrence of cyclones in the temperate latitudes of the Northern Hemisphere], *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, vol. 7, no. 2, pp. 57-80.

Voskresenskaya, E.N., Mikhailova, N.V. (2005) *Osobennosti izmenchivosti gidrometeokharakteristik Chernomorskogo regiona pod vliyaniem raznykh tipov El'-Nin'o* [Features of the variability of hydrometeorological characteristics of the Black Sea region under the influence of different types of El Nino], *Sistemy kontrolya okruzhayushchey sredy* [Environmental control systems], vol. 8, pp. 262-267.

Gorbatenko, V.P., Tunaev, E.L., Pustovalov, K.N., Volkova, M.A., Nechepurenko, O.E. (2020) *Izmeneniya tsiklogeneza nad Zapadnoy Sibir'yu v*

1976-2017 гг. [Changes in cyclogenesis over Western Siberia in 1976-2017], *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, vol. 2, pp. 35-57.

Gushchina, D., Dewitt, B. (2016) Yavleniye El'-Nin'o i yego vliyaniye na protsessy v atmosfere i okeane [The El Nino phenomenon and its influence on processes in the atmosphere and ocean], *Trudy Gosudarstvennogo okeanograficheskogo instituta* [Proceedings of the State Oceanographic Institute], no. 217, pp. 184-208.

Kovalenko, O., Bardin, M., Voskresenskaya, E. (2017) Izmeneniya kharakteristik ekstremal'nosti temperatury vozdukha v Prichernomorskom regione i ikh izmenchivost' v svyazi s krupnomasshtabnymi klimaticheskimi protsessami mezhdodovogo masshtaba [Changes in the characteristics of air temperature extremes in the Black Sea region and their variability in connection with large-scale climatic processes on an interannual scale], *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, vol. 2, pp. 42-62.

Kononova, N. (2015) Izmeneniya tsirkulyatsii atmosfery severnogo polushariya v XX-XXI stolyatiyakh i ikh posledstviya dlya klimata [Changes in the circulation of the atmosphere of the northern hemisphere in the XX-XXI centuries and their consequences for the climate], *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, vol. 1, pp. 133-162.

Kononova, N. (2018) Tipy global'noy tsirkulyatsii atmosfery: rezul'taty monitoringa i retrospektivnoy otsenki za 1899-2017 gg. [Types of global atmospheric circulation: results of monitoring and retrospective assessment for 1899-2017], *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, vol. 3, pp. 108-123.

Lubkov, A., Voskresenskaya, E. (2021) Metod neyronnykh setey dlya klimaticheskogo prognozirovaniya vodnosti Chernorechenskogo vodokhranilishcha [Neural network method for climate prediction of the water content of the Chernorechensk reservoir], *Sistemy kontrolya okruzhayushchey sredy* [Environmental Control Systems], no. 2, pp. 16-28.

Lubkov, A., Voskresenskaya, E., Sukhonos, O. (2022) Prognoz vypadeniya osadkov v rayone Ay-Petri na osnove modeli iskusstvennoy neyronnoy seti [Forecast of precipitation in the Ai-Petri area based on an artificial neural network model], *Vodnyye resursy*, vol. 49, no. 4, pp. 517-526.

Mikhailova, N.V., Voskresenskaya, E.N. (2010) Atlantiko-Yevropeyskiye proyavleniya sobytiy El'-Nin'o raznykh tipov [Atlantic-European manifestations of El Nino events of various types], *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoy i shel'fovoy zon i kompleksnoye ispol'zovaniye resursov shel'fa* [Environmental safety of coastal and shelf zones and integrated use of shelf resources], no. 23, pp. 34-39.

Mikhailova, N.V., Yurovsky, A.V. (2016) Vostochnoatlanticheskoye kolebaniye: mekhanizm i vliyaniye na klimat Yevropy v zimniy period [East Atlantic Oscillation: Mechanism and influence on the climate of Europe in winter], *Morskoy gidrofizicheskiy zhurnal*, no. 4 (190), pp. 27-37.

Nesterov, E. (2003) O fazakh severoatlanticheskogo kolebaniya [On the phases of the North Atlantic oscillation], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 1, pp. 64-74.

Nesterov, E. (2009) O vostochno-atlanticheskom kolebanii tsirkulyatsii atmosfery [On the East Atlantic fluctuation of atmospheric circulation], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 12, pp. 32-40.

Nesterov, E.S. (2013) *Severoatlanticheskoye kolebaniye: atmosfera i okean* [The North Atlantic Oscillation: atmosphere and ocean], Hydrometeorological Research Center of the Russian Federation, Moscow, Russia, 127 p.

Nesterov, E. (2016) O vliyaniy severoatlanticheskogo i vostochno-atlanticheskogo kolebaniy na formirovaniye opasnogo volneniya v Severnoy Atlantike [On the influence of North Atlantic and East Atlantic fluctuations on the formation of dangerous waves in the North Atlantic], *Trudy Gidrometeorologicheskogo nauchno-issledovatel'skogo tsentra Rossiyskoy Federatsii* [Proceedings of the Hydrometeorological Research Center of the Russian Federation], vol. 362, pp. 83-91.

Nesterov, E.S. (2018) Ekstremal'nyye tsyklony nad moryami yevropeyskoy chasti Rossii [Extreme cyclones over the seas of the European part of Russia], *Gidrometeorologicheskiye issledovaniya i prognozy* [Hydrometeorological studies and Forecasts], no. 1, pp. 97-115.

Polonsky, A. (2008) Atlanticheskaya mul'tidekadnaya ostsillyatsiya i yeye proyavleniya v Atlantiko-Yevropeyskom regione [Atlantic multidecadal oscillation and its manifestations in the Atlantic-European region], *Morskoy gidrofizicheskii zhurnal*, no. 4, pp. 69-80.

Alexandersson, H., Tuomenvirta, H., Schmith, T., Iden, K. (2000) Trends of storms in NW Europe derived from an updated pressure data set, *Clim. Res.*, vol. 14, pp. 71-73.

Alpert, P., Baldi, M., Ilani, R., Krichak, S., Price, C., Rodó, X., Saaroni, H., Ziv, B., Kishcha, P., Barkan, J., Mariotti, A., Xoplaki, E. (2006) Chapter 2. Relations between climate variability in the Mediterranean region and the tropics: ENSO, South Asian and African monsoons, hurricanes and Saharan dust, *Developments in Earth and Environmental Sciences*, in P. Lionello, R. Malanotte-Rizzoli, R. Boscolo (eds.), Elsevier, pp. 149-177.

Alpert, P., Neeman, B.U., Shay-El, Y. (1990) Climatological analysis of Mediterranean cyclones using ECMWF data, *Tellus Dyn. Meteorol. Oceanogr.*, vol. 42, no. 1, 65.

Bardin, M.Yu., Voskresenskaya, E.N. (2007) Pacific decadal oscillation and European climatic anomalies, *Phys. Oceanogr.*, vol. 17, no. 4, pp. 200-208.

Barnett, T.P. (1991) The interaction of multiple time scales in the tropical climate system, *J. Clim.*, vol. 4, no. 3, pp. 269-285.

Barnston, A.G., Livezey, R.E. (1987) Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns, *Mon. Weather Rev.*, vol. 115, no. 6, pp. 1083-1126.

Brönnimann, S., Xoplaki, E., Casty, C., Pauling, A., Luterbacher, J. (2006) ENSO influence on Europe during the last centuries, *Clim. Dyn.*, vol. 28, no. 2-3, pp. 181-197.

Brönnimann, S. (2007) Impact of El Niño – Southern Oscillation on European climate, *Rev. Geophys.*, vol. 45, no. 3, 2006RG000199.

Campins, J., Genovés, A., Picornell, M.A., Jansà, A. (2011) Climatology of Mediterranean cyclones using the ERA-40 dataset, *Int. J. Climatol.*, vol. 31, no. 11, pp. 1596-1614.

Conte, M., Giuffrida, A., Tedesco, S. (1989) The Mediterranean oscillation: impact on precipitation and hydrology in Italy, *Conference on climate and water, Rome, Suom. akat. julk.*, pp. 121-137.

Ding, S., Chen, W., Feng, J., Graf, H.-F. (2017) Combined impacts of PDO and two types of La Niña on climate anomalies in Europe, *J. Clim.*, vol. 30, no. 9, pp. 3253-3278.

Dükeloh, A., Jacobeit, J. (2003) Circulation dynamics of Mediterranean precipitation variability 1948-98, *Int. J. Climatol.*, vol. 23, no. 15, pp. 1843-1866.

Eichler, T.P., Gaggini, N., Pan, Z. (2013) Impacts of global warming on Northern Hemisphere winter storm tracks in the CMIP5 model suite, *J. Geophys. Res. Atmospheres*, vol. 118, no. 10, pp. 3919-3932.

Enfield, D.B., Mestas-Nuñez, A.M. (1999) Multiscale variabilities in global sea surface temperatures and their relationships with tropospheric climate patterns, *J. Clim.*, vol. 12, no. 9, pp. 2719-2733.

Flaounas, E., Davolio, S., Raveh-Rubin, S., Pantillon, F., Miglietta, M.M., Gaertner, M.A., Hatzaki, M., Homar, V., Khodayar, S., Korres, G., Kotroni, V., Kushta, J., Reale, M., Ricard, D. (2022) Mediterranean cyclones: current knowledge and open questions on dynamics, prediction, climatology and impacts. *Weather Clim. Dyn.*, vol. 3, no. 1, pp. 173-208.

Fraedrich, K., Müller, K. (1992) Climate anomalies in Europe associated with ENSO extremes, *Int. J. Climatol.*, vol. 12, no. 1, pp. 25-31.

Harvey, B.J., Cook, P., Shaffrey, L.C., Schiemann, R. (2020) The response of the Northern Hemisphere storm tracks and jet streams to climate change in the CMIP3, CMIP5, and CMIP6 climate models, *J. Geophys. Res. Atmospheres*, vol. 125, no. 23, e2020JD032701.

Herceg Bulić, I., Kucharski, F. (2012) Delayed ENSO impact on spring precipitation over North/Atlantic European region, *Clim. Dyn.*, vol. 38, no. 11-12, pp. 2593-2612.

Hlinka, J., Hartman, D., Vejmelka, M., Novotná, D., Paluš, M. (2014) Non-linear dependence and teleconnections in climate data: sources, relevance, nonstationarity, *Clim. Dyn.*, vol. 42, no. 7-8, pp. 1873-1886.

Hurrell, J.W., Deser, C. (2010) North Atlantic climate variability: the role of the North Atlantic Oscillation, *J. Mar. Syst.*, vol. 79, no. 3-4, pp. 231-244.

Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J. (2018) The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project, *Renewable energy*, Routledge, 1st edition, pp. 146-194.

Kerr, R.A. (2000) A North Atlantic climate pacemaker for the centuries, *Science*, vol. 288, no. 5473, pp. 1984-1985.

Kerr, R.A. (2005) Atlantic climate pacemaker for millennia past, decades hence? *Science*, vol. 309, no. 5731, pp. 41-43.

King, M.P., Keenlyside, N., Li, C. (2023) ENSO teleconnections in terms of non-NAO and NAO atmospheric variability, *Clim. Dyn.*, vol. 61, no. 5-6, pp. 2717-2733.

Kucharski, F., Parvin, A., Rodriguez-Fonseca, B., Farneti, R., Martin-Rey, M., Polo, I., Mohino, E., Losada, T., Mechoso, C.R. (2016) The teleconnection of the tropical Atlantic to Indo-Pacific sea surface temperatures on inter-annual to centennial time scales: a review of recent findings, *Atmosphere*, vol. 7, no. 2, 29.

Kumar, A., Hoerling, M.P. (2003) The nature and causes for the delayed atmospheric response to El Niño, *J. of Climate*, vol. 9, no.16, pp. 1391-1403.

Lionello, P., Trigo, I.F., Gil, V., Liberato, M.L.R., Nissen, K.M., Pinto, J.G., Raible, C.C., Reale, M., Tanzarella, A., Trigo, R.M., Ulbrich, S., Ulbrich, U. (2016) Objective climatology of cyclones in the Mediterranean region: a consensus view among methods with different system identification and tracking criteria, *Tellus Dyn. Meteorol. Oceanogr.*, vol. 68, no. 1, 29391.

Maheras, P., Flocas, H.A., Patrikas, I., Anagnostopoulou, Chr. (2001) A 40 year objective climatology of surface cyclones in the Mediterranean region: spatial and temporal distribution, *Int. J. Climatol.*, vol. 21, no. 1, pp. 109-130.

Maheras, P., Kutiel, H. (1999) Spatial and temporal variations in the temperature regime in the Mediterranean and their relationship with circulation during the last century, *Int. J. Climatol.*, vol. 19, no. 7, pp. 745-764.

Maheras, P., Xoplaki, E., Kutiel, H. (1999) Wet and dry monthly anomalies across the Mediterranean basin and their relationship with circulation, 1860-1990, *Theor. Appl. Climatol.*, vol. 64, pp. 189-199.

Mantua, N.J., Hare, S.R. (2002) The Pacific decadal oscillation, *J. Oceanogr.*, vol. 58, pp. 35-44.

Mariotti, A., Zeng, N., Lau, K.-M. (2002) Euro-Mediterranean rainfall and ENSO – a seasonally varying relationship, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 29, no. 12, 1621.

Martin-Vide, J., Lopez-Bustins, J. (2006) The western Mediterranean oscillation and rainfall in the Iberian Peninsula, *Int. J. Climatol., J. R. Meteorol. Soc.*, vol. 26, no. 11, pp. 1455-1475.

Maslova, V.N., Voskresenskaya, E.N., Lubkov, A.S., Yurovsky, A.V., Zhuravskiy, V.Y., Evstigneev, V.P. (2020) Intense cyclones in the Black Sea region: change, variability, predictability and manifestations in the storm activity, *Sustainability*, vol. 12, no. 11, 4468.

Maslova, V.N., Voskresenskaya, E.N., Lubkov, A.S., Yurovsky, A.V. (2021) Temporal variability and predictability of intense cyclones in the Western and Eastern Mediterranean, *Atmosphere*, vol. 12, no. 9, 1218.

Maslova, V.N., Voskresenskaya, E.N., Lubkov, A.S., Zhuravskiy, V.Yu. (2022) Teleconnections in cyclonic activity in the Atlantic-European region, *Proceedings of the International Research Conference GREG 2022: Greenhouse Gas Emissions Today and in the Geological Past: Sources, impact on climate and environment*, Kazan, Kazan University, p. 32.

Maslova, V.N., Voskresenskaya, E.N., Lubkov, A.S. (2017) Multidecadal change of winter cyclonic activity in the Mediterranean associated with AMO and PDO, *Terr. Atmospheric Ocean. Sci.*, vol. 28, no. 6, pp. 965-977.

Maslova, V., Voskresenskaya, E., Bardin, M. (2010) Variability of the cyclone activity in the Mediterranean-Black Sea region, *J. Environ. Prot. Ecol.*, vol. 11, no. 4, pp. 1366-1372.

McCabe, G.J., Clark, M.P., Serreze, M.C. (2001) Trends in Northern hemisphere surface cyclone frequency and intensity, *J. Clim.*, vol. 14, no. 12, pp. 2763-2768.

Nakamura, T., Hara, M., Oshika, M., Tachibana, Y. (2015) Impact of the winter North Atlantic Oscillation (NAO) on the Western Pacific (WP) pattern in the following winter through Arctic sea ice and ENSO. Part II: multi-model evaluation of the NAO-ENSO linkage, *Clim. Dyn.*, vol. 45, no. 11-12, pp. 3547-3562.

Neu, U., Akperov, M.G., Bellenbaum, N., Benestad, R., Blender, R., Caballero, R., Cocozza, A., Dacre, H.F., Feng, Y., Fraedrich, K., Grieger, J., Gulev, S., Hanley, J., Hewson, T., Inatsu, M., Keay, K., Kew, S.F., Kindem, I., Leckebusch, G.C., Liberato, M.L.R., Lionello, P., Mokhov, I.I., Pinto, J.G., Raible, C.C., Reale, M., Rudeva, I., Schuster, M., Simmonds, I., Sinclair, M., Sprenger, M., Tilinina, N.D., Trigo, I.F., Ulbrich, S., Ulbrich, U., Wang, X.L., Wernli, H. (2013) IMILAST: a community effort to intercompare extratropical cyclone detection and tracking algorithms, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, vol. 94, no. 4, pp. 529-547.

Nissen, K.M., Leckebusch, G.C., Pinto, J.G., Renggli, D., Ulbrich, S., Ulbrich, U. (2010) Cyclones causing wind storms in the Mediterranean: characteristics, trends and links to large-scale patterns, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, vol. 10, no. 7, pp. 1379-1391.

Peings, Y., Magnusdottir, G. (2014) Forcing of the wintertime atmospheric circulation by the multidecadal fluctuations of the North Atlantic ocean, *Environ. Res. Lett.*, vol. 9, no. 3, 034018.

Polonskii, A.B. (2008) Atlantic multidecadal oscillation and its manifestations in the Atlantic-European region, *Phys. Oceanogr.*, vol. 18, no. 4, pp. 227-236.

Polonsky, A.B., Basharin, D.V., Voskresenskaya, E.N., Worley, S.J., Yurovsky, A.V. (2004) Relationship between the North Atlantic oscillation, Euro-Asian climate anomalies and Pacific variability, *Pac. Oceanogr.*, vol. 2, no. 1-2, p. 52-66.

Polonsky, A., Torbinsky, A. (2021) The IOD–ENSO interaction: The role of the Indian Ocean current’s system, *Atmosphere*, vol. 12, no. 12, 1662.

Rogers, J.C. (1990) Patterns of low-frequency monthly sea level pressure variability (1899-1986) and associated wave cyclone frequencies, *J. Clim.*, vol. 3, no. 12, pp. 1364-1379.

Thompson, D.W., Wallace, J.M. (2000) Annular modes in the extratropical circulation. Part I: Month-to-month variability, *J. Clim.*, vol. 13, no. 5, pp. 1000-1016.

Timmermann, A. (2003) Decadal ENSO amplitude modulations: A nonlinear paradigm, *Glob. Planet. Change*, vol. 37, no. 1-2, pp. 135-156.

Trenberth, K.E., Hurrell, J.W. (1994) Decadal atmosphere-ocean variations in the Pacific, *Clim. Dyn.*, vol. 9, pp. 303-319.

Trigo, I.F., Bigg, G.R., Davies, T.D. (2002) Climatology of cyclogenesis mechanisms in the Mediterranean, *Mon. Weather Rev.*, vol. 130, no. 3, pp. 549-569.

Trigo, I.F., Davies, T.D., Bigg, G.R. (1999) Objective climatology of cyclones in the Mediterranean region, *J. Clim.*, vol. 12, no. 6, pp. 1685-1696.

Voskresenskaya, E., Marchukova, O., Maslova, V., Lubkov, A. (2018) Interannual climate anomalies in the Atlantic-European region associated with La-Nina types, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Kazan, IOP Publishing, 012043.

Voskresenskaya, E., Maslova, V. (2012) Joint manifestations of PDO (Pacific Decadal Oscillation) and negative AMO (Atlantic Multidecadal Oscillation) phases in winter cyclonic activity, *J. Environ. Sci. Eng.*, vol. 1, no. 12A, 1325.

Voskresenskaya, E.N., Maslova, V.N., Lubkov, A.S., Zhuravskiy, V.Y. (2022) Present and future changes in winter cyclonic activity in the Mediterranean–Black Sea region in the 21st century based on an ensemble of CMIP6 models, *Atmosphere*, vol. 13, no. 10, 1573.

Voskresenskaya, E., Polonskii, A. (1995) Trends and interannual variability of parameters of large-scale air-sea interaction in the North Atlantic, *Oceanogr. Lit. Rev.*, vol. 12, no. 42, 1057.

Voskresenskaya, E., Polonsky, A. (1993) Air pressure fluctuations in the North Atlantic and their relationship with El Nino-southern oscillations, *Phys. Oceanogr.*, vol. 4, no. 4, pp. 275-282.

Wallace, J.M. (2000) North Atlantic Oscillation/annular mode: Two paradigms – one phenomenon, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, vol. 126, no. 564, pp. 791-805.

Wallace, J.M., Gutzler, D.S. (1981) Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter, *Mon. Weather Rev.*, vol. 109, no. 4, pp. 784-812.

Zheleznova, I., Gushchina, D.Y. (2016) Circulation anomalies in the atmospheric centers of action during the Eastern Pacific and Central Pacific El Niño, *Russ. Meteorol. Hydrol.*, vol. 41, pp. 760-769.

Статья поступила в редакцию (Received): 21.10.2024.

Статья доработана после рецензирования (Revised): 10.11.2024.

Принята к публикации (Accepted): 13.12.2024.

Для цитирования / For citation:

Маслова, В.Н., Воскресенская, Е.Н. (2025) Детерминированность временной изменчивости повторяемости циклонов в Черноморско-Средиземноморском регионе, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 11, № 1, с. 75-114, doi:10.21513/2410-8758-2025-1-75-114.

Maslova, V.N., Voskresenskaya, E.N. (2025) Determinacy of temporal variability of cyclone frequency in the Black Sea-Mediterranean region, *Fundamental and Applied Climatology*, vol. 11, no. 1, pp. 75-114, doi:10.21513/2410-8758-2025-1-75-114.