

ГОДОВОЙ ХОД И СЕЗОННЫЕ ТРЕНДЫ ПАРАМЕТРОВ ЦИКЛОНОВ В ЧЕРНОМОРСКО-СРЕДИЗЕМНОМОРСКОМ РЕГИОНЕ В 1951 – 2017 гг.

В.Н. Маслова¹, Е.Н. Воскресенская¹, А.В. Юровский^{1,2}, М.Ю. Бардин^{3,4}

¹ Институт природно-технических систем, РФ, г. Севастополь, ул. Ленина, 28

E-mail: veronika_maslova@mail.ru

² Морской гидрофизический институт РАН, РФ, г. Севастополь, ул. Капитанская, 2

³ Институт географии РАН, РФ, г. Москва, Старомонетный пер., 29

⁴ Институт глобального климата и экологии им. академика Ю.А. Израэля,
РФ, г. Москва, ул. Глебовская, 20Б

На основе ежедневных четырёхсрочных данных высоты геопотенциальной поверхности 1000 гПа реанализа NCEP / NCAR и методики М.Ю. Бардина получены уточненные оценки параметров циклонов (повторяемость, глубина, площадь и интенсивность) для Черного моря, запада и востока Средиземного моря за период 1951–2017 гг. Рассмотрен годовой ход и сезонные величины параметров циклонов в Черноморско-Средиземноморском регионе, описаны общие и специфические черты, присущие каждому из регионов. Показаны различия между регионами в амплитуде годового хода повторяемости циклонов, а также месяцев наступления максимума и минимума величин параметров циклонов. Проведена оценка коэффициентов линейных трендов сезонных и годовых параметров циклонов в каждом из изучаемых регионов.

Ключевые слова: количество дней с циклонами, частота, статистические характеристики, климатический режим, климатические тенденции, оценки значимости.

Поступила в редакцию: 04.10.2019.

Введение. Влияние глобальных процессов на региональный режим и аномалии природной среды остается в числе приоритетных климатических направлений в связи с пониманием важности установления закономерностей тенденций и изменчивости среды для долгосрочного планирования экономического развития [1]. Природные аномалии в средних широтах в значительной степени обусловлены циклонической деятельностью, т.е. прохождением связанных систем циклонов и антициклонов [2]. Причем, для интерпретации изменения природно-климатического режима, а также его аномалий, в особенности таких параметров как фронтальные осадки, скорость и направление ветра, чаще привлекают соответствующие изменения циклонов [3, 4], в то время как изменения параметров антициклонов представляет наибольший интерес при анализе экстремальных температур [5, 6]. В настоящее время циклоны Северного полушария отечественные [7–9] и зарубежные [10, 11] ученые выделяют и исследуют с помощью данных глобальных

проектов реанализа, уделяя основное внимание физике циклона. В то же время, представляют интерес исследования изменчивости режимных характеристик циклонов и их аномалий в связи с глобальными климатическими процессами разного масштаба, например, [12]. Авторами настоящей работы ранее также были получены массивы параметров циклонов Черноморско-Средиземноморского региона по среднесуточным данным реанализа NCEP / NCAR за период 1948–2006 гг. и проведен анализ их межгодовой – десятилетней изменчивости в связи с глобальными процессами в системе океан – атмосфера в Атлантическом и Тихом океанах [13].

К настоящему времени реанализ NCEP / NCAR накопил данные за еще одно десятилетие, до 2017 г. Их учет позволит уточнить полученные ранее результаты. Цель настоящей работы состоит в получении и анализе актуальных и уточненных характеристик режима циклонической активности и тенденций ее изменения с использованием более детальных и длительных данных реана-

лиза, что составит основу для дальнейшего исследования изменчивости аномалий циклонической активности на межгодовом – междесятилетнем масштабах.

Данные и методика. Для выделения циклонов и их основных параметров в работе использовались четырехсрочные данные реанализа NCEP/NCAR за 1951–2017 гг. и методика, разработанная М.Ю. Бардиным [12] и апробированная, например, в международном проекте IMPLAST [14]. Под циклоном понимается минимум в поле высоты геопотенциальной поверхности H1000 с шагом 10 гпм, окруженный замкнутыми изогипсами. 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 за определенный интервал времени. Для характеристики «силы» циклона были получены площадь, глубина и интенсивность циклонов. Площадь определялась по фигуре, ограниченной последней замкнутой изогипсой. Под глубиной циклона понимается разность геопотенциальных высот между найденным минимумом в узле сетки и на внешней ограничивающей изогипсе. Для учета вклада площади

циклона в его «силовые» характеристики была получена интенсивность (или средняя глубина) циклона, представляющая собой отношение интеграла глубины циклона к его площади.

Массивы параметров циклонов были затем сформированы для трех доменов:

1) Черноморский регион, 37° – 50° с.ш., 27° – 45° в.д.; площадью ~2,07 млн км²;

2) запад Средиземного моря, 35° – 47° с.ш., 6° з.д. – 16° в.д.; 2,43 млн км²;

3) восток Средиземного моря, 29° – 41° с.ш., 16° – 38° в.д.; 2,64 млн км².

Площадь регионов неодинакова, но ее величины вполне сопоставимы между собой.

В полученных массивах была произведена фильтрация двух «выбросов» по порогу 3σ (стандартных отклонений) глубины, интенсивности и площади циклонов: 28 ноября 1978 г. в восточной части Средиземного моря и 30 ноября 1978 г. в Черноморском регионе. Указанный циклон характерен по своим параметрам для региона западной части Средиземного моря, где он и зародился, на границе с восточной частью моря и при своем движении на северо-восток был зафиксирован в статистике других регионов в качестве «выброса».

Полученные результаты. В табл. 1 приведены многолетние (за 1951–2017 гг.) годовые величины параметров циклонов и их среднеквадратические отклонения (СКО).

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

Параметр	ЧР		ЗСМ		ВСМ	
	Среднее	СКО	Среднее	СКО	Среднее	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	11,1	1,6	12,3	1,5	10	1,1

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 величин относительно среднего значения отмечается в Черноморском регионе (34 дня с циклонами) и превышает примерно в 2 раза разброс в обоих Средиземноморских регионах.

Параметры, отражающие «силу» циклона (частота, 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 (площадь 0,78 млн км², глубина около 26 гпм). Таким же образом распределены между регионами и средние квадратические отклонения площади циклонов (0,16 гпм на западе СМ и 0,1 на востоке). Однако, СКО глубины и интенсивности циклонов выше в Черноморском регионе (4,41 гпм).

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, глубины и площади циклонов.

Примечательно, что каждый из рассмотренных регионов отличается своими особенностями годового хода повторяемости циклонов (частоты и количества дней с циклонами). Из общих черт можно выделить лишь понижение величин в теплое полугодие и повышение в холодное. Прежде всего, заметны различия в амплитуде годового хода, которая 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 отмечается локальным максимумом, на востоке СМ максимум приходится на декабрь и январь, а минимум – на июль и август. Характер годового хода повторяемости циклонов в западной части СМ похож на типичный годовой ход «силовых» параметров циклонов (площади, глубины и интенсивности).

О характере годового хода циклонической активности в изучаемом регионе также можно судить из работы [11], в которой исследовалось количество событий циклогенеза в основных генерирующих их районах Средиземноморского бассейна, а также суммарно для западной и восточной частей СМ, причем Черное море включалось в восточную часть. Представленные в настоящей работе результаты по годовому ходу активности циклонов можно с оговоркой сравнить с результатами работы [11] с учетом разницы в определении повторяемости (сумма дней с циклонами и количество событий циклогенеза). Тем не менее, в событиях циклогенеза также прослеживаются полученные в настоящей работе 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.

Для всех изучаемых регионов годовой ход площади, глубины и интенсивности циклонов имеет общие особенности: максимум приходится на зимние месяцы, а минимум – на летние. При этом амплитуда годового хода приблизительно одинакова в Средиземноморских регионах (немного более 30 гпм по глубине, 12 ед. интенсивности и 800 тыс. км² по площади) и немного ниже (на ~25% по глубине и интенсивности и 12% по площади циклонов) в Черноморском регионе. Месяцы наступления максимальных величин отличаются для разных регионов на 1-2 месяца. На западе СМ максимум всех «силовых» параметров наблюдается в декабре и январе, а для площади циклонов в ноябре.

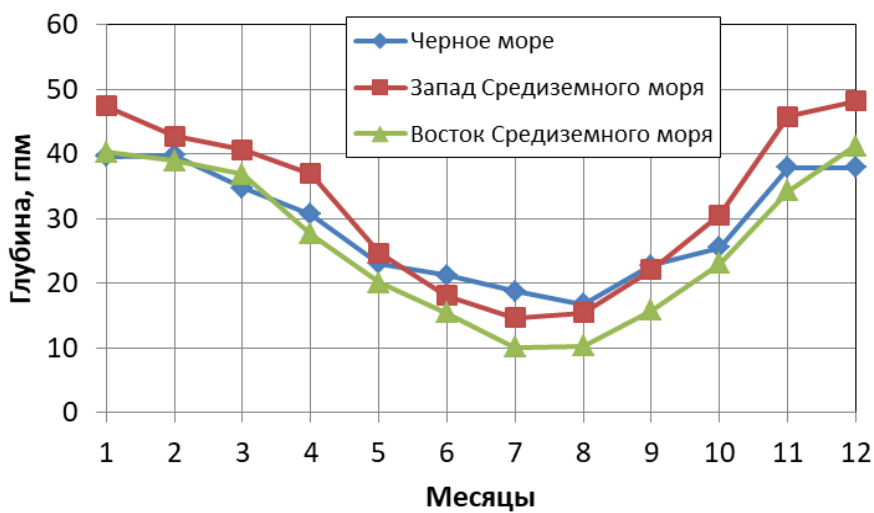
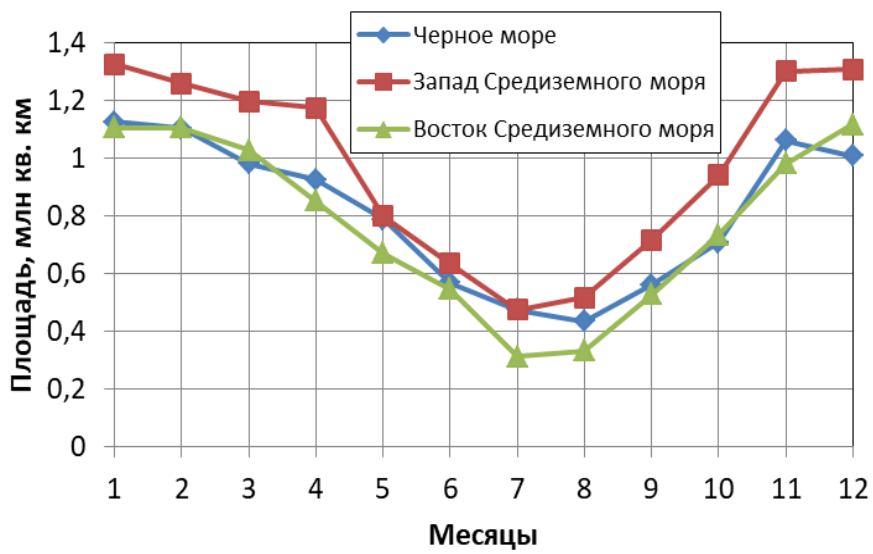
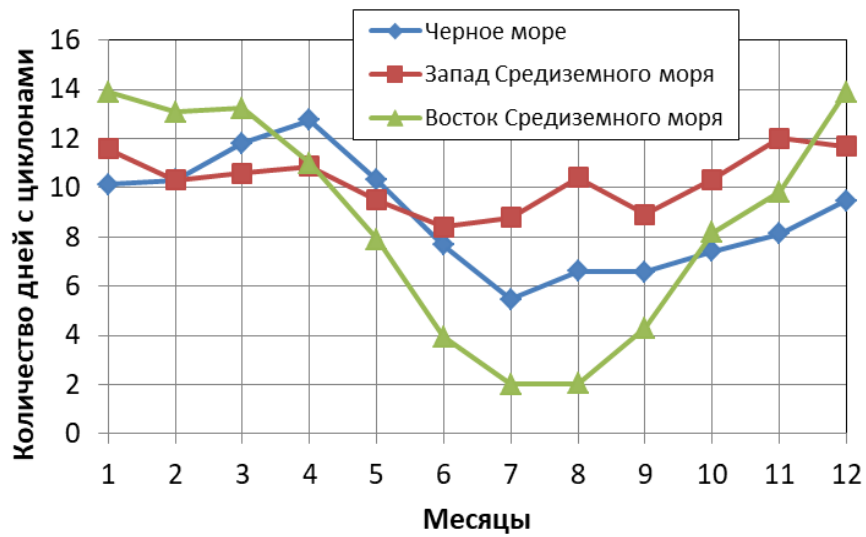


Рис. 1. Годовой ход количества дней с циклонами, площади и глубины циклонов в Черноморско-Средиземноморском регионе
Fig. 1. The annual course of the number of days with cyclones, the area and depth of cyclones in the Black Sea-Mediterranean region

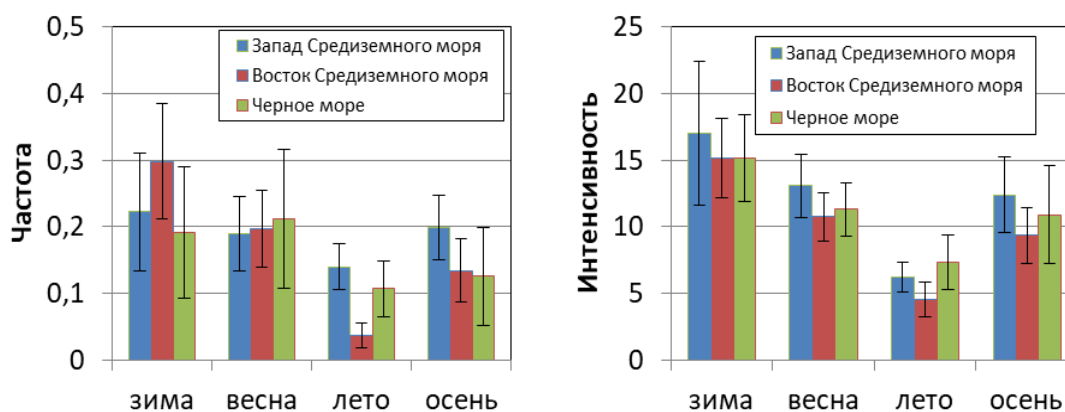


Рис. 2. Сезонные средние многолетние (1951–2017 гг.) величины частоты и интенсивности циклонов в изучаемых регионах. Планки погрешностей соответствуют СКО

Fig. 2. Long-term seasonal averages (1951–2017) of the frequency and intensity of cyclones in the studied regions. Error bars correspond to the standard deviation

На востоке СМ месяцы максимумов – декабрь и январь, а также февраль для площади циклонов. В Черноморском регионе максимум приходится на январь и февраль. Схожей чертой годового хода «силовых» параметров циклонов в регионах является наступление месяцев наименьших величин в июле и августе, при этом минимум достигается в Средиземноморских регионах в июле, а в Черноморском регионе – в августе.

Другие параметры циклонов (частота и интенсивность циклонов) приведены в сезонном осреднении на рис. 2. Можно сравнить регионы по циклонической активности, хотя следует сделать оговорку, что площадь регионов немного отличается (см. данные и методы). В распределении сезонных величин повторяемости (дней с циклонами и частоты) среди регионов в восточной части СМ отмечаются зимний максимум и летний минимум, а также в Черноморском регионе весенний максимум повторяемости циклонов, превышающий повторяемость Средиземноморских регионов. Тем не менее, суммарная повторяемость циклонов в западной части СМ в течение года выше, чем в других регионах. Интересно, что летом выделяются статистически значимые различия повторяемости циклонов в изучаемых регионах, что может свидетельствовать о независимости механизмов, определяющих повторяемость циклонов в этот сезон.

Соотношение регионов по распределению сезонных величин глубины, интенсивности и площади циклонов довольно постоянно по сезонам. Максимум величин преимущественно приходится на западную часть СМ, минимум – на восточную часть, а Черноморский регион занимает промежуточное положение. Особенности характеризуются зима, когда сезонные величины указанных параметров циклонов выравниваются в западной части СМ и Черноморском регионе, и лето, когда в интенсивности и глубине циклонов наблюдается максимум в Черноморском регионе. Следует отметить, что статистически значимых различий, как для повторяемости циклонов, в параметрах, отражающих «силу» циклона, не наблюдается.

Коэффициенты линейных трендов параметров циклонов по сезонам и для годовых величин приведены в табл. 2 с указанием оценки уровня значимости.

Анализ линейных трендов сезонных параметров циклонов показал, что значимые на 99,9% и 99% уровне отрицательные линейные тренды отмечаются для Черноморского региона в повторяемости (частоте и сумме дней с циклонами) зимой и весной, а также осенью на 80 и 90% уровне, что, соответственно, выражается в значимых отрицательных трендах в годовых величинах. Значимые положительные тренды выделяются осенью в интенсивности и глубине (на 99%

уровне) и площади (на 90% уровне) циклонов Черноморского региона.

Для западной части Средиземного моря значимые на 95% уровне линейные тренды характеризуются отрицательной тенденцией и отмечаются для отдельных

сезонов: для весны в днях с циклонами и лета в глубине и интенсивности циклонов. При этом в сумме дней с циклонами за год также наблюдается значимый на 90% уровне отрицательный тренд.

Таблица 2. Коэффициенты линейных трендов сезонных и годовых параметров циклонов в Черноморском регионе (ЧР), западной (ЗСМ) и восточной (ВСМ) частях Средиземного моря за период 1951–2017 гг. Статистическая значимость трендов обозначена: **** – 99,9%; *** – 99%; ** – 95 %; * – 90%, полужирным шрифтом – 80%

Район	Сезон / год	Частота	Дни с циклонами	Площадь	Глубина	Интенсивность
ЧР	зима	-0,002***	-0,255****	-0,003	-0,024	-0,007
	весна	-0,002***	-0,266****	-0,0001	-0,013	-0,004
	лето	+0,0004	+0,028	-0,0005	-0,031	-0,009
	осень	-0,0006	-0,133*	+0,005***	+0,174***	+0,018*
	год	-0,001**	-0,632***	+0,0004	+0,033	+0,021*
ЗСМ	зима	-0,00003	-0,025	-0,001	-0,039	-0,018
	весна	-0,0005	-0,105**	+0,001	+0,022	+0,001
	лето	+0,00008	+0,004	-0,001	-0,045**	-0,019**
	осень	+0,00003	-0,022	+0,003	+0,075	+0,024
	год	-0,0002	-0,165*	+0,0003	+0,001	-0,004
ВСМ	зима	+0,0005	+0,062	-0,001	+0,013	+0,005
	весна	-0,0004	-0,067	-0,001	-0,010	-0,002
	лето	+0,0001	+0,013	+0,0005	-0,037*	-0,014
	осень	-0,000003	-0,02	+0,003***	+0,089**	+0,034***
	год	-0,00002	-0,036	+0,0004	+0,013	+0,005

Тренды параметров циклонов в восточной части Средиземного моря преимущественно невелики за исследуемый период. Подобно Черноморскому региону в западной части Средиземного моря значимые положительные коэффициенты определены для осени в площади и интенсивности (на 99% уровне) и глубине (на 95% уровне) циклонов. Летом выделяется отрицательный тренд в глубине циклонов (на 90% уровне).

Проведем сравнение описанных результатов с полученными ранее коэффициентами линейных трендов параметров циклонов за период 1948–2006 гг.

Отрицательный знак значимых тенденций повторяемости циклонов зимой и весной в Черноморском регионе, весной на западе СМ, а также отсутствие значимых трендов на востоке СМ совпадают. Отличия наблюдаются летом и осенью в Черноморском регионе, при этом знак трендов совпадает, однако достижение уровня приемлемой значимости произо-

шло для более длинного периода (1951–2017 гг.), а также летом на западе СМ, когда за период 1948–2006 гг. были выделены значимые положительные тенденции, а за период 1951–2017 гг. они стали незначимы, однако знак тенденции сохранился.

Что касается глубины и интенсивности циклонов, за период 1948–2006 гг. значимые отрицательные тренды были определены только на западе СМ летом. Для периода 1951–2017 гг. присутствие значимых отрицательных трендов в этот сезон в регионе также отмечается, однако такие же тенденции появляются и на востоке СМ летом, кроме того во всех регионах осенью выявлены значимые положительные тренды.

Наибольшие различия трендов между двумя периодами (1948–2006 гг. и 1951–2017 гг.) касаются площади циклонов, хотя есть одно совпадение – значимый отрицательный тренд летом в западной части СМ в оба периода. За более

короткий период зимой отмечался значимый отрицательный тренд площади циклонов в Черноморском регионе, который стал незначимым за более длительный период; осенью напротив: незначимый положительный тренд стал значимым. На востоке СМ незначимые положительные тренды площади летом и осенью за короткий период приобрели значимость за более длинный период, а весной значимы положительный тренд площади циклонов за 1948–2006 гг. стал незначимым и отрицательным за 1951–2017 гг.

Выводы. С использованием четырехсрочных данных высоты геопотенциальной поверхности из реанализа NCEP / NCAR за период 1951–2017 гг. получены уточненные массивы характеристик параметров циклонов для трех районов Черноморско-Средиземноморского региона. Сравнительный анализ с соответствующими характеристиками по массивам за период до 2006 г. (на 11 лет короче), показал следующие результаты.

Максимальные годовые величины параметров циклонов характерны для западной части Средиземного моря, а Черноморский регион лидирует по разбросу (дисперсии) годовых величин относительно среднего, за исключением площади циклонов.

Амплитуда годового хода повторяемости циклонов между регионами минимальна на западе Средиземноморского региона и максимальна на востоке региона, а в Черноморском регионе занимает промежуточное положение. В общем характере годового хода параметров циклонов с понижением величин в теплое полугодие и повышением в холодное месяцы наступления максимума и минимума отличаются для регионов на 1-2 месяца, за исключением максимума повторяемости в апреле в Черноморском регионе.

По сезонному режиму повторяемости циклонов восточная часть Средиземноморского региона характеризуется зимним максимумом и летним минимумом, а Черноморский регион – весенним максимумом, при этом суммарная повторяемость циклонов в течение года выше в

западной части Средиземноморского региона.

Значимые не ниже 90% уровня линейные тренды за весь период преимущественно отрицательны, за исключением осеннего сезона: в Черноморском и западной части Средиземноморского региона они положительные. Наибольшие отрицательные тенденции повторяемости циклонов типичны для Черноморского региона в зимне-весенний сезон и менее значимые – для Средиземноморского региона в весенне-летний период.

Знак основных тенденций повторяемости циклонов в Черноморско-Средиземноморском регионе в период 1951–2017 гг. по сравнению с 1948–2006 гг. не изменился. При этом некоторые из них достигли статистически значимого уровня в летне-осенний период в Черноморском регионе и на западе Средиземного моря.

Продление анализируемого периода на 11 лет (2006–2017 гг.) показало появление значимых положительных трендов в площади, глубине и интенсивности циклонов во всех регионах в осенний сезон, а также значимых отрицательных трендов на востоке Средиземного моря летом. При этом в площади циклонов за более длинный период перестали быть значимыми тренды зимой в Черноморском регионе и весной на востоке Средиземного моря.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.). IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

2. *Метеорологический словарь* / авт.-сост. С.П. Хромов, Л.И. Мамонтова, под ред. В.И. Кузьменко. Л: Гидрометеоиздат, 1974. 568 с.

3. Mariotti A., Struglia M.V., Zeng N., Lau K.-M. The hydrological cycle in the Mediterranean region and implications for the water budget of the Mediterranean Sea // J. Clim. 2002. Vol. 15. P. 1674–1690.

4. Rodo X., Baert E., Comin F.A. Variations in seasonal rainfall in Southern Europe during the present century: relationship with the North Atlantic Oscillation and the El Niño–Southern Oscillation // *Climate Dynamics*. 1997. Vol. 13. P. 275–284.

5. Bardin M.Yu. Anticyclonic quasi-stationary circulation and its effect on air temperature anomalies and extremes over Western Russia // *Russian Meteorology and Hydrology*. 2007. Vol. 32. № 2. P. 75–84.

6. Kovalenko O.Y., Voskresenskaya E.N. Interannual variability of anticyclone activity and temperature extremes in the Black sea region // 3rd International Conference on Environment and Sustainable Development of Territories – Ecological Challenges of the 21st Century. T. 107: IOP Conference Series–Earth and Environmental Science – Kazan, RUSSIA, 2017.

7. Zolina O., Gulev S.K. Synoptic Variability of Ocean–Atmosphere Turbulent Fluxes Associated with Atmospheric Cyclones // *J. Clim.* 2003. Vol. 16. № 16. P. 2717–2734.

8. Tilinina N., Gulev S.K., Rudeva I., Koltermann P. Comparing Cyclone Life Cycle Characteristics and Their Interannual Variability in Different Reanalyses // *J. Clim.* 2013. Vol. 26. № 17. P. 6419–6438.

9. Akperov M.G., Bardin M.Y., Volodin E.M., Golitsyn G.S., Mokhov I.I. Probability distributions for cyclones and anticyclones from the NCEP/NCAR reanalysis data and the INM RAS climate model // *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* 2007. Vol. 43. № 6. P. 705–712.

10. Hoskins B.J., Hodges K.I. New Perspectives on the Northern Hemisphere Winter Storm Tracks // *J. Atmos. Sci.* 2002. Vol. 59. № 6. P. 1041–1061.

11. Trigo I.F., Bigg G.R., Davies T.D. Climatology of cyclogenesis mechanisms in the Mediterranean // *Mon. Weather Rev.* 2002. Vol. 130. P. 549–569.

12. Bardin M.Y., Polonsky A.B. North Atlantic oscillation and synoptic variability in the European–Atlantic region in winter // *Izvestiya atmospheric and oceanic physics*. 2005. Vol. 41. № 2. P. 127–136.

13. Maslova V., Voskresenskaya E., Bardin M. Variability of the cyclone activity in the Mediterranean–Black Sea region // *Journal of Environmental Protection and Ecology*. 2010. Vol. 11. № 4. P. 1366–1372.

14. Neu U. et al. IMILAST: A Community Effort to Intercompare Extratropical Cyclone Detection and Tracking Algorithms // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 2013. Vol. 94. № 4. P. 529–547.

ANNUAL REGIME AND SEASONAL TRENDS OF CYCLONE PARAMETERS IN THE BLACK SEA-MEDITERRANEAN REGION IN 1951–2017

V.N. Maslova¹, E.N. Voskresenskaya¹, A.V. Yurovsky^{1,2}, M.Yu. Bardin^{3,4}

¹Institute of Natural and Technical Systems, RF, Sevastopol, Lenin St., 28

²Marine Hydrophysical Institute of RAS, RF, Sevastopol, Kapitanskaya St., 2

³Institute of Geography Russian Academy of Sciences, RF, Moscow, Staromonetny Per., 29

⁴Institute of Global Climate and Ecology n. a. Ac. Yu.A. Izrael, RF, Moscow, Glebovskaya St., 20B

Using daily four-term data on 1000 hPa geopotential height from the NCEP / NCAR reanalysis in 1951–2017 and the methodology by M.Yu. Bardin refined cyclone parameters (recurrence, depth, area and intensity) were obtained for the Black Sea region, the western and eastern parts of the Mediterranean region during the period 1951–2017. The annual course and seasonal values of the parameters of cyclones in the Black Sea–Mediterranean region were studied, general and specific features typical for the each of the regions were described. The differences between the regions in the amplitude of the annual cycle of cyclone recurrence as well as the months of the onset of the maximum and minimum values of the cyclone parameters were identified and characterized. The coefficients of linear trends of seasonal and annual parameters of cyclones in each of the studied regions were estimated.

Keywords: number of days with cyclones, frequency, statistical characteristics, climatic regime, climatic trends, significance estimates.