

В.Н.Маслова

*Морской гидрофизический институт НАН Украины, г.Севастополь***КЛИМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СИНОПТИЧЕСКИХ ВИХРЕЙ
В ЧЕРНОМОРСКОМ РЕГИОНЕ**

Для расширенного Черноморского региона проведен анализ режима и временной изменчивости климатического масштаба индекса циклоничности как комплексной характеристики изменчивости синоптических вихрей – циклонов и антициклонов. Показано, что за период 1948 – 2006 гг. в среднем за год преобладали антициклонические условия. Несмотря на наличие значимых линейных трендов индекса, знаки которых различаются в теплый и холодный сезоны, для временного хода его среднегодовых значений характерно преобладание низкочастотной квазипериодической изменчивости междесятилетнего масштаба над изменчивостью межгодового масштаба. Зимой и весной в отрицательную фазу ТДО в Черноморском регионе преобладают циклонические условия, а в положительную фазу – антициклонические, причем циклонические условия в 3 раза более интенсивные.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *индекс циклоничности, режим, изменчивость, тренды, АМО, ТДО.*

Введение. Одной из наиболее дискуссионных проблем 21 века, актуальных как для науки, так и для экономики, является вопрос о глобальном изменении климата, а также о его региональных проявлениях. При этом активно обсуждается роль естественных колебаний климатической системы в изменении климата. Основным механизмом, определяющим региональный климат в средних широтах в целом и в Черноморском регионе в частности, является активность синоптических вихрей, под которыми в работе понимаются вихреобразные атмосферные возмущения синоптического масштаба – циклоны и антициклоны.

Главное внимание в современной научной литературе уделяется изменчивости циклонов. Например, в работах [1, 2], выделены режимы изменчивости циклонов, определяемые фазами естественных глобальных процессов в системе океан-атмосфера. Исследованию антициклонов на сегодняшний день уделяется недостаточно внимания, за редким исключением, например, в [3]. При этом их роль в формировании регионального климата чрезвычайно велика – это тепловые волны летом и заморозки зимой. Кроме того, циклоны и антициклоны неразрывно связаны, взаимно влияя на скорость и направление перемещения друг друга.

В настоящей работе проведен климатический анализ совместной изменчивости циклонов и антициклонов в Черноморском регионе. Под климатическим анализом понимается анализ временной изменчивости синоптических вихрей на междесятилетнем масштабе. Характеристики циклонов и антициклонов рассматривались в среднем для всего расширенного Черноморского региона в границах 37,5 – 50° с.ш., 27,5 – 45° в.д.

Для совместного анализа активности циклонов и антициклонов принято использовать индекс циклоничности, который учитывает повторяемость и

глубину синоптических вихрей. В настоящей работе индекс циклоничности (I) рассчитывался по формуле (1):

$$I = (f_c * d_c) - (f_a * d_a), \quad (1)$$

где f_c – частота циклонов, d_c – глубина циклонов, f_a – частота антициклонов, d_a – глубина антициклонов. Таким образом, положительным значениям индекса соответствует преобладание циклонических условий, с учетом совместного влияния частоты и глубины циклонов, а отрицательным значениям – соответственно, антициклонические.

Частота и глубина циклонов и антициклонов была взята из созданного ранее массива параметров циклонов с использованием авторской методики и пакета программ М.Ю.Бардина. Синоптические вихри и их параметры были выделены по среднесуточным данным реанализа *NCEP/NCAR* о высоте геопотенциала изобарической поверхности 1000 гПа на регулярной сетке $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ за период 1948 – 2006 гг.

Результаты и обсуждение. Рассмотрим изменчивость временных рядов индекса циклоничности по сезонам и за год, сглаженных 3-х летним скользящим средним (рис.1).

Сравнительная характеристика индекса циклоничности по сезонам показывает, что значение индекса циклоничности более + 0,5 наблюдалось в 60-е – 70-е гг. весной и зимой, а менее – 0,5 – летом и осенью в 50-е гг. и зимой и осенью в 80-е – 90-е гг. Наибольшие положительные значения индекса достигают 1,5 – 2 зимой и весной в 1964 – 1969 гг., а наименьшие отрицательные за редким исключением опускаются ниже – 1, а именно осенью 1991 г.

Таким образом, наибольшая активность циклонов наблюдалась в 60-е гг. 20 в. зимой и весной, а антициклонов – осенью в конце 80-х – начале 90-х гг. При этом в указанные периоды активность циклонов в Черноморском регионе, отражающая их частоту и глубину, превосходит, иногда в 2 раза, активность антициклонов. Тем не менее, в среднегодовом осреднении за исследуемый период 1948 – 2006 гг. по продолжительности преобладают интервалы с отрицательными значениями индекса, т.е. с антициклоническими условиями.

Перейдем к анализу трендов индекса циклоничности Черноморского региона и обсуждению соответствующих результатов. Линейные тренды индекса были рассчитаны по формуле (2) в среднем для сезонов и за год:

$$y = ax + b, \quad (2)$$

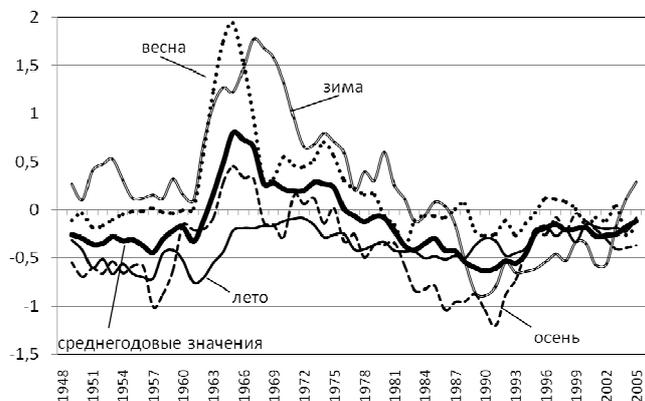


Рис. 1. Эволюция сглаженных 3-х летним скользящим средним рядов индекса циклоничности в Черноморском регионе с 1948 по 2006 гг., в среднем по сезонам и за год.

где y – функция, x – переменная, a и b – коэффициенты тренда. Достоверность линейных трендов определялась с использованием критерия Стьюдента.

Кроме линейных, были проанализированы и полиномиальные тренды. Для примера приведена формула (3) для вычисления полиномиального тренда 3-й степени:

$$y = ax^3 + bx^2 + cx + d, \quad (3)$$

где y – функция, x – переменная, a , b , c , d – коэффициенты тренда.

Выбор степени полинома для анализа изменчивости ряда определяется количеством экстремумов функции: полином 3-й степени точнее описывает ряд с тремя экстремумами низкочастотной изменчивости, т.е. когда на выбранном временном ряде наблюдается один полный период колебания. Полином четвертой степени выбирается для ряда с четырьмя экстремумами, т.е. с 1,5 периодами, а полином 5-й степени – для ряда с пятью экстремумами, т.е. с двумя периодами колебаний. Анализируемый в настоящей работе временной ряд имеет длину 59 лет (1948 – 2006 гг.), поэтому полином 3-й степени оценивает на нем колебания с периодом около 60 лет, полином 4-й степени – с периодом около 40 лет, а полином 5-й степени – около 30 лет. Следует отметить, что указанные периоды приблизительны, т.к. определены в зависимости от длины временного ряда. Тем не менее, они позволят сравнить колебания индекса циклоничности разного междесятилетнего масштаба между собой.

Вклад тренда в описание дисперсии ряда оценивался по величине коэффициента детерминации (R^2). Основные рассчитанные параметры анализа трендов приведены в табл.1.

Значимые отрицательные линейные тренды индекса циклоничности на рассматриваемом временном интервале (1948 – 2006 гг.) наблюдаются в зимний и весенний сезоны, а значимый положительный тренд – летом. В среднем за год отмечается небольшой отрицательный тренд, значимостью более 85 %. Наибольший среди сезонов вклад в дисперсию ряда индекса циклоничности вносит отрицательный тренд в зимний период (22 %).

Коэффициенты детерминации полиномиальных трендов 3-й, 4-й и 5-й степени свидетельствуют о том, что наибольший вклад в дисперсию ряда индекса циклоничности во все сезоны из рассмотренных междесятилетних колебаний (60, 40 и 30 лет) вносят колебания с периодом около 30 лет.

Т а б л и ц а 1. Коэффициент линейного тренда за 100 лет (a) и уровень его значимости (p). Коэффициенты детерминации линейного тренда – $R^2_{л}$, полиномиальных трендов 3-й, 4-й и 5-й степени – R^2_{n3} , R^2_{n4} , R^2_{n5} соответственно, T – период выделяемых колебаний.

интервал осреднения	a (p , %)	$R^2_{л}$, %	R^2_{n3} ($T \approx 60$ лет)	R^2_{n4} ($T \approx 40$ лет)	R^2_{n5} ($T \approx 30$ лет)
зима	– 2,11 (99,9)	22,4	51,3	58,6	62,5
весна	– 0,77 (91,6)	5,1	31,3	31,3	41,3
лето	0,45 (97,5)	8,4	9,7	20,6	37,6
осень	– 0,10 (20,1)	0,1	19,5	19,9	42,2
год	– 0,43 (86,5)	3,8	37,1	41,3	59,4

Колебания с периодами 60 и 40 лет осенью, весной и в среднем за год вносят приблизительно одинаковый вклад в дисперсию рядов индекса циклоничности, соответственно около 20, 30 и 40 %. Зимой и летом более высоким вкладом на 7 – 10 % характеризуются 40-летние колебания.

Далее охарактеризуем особенности временной изменчивости несглаженных рядов индекса циклоничности отдельно для каждого сезона и в среднем за год (рис.2). В течение исследуемого периода (1948 – 2006 гг.) для зимы характерно преобладание циклонических условий над антициклоническими как по интенсивности (модулю значений индекса), так и по продолжительности. Среднее многолетнее значение индекса циклоничности зимой составляет +0,22. Циклонические условия преобладали зимой с 1948 по 1981 год, а антициклонические – с 1982 по 2004 гг. Для зимы (а также в меньшей степени для весны) характерно преобладание дисперсии низкочастотной междесятилетней изменчивости над дисперсией межгодовой изменчивости, о чем можно судить из табл.2. А именно, дисперсия ряда зимнего индекса циклоничности, фильтрованного низкочастотным фильтром (более 20 лет), составляет 0,36, что в 3 раза больше дисперсии (0,12) ряда индекса, фильтрованного высокочастотным фильтром (до 5 лет). Кроме того, аппроксимация этого ряда полиномом, начиная с 3-й степени, описывает более 50 % его изменчивости. Поэтому с учетом указанной междесятилетней квазипериодической изменчивости, несмотря на отрицательный линейный тренд, в первые десятилетия 21 в. может ожидать повышение циклонической активности зимой, что подтверждается данными реанализа *NCEP/NCAR* по высоте геопотенциальной поверхности 1000 гПа с 2006 по 2012 гг.

Весной среднее многолетнее значение индекса также положительно и составляет 0,15 за счет высоких положительных значений в 60-е и 70-е гг. 20 в., причем отдельные выбросы в 60-е гг. превышали 3σ (среднеквадратических отклонения). Для временного ряда индекса циклоничности весной характерны следующие особенности. Во-первых, на интервалах 1948 – 1960 и 1980 – 2006 гг. велика межгодовая изменчивость индекса – он колеблется относительно нуля без значимого линейного тренда с небольшим преобладанием антициклонических условий. Во-вторых, на интервале 1960 – 1980 гг. явно преобладают циклонические условия. Аппроксимация ряда полиномом, начиная с 3-й степени, описывает более 30 % его изменчивости.

Для летнего сезона характерно преобладание отрицательных значений индекса циклоничности (среднее многолетнее – 0,36) с наименьшим среди сезонов среднеквадратическим отклонением ($\sigma = 0,27$). В течение всего периода 1948 – 2006 гг. за исключением нескольких лет, индекс циклоничности летом был отрицательным, т.е. преобладали антициклонические условия. Особенностью изменчивости летнего индекса циклоничности является суперпозиция междесятилетней квазипериодической изменчивости и значимого (97,5 %) положительного линейного тренда, составляющего 0,45 единиц индекса за 100 лет. Тем не менее, с учетом ожидаемой нисходящей ветви междесятилетней изменчивости, не следует ожидать значительного повышения частоты и интенсивности циклонических условий в Черноморском регионе летом в первые десятилетия 20 в. Это также подтверждается данными реанализа *NCEP/NCAR* по высоте геопотенциальной поверхности 1000 гПа с 2006 по 2012 гг.

Таблица 2. Дисперсия (σ^2) рядов индекса циклоничности в Черноморском регионе по сезонам и в среднем за год, фильтрованных высокочастотным (более 5 лет) и низкочастотным (менее 20 лет) фильтрами, соответственно *HF* и *LF*.

временной ряд	σ^2_{HF}	σ^2_{LF}
зима	0,12	0,36
весна	0,07	0,14
лето	0,03	0,02
осень	0,09	0,1
год	0,02	0,08

В отличие от летнего сезона, осенью значимый линейный тренд индекса циклоничности не наблюдается, однако, как и в зимний сезон, четко прослеживаются низкочастотные междесятилетние изменения относительно среднего многолетнего значения, равного $-0,4$. Среднеквадратическое отклонение ряда невелико, но немного выше, чем летом и составляет $0,38$. Положительные значения индекса циклоничности наблюдались лишь в отдельные годы, что свидетельствует преобладании антициклонических условий осенью в период 1948 – 2006 гг. Характеризуя изменчивость среднегодовых значений индекса циклоничности, следует отметить доминирование междесятилетней изменчивости над межгодовой (см. табл.2) и небольшое преобладание по продолжительности отрицательных значений индекса, т.е. антициклонических условий (рис.2). Это обусловило небольшое отрицательное значение среднего многолетнего значения индекса ($-0,15$). Однако в 1966 г. интенсивность циклонических условий (частота и глубина циклонов) была более чем в 2 раза выше, чем наибольшая интенсивность антициклонических условий, видимо, за счет весеннего и, в меньшей степени, зимнего максимума индекса циклоничности. Это заставляет проверить указанные пики ряда индекса циклоничности на достоверность. И действительно, они подтверждаются данными наблюдений за количеством осадков на станциях Украины – в отдельные зимние и весенние месяцы в 60 – 70-е гг. пики количества осадков, как и индекса циклоничности, превышали 3σ .

Суммируя проведенный анализ изменчивости индекса циклоничности в Черноморском регионе, можно заключить, что значительная, а иногда и основная роль принадлежит низкочастотным квазипериодическим колебаниям междесятилетнего масштаба. Чтобы выделить вероятные глобальные причины таких региональных междесятилетних колебаний, необходимо обратиться к основным масштабам глобальной изменчивости климатической системы, и как ее основной части – системы океан – атмосфера. Основным процессом связанной системы океан – атмосфера с типичным периодом 20 – 30 лет является Тихоокеанская декадная осцилляция (ТДО). На масштабе 60 – 70 лет основным сигналом является Атлантическая мультидекадная осцилляция (АМО). Масштаб около 60-ти лет также наблюдается в изменчивости индекса ТДО.

В течение исследуемого временного интервала в 59 лет с 1948 по 2006 гг. наблюдалось по одной положительной и отрицательной фазе АМО и ТДО. Чтобы определить, изменяется ли режим индекса циклоничности Черноморском регионе в зависимости от фазы указанных колебаний, был проведен композитный анализ, а именно рассчитаны и сопоставлены средние многолетние (за 30 лет) значения индекса, соответствующие фазам АМО и ТДО (рис.3).

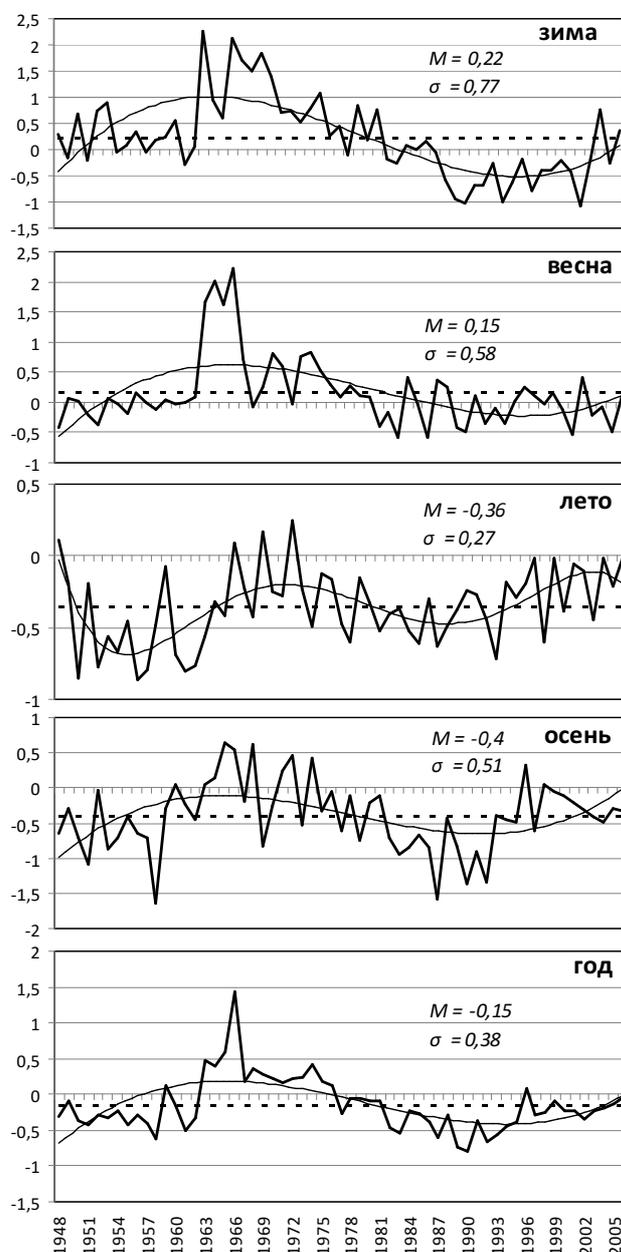
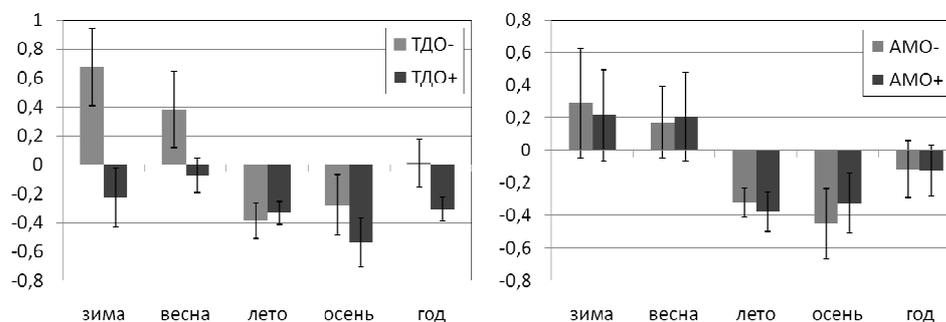


Рис. 2. Эволюция индекса циклоничности в Черноморском регионе с 1948 по 2006 гг., осредненного по сезонам и за год. M – среднее многолетнее значение индекса, σ – среднеквадратическое отклонение. Пунктирной линией показана величина M , волнистой линией показан полиномиальный тренд 3-й степени, исключение: лето – полином 5-й степени.

Проведенный композитный анализ подтвердил результаты, полученные ранее в работе [4] отдельно для циклонов, и уточнил их для антициклонов. Зимой и весной в отрицательную фазу ТДО в Черноморском регионе преобладают циклонические условия, а в положительную фазу – антициклонические, причем по модулю положительный индекс циклоничности в 3 раза больше отрицательного. В среднем за год также наблюдаются значимые различия композитов индекса циклоничности, но с другой интенсивностью – в отрицательную фазу ТДО он близок к нулю и положителен, а в положительную фазу – отрицателен и достигает $-0,3$.



Р и с . 3 . Композиты индекса циклоничности по сезонам и за год для фаз ТДО и АМО, положительные фазы – ТДО+, АМО+, отрицательные – ТДО-, АМО-. Планки погрешностей соответствуют 95 % уровню значимости.

По фазам АМО значимых различий композитов не выделяется, что вероятно обусловлено особенностями выбранного временного интервала, на котором положительная фаза АМО не достаточно ярко выражена.

Заклучение. Климатический анализ комплексной характеристики изменчивости синоптических вихрей – индекса циклоничности в расширенном Черноморском регионе за период 1948 – 2006 гг. позволил сделать следующие выводы:

- в среднем циклонические условия (положительный индекс циклоничности) преобладали по интенсивности и продолжительности зимой и весной, а антициклонические (отрицательный индекс) – летом, осенью и в среднем за год. При этом наибольшая активность циклонов наблюдалась в 60-е гг. 20 в. зимой и весной, а антициклонов – осенью в конце 80-х – начале 90-х гг.;

- значимые отрицательные линейные тренды индекса циклоничности характерны для зимнего и весеннего сезонов ($- 2,11$ и $- 0,77$ за 100 лет), а значимый положительный тренд – для летнего ($+ 0,45$ за 100 лет);

- для зимнего и весеннего сезона и в среднем за год характерно преобладание дисперсии низкочастотной междесятилетней изменчивости над дисперсией межгодовой изменчивости;

- зимой и весной в отрицательную фазу ТДО в Черноморском регионе значимо преобладают циклонические условия, а в положительную фазу – антициклонические, причем по модулю положительный индекс циклоничности в 3 раза больше отрицательного;

- в среднем за год в положительную фазу ТДО наблюдаются интенсивные антициклонические условия, тогда как в отрицательную фазу – слабо выраженные циклонические условия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Trigo I.F., Davies T.D., Bigg G.R.* Objective Climatology of Cyclones in the Mediterranean Region // J. Clim.– 1999.– 12.– P.1685-1696.
2. *Thompson D.W.J., Wallace J.M.* Annular modes in the extratropical circulation. Part 1: Month-to-Month variability // J. Clim.– 2000.– 13.– P.1000-1016.

3. *Polonskii A.B., Bardin M.Yu., Voskresenskaya E.N.* Statistical characteristics of cyclones and anticyclones over the Black Sea in the second half of the 20th century // *Physical Oceanography*.– 2007.– v.17, № 6.– P.348-359.
4. *Voskresenskaya E., Maslova V.* Joint manifestations of PDO (Pacific Decadal Oscillation) and negative AMO (Atlantic Multidecadal Oscillation) phases in winter cyclonic activity // *J. Environ. Scien. and Eng.*– 2012.– v.1, № 12.– P.1325-1328.

Матеріал поступил в редакцию 27.08.2013 г.

АНОТАЦІЯ У середньому для розширеного Чорноморського регіону проведено аналіз режиму і часової мінливості кліматичного масштабу індексу циклоничності як комплексної характеристики мінливості синоптичних вихорів – циклонів і антициклонів. Показано, що за період 1948 – 2006 рр. в середньому за рік і за тривалістю років переважали антициклонічні умови. Попри значні негативні лінійні тренди індексу взимку і навесні і позитивний тренд влітку, для зими, весни і в середньому за рік характерне переважання низькочастотної квазіперіодичної мінливості міждесятирічного масштабу над мінливістю міжрічного масштабу. Взимку і навесні в негативну фазу ТДО (Тихоокеанської декадної осциляції) в Чорноморському регіоні переважають циклонічні умови, а в позитивну фазу – антициклонічні, причому циклонічні умови в 3 рази більш інтенсивні.

ABSTRACT In average for the wider Black Sea region, regime and temporal variability of the climate-scale cyclonicity index as a complex characteristic of synoptic vortices (cyclones and anticyclones) variability was analyzed. It is shown that in the period 1948 – 2006 anticyclonic conditions dominated in the average for the year and by the duration of years. In spite of the significant negative linear trends of the index in winter and spring, and a positive trend in summer, winter, spring, and year in the average are characterized by the dominance of low-frequency quasi-periodic variability of multidecadal scale upon the interannual scale. In winter and spring in the negative phase of the PDO (Pacific Decadal Oscillation) in the Black Sea region, cyclonic conditions are dominant, and in the positive phase – anticyclonic, moreover cyclonic conditions are 3 times more intense.