

Член-корреспондент НАН Украины А. Б. Полонский,
Е. Н. Воскресенская, В. Н. Маслова

Изменчивость циклонической активности в Черноморско-Средиземноморском регионе в связи с процессами в Тихом океане и Атлантике

По данным ре-анализа NCEP/NCAR о поле геопотенциальной высоты 1000 гПа в период 1948–2006 гг. выделены циклоны в Черноморско-Средиземноморском регионе и рассчитаны их основные характеристики: частоты и глубины. Проведен анализ связи низкочастотной изменчивости характеристик циклонов с Тихоокеанской декадной осцилляцией (ТДО) в зимне-весенний период. Выявлена значительная интенсификация циклонической активности и смещение/расширение основных зон циклогенеза в отрицательную фазу ТДО (1948–1976) по сравнению с положительной (1977–2006). Смена фаз ТДО сопровождается сменой типов крупномасштабной атмосферной циркуляции и соответствующим смещением траекторий циклонов в меридиональном направлении. Полученные результаты свидетельствуют о важной роли тихоокеанских процессов десятилетнего масштаба в климатической изменчивости изучаемого региона. Предложена схема преобладающих траекторий циклонов Северного полушария для случаев положительной и отрицательной фаз ТДО на фоне отрицательной фазы Атлантической мультideкадной осцилляции.

Циклоническая активность в субтропических и умеренных широтах является одной из важнейших характеристик общей циркуляции атмосферы и служит надежным индикатором региональных изменений климата. Известно, что характеристики циклонической активности в Черноморско-Средиземноморском регионе тесно связаны с процессами крупномасштабного взаимодействия океана с атмосферой. Так, например, в работах [1–4] показано, что изменчивость циклонического режима межгодового-субдекадного масштаба в этом регионе в основном обусловлена Североатлантическим и Южным колебаниями, которые, в свою очередь, определяются крупномасштабными процессами в системе океан — атмосфера в Северной Атлантике и экваториальной зоне Тихого океана.

Оценки более долгопериодных тенденций изменений повторяемости циклонов в Черноморско-Средиземноморском регионе зачастую различаются не только по величине, но и по знаку [2, 5–7]. Это связано с двумя обстоятельствами. Во-первых, разные авторы используют различные данные за неодинаковые временные отрезки в период с середины 19 по начало 21 вв. и не универсальную методику осреднения характеристик циклонической активности по пространству. Во-вторых, в системе океан — атмосфера наблюдаются интенсивные низкочастотные квазипериодические процессы с типичными периодами от 20–30 до 50–70 лет, которые неодинаково проявляются в различных регионах. В результате оцениваемые региональные погодно-климатические тенденции, связанные с циклонической активностью, могут принципиально различаться.

Характеристики Черноморских циклонов в 60–90-х гг. XX ст. обнаруживают ярко выраженный тренд, обусловленный усилением зональной циркуляции над Атлантико-Европейс-

ким регионом и смещением атлантических штормтреков в меридиональном направлении [2]. Однако при увеличении длины анализируемого ряда в характеристиках Черноморских циклонов проявляется квазипериодическая (~50–60-летняя) компонента изменчивости, обусловленная главным образом Атлантической мультидекадной осцилляцией (АМО) соответствующего периода, а линейный тренд оказывается незначим.

Кроме низкочастотных процессов Атлантического происхождения в климатической системе выделяются колебания междесятилетнего масштаба, связанные с процессами крупномасштабного взаимодействия океана и атмосферы в северной части Тихого океана [8, 9]. Количественные оценки связи характеристик циклонической активности в Черноморско-Средиземноморском регионе с тихоокеанскими процессами десятилетнего масштаба до сих пор не опубликованы. Вместе с тем результаты работ [8, 10–13] свидетельствуют о том, что такая связь существует. Целью настоящей работы является анализ низкочастотных изменений частоты и глубины циклонов в Черноморско-Средиземноморском регионе и их связи с десятилетними процессами взаимодействия океана и атмосферы в Тихоокеанском регионе.

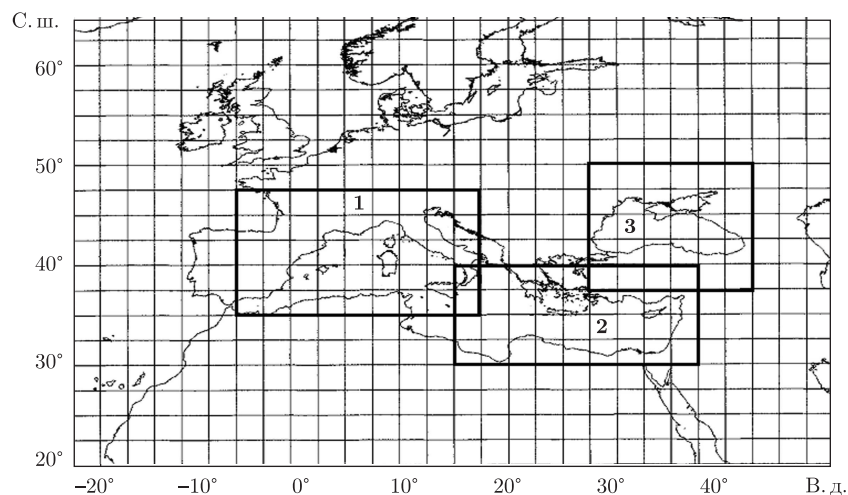
Для выделения циклонов использовались срочные (за 00 GMT) данные ре-анализа Национального прогностического центра США (NCEP/NCAR) о поле геопотенциала изобарической поверхности 1000 гПа за 1948–2006 гг. на сетке $2,5 \times 2,5^\circ$. С помощью методики, описанной в работе [2], выделялись циклоны и рассчитывались их частота и глубина для Черноморского, Западного и Восточного Средиземноморских регионов (границы регионов представлены на рис. 1, а). Под частотой циклонов понимается отношение количества суток, когда наблюдались циклонические условия в регионе, к общему количеству анализируемых случаев. За глубину циклона принималась разность давления между его центром и последней замкнутой изобарой (точность расчета 1 гПа). В качестве характеристики крупномасштабных процессов в системе океан — атмосфера десятилетнего масштаба использовались следующие данные (в основном за период 1948–2006 гг.):

индекс Тихоокеанской декадной осцилляции (ТДО), представляющий собой нормированные аномалии температуры поверхности океана в северной части Тихого океана;

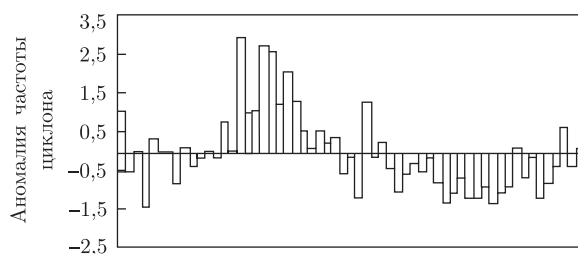
поля геопотенциала, ветра и температуры на высотах 500 и 300 гПа для Северного полушария по данным ре-анализа Национального прогностического центра США;

данные Атласа внутритропических циклонов Северного полушария для приземного слоя [<http://data.giss.nasa.gov/stormtracks/>].

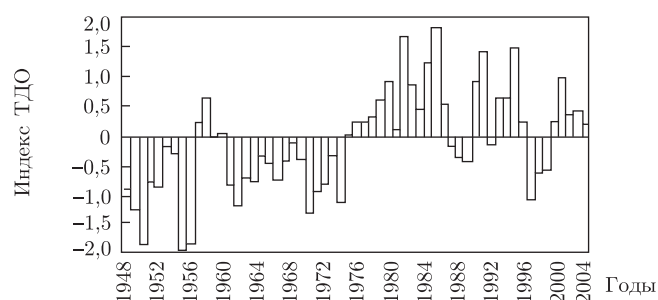
Особенностью низкочастотной изменчивости частоты и глубины зимних циклонов в изучаемых регионах является ее квазипериодический характер со сменой знака аномалий анализируемых параметров в середине 1970-х годов (см. рис. 1, б). В качестве одной из наиболее вероятных причин, вызывающих наблюдаемую периодичность, можно назвать климатический сигнал междесятилетнего масштаба в тихоокеанской системе океан — атмосфера — ТДО [8, 13], изменения индекса которого приведены на рис. 1, в. В течение анализируемого периода преимущественно отрицательная фаза ТДО отмечалась в период 1948–1976 гг. (за исключением конца 50-х годов), а положительная — в период 1977–2001 гг. (если не считать нескольких лет в конце 80-х–начале 90-х годов). Таким образом, временной ход индекса ТДО характеризуется суперпозицией более низкочастотного (~50–60-летнего) основного сигнала и ~20–30-летнего колебания меньшей амплитуды. Рассмотрим региональные (Черноморско-Средиземноморские) проявления основного колебания. Отметим, что его период практически совпадает с периодом АМО. Однако индексы ТДО и АМО изменяются примерно с десятилетним сдвигом по фазе. Это позволяет разделить их региональные проявления.



a



б



в

Рис. 1. Карта Черноморско-Средиземноморского региона с отмеченными областями, для которых проводился анализ (*a*), временной ход аномалий частоты зимних циклонов в Черноморском регионе (нормированных на стандартное отклонение) (*б*) и индекса ТДО в зимний период (*в*) (1948–2006).

Цифрами **1**, **2** и **3** (см. рис. 1, *a*) показаны соответственно Западно-Средиземноморский, Восточно-Средиземноморский и Черноморский регионы

Анализ количественных оценок изменчивости характеристик циклонов десятилетнего масштаба за каждый месяц проводился на основе рассчитанных композитов для двух фаз ТДО. Композитные диаграммы, приведенные на рис. 2, показывают, что в отрицательную фазу ТДО в зимне-весенний период частота циклонов в Черноморско-Средиземноморском регионе на статистически значимом уровне превышает соответствующие величины для положительной фазы ТДО. При этом в Черноморском регионе в отрицательную фазу ТДО отмечается увеличение числа циклонов в среднем в 2 раза (см. рис. 2, *a*). Изменчивость

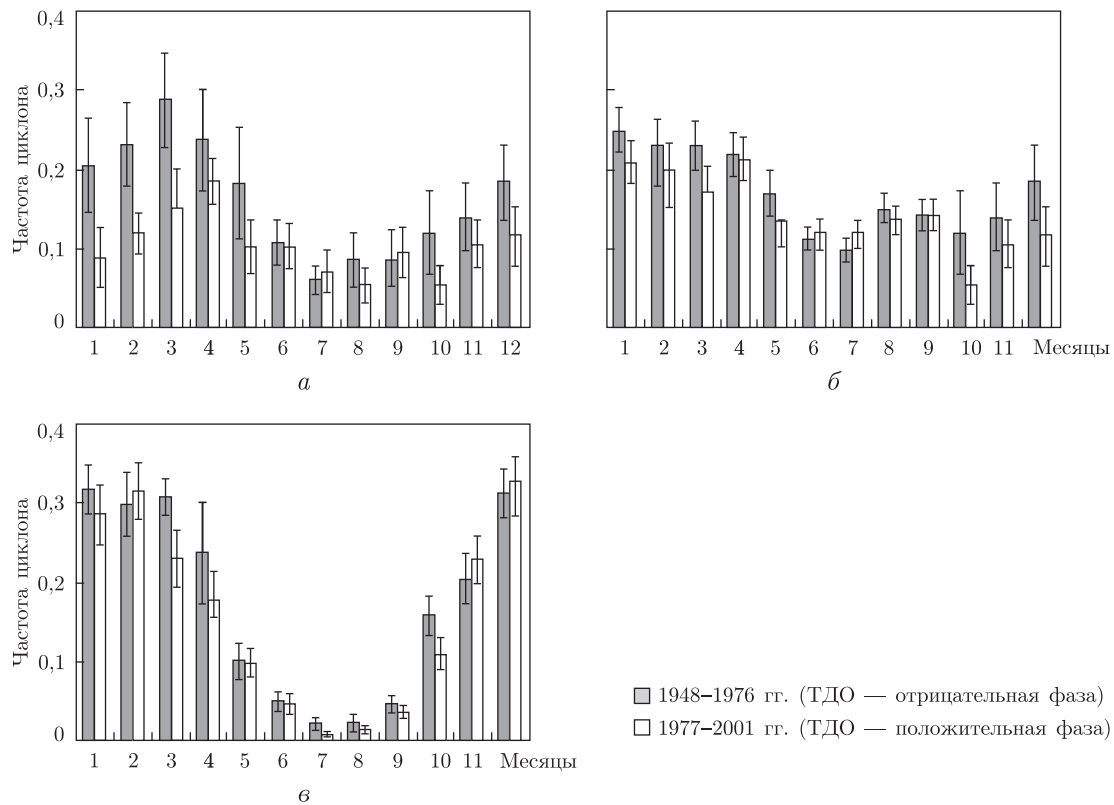


Рис. 2. Композиты частоты циклонов в Черноморском регионе (а), в западной (б) и восточной (в) части Средиземноморского региона по месяцам за периоды отрицательной и положительной фаз ТДО (вертикальными отрезками отмечены доверительные интервалы, соответствующие 90%-му уровню значимости)

параметров средиземноморских циклонов при смене фазы ТДО (особенно в западной части региона) похожа на изменчивость характеристик циклонов в Черноморском регионе, но она меньше по амплитуде (рис. 2, б и в). Частота циклонов западной части Средиземного моря в декабре и мае во время отрицательной фазы ТДО на 20% превышает частоту циклонов в положительную фазу осцилляции. Результат значим на 80%-м уровне. В восточной части Средиземноморского региона такое превышение наблюдается в марте и октябре. Причем эти результаты значимы соответственно на 90 и 80%-м уровне. Одновременно с увеличением частоты циклонов в отрицательную фазу ТДО наблюдается увеличение их глубины в среднем на 5 гПа (рисунок не приведен).

Изменение параметров циклонов в соответствии с фазой ТДО сопровождается изменением пространственного расположения зон циклонической активности. Для оценки различий в пространственном распределении количества циклонов в положительную и отрицательную фазы ТДО строились карты сумм количества центров циклонов, подсчитанных для исследуемого района за каждый день в квадратах $2,5 \times 2,5^\circ$, причем соседние квадраты перекрывали друг друга на $0,5^\circ$ по широте и долготе. Для исключения ошибки за счет неодинаковой продолжительности анализируемых периодов рассматривалось равное количество лет (1948–1976 и 1977–2005). Таким образом, были получены поля суммарной концентрации центров циклонов для каждого месяца за оба периода. На рис. 3 приведены карты таких полей для типичных месяцев зимнего и весеннего сезонов — января и марта.

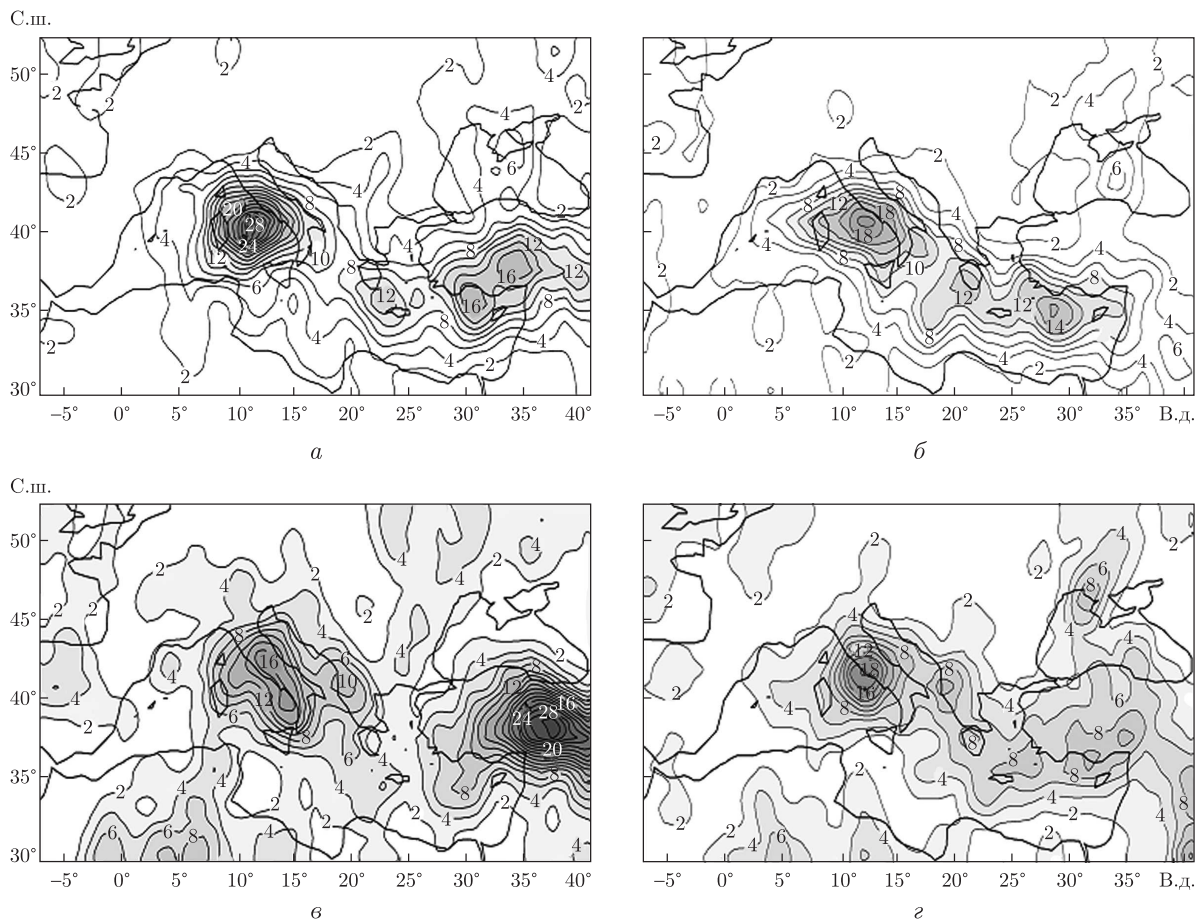


Рис. 3. Суммарное количество центров циклонов за периоды преимущественно отрицательной (*а, в*) и положительной (*б, г*) фаз ТДО в квадратах $2,5 \times 2,5^\circ$ в Черноморско-Средиземноморском регионе в январе 1948–1976 гг. (*а*) и 1977–2005 гг. (*б*); марте 1948–1976 гг. (*в*) и 1977–2005 гг. (*г*)

Видно, что в зимний период область сгущения центров восточносредиземноморских циклонов в отрицательную фазу ТДО существенно расширяется в северо-восточном направлении, занимая большую часть Малой Азии (см. рис. 3, *а*). При этом количество центров циклонов в районе Италии, которая находится под влиянием Генуэзской зоны циклогенеза, увеличивается на треть по сравнению с положительной фазой (см. рис. 3, *а* и *б*). В окрестности Крыма в положительную фазу ТДО зона концентрации центров циклонов смещается на $2,5^\circ$ к югу. Весной в положительную фазу ТДО основная циклоническая активность в Средиземноморском регионе сосредоточена в районе Италии, а в отрицательную фазу — над п-вом Малая Азия (здесь наблюдается на 40% больше центров циклонов, чем в районе Италии, и в 2–3 раза больше по сравнению с периодом положительной фазы ТДО в этом же районе). При этом в отрицательную фазу ТДО зона концентрации циклонов в районе Италии меняет свою конфигурацию, вытягиваясь на юг приблизительно на 5° . Таким образом, в отрицательную фазу ТДО в холодный период года происходит не только усиление циклонической активности, но и смещение/расширение (\sim на $2,5\text{--}5^\circ$) зон сгущения центров циклонов в регионе Средиземного и Черного морей.

Описанные изменения пространственно-временной структуры циклонической активности в регионе можно объяснить особенностями крупномасштабных циркуляционных процессов в атмосфере [8, 13]. Смена фаз ТДО сопровождается сменой преимущественного типа атмосферной циркуляции. Для положительной фазы ТДО характерно усиление зональной атмосферной циркуляции в Атлантико-Европейском регионе, приводящее к ослаблению циклогенеза в Черноморско-Средиземноморском регионе. Отрицательная фаза ТДО сопровождается ослаблением зональной атмосферной циркуляции над Северной Атлантикой и усилением циклогенеза в Черноморско-Средиземноморском регионе.

Для характеристики крупномасштабных циркуляционных процессов в атмосфере, на фоне которых происходит изменение пространственно-временной структуры циклонической активности в Черноморско-Средиземноморском регионе, был проведен анализ положения струйного течения, повторяемости центров циклонов в различных регионах и их траекторий для Северного полушария в разные фазы ТДО. Поскольку фазы основной моды ТДО и АМО не совпадают, рассмотрим разные фазы ТДО, зафиксировав фазу АМО. Для определенности будем исследовать период 1967–1992 гг., когда АМО находится в отрицательной фазе, т. е. в Северной Атлантике наблюдается отрицательная аномалия температуры поверхности океана. Чтобы получить характеристики положения струйного течения, были проанализированы композитные карты полей геопотенциала и ветра на высотах 500 и 300 гПа для Северного полушария. Положение струйного течения соответствует положению высотной планетарной фронтальной зоны, к северу от которой (с небольшим сдвигом по широте) распространяются среднеширотные циклоны. Проведенный анализ позволяет предложить простую схему пространственных смещений преобладающих штормтреков в разные фазы ТДО, поясняющую механизм формирования выявленных региональных изменений характеристик циклонов.

Сочетание положительной фазы ТДО и отрицательной фазы АМО характеризуется наклоном оси струйного течения в Атлантическом океане с юго-запада на северо-восток и сопровождается увеличением повторяемости циклонов вдоль этой линии (рис. 4, *a* и *б*). При этом в Черноморско-Средиземноморском регионе повторяемость циклонов уменьшается, а на севере Европы увеличивается. Сочетание отрицательных фаз АМО и ТДО сопровождается квазизональным положением оси струйного течения в Атлантическом океане, усилением циклонической активности в Черноморско-Средиземноморском регионе и ее ослаблением на севере Европы (см. рис. 4, *б* и *з*). Описанные закономерности пространственно-временной изменчивости циклонической активности и штормтреков Северного полушария в различные фазы ТДО схематически представлены на рис. 4, *д* и *е*.

Непосредственной причиной усиления циклогенеза в Черноморско-Средиземноморском регионе в период отрицательной фазы ТДО служит увеличение сдвига ветра в свободной атмосфере по вертикали, усиливающего бароклинную неустойчивости основного потока в регионе (рисунок не приведен). Кроме того, увеличение количества циклонов в рассматриваемом регионе в период отрицательной фазы ТДО является следствием дополнительного циклогенеза в субтропической зоне Атлантического океана (по сравнению с положительной фазой). Часть этих циклонов достигает окрестности Черноморско-Средиземноморский регион (см. рис. 4, *з*).

Таким образом, анализ линейных трендов параметров циклонов в Черноморско-Средиземноморском регионе для каждого месяца в период 1948–2006 гг. показал наличие небольших значимых величин лишь для зимы и весны. К сожалению, надежные данные о циклонической активности в регионе за период, существенно превышающий период, охваченный

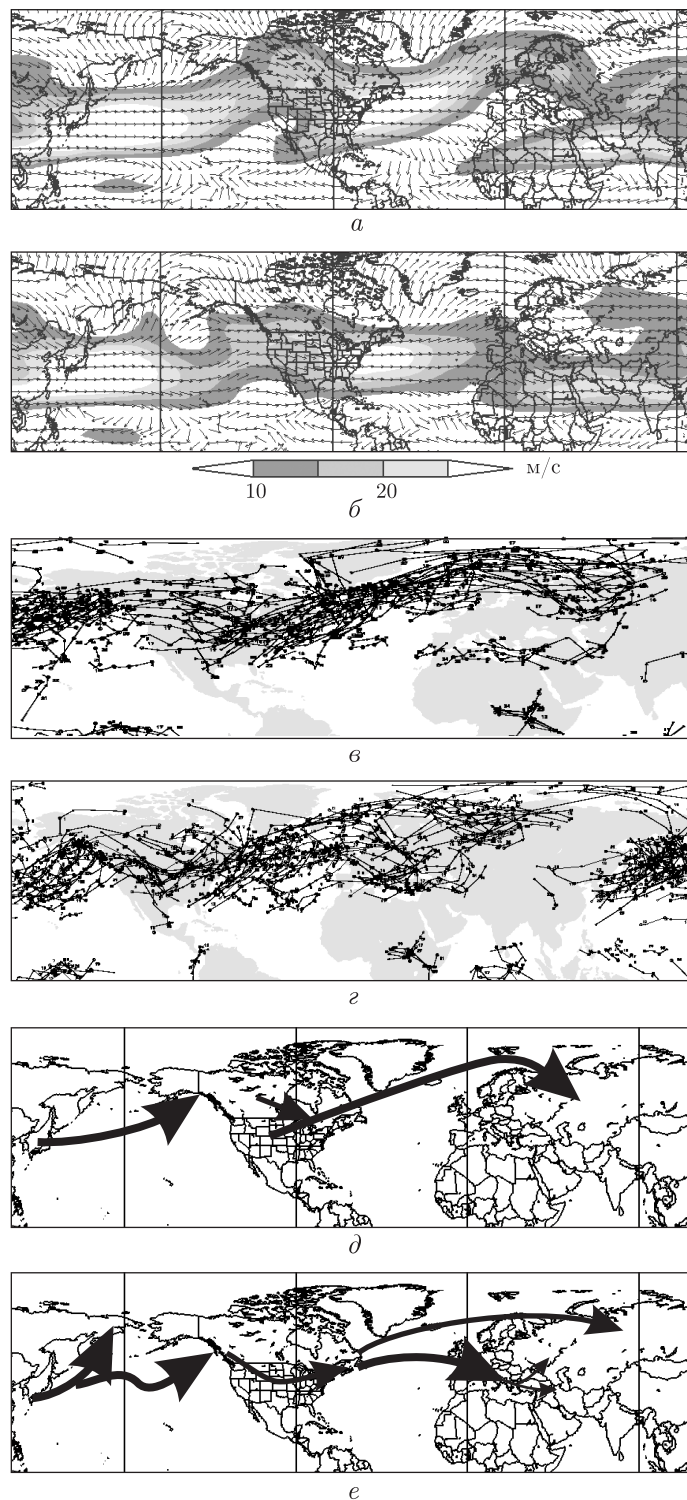


Рис. 4. Композиты поля ветра (м/с) в январе на уровне 500 гПа (а, б), траектории перемещения январских циклонов в приземном слое (в, з) и схема преобладающих траекторий циклонов в приземном слое (д и е, толщина черных стрелок характеризует относительную интенсивность циклогенеза) при отрицательном индексе АМО (1967–1992 гг.) в различные фазы ТДО: ТДО (+) (а, в, д); ТДО (-) (б, з, е)

данными ре-анализа, отсутствуют. Однако имеющиеся длительные наблюдения за волнением в прибрежной части Черного моря ясно указывают на преобладание квазипериодической низкочастотной компоненты изменчивости в аномалиях высот волн [14]. Поскольку аномальный волновой режим в Черном море определяется главным образом изменением статистики циклонов в регионе, можно утверждать, что квазипериодическая низкочастотная изменчивость преобладает и в характеристиках циклонов. Причем эта изменчивость проявляется в виде суперпозиции основного квазипериодического (~50–60-летнего) колебания ТДО и Атлантической мультидекадной осцилляции с близким периодом, но сдвинутой по фазе относительно ТДО. Обе периодичности обусловлены процессами крупномасштабного взаимодействия в системе океан — атмосфера.

1. *Воскресенская Е. Н., Маслова В. Н.* Изменчивость статистических характеристик циклонов юга Украины, обусловленная глобальными климатическими процессами // Системы контроля окружающей среды. Средства, информационные технологии и мониторинг: Сб. науч. тр. — Севастополь: Мор. гидрофиз. ин-т НАН Украины, 2007. — С. 253–256.
2. *Полонский А. Б., Бардин М. Ю., Воскресенская Е. Н.* Статистические характеристики циклонов и антициклонов над Черным морем во второй половине XX века // Мор. гидрофиз. журн. — 2007. — № 6. — С. 47–58.
3. *Fraedrich K., Müller K.* Climate anomalies in Europe associated with ENSO extremes // *Int. J. Climatol.* — 1992. — **12**. — P. 25–31.
4. *Mariotty F. E.-Z., Zeng N., Lau K. M.* Euro-Mediterranean rainfall variability and ENSO // *CLIVAR Exch.* — 2006. — **7**, No 1. — P. 200–235.
5. *Lionello P., Bhend J., Boldrin U. et al.* Climatology of cyclones in the Mediterranean: present trends and future scenarios // *Ibid.* — 2006. — **11**, No 2. — P. 10–12.
6. *Maheras P., Flocas H., Patrikas I., Anagnostopoulou Ch.* A 40 year objective climatology of surface cyclones in the Mediterranean region: Spatial and temporal distribution // *Int. J. Climat.* — 2001. — **21**. — P. 109–130.
7. *Pinto J. G., Spanghel T., Ulbrich U., Speth P.* Assessment of winter cyclone activity in a transient ECHAM4-OPYC3 GHG experiment // *Meteor. Zeitschrift.* — 2006. — **14**. — P. 823–838.
8. *Бардин М. Ю., Воскресенская Е. Н.* Тихоокеанская декадная осцилляция и европейские климатические аномалии // Мор. гидрофиз. журн. — 2007. — № 4. — С. 13–23.
9. *Mantua N. J., Hare S. R., Zhang Y. et al.* A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* — 1997. — **78**. — P. 1069–1079.
10. *Zanchettin D., Stewart W. F., Pietro T., Mario T.* On ENSO impacts on European wintertime rainfalls and their modulation by the NAO and the Pacific multi-decadal variability described through the PDO index // *Int. J. Climat.* — 2008. — **28**. — P. 995–1006.
11. *Pekarova P., Miklanek P., Pekar J.* Long-term trends and runoff fluctuations of European rivers // *Climate Variability and Change – Hydrological Impacts: Proc. of the 5th FRIEND World Conf. held at Havana, Cuba.* — Havana: IAHS, 2006. — **308**. — P. 520–525.
12. *Guijarro J. A., Jansa A., Campins J.* Time variability of cyclonic geostrophic circulation in the Mediterranean // *Advances in Geosciences.* — 2006. — **7**. — P. 45–49.
13. *Полонский А. Б.* Роль океана в изменениях климата. — Киев: Наук. думка, 2008. — 134 с.
14. *Наумова В. А., Евстигнеев М. П., Евстигнеев В. П., Любарец Е. П.* Ветро-волновые условия Азово-Черноморского побережья Украины: Сб. науч. праць. — Київ: Україн. наук.-досл. гідрометеорологічний ін-т, 2010. — № 259. — С. 263–283.

Член-кореспондент НАН України **О. Б. Полонський, О. М. Воскресенська, В. М. Маслова**

Мінливість циклонічної активності в Чорноморсько-Середземноморському регіоні у зв'язку з процесами в Тихому океані та Атлантиці

За даними ре-аналізу NCEP/NCAR про поле геопотенціальної висоти 1000 гПа у період 1948–2006 рр. виділено циклони в Чорноморсько-Середземноморському регіоні та розраховано їх основні характеристики: частоти і глибини. Проведено аналіз зв'язку низькочастотної мінливості характеристик циклонів з Тихоокеанською декадною осциляцією (ТДО) у зимово-весняний період. Виявлено значну інтенсифікацію циклонічної активності та зміщення/розширення основних зон циклогенезу в негативну фазу ТДО (1948–1976) у порівнянні з позитивною (1977–2006). Зміна фаз ТДО супроводжується зміною типів великомасштабної атмосферної циркуляції і відповідним зміщенням траєкторій циклонів у меридіональному напрямі. Отримані результати свідчать про важливу роль тихоокеанських процесів десятирічного масштабу в кліматичній мінливості регіону, що вивчається. Запропоновано схему основних траєкторій циклонів Північної півкулі для випадків позитивної і негативної фаз ТДО на фоні негативної фази Атлантичної мультідекадної осциляції.

Corresponding Member of the NAS of Ukraine **A. B. Polonsky, E. N. Voskresenskaya, V. N. Maslova**

Variability of cyclonic activity in the Black Sea-Mediterranean region associated with processes in the Pacific Ocean and the Atlantic

Using NCEP/NCAR re-analysis data on the 1000 hPa geopotential height in 1948–2006, cyclones over the Black Sea-Mediterranean region are detected, and their main characteristics (frequency and depth) are calculated. Analysis of the low-frequency variability of characteristics of the cyclones associated in winter-spring with the Pacific decadal oscillation (PDO) is done. A considerable intensification of cyclonic activity and displacement/spread of the main cyclogenesis areas in the negative PDO phase (1948–1976) in comparison to the positive one (1977–2006) is found. It is shown that the change of the PDO phases is accompanied by a change of types of the large-scale atmospheric circulation and the associated displacement of trajectories of cyclones in the meridional direction. The obtained results demonstrate the important role of decadal Pacific processes in the climatic variability in the studied region. The scheme of main trajectories of cyclones in the Northern hemisphere is presented for the cases of positive and negative PDO phases on a background of the negative phase of the Atlantic Multidecadal Oscillation.