

О ВЛИЯНИИ ОБРУШЕНИЯ ПЛАНЕТАРНЫХ ВОЛН В АТМОСФЕРЕ НА СЕВЕРОАТЛАНТИЧЕСКОЕ КОЛЕБАНИЕ

Е.С. Нестеров

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации
nesterov@mecom.ru*

Введение

Североатлантическое колебание (САК) является доминирующей модой циркуляции атмосферы в Северном полушарии, которая выражена во все сезоны года, проявляется на масштабах от нескольких суток до столетий и вносит существенный вклад в изменчивость основных гидрометеорологических характеристик [1, 2, 4, 7]. От фазы САК существенно зависит расположение очагов опасного ветрового волнения в Северной Атлантике [3].

В последние годы при исследовании механизмов формирования САК большое внимание уделяется процессам синоптического масштаба [5, 12]. В работе [13] было показано, что типичное время существования положительной или отрицательной фазы САК составляет около двух недель, а процессы, которые определяют такую изменчивость, имеют временной масштаб менее 10 суток.

Изучение процессов такого масштаба выявило важную роль обрушения атмосферных планетарных волн в формировании той или иной фазы САК [10, 14, 18, 26]. В частности, было выявлено, что антициклоническое обрушение волн над Северной Америкой и Северной Атлантикой способствует формированию положительной фазы САК, а циклоническое обрушение над Северной Атлантикой – формированию отрицательной фазы САК. Обрушение волн может существенно изменить индекс САК за несколько дней и даже повлиять на знак САК в течение всего месяца [24].

Для идентификации обрушения волн были предложены различные методы [15, 19], а для изучения механизмов влияния обрушения волн на формирование САК привлекались модели циркуляции атмосферы [17]. В данной работе делается обзор основных результатов исследований по этой проблеме.

Методы идентификации обрушения волн

Большинство методов идентификации обрушения волн основаны на концепции потенциальной завихренности и потенциальной температуры как основных динамических

характеристиках атмосферы. В работе [19] эта концепция впервые была применена к обрушению ультрадлинных планетарных волн в стратосфере и получила дальнейшее развитие в [11, 27].

Обычно исследуется временная эволюция потенциальной температуры на поверхности 2 PVU, так называемой номинальной тропопаузе (1 единица потенциальной завихренности PVU = $10^{-6} \text{ м}^2\text{с}^{-1}\text{Ккг}^{-1}$). Обрушение волн соответствует обратному знаку (обращению) градиента потенциальной температуры или потенциальной завихренности. Ежедневные поля потенциальной температуры на поверхности 2-PVU могут быть получены, например, на основе полей реанализа ветра и температуры NCEP/NCAR [10].

В работах [15, 17] для идентификации обрушения использовалось обращение меридионального градиента потенциальной завихренности, а в [28] использовался индекс блокирования [22], который характеризует обращение знака меридионального градиента потенциальной температуры на номинальной тропопаузе.

Особенности обрушения волн

Обрушения волн оставляют характерные следы в полях различных характеристик, в частности в поле потенциальной завихренности. Так, след антициклонического обрушения волн (АЦО) представляет из себя пару ложбина-гребень с наклоном оси с северо-востока на юго-запад, которая движется антициклонически с продолжающимся обострением и увеличением зональной ориентации ложбины (рис. 1) [10, 17]. При циклоническом обрушении (ЦО) наклон пары ложбина-гребень ориентирован с северо-запада на юго-восток, она движется циклонически и ложбина становится шире со временем. Среднее время жизни для АЦО – 2,6 дня, для ЦО – 4,3 дня [17].

В работе [15] показано, что обрушение волн (АЦО и ЦО) может быть направлено как к северу, так и к югу, и это может иметь различное влияние на циркуляцию и погодные режимы.

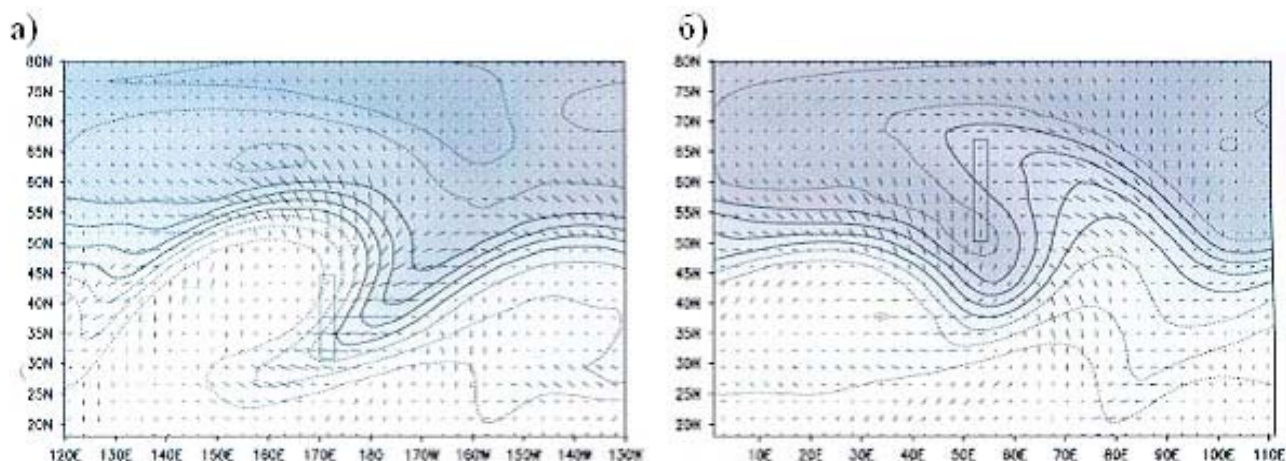


Рис. 1. Примеры антициклонического (а) и циклонического (б) обрушения волн в поле потенциальной завихренности.

Прямоугольниками выделены области с наиболее резкой сменой знака [17].

Влияние обрушения волн на циркуляцию атмосферы

Антициклоническое или циклоническое обрушение волн вызывает принципиально разные изменения в регионе Северной Атлантики. В работе [10] были получены композитные поля различных характеристик для 10 случаев формирования положительной фазы САК и 20 случаев формирования отрицательной фазы.

Анализ композитных полей показал, что образованию положительной фазы предшествовало антициклоническое обрушение волн над западным побережьем Северной Америки и над субтропиками Северной Атлантики. Это привело к адвекции холодного воздуха из Канады в северную часть Северной Атлантики и адвекции теплого воздуха в центральную часть Северной Атлантики, увеличению меридионального градиента потенциальной температуры над Северной Атлантикой, усилению западных ветров и в конечном счете установлению положительной фазы САК (рис. 2).

Циклоническое обрушение волн над Северной Атлантикой вызывает адвекцию на север теплого воздуха (происходит повышение температуры воздуха на юге Гренландии) и адвекцию на юг холодного воздуха. В результате происходит ослабление зональных процессов, формирование области высокого давления (похоже на блокирование) и установление отрицательной фазы САК.

В [10] делается вывод о том, что именно остатки обрушающихся волн формируют физическую сущность САК. Установлению положительной фазы САК предшествует антициклоническое обрушение волн над западным побережьем Северной Америки и над

субтропиками Северной Атлантики, а формированию отрицательной фазы САК предшествует циклоническое обрушение волн над Северной Атлантикой.

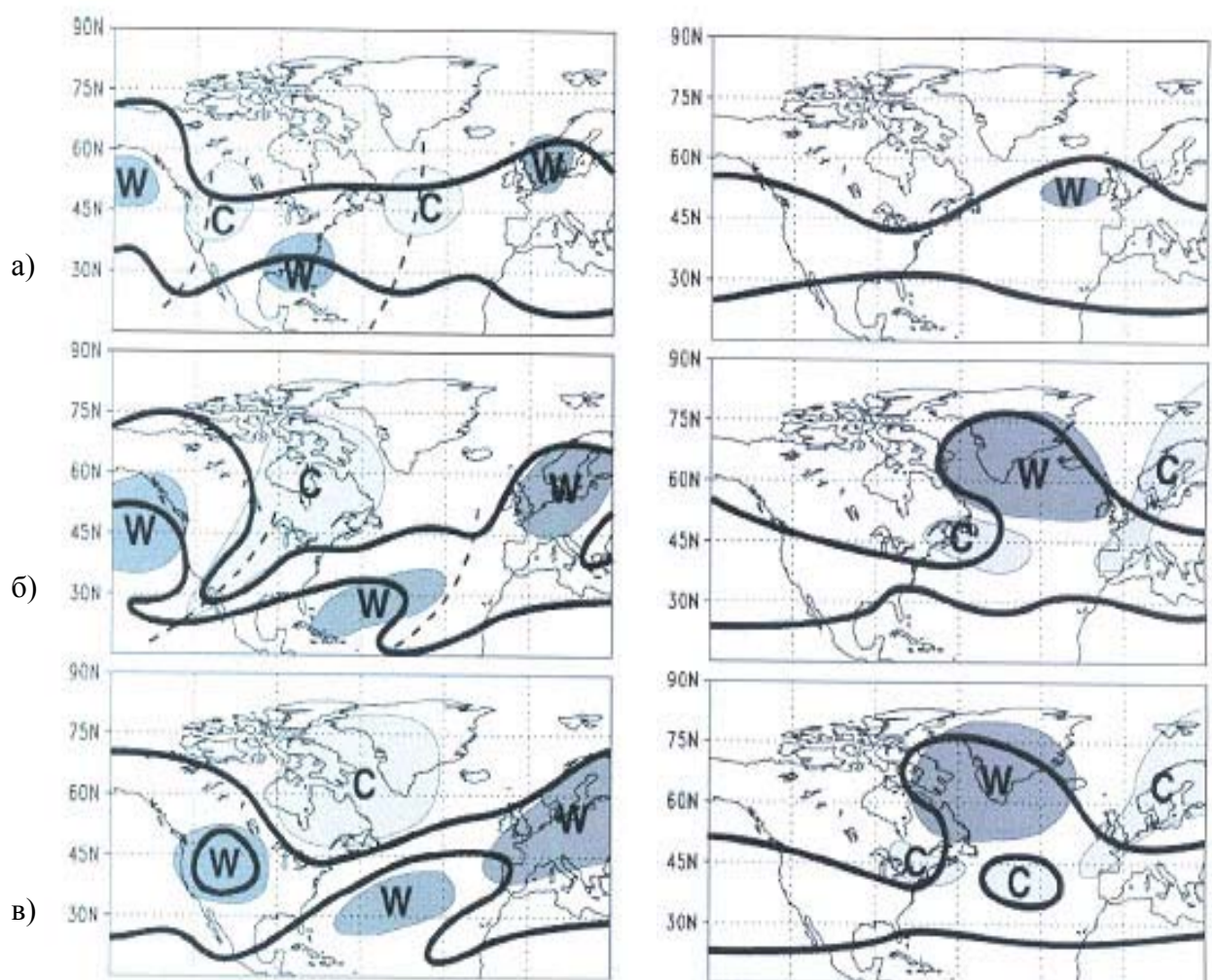


Рис. 2. Схема формирования положительной (слева) и отрицательной (справа) фазы САК под влиянием синоптических процессов: а) за 8-10 дней до формирования фазы САК; б) за 3-5 дней; в) день установления фазы.

Жирные линии – основные течения; пунктир – оси ложбин; W – области положительной аномалии температуры воздуха; C – области отрицательной аномалии температуры воздуха [10].

Аналогичные выводы содержатся в [14], где получено, что при положительной фазе САК северный центр диполя формируется из АЦО над западным побережьем Северной Америки, а южный центр возникает в результате АЦО над средними широтами и субтропиками Северной Атлантики. Установлению отрицательной фазы САК предшествует циклоническое обрушение волн над Северной Атлантикой, в результате чего формируются оба центра диполя САК.

В этой же работе отмечается, что тихоокеанский штормтрек смещается на юг перед формированием положительной фазы САК, и на север перед формированием отрицательной фазы, т.е. широтное положение тихоокеанского шторм-трека играет важную роль в определении фазы САК.

В работе [9] также обнаружена связь между антициклоническим обрушением планетарных волн над субтропиками Северной Атлантики и формированием положительной фазы САК. Влияние обрушения планетарных волн на формирование погодных режимов в Северной Атлантике исследовано в работе [20].

Обрушению волн могут предшествовать сильные штормы на восточном побережье Северной Америки. Так, после шторма 5–7.02.1978 г. произошло циклоническое обрушение волн, а после шторма 15–17.03.1993 г. – антициклоническое [24]. В первом случае эти события привели к резкому понижению индекса САК, во втором – к его резкому росту.

В этой же работе отмечена важная роль процессов взаимодействия океана и атмосферы в районе к востоку от Ньюфаундленда (40-50° с. ш., 40-50° з. д.) в формировании изменчивости САК. Показано, что аномально сильные потоки скрытого тепла в этом районе могут дестабилизировать нижние слои атмосферы и способствовать циклоническому обрушению волн и дальнейшему установлению отрицательной фазы САК. Наибольшие потоки влаги в указанный район поступают из бассейна Карибского моря, на который в свою очередь влияют особенности циркуляции атмосферы в тропиках восточной части Тихого океана. Таким образом, на формирование фаз САК могут влиять процессы в тропиках Тихого океана [24].

Следует также отметить, что наибольшие потоки скрытого тепла в западной части Северной Атлантики связаны с формированием «взрывных» циклонов [21], то есть «взрывные» циклоны могут способствовать циклоническому обрушению волн и, в конечном счете, формированию отрицательной фазы САК. Важная роль «взрывного циклогенеза» в формировании блокирующего режима циркуляции атмосферы в Северной Атлантике и установлении отрицательной фазы САК отмечалась ранее в работе [5].

Исследование влияния обрушения волн на формирование САК с помощью упрощенной модели общей циркуляции атмосферы [17] показало, что взаимодействие двух событий АЦО создает положительную фазу САК в нижних слоях тропосферы, но не на верхних уровнях, а единичное событие ЦО создает более длительную отрицательную фазу САК на верхних уровнях, но не в нижних слоях тропосферы. Делается вывод, что отдельные события АЦО (ЦО) не могут создавать положительную (отрицательную) фазу САК. Вместе с тем,

полученные результаты указывают на возможность формирования изменчивости циркуляции атмосферы, подобной САК, вследствие последовательности событий АЦО и ЦО.

Известно, что обрушение атмосферных волн приводит к синоптическим ситуациям, подобным блокированию [8]. Также известно, что в период положительной фазы САК блокирование наблюдается гораздо реже, чем при отрицательной фазе. В работе [28] с использованием индекса блокирования, предложенного в [22], по данным реанализа ERA-40 определены случаи обрушения волн, которые затем связаны с САК. В качестве предвестников и источников обрушения волн указываются распространение волн Россби из восточной части Тихого океана, а также изменчивость стратосферного полярного вихря. Влияние характеристик полярного вихря на обрушение волн отмечается также в работах [15, 17].

Связь между колебаниями PNA и САК

Выше уже отмечалось, что особенности циркуляции атмосферы в северной части Тихого океана, в частности, положение тихоокеанского шторм-трека, может иметь важное значение для формирования САК. Для характеристики состояния циркуляции атмосферы в северной части Тихого океана часто используется индекс PNA (Pacific – North America), суточные и месячные значения которого рассчитываются регулярно, как и индекса САК.

В работе [25] была получена отрицательная корреляция между индексами PNA и САК на сдвигах до 10 суток. Для объяснения этого явления была выдвинута гипотеза, что связь между PNA и САК может быть следствием обрушения волн в восточной части Тихого океана, которое может способствовать формированию положительной или отрицательной фазы САК.

Было установлено, что распределение аномалий зонального ветра на поверхности 300 гПа над северными частями Тихого и Атлантического океанов соответствуют положительной фазе PNA и отрицательной фазе САК. Положительная фаза PNA связана с более частыми событиями АЦО в высоких широтах региона Северная Атлантика/Северная Америка и менее частыми событиями АЦО в средних и низких широтах Северной Атлантики.

В работе [23] связь между PNA и САК исследовалась с помощью модели общей циркуляции атмосферы. Были установлены периоды сильного и слабого взаимодействия PNA и САК (активные и неактивные фазы), а также значимая отрицательная корреляция

между PNA и САК. В активной фазе интенсивность штормтрека в Северной Атлантике имеет более сильную связь с PNA, чем в неактивную фазу.

Возможный физический механизм этой связи связан с тем, что колебание PNA индуцирует рост бароклинных волн, которые влияют на атлантический шторм-трек. В частности, в период отрицательной фазы PNA в начале зимы происходит интенсификация штормтрека у Ньюфаундленда, а дальнейшее его активизация в центральной и северо-восточной Атлантике происходит в результате усиления положительной фазы САК. Это связано с тем, что при отрицательной фазе PNA усиливается адвекция теплого и влажного воздуха из Мексиканского залива и холодного воздуха из Канады. Это увеличивает бароклинность атмосферы над западной частью Северной Атлантики, что создает благоприятные условия для интенсификации атлантического штормтрека.

Указанные выше результаты подтверждаются данными [16], где получено, что формированию положительной фазы САК предшествуют волны в атмосфере над восточной частью Тихого океана (район PNA), в то время как формирование отрицательной фазы САК происходит локально над Северной Атлантикой. Как указывалось выше, вывод о важности для определения фазы САК атмосферных волн, приходящих из восточной части Тихого океана, был также сделан в работе [24].

Формирование фаз САК в результате обрушения волн

Результаты исследований влияния обрушения волн в атмосфере на САК обобщим в виде последовательности событий, предшествующих установлению той или иной фазы САК.

Формирование положительной фазы САК

За 7–10 дней (до установления)

1. Усиление гребня над северо-восточной частью Тихого океана.
2. Обрушение волн по антициклоническому типу волн над западным побережьем Северной Америки и над субтропиками Северной Атлантики; сдвиг струйного течения на юг.

За 2–6 дней

3. Холодный воздух распространяется над Канадой и далее на восток в высокие широты Северной Атлантики, теплый воздух распространяется над центральной частью Северной Атлантики.
4. Тихоокеанский штормтрек смещается на юг.
5. Над районом PNA (северная часть Тихого океана) – цепочка волн.

6. В результате адвекции холодного воздуха из Канады в северную часть Северной Атлантики и адвекции теплого воздуха в центральную часть Северной Атлантики усиливается градиент потенциальной температуры над Северной Атлантикой. Это приводит к усилению западных ветров и установлению положительной фазы САК.

Формирование отрицательной фазы САК

За 4–12 дней

1. Развитие гребня над Северной Атлантикой (похоже на блокирование).
2. Тихоокеанский штормтрек смещается на север.

За 2–3 дня

3. Обрушение волн по циклоническому типу над Северной Атлантикой; сдвиг струйного течения на север.
4. Адвекция на север теплого воздуха (повышение температуры воздуха на юге Гренландии) и адвекция на юг холодного воздуха.
5. Установление отрицательной фазы САК.

Заключение

Выполненные в последние годы исследования показывают, что обрушение планетарных волн в атмосфере может способствовать формированию той или иной фазы североатлантического колебания. Антициклоническое обрушение волн над Северной Америкой и Северной Атлантикой способствует формированию положительной фазы САК, а циклоническое обрушение над Северной Атлантикой – формированию отрицательной фазы САК.

Предвестниками этих процессов могут быть особенности циркуляции атмосферы в восточной части Тихого океана, такие, как цепочки волн и смещение на юг или на север тихоокеанского штормтрека. Адвекция потоков тепла и влаги из тропической зоны восточной части Тихого океана в регион Карибского моря и далее в область формирования атлантического штормтрека к востоку от Ньюфаундленда может дестабилизировать нижние слои атмосферы и способствовать, в частности, циклоническому обрушению волн и дальнейшему установлению отрицательной фазы САК.

Изучение процессов обрушения волн в атмосфере не только помогает понять физические механизмы формирования САК на временных масштабах от нескольких суток до нескольких недель, но может внести вклад в изучение низкочастотной изменчивости САК на сезонном и межгодовом периодах. Межгодовая изменчивость САК зависит, в частности, от

суммарной длительности различных режимов циркуляции атмосферы [5, 6], которые в свою очередь формируются синоптическими процессами. При изучении низкочастотной изменчивости САК необходимо учитывать влияние и других факторов, таких, как температура поверхности океана, состояние стратосферного полярного вихря и т.д.

Список использованных источников

1. Бардин М.Ю., Полонский А.Б. Североатлантическое колебание и синоптическая изменчивость в Европейско-Атлантическом регионе в зимний период // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2005. – Т. 41. – № 2. – С. 3–13.
2. Курбаткин Г.П., Смирнов В.Д. Межгодовые вариации температуры тропосферы, связанные с декадными изменениями североатлантического колебания // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2010. – Т. 46. – № 4. – С. 435–447.
3. Лукин А.А., Нестеров Е.С. Опасное ветровое волнение в Северной Атлантике при разных режимах атмосферной циркуляции // Метеорология и гидрология. – 2011. – № 12. – С. 36–44.
4. Мохов И.И., Елисеев А.В. и др. Североатлантическое колебание: диагноз и моделирование десятилетней изменчивости и ее долгопериодной эволюции // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2000. – Т. 36. – № 5. – С. 605–616.
5. Нестеров Е.С. О фазах североатлантического колебания // Метеорология и гидрология. – 2003. – № 1. – С. 64–74.
6. Нестеров Е.С. Особенности циркуляции атмосферы в Северной Атлантике в последние десятилетия // Современные проблемы динамики океана и атмосферы. Сборник статей, посвященный 100-летию со дня рождения проф. П.С. Линейкина. – М.: Триада ЛТД, 2010. – С. 269–280.
7. Попова В.В., Шмакин А.Б. Региональная структура колебаний температуры приземного воздуха в Северной Евразии во второй половине XX – начале XXI веков // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2010. – Т. 46. – № 2. – С. 161–175.
8. Шакина Н.П., Иванова А.Р. Блокирующие антициклоны: современное состояние исследований и прогнозирования // Метеорология и гидрология. – 2010. – № 11. – С. 5–18.
9. Abatzoglou J.T., Magnusdottir G. Opposing effects of reflective and nonreflective planetary wave breaking on the NAO // J. Atm. Sci. – 2006. – Vol. 63. – No. 12. – P. 3448–3457.
10. Benedict J.J., Lee S., Feldstein S.B. Synoptic view of the North Atlantic Oscillation // J. Atm. Sci. – 2004. – Vol. 61. – No. 2. – P. 121–144.
11. Davis C.A., Emanuel K.A. Potential vorticity diagnostics of cyclogenesis // Mon. Weath. Rev. – 1991. – Vol. 119. – No. 8. – P. 1929–1953.
12. Feldstein S.B. The timescale, power spectra, and climate noise properties of teleconnection patterns // J. Climate. – 2000. – Vol. 13. – No. 24. – P. 4430–4440.

13. *Feldstein S.B.* The dynamics of NAO teleconnection pattern grows and decay // *Quart. J. Roy. Met. Soc.* – 2003. – Vol. 129. – P. 901–924.
14. *Franzke C., Lee S., Feldstein S.B.* Is the North Atlantic Oscillation a breaking wave? // *J. Atm. Sci.* – 2004. – Vol. 61. – No. 2. – P. 145–160.
15. *Gabriel A., Peters D.* A diagnostic study of different types of Rossby wave breaking events in the northern extratropics // *J. Met. Soc. Japan.* – 2008. – Vol. 86. – No. 5. – P. 613–631.
16. *Jia X., Derome J., Lin H.* Comparison of the life cycles of the NAO using different definitions // *J. Climate.* – 2008. – Vol. 20. – No. 24. – P. 5992–6011.
17. *Kunz T., Fraedrich K., Lunkeit F.* Synoptic scale wave breaking and its potential to drive NAO-like circulation dipoles: a simplified GCM approach // *Quart. J. Roy. Met. Soc.* – 2009. – Vol. 135. – P. 1–19.
18. *Martius O., Schwierz C., Davies H.C.* Breaking waves at the tropopause in the wintertime Northern Hemisphere: climatological analyses of the orientation and the theoretical LC1/2 classification // *J. Atm. Sci.* – 2007. – Vol. 64. – No. 7. – P. 2576–2592.
19. *McIntyre M.E., Palmer T.N.* Breaking planetary waves in the stratosphere // *Nature.* – 1983. – Vol. 305. – P. 593–600.
20. *Michel C., Rivière G.* The link between Rossby wave breakings and weather regime transitions // *J. Atm. Sci.* – 2011. – Vol. 68. – No. 8. – P. 1730–1748.
21. *Neiman P.J., Shapiro M.A.* The life cycle of an extratropical marine cyclone. Part I: frontal-cyclone evolution and thermodynamic air-sea interaction // *Mon. Weath. Rev.* – 1993. – Vol. 121. – No. 8. – P. 2153–2176.
22. *Pelly J.L., Hoskins B.J.* A new perspective on blocking // *J. Atm. Sci.* – 2003. – Vol. 64. – P. 3–28.
23. *Pinto J.G., Reyers M., Ulbrich U.* The variable link between PNA and NAO in observations and in multi-century CGCM simulations // *Clim. Dyn.* – 2011. – Vol. 36.-No. 1,2. –P. 337–354.
24. *Riviere G., Orlanski I.* Characteristics of the Atlantic storm-track eddy activity and its relation with the North Atlantic Oscillation // *J. Atm. Sci.* – 2007. – Vol. 64. – No. 2. –P.241–266.
25. *Song J., Li C., et al.* The linkage between the Pacific-North American teleconnection pattern and the North Atlantic Oscillation // *Advances Atm. Sci.* – 2009. – Vol. 26. – No. 2. – P.229–239.
26. *Strong C., Magnusdottir G.* Tropospheric Rossby wave breaking and the NAO/NAM // *J. Atm. Sci.* – 2008. – Vol. 65. – No. 9. – P. 2861–2876.
27. *Thorncroft C.D., Hoskins B.J., McIntyre M.E.* Two paradigms of baroclinic wave life-cycle behavior // *Quart. J. Roy. Met. Soc.* – 1993. – Vol. 119. – No. 1. – P. 17–55.
28. *Woollings T., Hoskins B., et al.* A new Rossby wave-breaking interpretation of the North Atlantic Oscillation // *J. Atm. Sci.* – 2008. – Vol. 65. – No. 2. – P. 609–626.

Поступила в редакцию 25.04.2012 г.