

О ВЛИЯНИИ АТМОСФЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ НА ФОРМИРОВАНИЕ ЭКСТРЕМАЛЬНОГО ВОЛНЕНИЯ В ОКЕАНЕ

Е.С. Нестеров

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

Введение

Характеристики волнения в морях и океанах представляют значительный интерес для навигации, рыболовного промысла, добычи углеводородов на шельфе, проектирования судов и т. д. Особенно важны сведения об экстремальных волнах, высота которых может превышать 20 м. Такие волны вызываются наиболее глубокими циклонами, природа и характеристики которых активно изучаются [4, 9, 11, 17]. В [2] получено, что за последние 10–15 лет число глубоких циклонов (со скоростью ветра более 24 м/с) в Северной Атлантике увеличилось. Расчеты по климатическим моделям показывают, что в будущем количество глубоких циклонов может возрасть [7, 13].

В настоящее время наиболее полная информация об экстремальных волнах содержится в базе данных GlobWave [8], которая включает измерения высоты волн более 12 м в Мировом океане по данным альтиметрии со спутников ERS-1,2; Envisat; Topex Poseidon; Jason-1,2; Geosat FO за период с августа 1991 по март 2010 года.

За указанный период было зарегистрировано 5256 волн с высотой более 12 м, из которых 1046 (19,9 %) имели высоту более 14 м и 185 (3,5 %) более 16 м. Из 5256 случаев 26 % относится к акватории Северной Атлантики. Из 17 случаев высоты волн более

18 м 10 относится к Северной Атлантике, 4 – к северной части Тихого океана и 3 – к остальной части Мирового океана. Получено, что в среднем в Мировом океане происходит 5 штормов в год с высотой волн более 16 м. При нормировании на размер бассейна Северная Атлантика имеет наибольшую частоту возникновения глубоких циклонов и экстремальных волн.

Частично информация базы GlobWave использовалась в [5], где были проанализированы причины формирования экстремальных волн с высотой более 14 м в Северной Атлантике в период с 2002 по 2011 г. Было получено, что экстремальное волнение в Северной Атлантике в этот период в 81 % случаев формировалось под влиянием взрывных циклонов со скоростью заглубления более 1 гПа в час.

В настоящей работе продолжено исследование экстремального волнения в океане, при этом основное внимание уделено волнам с высотой более 16 м.

Исходные данные

В работе использовались данные о высотах волн из базы данных GlobWave [8] и реанализа ERA-Interim [10], траекториях циклонов из WEB-атласа [9], ежедневные поля геопотенциала поверхности 500 гПа и температуры воздуха на поверхности 850 гПа из реанализа NCEP/NCAR [12], карты приземного давления [18], суточные значения индекса североатлантического колебания (САКс).

Характеристики экстремального волнения в Северной Атлантике

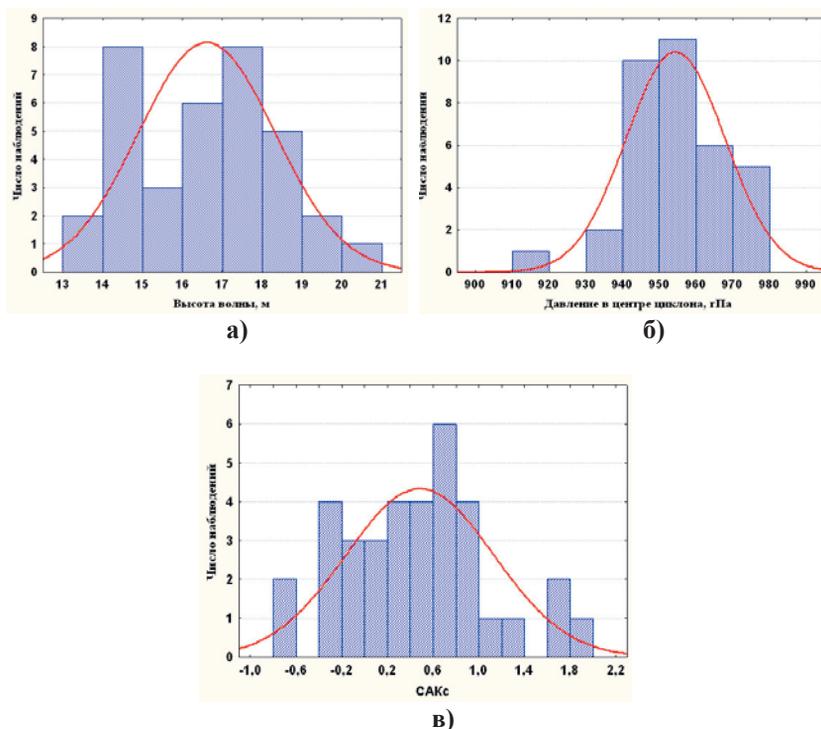
На основании данных [5, 8] была составлена сводная таблица характеристик циклонов и волн высотой более 14 м в Северной Атлантике за период с 1993 по 2011 г. Данные в таблице ранжированы по высоте волн. В рассматриваемом ряду наиболее часто встречаются волны с высотой от 14 до 15 м и от 17 до 18 м (рис. 1 а). Экстремальное волнение преимущественно вызывается глубокими циклонами с давлением в центре от 940 до 960 гПа (рис. 1 б).

Таблица

Характеристики циклонов, экстремальных волн и индекса САКс

№ п/п	Дата	Координаты центра циклона	Способ (платформа) измерения	Индекс САКс	Высота волны, м	Миним. давление в центре циклона, гПа
1	10.02.2007	48 °с.ш., 33 °з.д.	GFO	-0,16	20,2	963
2	9.02.2007	49 °с.ш., 19 °з.д.	Jason1	-0,05	19,2	951
3	2.02.1995	51 °с.ш., 33°з.д.	Topex	0,78	19,1	935
4	8.02.2000	58 °с.ш., 23°з.д.	GFO	1,75	18,6	953
5	12.02.2003	48 °с.ш., 40°з.д.	Topex	0,78	18,3	949
6	8.12.2007	54 °с.ш., 20°з.д.	Буй 62108	1,40	18,3	968
7	26.11.2006	47 °с.ш., 27°з.д.	GFO	0,85	18,2	947
8	10.03.2007	59 °с.ш., 25°з.д.	Jason1	1,12	18,1	945
9	10.01.1993	61 °с.ш., 07°з.д.	Topex	1,76	18,0	913
10	1.02.2002	60 °с.ш., 09°з.д.	GFO	0,16	18,0	931
11	5.01.1996	42 °с.ш., 29°з.д.	Topex	-0,67	17,5	947
12	18.01.1994	59 °с.ш., 26°з.д.	Topex	0,72	17,4	951
13	16.01.2009	55 °с.ш., 43°з.д.	Jason1	0,44	17,3	947
14	24.12.1998	52 °с.ш., 37°з.д.	Topex	0,46	17,2	945
15	10.01.2000	62 °с.ш., 22°з.д.	GFO	0,85	17,2	949
16	8.03.2003	47 °с.ш., 41°з.д.	Jason1	0,39	17,2	951
17	30.03.1994	54 °с.ш., 21°з.д.	Topex	1,82	17,0	941
18	10.03.2008	49 °с.ш., 08°з.д.	ERS2	1,00	17,0	943
19	28.12.1998	44 °с.ш., 34°з.д.	Topex	0,68	16,8	965
20	1.01.2007	46 °с.ш., 44°з.д.	Jason1	0,80	16,7	976
21	31.12.2000	45 °с.ш., 34°з.д.	Topex	-0,35	16,6	955
22	21.01.2002	42 °с.ш., 32°з.д.	Topex	-0,35	16,6	961
23	4.02.2011	61 °с.ш., 5°з.д.	Буй 64046	0,94	15,9	948
24	11.11.2001	66 °с.ш., 02°в.д.	SBWR	0,05	15,5	952
25	21.02.2007	48 °с.ш., 37°з.д.	Jason1	-0,25	15,1	952
26	24.03.2006	38 °с.ш., 42°з.д.	Jason1	-0,67	15,0	966
27	2.03.2004	57 °с.ш., 24°з.д.	Jason1	0,17	14,8	959
28	24.01.2002	45 °с.ш., 39°з.д.	Jason1	-0,23	14,7	972
29	12.02.2006	54 °с.ш., 30°з.д.	Jason1	0,34	14,6	960
30	23.01.2006	51 °с.ш., 50°з.д.	Jason1	0,21	14,4	958
31	14.01.2003	54 °с.ш., 24°з.д.	Jason1	0,52	14,3	974
32	13.01.2005	50 °с.ш., 41°з.д.	Jason1	0,39	14,3	966
33	30.12.2002	42 °с.ш., 39°з.д.	Jason1	-0,13	14,2	976
34	15.01.2002	51 °с.ш., 41°з.д.	Jason1	0,43	14,0	972
35	7.02.2002	55 °с.ш., 34°з.д.	Jason1	0,71	14,0	953
Среднее				0,48	16,6	954

Среднее значение индекса САКс (0,48) в таблице свидетельствует о том, что абсолютное большинство экстремальных волн (74 % случаев) возникает при положительной фазе САК, что также подтверждается данными гистограммы (рис. 1 в). По данным таблицы коэффициент корреляции высоты волн с давлением в центре циклонов составил $-0,51$, а с индексом САКс $0,31$. Коэффициент корреляции давления с САКс равен $-0,38$. Это означает, что чем сильнее развита положительная фаза САК, тем более глубокими формируются циклоны, которые вызывают более экстремальное волнение.



**Рис. 1. Гистограммы высоты волн более 14 м (а), давления в центре циклонов (б) и индекса САКс (в).
Кривая – нормальное распределение.**

Выше уже упоминалось, что экстремальное волнение в океане вызывается в основном взрывными циклонами [5]. По данным [8], все волны в Северной Атлантике высотой более 16 м сформировались под влиянием именно таких циклонов. Поэтому далее особенности взрывного циклогенеза будут рассмотрены более подробно.

Предвестники взрывного циклогенеза

Проблеме формирования взрывных циклонов посвящена обширная литература; результаты некоторых исследований обобщены в [6]. В [14, 15] на основе композитного анализа 42 взрывных циклонов в Северной Атлантике были выявлены особенности циркуляции атмосферы, предшествующие циклогенезу. Среди них:

- отрицательная аномалия геопотенциала H500 над северной частью Тихого океана и положительная аномалия над западом Северной Америки;

- ложбина в средней тропосфере, которая обуславливает северо-западный перенос над центральной частью Северной Америки за 24–36 часов до заглубления циклона и пересекает восточное побережье Северной Америки в момент заглубления;

- адвекция холода из западной Канады в район циклогенеза.

Характерно, что композитный анализ 25 обычных циклонов не выявил указанных особенностей. Это указывает на возможность прогноза возникновения взрывных циклонов на основе мониторинга циркуляции атмосферы.

В [16] в качестве факторов, характеризующих развитие взрывного циклогенеза, рассматривались следующие параметры:

- параметр роста Иди (Eady) – мера бароклинности атмосферы, которая характеризует крупномасштабные условия потенциального развития циклонов;

- скорость ветра на 250 гПа – характеристика струйного течения, которая сильно влияет на развитие циклонов;

- дивергенция на 250 гПа – в областях интенсивной дивергенции к северу от струйного течения происходит быстрое развитие циклонов;

– потенциальная температура на 850 гПа – индикатор совместного влияния потоков скрытого и явного тепла, которые могут вносить вклад в развитие циклонов.

Было получено, что сильное заглубление циклонов часто связано с экстремальными величинами перечисленных параметров. Также показано, что взрывные циклоны возникают наиболее часто при положительной фазе САК, что может объясняться большей областью с наиболее благоприятными условиями их развития, чем при отрицательной фазе. При положительной фазе САК эта область тянется от восточного побережья США к северной Европе, а при отрицательной фазе находится в западной части Северной Атлантики. Чем больше величина индекса САКс, тем циклоны глубже, имеют большее время жизни и более длинную траекторию. Основная область возникновения взрывных циклонов – у восточного побережья США.

Отметим, что эти результаты согласуются с выводами, полученными выше на основе данных таблицы. Для характеристики условий формирования циклона, вызвавшего максимальную высоту волны 20,2 м 10.02.2007 г. (см. таблицу), по данным реанализа NCEP/NCAR была получена композитная аномалия температуры воздуха на поверхности 850 гПа за период, предшествующий формированию взрывного циклона 8.02.2007 г. (рис. 2). Как видно из рисунка, быстрому углублению циклона предшествовал интенсивный вынос холодного воздуха с континента, что соответствует приведенным выше результатам.

Эволюция взрывных циклонов и экстремальное волнение

В [5] было выполнено сравнение эволюции взрывного и обычного циклонов и вызываемого ими ветрового волнения. Более детальная модель развития и затухания взрывного циклона, который может вызвать волны высотой более 16 м, предложена в [8]. Модель включает 4 стадии.

1 стадия (длительность 12–24 ч)

Начало бароклинной неустойчивости, которая вызывает быстрое заглубление циклона. Скорость ветра составляет 10–20 м/с. Высота волн зависит от предшествующего атмосферного воздействия.

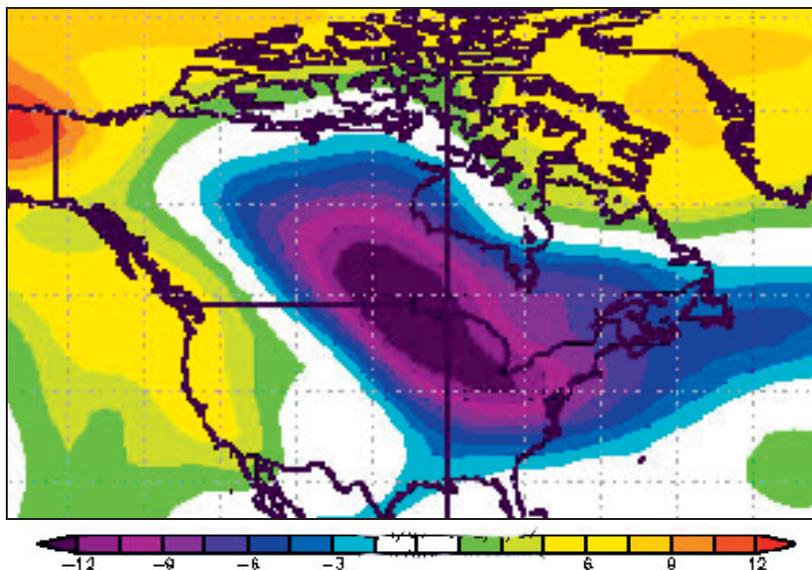


Рис. 2. Аномалия температуры (К) на поверхности 850 гПа
1–7.02.2007 г.

II стадия (длительность ~24 ч)

Взрывное заглубление циклона. Для циклонов, вызывающих волны высотой более 16 м, заглубление обычно составляет около 33 гПа за 24 часа. Скорость ветра возрастает до 35–40 м/с. Высота волн растет.

III стадия (длительность ~12 ч)

Довольно короткая стадия максимальной интенсивности циклона с сохранением минимального давления в центре и максимальной скорости ветра. Высота волн продолжает медленно увеличиваться к максимальным значениям.

IV стадия (длительность 24–48 ч)

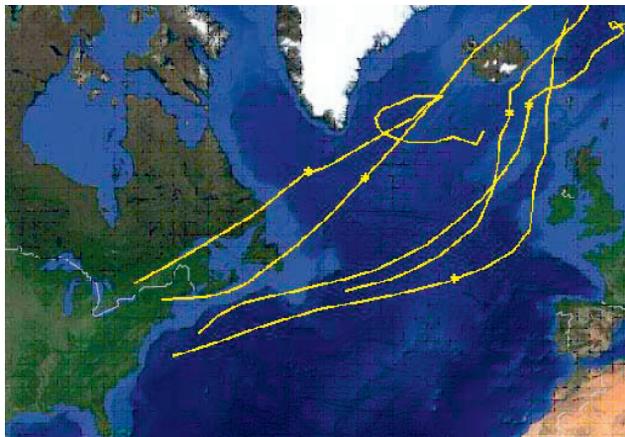
Стадия разрушения. Давление в центре циклона быстро растет, максимальные значения скорости ветра и высоты волн быстро уменьшаются.

Циклон, вызвавший максимальную высоту волн 20,2 м 10.02.2007 г., развивался именно по этой модели [8].

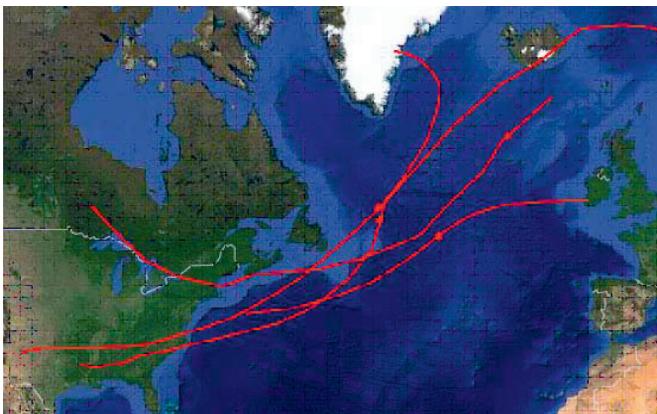
По данным WEB-атласа [9] были получены траектории и характеристики глубоких циклонов, вызвавших волны высотой более 16 м (рис. 3). Выявлено, что в случае зарождения циклона над океаном время до стадии максимальной интенсивности циклона составляет в среднем 36 ч, а при зарождении циклона над сушей может достигать 72 ч. Отметим, что циклоны, вызвавшие волны высотой более 18 м, зародились, в основном, над сушей (рис. 3в).



3а)



3б)

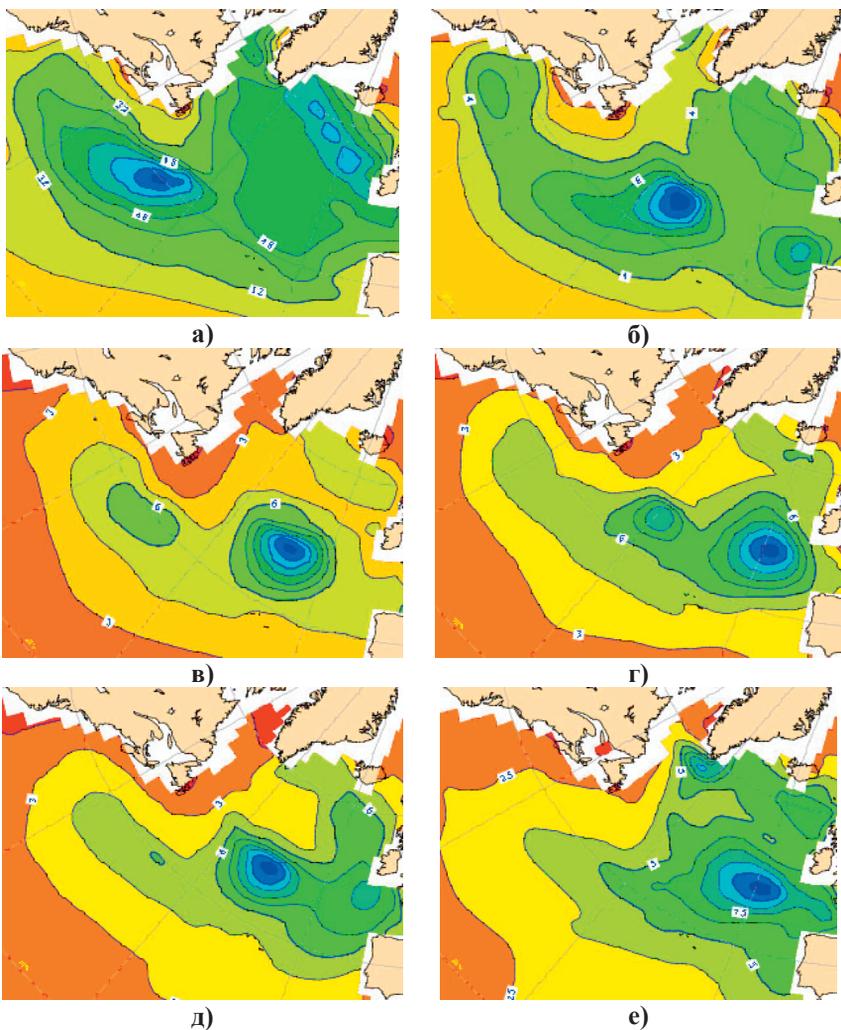


Зв)

Рис. 3. Траектории циклонов, вызвавших волны высотой 16–17 м (а), 17–18 м (б) и больше 18 м (в). Звездочками на траекториях обозначено положение циклона в стадии максимальной интенсивности.

По данным реанализа ERA-Interim [10] были получены распределения высоты волн в Северной Атлантике в период 8–10.02.2007 г., когда были зарегистрированы максимальные волны высотой 20,2 и 19,2 м (таблица). Эти волны были вызваны двумя глубокими циклонами, следующими один за другим. Первый из них сформировался над Гольфстримом 8.02.2007 г., стал смещаться на северо-восток и заглобился до минимального давления в центре 951 гПа 9.02.2007 г. В этот же день была зафиксирована волна высотой 19,2 м (рис. 4 а–в). Второй циклон также сформировался над Гольфстримом 8.02.2007 г., заглобился до 963 гПа 10.02.2007 г. и вызвал волну высотой 20,2 м (рис. 4 г–е).

Явление, когда циклоны следуют один за другим, объединяясь в серии (кластеры), хорошо известно [6, 14, 15]. Так, из 42 взрывных циклонов в западной части Северной Атлантики, рассмотренных в [14, 15], 23 были объединены в серии (с промежутками между циклонами менее 1 недели), а 19 были «изолированными» циклонами (с промежутками более 1 недели). Одним из условий для формирования серий служит сохранение в течение нескольких



**Рис. 4. Высота волн (м) в Северной Атлантике по данным реанализа ERA-Interim:
 8.02.2007 г. (12 ч) (а); 9.02.2007 г. (00 ч) (б); 9.02.2007 г. (12 ч) (в);
 10.02.2007 г. (00 ч) (г); 10.02.2007 г. (12 ч) (д); 11.02.2007 г. (00 ч) (е).**

суток указанных выше особенностей циркуляции атмосферы, благоприятных для взрывного циклогенеза, а именно пары ложбина–гребень над северной частью Тихого океана и Северной Америкой и мобильных ложбин в средней тропосфере, которые, выходя на акваторию Северной Атлантики, вызывают серии глубоких циклонов [14, 15].

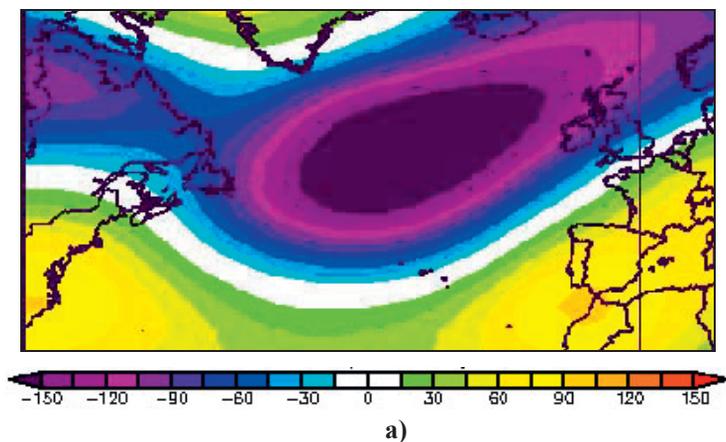
В качестве примера можно привести период с 14.01 по 9.02.2002 г., когда в Северной Атлантике сформировалось 9 глубоких циклонов, 5 из которых вызвали волны высотой от 14 до 18 м (таблица). На рис. 5 представлена аномалия геопотенциала поверхности 500 гПа за этот период (рис. 5 а) и траектория циклона, который 1.02.2002 г. вызвал волну высотой 18 м (рис. 5 б). Аномалия геопотенциала (рис. 5 а) свидетельствует об активной циклонической деятельности севернее 50° с.ш.

Заключение

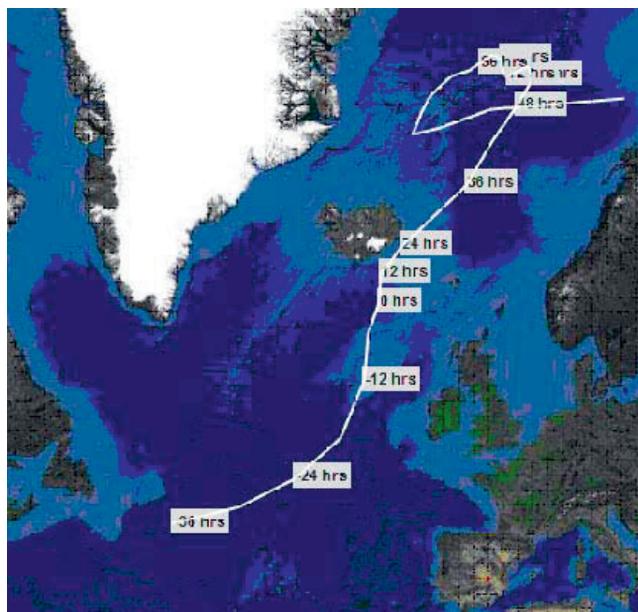
Рассмотрены условия формирования 35 экстремальных волн в Северной Атлантике с высотой более 14 ч в 1993–2011 гг. Абсолютное большинство волн (74 % случаев) возникло при положительной фазе САК. Наиболее часто экстремальное волнение вызывается глубокими циклонами с давлением в центре от 940 до 960 гПа. В рассматриваемом ряду наиболее часто встречались волны высотой от 14 до 15 м и от 17 до 18 м.

Экстремальное волнение в океане вызывается, в основном, взрывными циклонами со скоростью заглубления более 1 гПа в час. Формированию взрывных циклонов в западной части Северной Атлантики предшествуют особенности циркуляции атмосферы, в том числе интенсивная адвекция холодного воздуха из западной Канады в район циклогенеза. В случае зарождения циклона над океаном время до стадии максимальной интенсивности циклона и развития экстремального волнения составляет в среднем 36 ч, а при зарождении циклона над сушей может достигать 72 ч.

Сохранение в течение длительного времени особенностей циркуляции атмосферы, благоприятных для взрывного циклогенеза, может способствовать формированию серии глубоких циклонов с дискретностью несколько суток, вызывающих экстремальное волнение.



а)



б)

Рис. 5. Аномалия геопотенциала поверхности 500 гПа (м) 14.01–9.02.2002 г. (а) и траектория циклона 30.01–3.02.2002 г. (б). Цифры на траектории указывают положение циклона до стадии максимального развития (0 ч) и после нее.

Список использованных источников

1. Бадулин С.И., Иванов А.Ю., Островский А.Г. Волны-убийцы и их дистанционное зондирование // Исслед. Земли из космоса. – 2006. – № 1. – С. 77–92.
2. Вязилова Н.А., Вязилова А.Е. О штормовых циклонах в Северной Атлантике // Метеорология и гидрология. – 2014. – № 6. – С. 19–27.
3. Дивинский Б.В., Косьян Р.Д., Подымов И.С., Пушкарев О.В. Экстремальное волнение в северо-восточной части Черного моря в феврале 2003 г. // Океанология. – 2003. – Т. 43, № 6. – С. 948–950.
4. Лукин А.А., Мысленков С.А., Нестеров Е.С. Особенности термодинамической структуры атмосферы при формировании интенсивного волнения в океане // Труды Гидрометцентра России. – 2013. – Вып. 350. – С. 13–27.
5. Нестеров Е.С., Лукин А.А. Об экстремальном волнении в Северной Атлантике // Метеорология и гидрология. – 2012. – № 11. – С. 46–55.
6. Нестеров Е.С. Североатлантическое колебание: атмосфера и океан. – М.: Триада лтд, 2013. – 144 с.
7. Bengtsson L., Hodges K.I., Roeckner E. Storm tracks and climate change // J. Climate. – 2006. – Vol. 19. – No. 15. – P. 3518–3543.
8. Cardone V.J., Cox A.T., Morrone M.A., Swail V.R. Global distribution and associated synoptic climatology of very extreme sea states (VESS) // 12 International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting, Hawaii, October 31–November 4, 2011. – JCOMM-TR-67. – <http://www.jcomm.info/index.php>
9. Dacre H. F., Hawcroft M. K., Stringer M.A. et al. An extratropical cyclone atlas: a tool for illustrating cyclone structure and evolution // Bull. Amer. Met. Soc. – 2012. – Vol. 93, No. 10. – P. 1497–1502.
10. Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J. et al. The Era-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system // Quart. J. Roy. Met. Soc. – 2011. – Vol. 137. – P. 553–597.
11. Hanafin J., Quilfen Y., Vandemark D. et al. Phenomenal sea states and swell radiation: a comprehensive analysis of the 12–16 February 2011 North Atlantic storms // Bull. Amer. Met. Soc. – 2012. – Vol. 93, No. 12. – P. 1825–1832.
12. Kalnay E. et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project // Bull. Amer. Met. Soc. – 1996. – Vol. 77, No. 3. – P. 437–472.
13. Knippertz P., Ulbrich U., Speth P. Changing cyclones and surface wind speeds over the North Atlantic and Europe in a transient GHG experiment // Climate research. – 2000. – Vol. 15. – P. 109–122.

14. *Lackmann G.M., Bosart L.F., Keyser D.* Planetary- and synoptic-scale characteristics of explosive wintertime cyclogenesis over the western North Atlantic ocean // *Mon. Weath. Rev.* – 1996. – Vol. 124, No. 12. – P. 2672–2702.

15. *Lackmann G.M., Keyser D., Bosart L.F.* A characteristic life cycle of upper-tropospheric cyclogenetic precursors during the experiment on rapidly intensifying cyclones over the Atlantic (ERICA) // *Mon. Weath. Rev.* – 1997. – Vol. 125, No. 11. – P. 2729–2758.

16. *Pinto J.G. et al.* Factors contributing to the development of extreme North Atlantic cyclones and their relationship with the NAO // *Clim. Dyn.* – 2009. – Vol. 32. – P. 711–737.

17. *Vose R.S. et al.* Monitoring and understanding changes in extremes: extratropical storms, winds, and waves // *Bull. Amer. Met. Soc.* – 2014. – Vol. 95, No. 3. – P. 377–386.

18. <http://www.wetterzentrale.de/topkarten/fsfaxsem.html>)

Поступила в редакцию 30.03. 2015 г.