

ОСОБЕННОСТИ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ АТМОСФЕРЫ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ИНТЕНСИВНОГО ВОЛНЕНИЯ В ОКЕАНЕ

А.А. Лукин, С.А. Мысленков, Е.С. Нестеров

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

Введение

Прогноз ветрового волнения представляет большой интерес для мореплавания, рыболовства, гидротехнического строительства, добычи нефти и газа на шельфе и других видов морской деятельности [1]. Наиболее важен прогноз опасных ветровых волн. Согласно типового перечня опасных природных явлений, к опасным явлениям (ОЯ) относятся волны, высота которых в прибрежных районах составляет не менее 4 м, в открытом море – не менее 6 м, в открытом океане – не менее 8 м.

Северная Атлантика является одним из ключевых районов в Мировом океане, где режим ветра и волнения оказывает значительное влияние на морскую деятельность в прибрежных и удалённых от берега районах, поэтому здесь особенно важен качественный прогноз ветра и волнения.. Большая заблаговременность прогноза волнения, а в особенности возникновения опасного волнения (ОВ), для морской деятельности является актуальной задачей.

На основе краткосрочных прогнозов осуществляется проводка судов по безопасным и наиболее выгодным курсам, выпускаются предупреждения о возникновении опасных явлений для всех видов морской деятельности. Качественный прогноз возникновения ОВ с большей заблаговременностью может позволить заранее планировать все виды морских работ, в особенности в сложных условиях, и предупреждать о возникновении опасных явлений на акватории океана, что является очень важным и экономически выгодным в современных условиях.

В настоящее время прогноз ветрового волнения на основе гидродинамических моделей дает надежные результаты с заблаговременностью до 3–5 суток. Для сроков с большей заблаговременностью качество прогноза волнения резко ухудшается, особенно в случаях возникновения ОЯ, что создает непосредственную угрозу как для безопасной работы персонала, так и для обеспечения безаварийной и бесперебойной работы различных видов морской деятельности. Поэтому для планирования морских работ на длительные сроки необходимы прогнозы с большей заблаговременностью.

Целью данной работы является изучение и описание процессов, происходящих в средней тропосфере, которые предшествуют возникновению очагов опасного волнения на акватории Северной Атлантики. Исследования этих процессов в данной области могут позволить прогнозировать ОЯ с большей заблаговременностью, чем это осуществляется сейчас на основе современных отечественных и зарубежных гидродинамических моделей.

В [2] было выполнено в основном качественное описание процессов в средней тропосфере над северо-восточной частью Тихого океана и Северной Америкой, приводящих к формированию штормовых циклонов, вызывающих опасное волнение в Северной Атлантике. В данной работе будут получены количественные характеристики некоторых из этих процессов.

Физической основой изучаемых процессов является распространение волновых пакетов в атмосфере из Тихого океана через Северную Америку, с которыми, в частности, связаны ложбины в средней тропосфере, которые в свою очередь способствуют формированию циклонов, как над континентом, так и над океаном [5, 7, 8].

В свою очередь положение траекторий циклонов и очагов опасного волнения в Северной Атлантике сильно зависит от фазы североатлантического колебания (САК) [3]. При этом необходимо отметить важную роль обрушения атмосферных планетарных волн в формировании той или иной фазы САК. Волны, приходящие из восточной части Тихого океана на акваторию Северной Атлантики, могут разрушаться тем или иным путем и влиять на состояние САК [4]. Другим важным фактором, связанным с разрушением волн и влияющим на САК, может быть развитие взрывного циклогенеза в западной части Северной Атлантики.

Особенности атмосферной циркуляции средней тропосферы в регионе Северной Америки

Важнейшей особенностью циркуляции атмосферы является её непрерывная изменчивость, имеющая характер колебаний, которая выражается в зарождении и развитии атмосферных волн – ложбин и гребней. Понимание процессов образования и закономерностей развития ложбин и гребней может послужить основой для разработки физико-статистической модели прогноза опасного волнения на акватории океана.

Рассмотрим этапы развития атмосферных ложбин, проходящих в холодный период года через континент Северной Америки. На первом этапе ложбина из северо-восточной части Тихого океана смещается на восток к району Скалистых гор. Орографические условия оказывают задерживающее воздействие на ее перемещение, но хорошо развитые атмосферные ложбины переваливают через горы, мало меняя свои термодинамические

характеристики. При этом в приземном поле давления под зоной дивергенции в большинстве случаев наблюдается слабо выраженная ложбина или быстро движущийся молодой циклон (рис. 1).

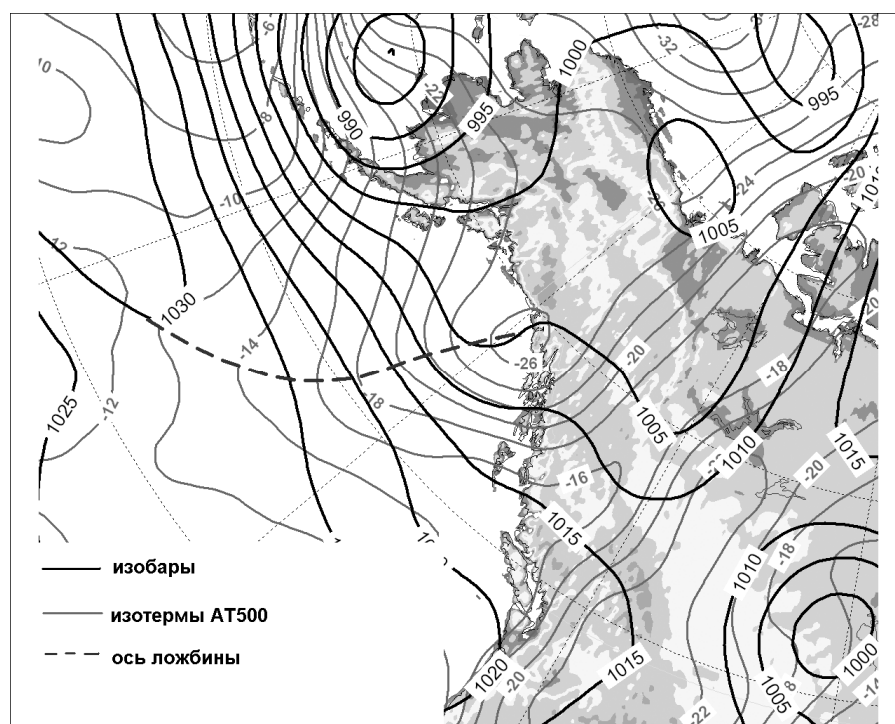


Рис. 1. Выход ложбины из северо-восточной части Тихого океана на Северную Америку.

Далее, продолжая свое перемещение над континентом, ложбина в тыловой части начинает захватывать выхоленный континентальный воздух и перемещать его к югу. Вовлекаемый холодный воздух вызывает дальнейшее обострение и углубление ложбины (рис. 2).

При выходе ложбины на акваторию Северной Атлантики выхоленный континентальный воздух натекает на теплую воздушную массу. Большая разность температур теплой и холодной воздушных масс вызывает резкое углубление молодого циклона. Из-за падения давления в циркуляционной системе циклона увеличиваются барические градиенты, что приводит к появлению зон штормовых и ураганных ветров. В некоторых случаях при очень больших температурных различиях теплой и холодной воздушных масс циклогенез происходит по «взрывному» типу. Через некоторое время воздействие штормовых и ураганных ветров приводит к образованию опасного волнения (рис. 3).

Именно интенсивность термодинамических процессов в атмосферных ложбинах и особенности циркуляции воздушных масс над Северной Америкой определяют эволюцию и перемещение циклонов, возникновение штормовых циклонов и образование зон опасного волнения на акватории Северной Атлантики. Все циклоны связаны с ложбинами, но не все

развиваются до стадии штормовых с сопутствующим им возникновением очагов опасного волнения.

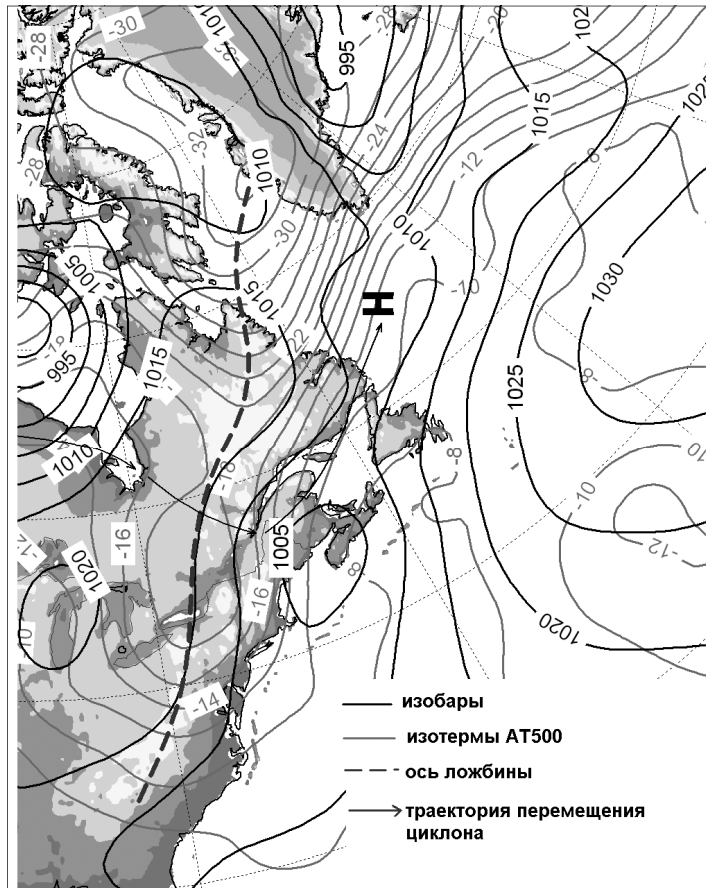


Рис. 2. Выход ложбины на акваторию Северной Атлантики.

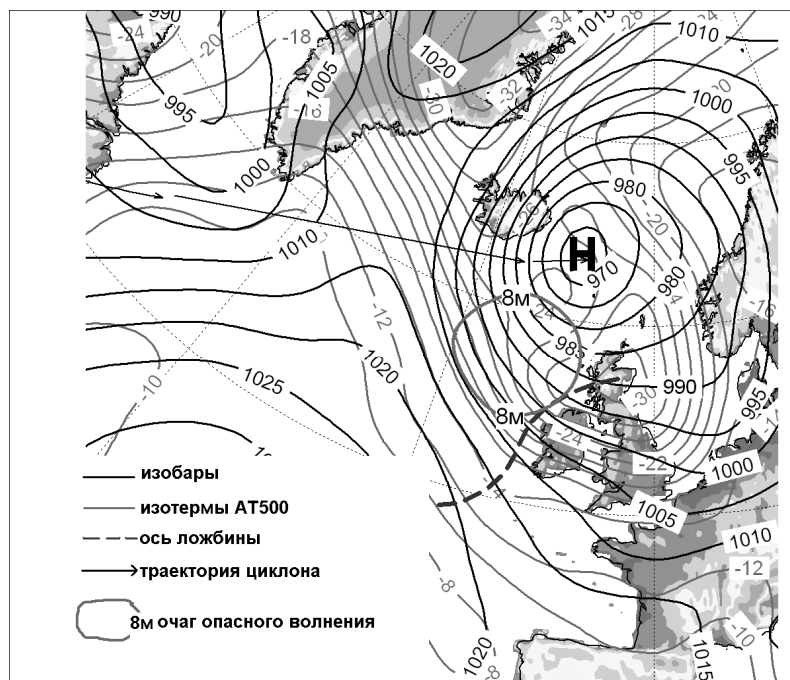


Рис. 3. Заключительная стадия развития ложбины – образование очага опасного волнения.

Для выявления особенностей циркуляции атмосферы, приводящих к образованию штормовых циклонов, были проведены исследования на основе данных пяти холодных периодов (октябрь–март) 2007–2012 гг. Для этого был рассмотрен ход метеорологических параметров в приземном слое и на нескольких уровнях в свободной атмосфере за период времени от возникновения молодого циклона до возникновения очага опасного волнения в стадии максимального развития штормового циклона. При этом было исследовано пространственно-временное распределение и изменение во времени следующих метеопараметров:

- давление на уровне моря;
- геопотенциал стандартных изобарических поверхностей;
- температура воздуха на стандартных изобарических поверхностях.

Одновременно с этим было выявлено влияние метеопараметров и их пространственного распределения на штормовые циклоны: координаты района зарождения, скорость углубления, минимальное давление, траектория перемещения, координаты возникновения очага опасного волнения, перемещение и эволюция (развитие) очага опасного волнения.

Особенности термодинамической структуры атмосферы и развитие атмосферных процессов, определяющих возникновение опасного волнения на акватории океана

На основе анализа термодинамической структуры средней тропосферы и штормовых циклонов на акватории Северной Атлантики за холодные периоды 2007–2012 гг. были выявлены следующие закономерности:

- все штормовые циклоны были связаны с хорошо выраженными ложбинами;
- ложбины, перемещаясь через континент Северной Америки, вызвали обрушение холодных воздушных масс, при выходе на океан способствовали формированию или усилению штормовых циклонов;
- средний период между выявлением ложбин в северо-восточной части Тихого океана и формированием очага опасного волнения в Северной Атлантике составил 6,5 суток, что позволяет при использовании прогнозов гидродинамических атмосферных моделей с заблаговременностью 120 ч увеличить заблаговременность прогноза ОЯ до 10–12 суток.

На основе анализа полей метеорологических элементов в северо-восточной части Тихого океана было выявлено, что параметром, в максимальной степени характеризующим прохождение ложбин, является температура воздуха на уровне стандартной изобарической поверхности 500 гПа.

Этот уровень был выбран с учетом особенностей распределения по вертикали температуры воздуха в тропосфере. Нижележащие слои воздуха подвержены сильному влиянию подстилающей поверхности, что сильно влияет на свойства воздушной массы, особенно в пограничном слое. Так, например, холодная воздушная масса, вышедшая на океан, очень быстро прогревается, перемещаясь над теплой водной поверхностью в нижнем слое атмосферы, что не позволяет определить интенсивность переноса холодных воздушных масс в циркуляционной системе ложбины. На более высокие слои тропосферы оказывают влияние динамические и радиационные процессы, происходящие в нижней стратосфере, что также не позволяет определить в полной мере интенсивность переноса холодных воздушных масс в циркуляционной системе ложбины.

На основе этих данных был проведен анализ колебаний температуры воздуха на уровне 500 гПа при прохождении через исследуемый район атмосферных ложбин. При этом было выявлено, что наибольшая изменчивость температуры в северо-восточной части Тихого океана при прохождении атмосферных ложбин наблюдается в районе 50–60° с.ш., 130–150° з.д.

На основе этих результатов на первом этапе разработки алгоритма для выявления атмосферных ложбин был проанализирован ход температуры воздуха на уровне 500 гПа в точке с координатами 55° с.ш., 140° з.д., который показал, что ход температуры в этой точке в полной мере отражает прохождение ложбин через исследуемый район.

На втором этапе количество ложбин, прошедших через исследуемый район, было сопоставлено со случаями возникновения опасного волнения. Этот анализ показал, что примерно 20–30 % ложбин, проходящих через этот район, не вызывают опасное волнение на акватории Северной Атлантики, а остальные 70–80 % непосредственно связаны со штормовыми циклонами и образованием очагов опасного волнения.

Для определения параметров ложбин был создан алгоритм расчета некоторых количественных характеристик, позволяющих оценить интенсивность атмосферных процессов (рис. 4). Расчет параметров ложбин был произведен на основе реанализа NCEP NCAR с шагом по пространству 0,5° и шагом по времени 1 ч [6]. Для исследования использовались поля температуры воздуха на уровне 500 гПа для холодных периодов 2010–2012 гг.

Как видно из рис. 4, основой алгоритма служит вычисление разности температур между центральной точкой и шестью точками на концах равных отрезков. Расчет разностей температур производится по трем сечениям. Ориентация сечений была выбрана с учетом преобладающих направлений перемещения атмосферных ложбин. Такое расположение точек на сечениях позволяет выявлять ложбины, перемещающиеся в различных направлениях.

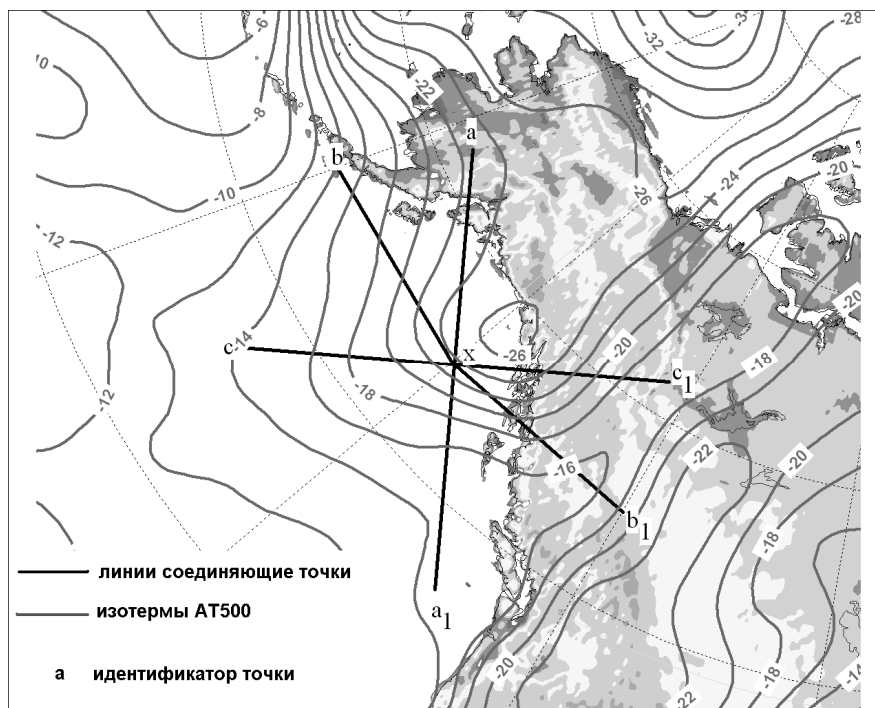


Рис. 4. Схема процедуры выявления атмосферных ложбин в северо-восточной части Тихого океана и расчета их параметров.

Наличие ложбины определяется выполнением условия, когда температура воздуха на уровне 500 гПа в центральной точке должна быть ниже температуры в этот же момент времени на двух точках, расположенных на концах сечений. Если данное условие выполняется на всех трех отрезках, то выбирается максимальная разность температур из трех значений. На рис. 5 отражен пример работы алгоритма – выявление ложбин в северо-восточной части Тихого океана в ноябре 2010 года.

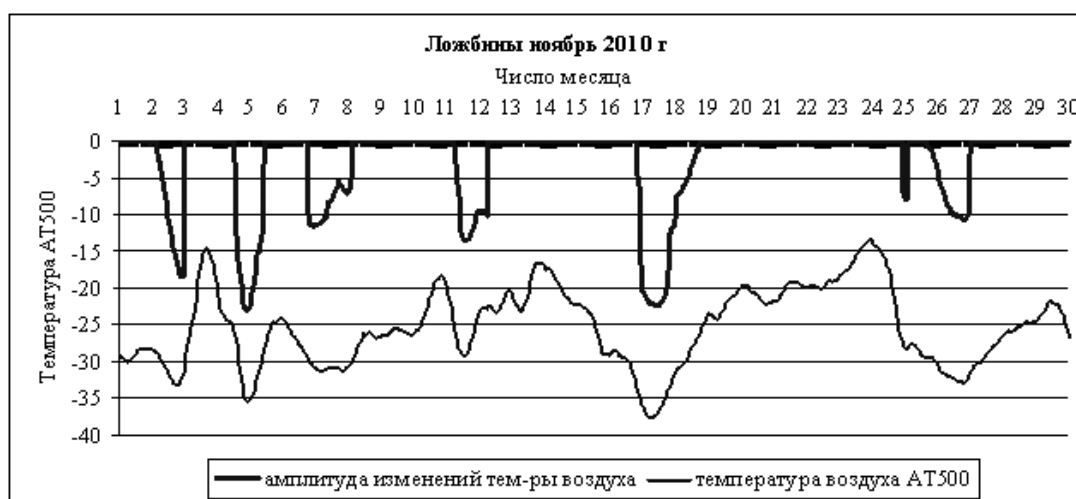


Рис. 5. Пример выявления ложбин в ноябре 2010 г.

Из рис. 5 видно, что в течение месяца через исследуемый район прошло большое количество слабовыраженных ложбин и 6 хорошо выраженных. На акватории Северной Атлантики эти ложбины вызвали формирование 8 штормовых циклонов. Две ложбины от 5 и 11 ноября вызвали образование второго очага ОВ. Это было связано с возникновением вторичных циклонов, развившихся в циркуляционной системе вышедших на акваторию океана ложбин.

Так как в данный алгоритм выявления ложбин заложены параметры только «штормообразующих» ложбин, то слабовыраженные возмущения термобарического поля автоматически отфильтровываются.

На основе анализа синоптических карт и карт барической топографии было определено, что ложбины, выявленные этим алгоритмом, вызвали зарождение штормовых циклонов, в зоне максимальных ветров которых наблюдалось ветровое волнение с максимальной высотой волн 8 м и более.

На рис. 6 приведена синоптическая карта в момент образования очага опасного волнения на акватории Северной Атлантики, вызванного смещением ложбины холода из северо-восточной части Тихого океана, перемещение которой схематически показано пунктирной линией. Положение осей ложбин показано в сроки, кратные 0 ч ВСВ с интервалом через одни сутки.

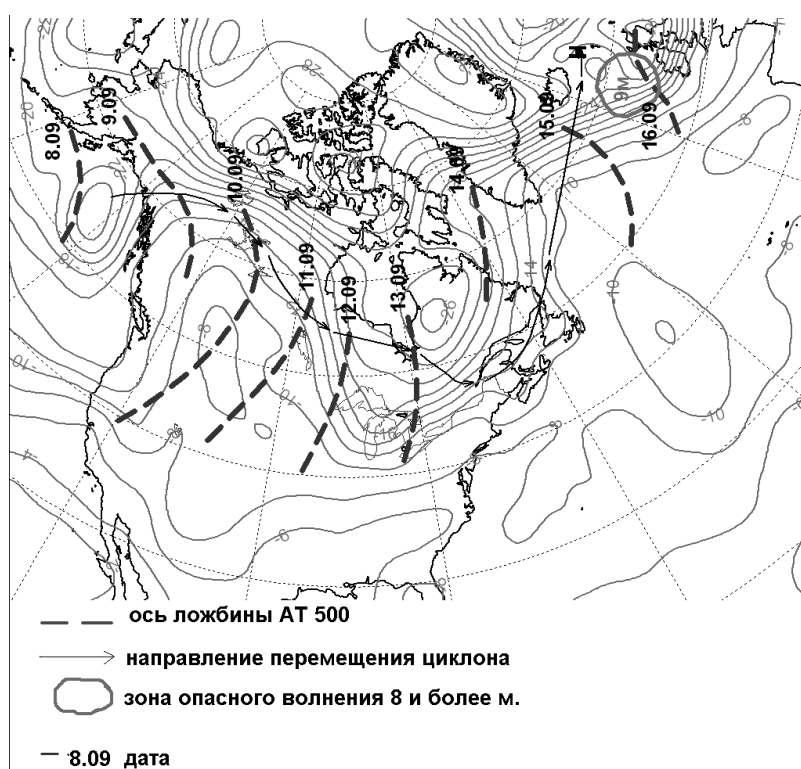


Рис. 6. Схема перемещения типичной ложбины от момента выхода на северо-восточную часть Тихого океана до возникновения очага опасного волнения в Северной Атлантике.

Из рис. 6 видно, что через 8 суток после прохождения атмосферной ложбиной северо-восточной части Тихого океана на акватории Северной Атлантики возник очаг опасного волнения с максимальной высотой волн 9 м. Ложбина перемещалась почти равномерно со средней скоростью 37 км/ч до момента выхода на акваторию океана, где скорость ее перемещения увеличилась и составила 60 км/ч.

Траектория и скорость перемещения ложбины являются типичными, но при различных структурах термобарического поля атмосферы эти характеристики ложбин могут существенно отличаться от типичной схемы.

Так, например, временной интервал от момента обнаружения ложбины до возникновения опасного волнения может составлять от 3 до 13 суток, а траектория перемещения сильно отклоняться от типичной, что непосредственно влияет на время образования и местоположение очага опасного волнения.

Для разделения ложбин, приходящих из северо-восточной части Тихого океана, на «штормообразующие» и «штормобезопасные» были проанализированы два холодных периода года с ноября по март 2010–2011 и 2011–2012 гг. В результате были выявлены необходимые начальные параметры ложбин, которые, перемещаясь на акваторию Северной Атлантики, вызывали возникновение очагов опасного волнения (табл. 1 и 2).

На основе данных табл. 1 и 2 были определены средние, максимальные и минимальные значения параметров (табл. 3).

Эти данные позволили определить пороговые значения параметров ложбин в северо-восточной части Тихого океана, вызывающих образование штормовых циклонов и очагов опасного волнения в Северной Атлантике.

На основе полученных результатов можно заключить, что минимальная амплитуда температуры в «штормообразующей» ложбине составляет 4 °С, при этом максимальные значения достигали 25 °С. Значение 4 °С можно принять за пороговое значение амплитуды в температурном поле ложбины на поверхности 500 гПа.

Дополнительным критерием является минимальная температура воздуха на уровне 500 гПа, так как в ходе исследований было выявлено, что ложбины с амплитудой температуры более 4 °С, но минимальной температурой на оси ложбины в исследуемом районе выше -20 °С, не вызывали образование штормовых циклонов и очагов опасного волнения.

Таблица 1

Параметры ложбин в средней тропосфере и очагов опасного волнения в Северной Атлантике в период с ноября 2010 по февраль 2011 г.

Дата обнаружения ложбины	Дата возникновения очага ОВ $h > 8$ м	Миним. темпер-ра на оси ложбины (°С)	Амплитуда ложбины (°С)	Индекс САК в момент обнаружения ложбины	Индекс САК в момент образования ОВ	Среднее значение индекса САК за период развития ложбины	Интервал времени между обнаружением ложбины и образованием ОВ (сутки)	Координаты центра очага ОВ	
								Широта (° с.ш.)	Долгота (° з.д.)
31.X	6.XI	-33	15	-0,30	-0,20	-0,20	6	40	40
2.XI	11.XI	-32,8	18,4	0	-0,90	-0,41	9	54	21
5.XI	11.XI	-35,3	22,8	0,51	-0,90	-0,55	6	43	61
7.XI	17.XI	-31	7	0,10	-0,10	-0,34	10	51	18
11.XI	21.XI	-29,3	13,4	-0,90	-1,00	-0,43	10	60	50
17.XI	27.XI	-37,5	22,2	-0,10	-2,53	-1,42	10	59	48
26.XI	5.XII	-32,5	9,9	-2,63	-1,21	-2,09	9	45	25
7.XII	14.XII	-31	8	-1,11	-1,54	-1,02	7	48	42
13.XII	22.XII	-35	9	-1,42	-0,83	-1,15	9	35	60
16.XII	27.XII	-36,5	7,8	-1,12	-0,87	-1,06	11	39	62
28.XII	10.I	-40,5	17,3	-0,97	-0,14	-1,29	13	40	55
7.I	13.I	-35,5	17,7	-1,24	0,47	-0,29	6	40	62
12.I	18.I	-38	20,5	0,28	0,34	0,46	6	52	45
18.I	23.I	-33,8	15,2	0,34	-0,80	-0,25	5	59	56
20.I	24.I	-26,9	10,5	-0,05	-0,94	-0,60	4	35	54
22.I	28.I	-29,1	7,3	-0,78	-0,07	-0,63	6	41	58
24.I	31.I	-29,5	12,9	-0,94	0,46	-0,25	7	62	12
25.I	2.II	-29,4	4	-0,87	0,83	0,02	8	54	28
27.I	4.II	-33	16,2	-0,36	0,94	0,40	8	59	9
2.II	7.II	-24,5	-	0,73	0,87	0,82	5	42	5
3.II	7.II	-29,1	-	0,96	0,87	0,84	4	48	10
4.II	9.II	-31,6	12,5	0,94	0,37	0,71	5	46	43
6.II	11.II	-30,3	13,6	0,65	0,41	0,55	5	45	42
8.II	13.II	-24,8	6,3	0,64	0,64	0,50	5	42	4
11.II	17.II	-32	12,7	1,90	0,09	0,49	6	53	52
15.II	23.II	-38,5	19,7	0,60	-0,03	0	8	52	31
17.II	24.II	-30,1	-	0,09	-0,03	-0,12	6	34	55
20.II	27.II	-32,3	12,3	-0,28	1,16	0,44	7	54	48

Таблица 2

Параметры ложбин в средней тропосфере и очагов опасного волнения в Северной Атлантике в период с ноября 2011 по февраль 2012 г.

Дата обнаружения ложбины	Дата возникно-вения очага ОВ $h > 8$ м	Миним. темпер-ра на оси ложбины (°С)	Амплитуда ложбины (°С)	Индекс САК в момент обнаружения ложбины	Индекс САК в момент образования ОВ	Среднее значение индекса САК за период развития ложбины	Интервал времени между обнаружением ложбины и образованием ОВ (сутки)	Координаты центра очага ОВ	
								Широта (° с.ш.)	Долгота (° з.д.)
2.XI	11.XI	-34,1	23,2	-0,33	0,02	0,41	9	40	64
7.XI	13.XI	-34,3	15,0	1,11	0,17	0,42	6	60	51
11.XI	18.XI	-27,1	12,7	0,02	0,25	0,04	7	60	50
15.XI	20.XI	-32,3	-	-0,03	1,23	0,36	5	54	43
17.XI	22.XI	-36,1	22,0	-0,03	1,36	0,81	5	54	30
23.XI	29.XI	-39,3	25,0	1,37	1,64	1,58	6	68	20
29.XI	3.XII	-31,8	4,6	1,64	2,00	1,70	5	57	10
6.XII	9.XII	-22,3	-	2,00	0,98	1,45	3	52	51
10.XII	15.XII	-35,6	16,9	1,30	1,22	1,49	5	49	9
13.XII	19.XII	-33,8	14,5	1,70	0,52	1,03	6	60	36
15.XII	20.XII	-32,3	9,1	1,22	0,54	0,78	5	40	54
17.XII	23.XII	-33,9	13,0	0,76	1,44	0,72	6	60	11
20.XII	24.XII	-35,4	11,8	0,54	1,85	1,03	4	60	11
25.XII	31.XII	-35,8	-	1,78	1,42	1,20	6	50	40
30.XII	3.I	-40,3	-	0,98	1,53	1,33	5	49	10
2.I	9.I	-33,8	14,4	1,36	0,73	0,98	7	58	25
5.I	10.I	-33,0	9,9	1,02	0,52	0,64	5	60	12
11.I	18.I	-29,8	13,0	0,11	1,43	0,45	7	56	26
14.I	20.I	-38,6	21,1	0,16	1,14	0,92	6	54	47
19.I	24.I	-25,0	-	1,36	0,44	0,85	5	54	47
21.I	26.I	-37,5	10,5	0,92	0,37	0,58	5	61	-1
26.I	1.II	-41,3	16,6	0,37	0,13	0,25	7	61	33
31.I	5.II	-34,5	9,1	0,26	0,14	0,12	5	46	46
8.II	13.II	-31,3	12,1	1,02	-0,22	0,42	5	51	47
17.II	24.II	-34,8	14,7	0,48	0,64	0,52	7	51	47
22.II	27.II	-34,0	7,8	0,69	0,83	0,66	5	54	25
24.II	1.III	-35,0	7,4	0,64	0,96	0,78	7	45	40

Средние, максимальные и минимальные значения параметров ложбин в средней тропосфере и очагов опасного волнения в Северной Атлантике в холодные периоды 2010–2012 гг.

Параметр	Минимальная температура на оси ложбины (°С)	Амплитуда ложбины (°С)	Индекс САК в момент обнаружения ложбины	Индекс САК в момент образования ОВ	Среднее значение индекса САК за период развития ложбины	Интервал времени между обнаружением ложбины и образованием ОВ (сутки)	Координаты центра очага ОВ	
							Широта (° с.ш.)	Долгота (° з.д.)
Среднее значение	–33,0	13,5	0,3	0,3	0,3	6,5	50,8	36,0
Минимальное значение	–41,3	4,0	–2,6	–2,5	–2,1	3,0	34,0	1,0
Максимальное значение	–22,3	25,0	2,0	2,0	1,7	13,0	68,0	64,0

Список использованных источников

1. Абузьяров З.К, Думанская И.О., Нестеров Е.С.. Оперативное океанографическое обслуживание. – М., Обнинск: ИГ-СОЦИН, 2009. – 287 с.
2. Лукин А.А. Циркуляция в средней тропосфере и прогноз опасного ветрового волнения в Северной Атлантике // Труды Гидрометцентра России. – 2012. – Вып. 347. – С. 169–180.
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. Нестеров, Е.С. Североатлантическое колебание: атмосфера и океан. – М.: Триада, лтд, 2013. – 144 с.
5. Chang E.K., Yu D.B. Characteristics of wave packets in the upper troposphere. Part 1: Northern hemisphere winter // J. Atmos. Sci. – 1999. – Vol. 56, No. 11. – P. 1708–1728.
6. CISL Research Data Archive. – <http://rda.ucar.edu>
7. Hakim G.J. Developing wave packets in the North Pacific storm track // Mon. Weath. Rev. – 2003. – Vol.131, No. 11. – P. 2824–2837.
8. Li Y., Lau N.-C. Contributions of downstream eddy development to the teleconnection between ENSO and the atmospheric circulation over the North Atlantic // J. Climate. – 2012. – Vol. 25, No. 14. – P. 4993–5010.

Поступила в редакцию 09.10.2013 г.