

ТЕХНОЛОГИЯ ОПЕРАТИВНОГО ПРОГНОЗА ОПАСНОГО ВОЛНЕНИЯ В СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКЕ С ЗАБЛАГОВРЕМЕННОСТЬЮ ДО 10–15 СУТОК

Е.С. Нестеров, А.А. Лукин, С.А. Мысленков, Т.В. Красюк

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации
nesterov@metcom.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 (ОВ). Согласно типового перечня опасных природных явлений, к опасным явлениям 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.

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 ухудшается, в особенности это проявляется в условиях возникновения ОВ, что создает угрозу для безопасности различных видов морской деятельности. Для планирования морских работ, требующих большого количества времени (буксировка морских объектов и т. д.), необходимы прогнозы, и в особенности прогнозы ОВ, с большей заблаговременностью. Возможные подходы к решению этой проблемы обсуждаются в [4].

Целью данной работы является разработка технологии оперативного прогноза опасного волнения в Северной Атлантике с заблаговременностью до 10–15 суток.

Основы технологии прогноза опасного волнения с повышенной заблаговременностью

В основе технологии лежат закономерности развития термодинамических процессов в средней тропосфере над северо-восточной частью Тихого океана и Северной Америкой. В [6, 8, 9] показано, что характерной чертой этих процессов является распространение волновых пакетов 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. Данные о термодинамических характеристиках атмосферы необходимы для выявления зон атмосферных возмущений (ложбин), которые оказывают непосредственное влияние на процессы образования и развития штормов на акватории Северной Атлантики, с которыми связано образование очагов ОВ. Термодинамические характеристики воздушных масс в районах перемещения ложбин в большой степени определяют их воздействие на циклогенез на акватории Северной Атлантики.

В [2, 3] показано, что только ложбины с определенными параметрами (минимальная температура, амплитуда, горизонтальные и вертикальные размеры, скорость и направление перемещения) являются устойчивыми и вызывают при выходе на акваторию океана образование очагов ОВ. Слабо выраженные возмущения (минимальная температура в системе ложбины выше $-33\text{ }^{\circ}\text{C}$, длина волны в ложбине менее 1800 км, амплитуда температуры в системе ложбины меньше $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ [2]) при выходе на акваторию Северной Атлантики не оказывают заметного влияния на процессы образования зон штормовых ветров, вызывающих сильное ветровое волнение.

Технология прогноза опасного волнения в Северной Атлантике с повышенной заблаговременностью основана на выявлении атмосферных возмущений (ложбин) и определении параметров их

термодинамической структуры для оценки устойчивости ложбин и прогноза их развития, что позволяет прогнозировать возникновение очагов ОВ с заблаговременностью до 10–15 суток.

Атмосферные ложбины и их термодинамическая структура могут быть определены на основе автоматизированного анализа структуры поля температуры на уровне стандартной изобарической поверхности 500 гПа (T_{500}), поэтому основой для реализации технологии служат прогностические поля T_{500} , рассчитанные на основе глобальной полулагранжевой модели среднесрочного прогноза погоды ПЛАВ [5].

Оперативная версия модели имеет горизонтальное разрешение $0,72^\circ$ по широте, $0,9^\circ$ по долготе, 28 неравномерно расположенных уровней по вертикали. Прогноз полей метеорологических элементов осуществляется с помощью численного решения уравнений гидротермодинамики в вертикальной сигма-системе координат на сфере. Пространственное разрешение модели и высокое качество прогноза T_{500} с заблаговременностью 96–120 ч позволяет успешно использовать выходную продукцию ПЛАВ в технологии прогноза ОВ в Северной Атлантике с повышенной заблаговременностью. Прогностические поля T_{500} на 96–120 ч позволяют увеличить заблаговременность прогноза ОВ на 4–5 суток.

Этапы технологии прогноза на основе модифицированного алгоритма

В [3] подробно рассматриваются особенности термодинамической структуры атмосферы при формировании опасного волнения и предложен алгоритм для выявления ложбин, который в данной работе существенно модифицирован и реализован.

Для прогноза развития и перемещения атмосферных возмущений необходимы данные о термодинамическом состоянии атмосферы над континентом Северной Америки и акваторией Северной Атлантики. Данные о параметрах атмосферы на достаточно обширной территории необходимы в связи с тем, что направление перемещения ложбины и ее эволюция (усиление или ослабление), напрямую зависят от термодинамического состояния атмосферы в данный момент времени на обширной территории. Атмосферная

ложбина при своем перемещении на восток взаимодействует с воздушными массами, располагающимися на севере континента Северной Америки, и в зависимости от их свойств и термодинамической структуры усиливается или ослабевает.

При преобладании сильно выхоложенных воздушных масс ложбина втягивает их в свою циркуляционную систему, чем вызывает их обрушение (глубокое проникновение к югу), при этом усиливаясь. При выходе на акваторию Северной Атлантики такие ложбины вызывают сильный циклогенез; в некоторых случаях циклоны развиваются по типу «взрывного», т. е. понижение давления в центре циклона за сутки составляет 24 гПа и более.

В случаях, когда воздушные массы выхоложены недостаточно (температура воздуха в районе оси ложбины -33°C и выше), обрушение холодных воздушных масс происходит с меньшей интенсивностью. При выходе на акваторию Северной Атлантики такие ложбины также вызывают возникновение очагов ОВ, но с меньшей интенсивностью. Термическая структура атмосферы над континентом Северной Америки и акваторией Северной Атлантики определяет район возникновения очага ОВ, интенсивность, направление его перемещения и эволюцию.

Все вышеперечисленные закономерности, основанные на ранее изученных процессах в средней тропосфере, которые предшествуют возникновению очагов ОВ, были заложены в алгоритмы технологии прогноза ОВ. Основными этапами технологии прогноза ОВ являются:

- выявление ложбины и оценка ее устойчивости;
- расчет скорости перемещения ложбины;
- прогноз времени и района возникновения очага ОВ;
- визуализация прогностической информации.

Этап 1. Выявление ложбины и оценка ее устойчивости

На первом этапе производится выявление ложбин. Для этого используются прогностические поля T_{500} по модели ПЛАВ с заблаговременностью 96 и 120 ч. Зона поиска и идентификации ложбин находится в пределах $30-65^{\circ}$ с.ш., $180-120^{\circ}$ з.д. (рис. 1). Для выявления признаков (идентификации ложбины) в прогностических

полях T_{500} для каждого узла регулярной сетки производится автоматизированный поиск минимумов температуры в области с характерным масштабом, не превышающим 1800 км в зональном направлении. Данный масштаб выбран с учетом статистических данных ложбин, вызывающих возникновение очагов ОВ на акватории Северной Атлантики. Ложбины с меньшими горизонтальными размерами обычно неустойчивы и в редких случаях вызывают масштабные циклонические возмущения на акватории Атлантического океана.

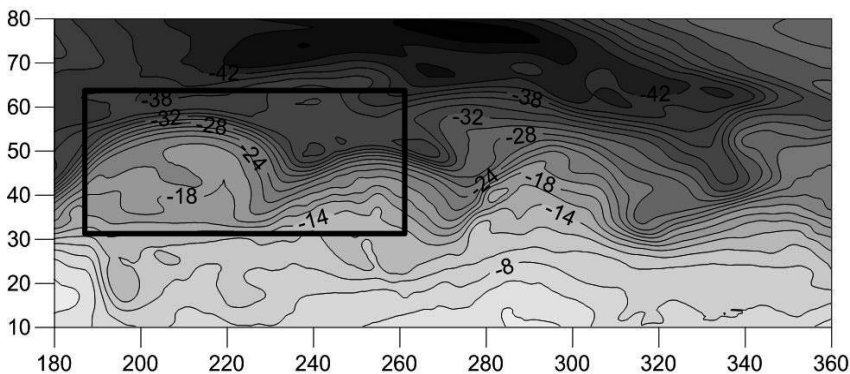


Рис. 1. Распределение температуры T_{500} и зона поиска ложбин (черный прямоугольник).

В случае, если температура воздуха в узле регулярной сетки минимальна, т. е. растет в западном и восточном направлениях от узла, определяется амплитуда ложбины по данным изменений температуры в обе стороны от узла. Для каждого найденного температурного минимума в пределах зоны поиска определяется амплитуда температурных колебаний (рис. 2).

В случае, если в поле температур найдены минимумы, удовлетворяющие вышеперечисленным параметрам, то считается, что атмосферная ложбина выявлена. Далее производится ее идентификация как штормовой или не штормовой, т. е. может она вызвать возникновение очага ОВ на акватории Северной Атлантики или нет. Для этого в автоматическом режиме на основе разработанного

алгоритма производится сравнение минимальной температуры на оси ложбины и амплитуды колебаний температуры в ее циркуляционной системе с ранее выявленными критериями штормовой опасности ложбин.

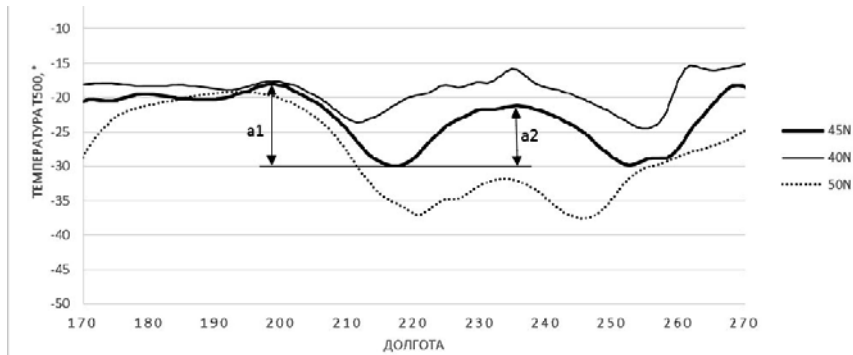


Рис. 2. Изменение температуры T_{500} на различных широтах (a_1 , a_2 – амплитуды ложбин).

Так, ложбина с минимальной температурой на оси ниже -33°C и амплитудой колебания температуры не менее 4°C [2] считается штормовой, а ложбина с минимальной температурой на оси выше -33°C и амплитудой колебания температуры менее 4°C – нет. Если ложбина классифицируется как штормовая, то в автоматическом режиме выбирается точка температурного минимума с максимальной амплитудой по сравнению с другими точками, характеризующими ось ложбины; фиксируются широта и долгота этой точки.

Этап 2. Расчет скорости перемещения ложбины

На втором этапе на основе разработанного алгоритма производится расчет скорости перемещения штормовой ложбины. В случае выявления ложбины и идентификации ее как штормовой (на основе прогноза T_{500} с заблаговременностью 96 ч) производится такая же процедура выявления и идентификации на основе прогноза T_{500} с заблаговременностью 120 ч. Если ложбина, выявленная в поле T_{500} с заблаговременностью 120 ч, идентифицирована как

штормовая и находится восточнее относительно ложбины в прогнозе T_{500} с заблаговременностью 96 ч, то рассчитывается средняя за сутки скорость перемещения ложбины на основе разности координат оси ложбины за 24 ч.

Этап 3. Прогноз времени и района возникновения очага ОВ

Для определения района возникновения очагов ОВ был проведен статистический анализ полей волнения и температуры T_{500} в Северной Атлантике по данным реанализа Era-interim [7]. Для периода с 2000 по 2010 год положение очагов ОВ было сопоставлено с анализом термобарического поля. Было выявлено, что положение очага ОВ связано с положением изотермы $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ в поле T_{500} . В большинстве случаев очаг ОВ образовывался на расстоянии 1000 км восточнее точки пересечения изотермой $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ восточного побережья Северной Америки. Эта особенность и была использована в технологии прогноза возникновения очагов ОВ.

Для определения района возникновения очагов ОВ на основе прогностических полей T_{500} определяется точка пересечения изотермой $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ восточного побережья Северной Америки. По координатам положения ложбины в прогностическом поле T_{500} с заблаговременностью 120 ч и координатам точки выхода ложбины на акваторию океана определяется расстояние, которое необходимо преодолеть ложбине до момента выхода на акваторию океана.

На основе полученного расстояния и среднесуточной скорости ложбины вычисляется время выхода ложбины на акваторию океана. Далее на основе расчетного времени выхода ложбины на акваторию океана рассчитывается время образования очага ОВ с учетом необходимого времени для разгона волн и времени для образования волн высотой 8 м. В среднем интервал времени от момента выхода ложбины на акваторию океана до момента образования очага ОВ составляет 12–24 ч.

Этап 4. Визуализация прогностической информации

На основе произведенных расчетов выдается карта с визуализированной расчетной информацией. На основе статистического

анализа параметров очагов ОВ в стадии образования было выявлено, что в подавляющем большинстве случаев образующийся очаг ОВ имеет форму, близкую к эллипсу, которая определяется формой области максимальных ветров.

Размеры области ОВ в момент увеличения высоты волн до 8 м и более непосредственно соответствуют зоне штормовых и ураганных ветров в сочетании с необходимым «разгоном» для волн. Поэтому в соответствии со среднестатистическими горизонтальными размерами штормовых циклонов и зон штормовых и ураганных ветров параметры очага ОВ вписываются в эллипс размером примерно 500×1000 км, который с учетом разгона ветровых волн располагается к востоку на 1000 км от расчетной точки выхода ложбины (рис. 3).

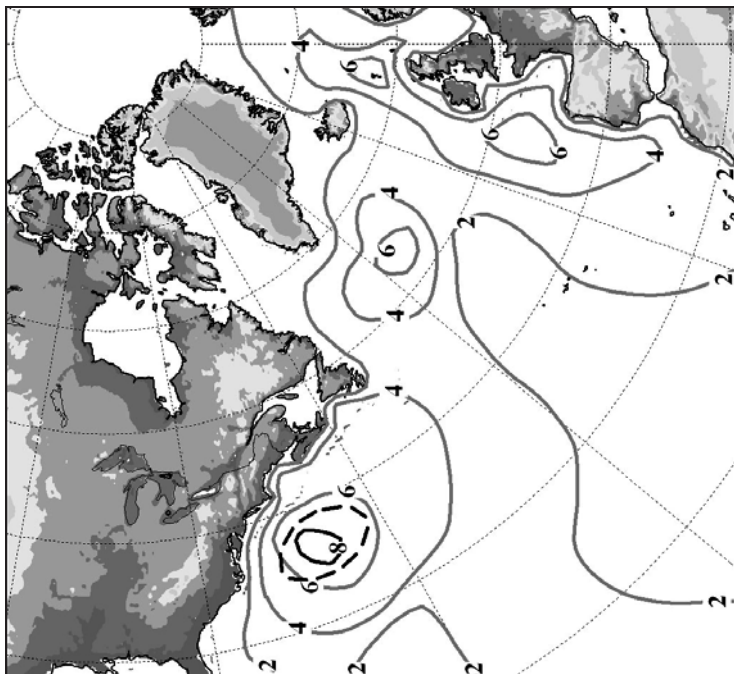


Рис. 3. Прогноз с заблаговременностью 12 суток положения области опасного волнения (пунктир) на 1.02.2015 г. и анализ волнения на 18 ч ВСВ 31.01.2015 г.

Оценка качества прогноза очагов ОВ с повышенной заблаговременностью

Технология прогноза опасного волнения с повышенной заблаговременностью была реализована в отделе морских гидрологических прогнозов ФГБУ «Гидрометцентр России» и в настоящее время проходит тестирование в оперативном режиме. Следует отметить, что прогноз возникновения очага ОВ не имеет фиксированной заблаговременности, т. к. она зависит от скорости движения ложбины и изменяется в пределах от 180 до 390 часов.

В период с 12 января по 16 апреля 2015 г. была произведена предварительная оценка качества прогнозов возникновения очагов ОВ. Оценка качества производилась на основе сравнения с измерениями параметров волнения на заякоренных океанских буйях с дискретностью 6 ч. Также для получения полной картины развития и перемещения очагов ОВ использовался анализ высоты ветрового волнения по модели WAVEWATCH с дискретностью 6 ч и прогноз волнения по этой же модели с заблаговременностью 180 ч.

Оценка качества проводилась для прогноза наличия ложбины и прогноза возникновения очага ОВ (таблица).

Рассматривались следующие характеристики:

- время возникновения очага ОВ;
- заблаговременность прогноза ОВ;
- место возникновения очага (положение южной части очага ОВ, ограниченное изолинией высоты волны 8 м).

Были рассчитаны следующие ошибки прогноза ОВ:

- средняя, минимальная и максимальная ошибки времени возникновения очага ОВ;
- средняя, минимальная и максимальная ошибки места возникновения очага ОВ.

Из 31 случая возникновения очагов ОВ успешно было спрогнозировано возникновение 28 очагов (таблица). Не было спрогнозировано возникновение двух очагов, и в одном из спрогнозированных очагов фактическая высота волн не превышала 6 м.

Ошибка прогноза по времени была рассчитана на основе сопоставления фактического времени образования очага ОВ с временем его прогноза. Ошибка с положительным знаком означает, что

образование очага было спрогнозировано позже, чем это произошло фактически, с отрицательным знаком – образование очага было спрогнозировано раньше, чем это произошло фактически. Средняя ошибка прогноза времени возникновения очага ОВ с учетом знака составила 12 ч (диапазон ошибки по времени от –81 до 96 ч).

Ошибка в положении района образования очага ОВ была рассчитана на основе сопоставления южной широты фактического положения очага ОВ (положения изолинии высоты волн 8 м) с южной широтой прогностического положения очага ОВ. Ошибка с положительным знаком означает, что фактическое положение очага ОВ наблюдалось к югу от спрогнозированного положения, ошибка с отрицательным знаком – фактическое положение очага ОВ наблюдалось к северу от спрогнозированного положения. Средняя ошибка прогноза положения очага ОВ с учетом знака составила –6° по широте (диапазон ошибки положения очага ОВ от –20° до 8° по широте).

Таблица

Оценка качества оперативного прогноза ОВ в Северной Атлантике с повышенной заблаговременностью

Прогноз возникновения очага ОВ					Фактич. параметры очагов ОВ		Ошибки прогноза	
№ прогноза	Прогноз даты наличия ложбины	Прогноз даты возникновения очага ОВ	Заблаговременность прогноза, ч	Прогноз южной границы очага ОВ	Дата возникновения очага ОВ	Южная граница очага ОВ	Ошибка по времени, ч	Ошибка положения очага (град)
1	11.01, 00 ч	20.01, 12 ч	232	40°с.ш.	21.01, 18 ч	55°с.ш.	–30	–15
2	13.01, 00 ч	22.01, 12 ч	225	50°с.ш.	23.01, 12 ч	42°с.ш.	–24	8
3	17.01, 00 ч	25.01, 18 ч	212	33°с.ш.	25.01, 00 ч	33°с.ш.	18	0
4	19.01, 00 ч	28.01, 00 ч	215	33°с.ш.	27.01, 12 ч	40°с.ш.	12	–7
5	20.01, 00 ч	01.02, 12 ч	302	37°с.ш.	31.01, 18 ч	33°с.ш.	18	4
6	Возникновение ОВ не спрогнозировано				03.02, 00 ч	35°с.ш.	–	–
7	27.01, 00 ч	07.02, 00 ч	263	34°с.ш.	06.02, 06 ч	37°с.ш.	18	–3

Прогноз возникновения очага ОБ					Фактич. параметры очагов ОБ		Ошибки прогноза	
№ прогноза	Прогноз даты наличия ложбины	Прогноз даты возникновения очага ОБ	Заблаговременность прогноза, ч	Прогноз южной границы очага ОБ	Дата возникновения очага ОБ	Южная граница очага ОБ	Ошибка по времени, ч	Ошибка положения очага (град)
8	29.01, 00 ч	10.02, 06 ч	296	38°с.ш.	07.02, 12 ч	38°с.ш.	66	0
9	30.01, 00 ч.	15.02, 06 ч	393	37°с.ш.	11.02, 06 ч	32°с.ш.	96	5
10	02.02, 00 ч	15.02, 12 ч	326	32°с.ш.	14.02, 00 ч	38°с.ш.	36	-6
11	Возникновение ОБ не спрогнозировано				15.02, 12 ч	32°с.ш.	-	-
12	08.02, 00 ч	17.02, 06 ч	220	37°с.ш.	17.02, 18 ч	35°с.ш.	-12	2
13	09.02, 00 ч	17.02, 21 ч	209	47°с.ш.	21.02, 06 ч	57°с.ш.	-81	-10
14	14.02, 00 ч	26.02, 00 ч	290	35°с.ш.	25.02, 06 ч	48°с.ш.	18	-13
15	19.02, 00 ч	26.02, 12 ч	184	38°с.ш.	27.02, 00 ч	52°с.ш.	-12	-14
16	21.02, 00 ч	05.03, 00 ч	311	33°с.ш.	01.03, 00 ч	53°с.ш.	96	-20
17	22.02, 00 ч	03.03, 00 ч	216	38°с.ш.	03.03, 12 ч	39°с.ш.	-12	-1
18	23.02, 00 ч	07.03, 06 ч	295	36°с.ш.	05.03, 18 ч	48°с.ш.	36	-12
19	24.02, 00 ч	08.03, 06 ч	296	37°с.ш.	09.03, 06 ч.	48°с.ш.	-24	-11
20	26.02, 00 ч	10.03, 12 ч	298	41°с.ш.	10.03, 18 ч	57°с.ш.	-6	-16
21	27.02, 00 ч	14.03, 00 ч	361	44°с.ш.	12.03, 06 ч	48°с.ш.	42	-4
22	04.03, 00 ч	12.03, 12 ч	205	40°с.ш.	12.03, 18 ч	49°с.ш.	-6	-9
23	07.03, 00 ч	16.03, 00 ч	217	42°с.ш.	16.03, 06 ч.	28°с.ш.	-6	-14
24	08.03, 00 ч	17.03, 12 ч	230	42°с.ш.	18.03, 18 ч	38°с.ш.	-30	4
25	09.03, 00 ч	22.03, 12 ч	323	42°с.ш.	22.03, 12 ч	44°с.ш.	0	-2
26	21.03, 00 ч	30.03, 06 ч	223	42°с.ш.	29.03, 06 ч	39°с.ш.	24	-3
27	23.03, 00 ч	02.04, 00 ч	240	50°с.ш.	02.04, 00 ч	58°с.ш.	0	-8
28	29.03, 00 ч	06.04, 12 ч	203	45°с.ш.	06.04, 00 ч	54°с.ш.	12	-9
29	03.04, 00 ч	14.04, 06 ч	272	43°с.ш.	11.04, 00 ч	61°с.ш.	78	-18
30	04.04, 00 ч	15.04, 12 ч	277	43°с.ш.	13.04, 18 ч	57°с.ш.	42	-14
31	08.04, 00 ч	16.04, 00 ч	192	39°с.ш.	16.04, 12 ч	39°с.ш.	-12	0

Основное преимущество разработанной технологии над существующими технологиями прогноза ветрового волнения на основе гидродинамических моделей состоит в том, что она позволяет прогнозировать возникновение очагов опасного волнения с большой заблаговременностью (от 7,5 до 16 суток). Например, заблаговременность глобального прогноза волнения по модели WAVEWATCH составляет 7,5 суток, при этом нужно оценить, насколько успешно прогнозируется именно опасное волнение.

Заключение

Создана оперативная технология прогноза возникновения опасного волнения в Северной Атлантике с заблаговременностью до 10–15 суток. Технология включает идентификацию атмосферных ложбин в средней тропосфере над западной частью Северной Америки, расчет скорости перемещения ложбин, расчет времени и района возникновения опасного волнения в Северной Атлантике. В технологии используется прогноз температуры в средней тропосфере на основе глобальной атмосферной модели ПЛАВ. Получены удовлетворительные оценки качества экспериментальных прогнозов опасного волнения в январе–апреле 2015 года.

Список использованных источников

1. Абузяров 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., 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.
4. Нестеров Е.С. О возможности прогноза опасного волнения в Северной Атлантике с повышенной заблаговременностью // Труды Гидрометцентра России. – 2013. – Вып. 350. – С. 5–12.

5. Толстых М.А., Богословский Н.Н., Шляева А.В., Мизяк В.Г. Оперативная технология расчета глобальных прогнозов с помощью полулагранжевой модели атмосферы ПЛИАВ // Труды Гидрометцентра России. – 2011. – Вып. 346. – С. 170–180.

6. Chang E. K. M., Yu D.B. Characteristics of wave packets in the upper troposphere. Part I: Northern hemisphere winter // J. Atmos. Sci. – 1999. – Vol. 56, No. 11. – P. 1708–1728.

7. 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.

8. Hakim G.J. Developing wave packets in the North Pacific storm track // Mon. Weath. Rev. – 2003. – Vol. 131, No. 11. – P. 2824–2837.

9. 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. – P. 4993–5010.

Поступила в редакцию 29.04.2015 г.