

О ГИДРОДИНАМИКО-СТАТИСТИЧЕСКОМ ПРОГНОЗЕ ШТОРМОВОГО ВЕТРА В СЕВЕРНОМ, НОРВЕЖСКОМ И БАРЕНЦЕВОМ МОРЯХ

К.Н. Головлев, А.А. Лукин, Э.В. Переходцева

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации
perekhod@metcom.ru*

Введение

Успешный прогноз максимальной скорости ветра в Северном, Норвежском и Баренцевом морях чрезвычайно важен для прогноза ветрового волнения в этих морях. Высота волн 4–5 м может достигаться уже при максимальной скорости ветра 20 м/с, а высота волн до 6–7 м – при скорости ветра более 24 м/с. В [10] изложен подробный анализ возникновения ветрового волнения в различных физико-географических условиях. Там же представлены современные зарубежные и отечественные гидродинамические модели прогноза ветрового волнения. Для оперативного океанографического обслуживания были разработаны физико-статистические методы: метод З.К. Абузярова и метод, основанный на прогнозировании скорости ветра на фронтах по методике М.А. Мастерских [1, 10].

В настоящее время в оперативную практику внедрен гидродинамический метод прогноза ветрового волнения [5], в котором в качестве атмосферного форсинга может использоваться прогноз скорости ветра из гидродинамической модели COSMO-Ru. Однако, как показывают оценки лаборатории испытаний Гидрометцентра России, максимальная скорость ветра более 22 м/с этой моделью прогнозируется недостаточно успешно. Синоптический прогноз таких скоростей ветра даже с заблаговременностью 12 ч

при использовании графических и расчетных методов в значительной мере субъективен. Другие отечественные гидродинамические модели также недостаточно успешно прогнозируют максимальные скорости ветра. Надежный их прогноз с заблаговременностью 12–48 ч до настоящего времени является весьма актуальной задачей.

Одним из возможных путей решения этой проблемы является использование статистических методов прогноза таких явлений, когда с помощью некоторого решающего правила проводится распознавание метеорологических ситуаций, способствующих их возникновению. При этом с целью автоматизации статистического прогноза в качестве предикторов в статистических решающих правилах могут использоваться выходные прогностические поля (заблаговременностью 12–48 ч) различных гидродинамических моделей.

Модель автоматизированного гидродинамико-статистического прогноза максимальной скорости ветра

Модель автоматизированного гидродинамико-статистического прогноза с заблаговременностью 12 и 24 ч скорости ветра более 20 м/с (для летнего периода) с использованием прогностических полей оперативной гидродинамической полусферной модели Гидрометцентра России (автор – Л.В. Беркович) использовалась в течение 15 лет в оперативной синоптической практике пяти УГМС Европейской территории России (ЕТР) [4]. Позднее, в 1999 г., была разработана статистическая модель для прогноза скорости ветра более 24 м/с заблаговременностью 12–24–36 ч (также с использованием прогностических данных полусферной модели [3, 7, 11]). В этих моделях применены методы, изложенные в [6], для исследования связей между 38 потенциальными предикторами, произведено сжатие этого исходного пространства предикторов, выбраны наиболее информативные и слабо зависимые предикторы, которые вошли в исходный вектор-предсказатель.

На основе байесовского подхода [2] были рассчитаны линейные статистические решающие правила диагноза и прогноза явлений сильного ветра первого и второго классов ($V > 19$ м/с и $V > 24$ м/с) с заблаговременностью 12–36 ч. Представленная в [2] формула линейной дискриминантной функция $U(\mathbf{X})$ имеет вид:

$$U(\mathbf{X}) = [\mathbf{X} - (\mathbf{M}(A) + \mathbf{M}(B))/2] W^{-1} \cdot [\mathbf{M}(A) - \mathbf{M}(B)] + \ln[P(A) C(B/A)/P(B) C(A/B)],$$

где $\{\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)\}$ – множество векторов, соответствующих исследуемым метеорологическим ситуациям;

$\mathbf{M}(A)$ – вектор средних значений параметров для выборки присутствия явления A (A в первоначальном варианте – явление сильных шквалов и максимального ветра с $V > 19$ м/с);

$\mathbf{M}(B)$ – вектор средних значений параметров для выборки наличия явления B (B – отсутствие сильных шквалов и максимального ветра со скоростью $V > 19$ м/с, т. е. отсутствие явления A);

W – средняя матрица ковариации:

$$W = (N_1 - 1)W_1(A) + (N_2 - 1)W_2(B) / (N_1 + N_2 - 2);$$

$W_1(A)$ – матрица ковариации для выборки ситуаций с явлением A ; N_1 – объем выборки A ;

$W_2(B)$ – матрица ковариации для выборки ситуаций с явлением B ; N_2 – объем выборки B ;

$P(A)$ – повторяемость явления A (рассчитанная по данным выборки явления A);

$P(B)$ – повторяемость явления B (рассчитанная по данным выборки явления B);

$C(B/A)$ – цена “пропуска цели” – ошибки первого рода; обычно обозначаемой как α ;

$C(A/B)$ – цена “ложной тревоги” – ошибки второго рода, обозначаемой как β .

При этом, исходя из оценки наносимого ущерба, предполагается, что цена “пропуска цели” много больше цены “ложной тревоги”, т. е. $C(B/A) \gg C(A/B)$. Статистическое решающее правило прогноза шквалов и сильных порывов ветра с $V > 19$ м/с тогда имеет вид:

если $U(\mathbf{X}) > 0$, то при неустойчивой стратификации прогнозируется явление А;

если $U(\mathbf{X}) < 0$, то прогнозируется отсутствие явления А, т. е. прогнозируется явление В.

Аналогичным образом были получены и линейные дискриминантные функции, или линейные статистические решающие правила, диагноза и прогноза явлений скорости ветра второго класса ($V > 24$ м/с) с заблаговременностью 12–36 ч. В итоге обе линейные дискриминантные функции с постоянными коэффициентами представляются в новых обозначениях в следующем виде:

$$F_1(\mathbf{X}) = \sum a_i x_i + c_1, \quad i=1, \dots, k, \quad k < n;$$

$$F_2(\mathbf{X}) = \sum b_i x_i + c_2, \quad i=1, \dots, k, \quad k < n;$$

где переменные x_i – значения геопотенциала на уровне 1000 гПа, температуры и модуля градиента температуры у Земли, температуры точки росы у Земли, а также значения скорости ветра на уровне 750 гПа, сдвига ветра в средней тропосфере и индекса термодинамической неустойчивости Вайтинга (I_w).

Эти автоматизированные гидродинамико-статистические методы прогноза были рекомендованы к использованию в синоптической практике в четырех регионах ЕТР. В Северо-Западном регионе оценки успешности прогноза опасного ветра первого класса ($V > 19$ м/с) и второго класса ($V > 24$ м/с) с заблаговременностью 24 ч и скорости ветра $V > 24$ м/с с заблаговременностью 36 ч оказались самыми успешными.

Предупрежденность прогноза скорости ветра $V > 24$ м/с и его отсутствия с заблаговременностью 36 ч составила, соответственно, $P_{\text{я}} = 93$ % и $P_{\text{отс}} = 97$ %, а критерий Пирси–Обухова $T = 0,9$ [7]. Метод был рекомендован для использования в синоптической практике в качестве основного расчетного.

С 2007 г. в статистической модели прогноза скорости максимальных порывов ветра двух классов используются гидродинамические прогнозы региональной модели Гидрометцентра России с горизонтальным разрешением 75×75 км (автор – В.М. Лосев).

В [8] приводятся успешные результаты гидродинамико-статистического метода прогноза, основанного на новой гидродинамико-статистической модели.

Адаптация модели гидродинамико-статистического прогноза максимального ветра к прогнозу штормового ветра в Северном, Норвежском и Баренцевом морях в холодный период года

В 2009–2010 гг. с помощью описанной выше модели прогноза были получены успешные прогнозы максимального летнего ветра с $V > 19$ м/с и $V > 24$ м/с по ЕТР с заблаговременностью до двух суток [8]. В лаборатории испытаний Гидрометцентра России была проведена независимая автоматизированная оценка прогноза этих явлений с заблаговременностью 12 ч, по ее результатам метод прогноза был рекомендован Ученым советом Гидрометцентра России и ЦМКП Росгидромета к использованию в оперативной практике [9].

Для оперативного автоматизированного прогноза двух классов летнего ветра ($V > 19$ м/с и $V > 24$ м/с) в узлах сетки 75×75 км по региональной модели рассчитываются значения дискриминантных функций $F_1(\mathbf{X})$ и $F_2(\mathbf{X})$, а также зависящих от них вероятностей прогноза в процентах по формулам:

$$P_1(\mathbf{X}) = 100 / (1 + \text{EXP}(-F_1(\mathbf{X}))),$$

$$P_2(\mathbf{X}) = 100 / (1 + \text{EXP}(-F_2(\mathbf{X}))).$$

По эмпирически найденным для каждой заблаговременности пороговым вероятностям $P_{\text{пор}}$ для явлений первого и второго классов выделяются прогнозируемые области сильного максимального ветра, соответственно, первого и второго классов.

Для севера Европы по данным региональной модели для всех месяцев года регулярно рассчитывался гидродинамико-статистический прогноз штормового ветра. Особенно важным является прогноз порывов ветра скоростью $V > 24$ м/с (по функции $F_2(\mathbf{X})$). При таком ветре, особенно в Норвежском море, высота волн может достигать 6–7 м, что считается опасным волнением. Поскольку, судя по данным, приведенным в таблице, наибольшая повторяемость штормового ветра приходится на осенне-зимние и весенние месяцы, нами была понижена пороговая вероятность (по сравнению с летним сезоном) для прогноза штормового ветра до $P = 58$ и 50 %, соответственно, для заблаговременности 12 и 36 ч.

Используя гидродинамико-статистический прогноз штормового ветра со скоростью $V > 19$ м/с и с $V > 24$ м/с, можно с достаточной точностью давать предупреждение о сильном волнении, учитывая связь скорости максимального ветра с высотой волнения в Северном, Норвежском и Баренцевом морях.

Таблица

Количество штормовых дней ($V > 15$ м/с) по акваториям Баренцева, Норвежского и Северного морей за 2011–2014 гг. и их среднее значение за 2000–2010 гг.

Месяц	Море	Количество штормовых дней				
		Среднее за 2000-2010 гг.	2011 г.	2012 г.	2013 г.	2014 г.
Январь	Баренцево	13	12	9	13	1
	Норвежское	19	18	21	15	10
	Северное	17	7	16	9	17
Февраль	Баренцево	12	12	15	7	4
	Норвежское	16	23	25	14	9
	Северное	11	16	8	6	10
Март	Баренцево	10	17	8	10	10
	Норвежское	14	24	24	17	16
	Северное	11	9	8	13	11
Апрель	Баренцево	9	2	3	8	5
	Норвежское	10	15	14	11	8
	Северное	5	5	3	7	2
Май	Баренцево	5	5	6	3	1
	Норвежское	5	7	12	6	4
	Северное	2	7	5	3	1
Июнь	Баренцево	3	4	0	0	4
	Норвежское	3	6	4	0	3
	Северное	2	2	3	0	3
Июль	Баренцево	3	3	1	1	1
	Норвежское	4	5	6	6	3
	Северное	2	9	6	1	2
Август	Баренцево	4	1	6	3	2
	Норвежское	5	7	4	3	6
	Северное	4	8	6	0	9

Месяц	Море	Количество штормовых дней				
		Среднее за 2000-2010 гг.	2011 г.	2012 г.	2013 г.	2014 г.
Сентябрь	Баренцево	6	3	6	3	8
	Норвежское	11	11	11	9	12
	Северное	8	9	9	5	3
Октябрь	Баренцево	12	11	9	7	17
	Норвежское	18	24	7	9	21
	Северное	12	15	7	7	14
Ноябрь	Баренцево	12	19	18	12	20
	Норвежское	17	20	23	20	15
	Северное	11	12	16	11	15
Декабрь	Баренцево	12	3	16	16	12
	Норвежское	19	23	13	13	27
	Северное	13	19	16	16	20

Используя гидродинамико-статистический прогноз штормового ветра со скоростью $V > 19$ м/с и с $V > 24$ м/с, можно с достаточной точностью давать предупреждение о сильном волнении, учитывая связь скорости максимального ветра с высотой волнения в Северном, Норвежском и Баренцевом морях.

Технология гидродинамико-статистического прогноза штормового ветра с заблаговременностью 12–36 ч в Баренцевом, Норвежском и Северном морях

Как уже было сказано, в системе АСООИ Гидрометцентра России оперативно рассчитываются значения вероятностей гидродинамико-статистического прогноза штормового ветра в узлах сетки 75×75 км для двух классов штормового ветра. Для каждого класса автоматически разрисовываются на двух бланках карт Европы изолинии равной вероятности $P_1(\mathbf{X})$ по функции $F_1(\mathbf{X})$ и вероятности $P_2(\mathbf{X})$ по функции $F_2(\mathbf{X})$. Области прогноза сильного ветра первого и второго классов выделяются на этих картах изолиниями с вероятностью выше указанной пороговой вероятности (разной для каждого класса и заблаговременности). Расчет в оперативном режиме вероятностей прогноза на 12–36 ч проводится

два раза в сутки (в 00 и 12 ч ВСВ). Авторская проверка расчетов прогноза штормового ветра на акваториях вышеуказанных морей проводилась в течение нескольких лет и показала успешные результаты прогноза сильного ветра двух классов ($V > 19$ м/с и $V > 24$ м/с). В силу ограниченного объема статьи приводим небольшую часть примеров, иллюстрирующих связь прогнозируемого и фактического максимального ветра с ожидаемой высотой ветрового волнения.

На рис. 1 а представлена карта фактических значений скорости ветра на 08.11.2011 г., когда над Норвегией и Норвежским морем почти повсеместно наблюдались порывы ветра от 22 до 25 м/с. Фактические значения высоты волнения на эту дату представлены на рис. 1 б. Из сопоставления рис. 1 а и 1 б следует, что такой ветер вызывает волнение высотой не менее 4–6 м.

На рис. 2 проведено сопоставление скорости прогнозического и фактического максимального ветра на дату 21.03.2011 г. Вероятности прогноза ветра скоростью более 24 м/с достигают значения $P=80\%$, что существенно выше пороговой; это свидетельствует об успешности прогноза опасного ветра с $V > 24$ м/с (рис. 2 а). На карте значений фактической скорости ветра (рис. 2 б) на многих станциях отмечена скорость ветра $V=25$ м/с.

На рис. 3а представлен прогноз на 22.03.2011 г. скорости штормового ветра по Норвежскому морю с помощью функции $F_2(\mathbf{X})$, что позволяет выделить области с достаточно высокими вероятностями $P=50-54\%$, но ниже пороговой вероятности $P=58\%$, в связи с чем в прогнозе следует ожидать в основном ветер с максимальной скоростью около 20 м/с. На рис. 3 б представлен прогноз сильного ветра со скоростью $V > 19$ м/с по Баренцеву морю, рассчитанный с помощью функции $F_1(\mathbf{X})$. Карта фактической скорости ветра (рис. 3 в) практически всюду над Баренцевым и Норвежским морями подтверждает прогноз скорости ветра $V=20$ м/с; при такой скорости ветра ожидаемая высота волн составит примерно 4 м.

На рис. 4 а представлен прогноз ветра со скоростью $V > 24$ м/с на 28.10.2013 г. с заблаговременностью 36 ч. Высокие значения вероятности прогноза ($P=90-95\%$) охватывают большую область, связанную со штормом «Святой Иуда» [12]. Этот шторм вызвал наибольшее волнение в Бискайском заливе, где высота волн дохо-

дила до 8 м. Вероятности прогноза такого штормового ветра в Северном море составила $P=55-90\%$. При этом высота волнения была несколько меньше и составила 4–5 м (рис. 4 б).

На рис. 5а в Норвежском море представлена область прогноза штормового ветра со скоростью $V>24$ м/с на дату 02.02.2015 г. с заблаговременностью 36 ч. Там, где вероятности прогноза равны $P=60-80\%$, ожидается максимальная скорость ветра более 24 м/с. На карте фактического волнения (рис. 5 б) в Норвежском море областям с более высокими вероятностями прогноза скорости ветра $V>24$ м/с соответствует высота волнения 21–24 фута (примерно 7–8 м), областям с вероятностями около 60 % соответствует высота волнения 15–18 футов (т. е. около 5–6 м).

Таким образом, из анализа приведенных примеров можно сделать вывод о возможности использования гидродинамико-статистического прогноза штормового ветра для прогноза ветрового волнения в указанных морях.

Заключение

Проведенная на большом архиве (сезоны 2011–2014 гг.) авторская проверка показала достаточную успешность оперативного гидродинамико-статистического прогноза штормового ветра в Норвежском, Баренцевом и Северном морях. Приведенные примеры показывают потенциальную возможность применения данного метода к прогнозу ветрового волнения в этих морях. В настоящее время авторами готовится программа расчета среднесрочного прогноза штормового ветра на основе использования выходных данных глобальной полулагранжевой гидродинамической модели среднесрочного прогноза погоды (автор – М.А. Толстых), которая позволит увеличить заблаговременность расчета прогноза штормового ветра до 5 суток.

Список использованных источников

1. *Абузяров З.К., Думанская И.О., Нестеров Е.С.* Оперативное океанографическое обслуживание. – М.; Обнинск: ИГ-СОЦИН, 2009. – 287 с.
2. *Андерсон Т.* Введение в многомерный статистический анализ. – М.: Физматгиз, 1963. – 500 с.

3. Булдовский Г.С., Шаколько Е.Н. О результатах испытания автоматизированного метода прогноза дневной максимальной скорости ветра, связанной с активной конвекцией для территории Московской области и прилегающих областей с заблаговременностью 12 и 24 ч // Информационный сборник № 25. – 2001. – С. 34–37.

4. Веселова Г.К., Гайфутдинова Р.Г., Гостева И.П., Дурова Т.В. Результаты испытания автоматизированного метода прогноза дневных максимальных скоростей ветра (не менее 20 м/с), связанных с активной конвекцией, заблаговременностью 12 и 24 ч // Информационный сборник № 23. – 1995. – С. 7–12.

5. Зеленко А.А., Струков Б.С., Реснянский Ю.Д., Мартынов С.Л. Система прогнозирования ветрового волнения в Мировом океане и морях России // Труды ГОИН. – 2014. – Вып. 215. – С. 90–101.

6. Переходцева Э.В. Прогноз шквалов статистическими методами классификации на основании диагностических и прогностических синхронных связей // Труды Гидрометцентра СССР. – 1985. – Вып. 271. – С. 37–60.

7. Переходцева Э.В., Золин Л.В. Гидродинамико-статистический прогноз и экспертная система прогноза смерчей на Европейской территории России // Труды Гидрометцентра России. – 2008. – Вып. 342. – С. 45–54.

8. Переходцева Э.В. Анализ устойчивости гидродинамико-статистической модели прогноза шквалов и смерчей для территории России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2009. – Т. 1. – Вып. 6. – С. 155–162.

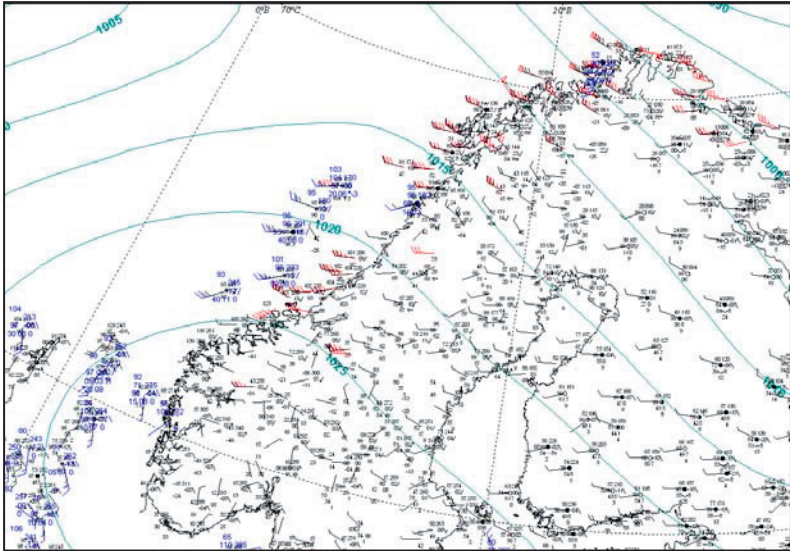
9. Переходцева Э.В. Гидродинамико-статистический метод прогноза шквалов и очень сильного ветра в градации опасных явлений в летний период с заблаговременностью 12–36 ч по выходным данным региональной модели для европейской территории России // Москва. Информационный сборник № 40. – 2013. – С. 170–179.

10. Режим, диагноз и прогноз ветрового волнения в океанах и морях / под ред. Е.С. Нестерова. – М.: ИГ-СОЦИН, 2013. – 295 с.

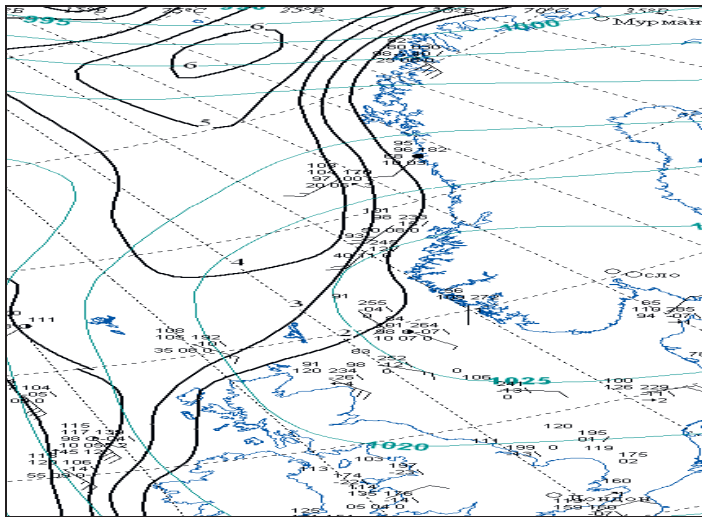
11. Perekhodtseva E.V. Hydrodynamic-statistical model of forecast to 36h ahead of dangerous convective phenomena –squalls, tornadoes and rainfalls // Res. Act. Atm. Ocean. Model. – 2003. – Rep. 32, part 2. – P. 21–23.

12. Perekhodtseva E.V. Operative Hydrodynamic-Statistical Forecast of St. Jude Storm and other Dangerous Storm Winds over the Territory of Russia and Europe on the Base of the Regional Model of Russia// Res. Act. Atm. Ocean. Model. – 2014. – Section 5. – P. 3–4.

Поступила в редакцию 13.05.2015 г.

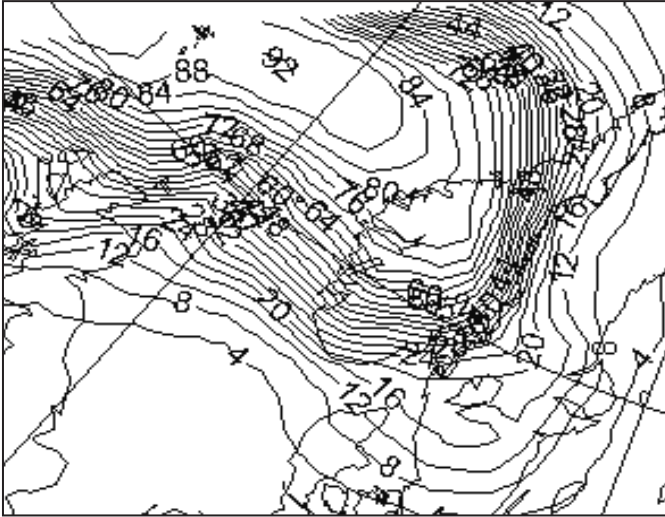


a)

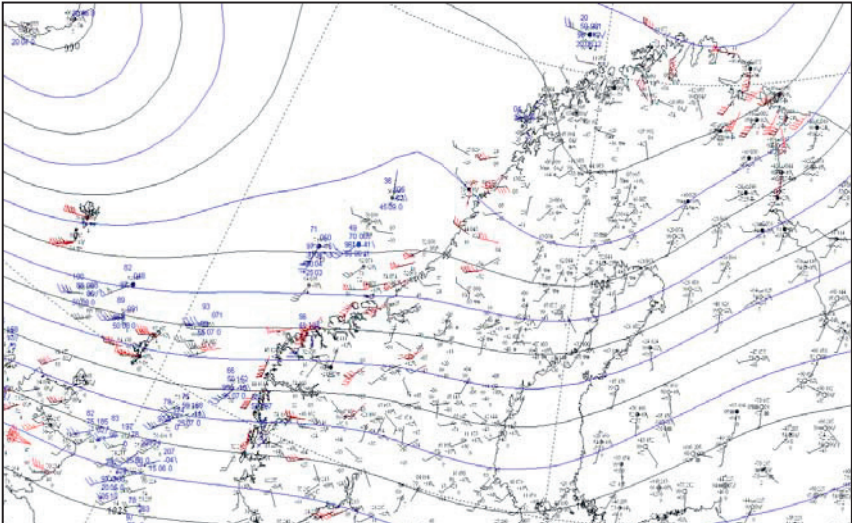


б)

Рис. 1. Карта фактических значений максимальной скорости ветра (а); фактические значения высоты волнения (б) на дату 08.11.2011 г.

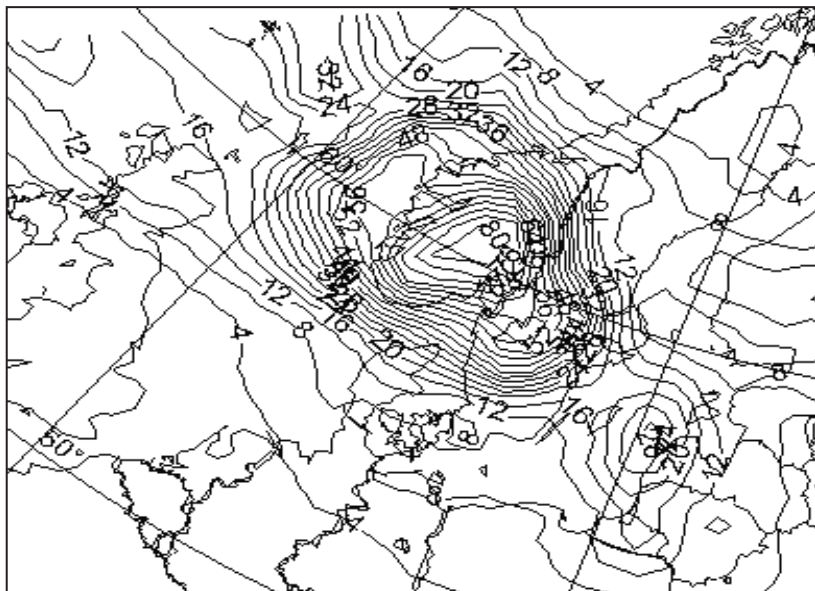


а)

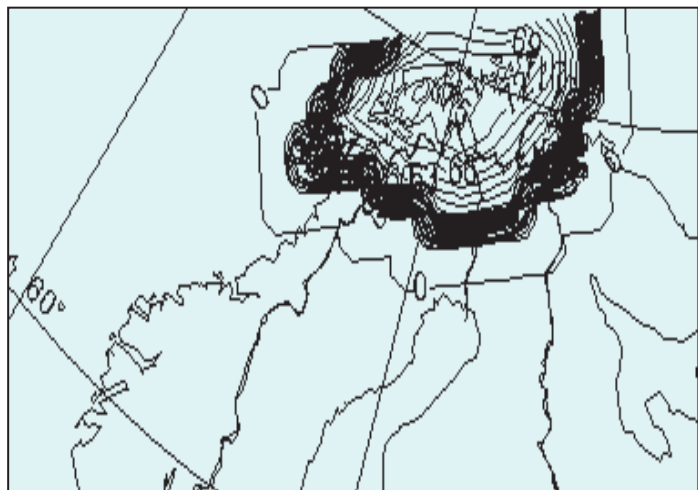


б)

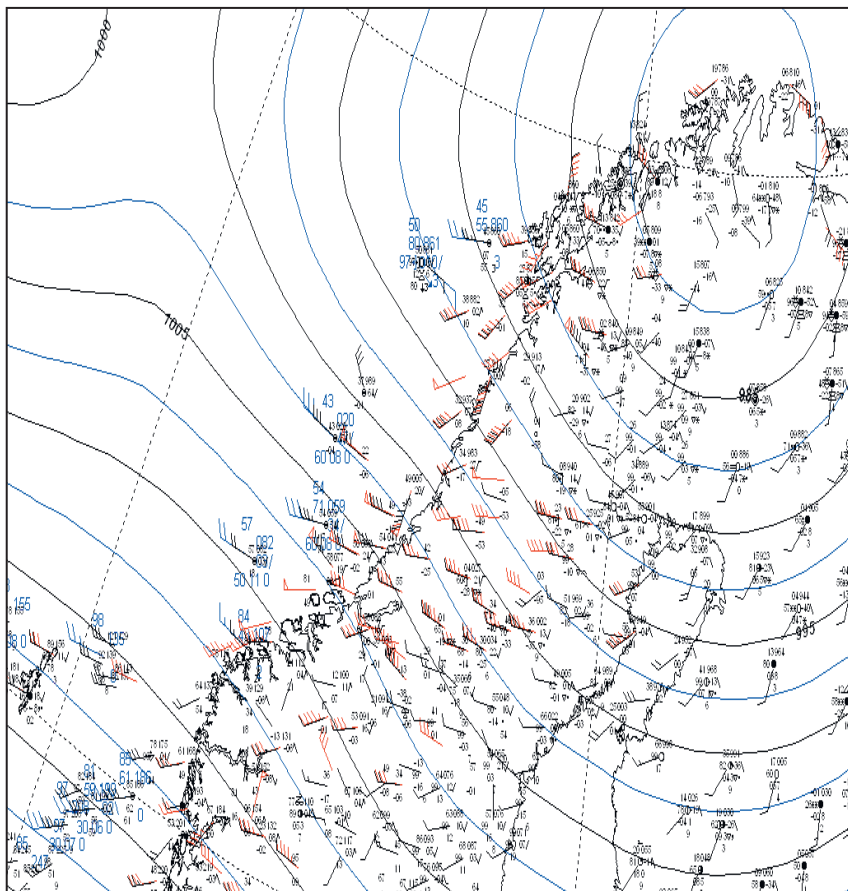
Рис. 2. Область прогноза на 12 ч ветра с порывами $V > 25$ м/с, ограничена изолинией $P=58\%$ (а); карта фактических значений максимальной скорости ветра (б) на дату 21.03.2011 г.



3a)

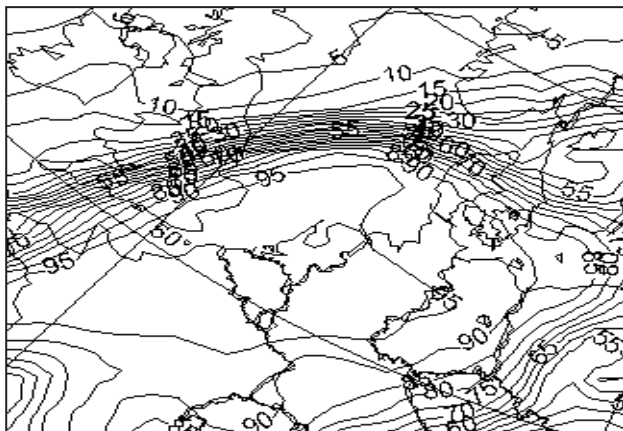


3b)

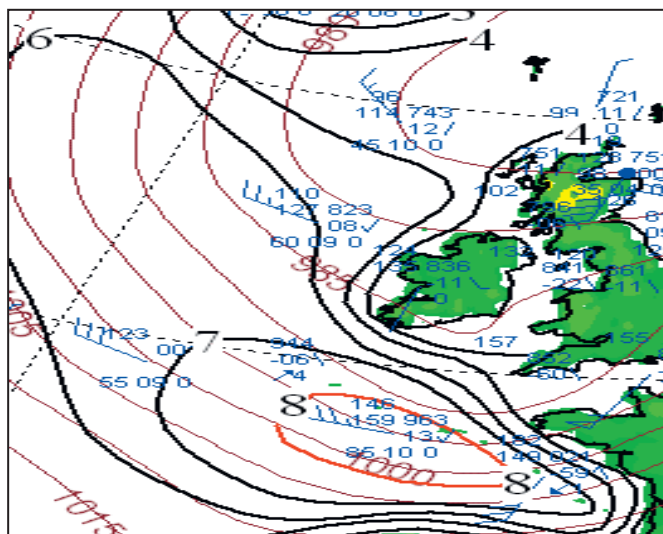


3в)

Рис. 3. Область прогноза ветра скоростью $V > 25$ м/с, рассчитанная за 36 ч на 22.03.11 г. по функции $F_2(X)$, ограничена изолинией $P = 55\%$, область прогноза ветра с $V > 19$ м/с, ограничена изолинией $P = 52\%$ (а); область прогнозируемого ветра над Баренцевым морем скоростью $V > 19$ м/с, рассчитанная за 24 ч по функции $F_1(X)$ (б); карта значений максимального фактического ветра на дату 22.03.2011 г. (в).

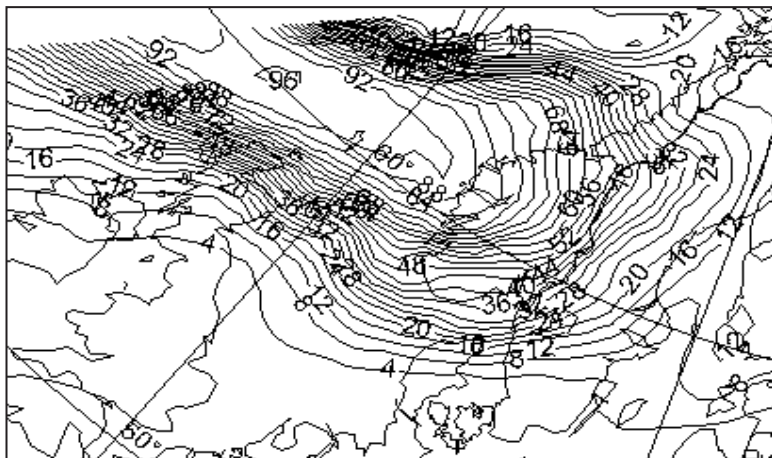


а)

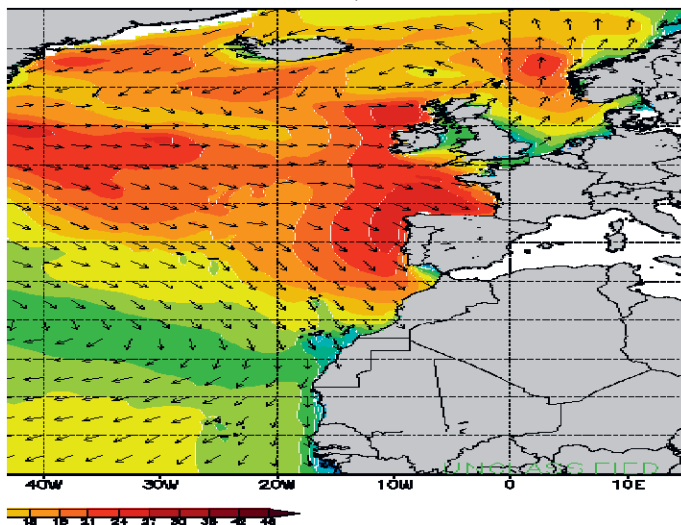


б)

Рис. 4. Прогнозируемая на 36 ч на 28.10.2013 г. область прогноза опасного ветра охватывает широкую область, в том числе Северное море, с вероятностями, достигающими 90 % (а); карта фактических значений ветрового волнения, вызванного штормом «Святой Иуда (б).



a)



б)

Рис. 5. Область прогноза ветра с $V > 24$ м/с, рассчитанная за 36 ч на 02.02.2014 г. (а); карта значений высоты волнения в футах: высоким вероятностям $P=88-90\%$ соответствует высота волн у берегов Норвегии 21–24 фута (7–8 м), далее – до 18 и 15 футов (т. е. до высоты 6 и 5 м) (б).