

**МОДЕЛЬ ГИДРОДИНАМИКО-
СТАТИСТИЧЕСКОГО ПРОГНОЗА ШТОРМОВОГО
ВЕТРА В СЕВЕРНОМ, НОРВЕЖСКОМ И
БАРЕНЦЕВОМ МОРЯХ**

ПЕРЕХОДЦЕВА Э. В., ГОЛОВЛЕВ К.Н.

ФГБУ «ГИДРОМЕТЦЕНТР РОССИИ», МОСКВА,

(E-MAIL: PEREKHOD@MECOM.RU)

**9-ая Всероссийская Открытая Ежегодная конференция
«Современные проблемы дистанционного зондирования
Земли из космоса»**

Введение

Успешный прогноз максимальной скорости ветра над Северным, Норвежским и Баренцевым морями является важнейшей составляющей успешного прогноза ветрового волнения в этих морях, т.к. высота волн тесно связана со скоростью штормового ветра: $H=aV+b$. Высота волн от четырех до семи метров наблюдается при скорости ветра $V>19\text{м/с}$ и порывах ветра, равных 25м/с и более. Успешный прогноз таких максимальных скоростей ветра на 12-24-36-48ч до настоящего времени является актуальной проблемой синоптической практики. Автоматизированный успешный прогноз этих явлений заблаговременностью от 12ч до 48ч позволил бы принять предохраниительные меры и уменьшить возможные экономические потери. Современные отечественные гидродинамические модели пока не прогнозируют максимальную скорость порывов сильного ветра.

Наиболее объективными и успешными представляются статистические методы прогноза этих явлений, когда проводится распознавание метеорологических ситуаций, (интерпретируемых как вектора $\mathbf{X}(A)=(x_1(A), x_2(A), \dots x_n(A))$), способствующих их возникновению, с помощью некоторого статистического решающего правила, а затем прогноза на основе использования значений₂ прогностических (на 12-48ч) полей гидродинамических моделей.

МОДЕЛЬ ГИДРОДИНАМИКО-СТАТИСТИЧЕСКОГО ПРОГНОЗА СИЛЬНОГО ВЕТРА ДЛЯ СКОРОСТЕЙ V>19М/С и V>24М/С

Разработанная на основе байесовского подхода [1, 2] в 1994-95г.г. статистическая модель оперативного прогноза на 12ч и 24ч максимальной скорости летнего ветра $V>19\text{м/с}$ оказалась достаточно успешной [4]. Метод прогноза, основанный на данной статистической модели и использовании значений прогностических полей полусферной (автор-Беркович Л.В.) гидродинамической модели Гидрометцентра России был автоматизирован и рекомендован к использованию в синоптической практике. В дальнейшем были разработаны методы прогноза максимальных скоростей летнего ветра скоростью $V>24\text{м/с}$ заблаговременностью 12-24ч (2001г) и с заблаговременностью 36ч (2005г), которые также были рекомендованы для использования в оперативной практике в четырех регионах Европейской территории России [5, 6]. Для Северо-Западного региона оценки прогноза даже на 36ч оказались самыми высокими [7] (предупрежденность такого ветра и его отсутствия составили соответственно $\Pi_{\alpha}=93\%$, $\Pi_{\text{отс}}=97\%$, а критерий Пирси-Обухова $T=0,9$, табл.1).

При разработке статистической модели использовались обучающие выборки векторов наличия и отсутствия явлений, зависящие от значений 38-ми параметров атмосферы. Предварительно было проведено сжатие пространства признаков размерности $n=38$ до $k=8$ без значительной потери информации. Это было сделано эмпирико-статистическим методом, применявшимся в [2], с помощью диагонализации средней матрицы корреляции предикторов R и выбора наиболее информативных параметров – представителей от каждого блока преобразованной матрицы R .

В результате были выбраны следующие параметры:

H_{1000} – геопотенциал на уровне 1000гПа,

T_{850} – температура на уровне 850гПа,

$\text{mod}(\text{grad}T_3)$ - модуль градиента температуры у Земли,

dT_3 - температура точки росы у Земли,

T_{300} – температура на уровне 300гПа

V_{700} – модуль скорости ветра на уровне 700гПа,

U_{850} - U_{925} - сдвиг горизонтальной составляющей ветра в средней тропосфере,

Iw - индекс термодинамической неустойчивости Вайтинга.

В качестве критериев информативности использовались критерий – расстояние Махalanобиса и критерий минимальной энтропии Вапника-Червоненкиса.

- КРИТЕРИИ ИНФОРМАТИВНОСТИ - РАССТОЯНИЕ МАХАЛАНОБИСА И КРИТЕРИЙ МИНИМАЛЬНОЙ ЭНТРОПИИ ВАПНИКА-ЧЕРВОНЕНКИСА

- От каждого блока средней матрицы корреляции вектор-предсказатель выбирался один из наиболее информативных предикторов. Информативность предикторов оценивалась по расстоянию Махalanобиса Δ^2 :
 - $\Delta^2 = (m_i(A) - m_i(B))^T 2 / \sigma^2$,
- где $m_i(A)$ и $m_i(B)$ – компоненты векторов математических ожиданий $M(A)$ и $M(B)$ - выборок присутствия и отсутствия явления A соответственно, σ^2 – средняя дисперсия.
- Также информативность предикторов оценивалась и по значениям минимальной энтропии Вапника-Червоненкиса H_{\min} [3].
- Критерий Δ^2 обычно используется для нормально распределенных случайных величин. Поскольку температура, давление, геопотенциал, средняя скорость ветра в различных слоях имеют распределение, близкое к нормальному, то этот критерий был использован для оценки информативности этих параметров как самый простой критерий. Критерий H_{\min} Вапника-Червоненкиса – непараметрический метод, но выбранные группы наиболее информативных параметров атмосферы по обоим критериям практически совпали.

ТЕХНОЛОГИЯ РАСЧЕТА ОБЛАСТИ ПРОГНОЗА СИЛЬНОГО ВЕТРА ДВУХ ГРАДАЦИЙ ПО МОДЕЛИ ГИДРОДИНАМИКО-СТАТИСТИЧЕСКОГО ПРОГНОЗА

Для разработки оперативного автоматизированного прогноза двух классов этих явлений (со скоростью ветра более 19м/с и со скоростью ветра более 24м/с) в узлах сетки 150x150км полусферной модели рассчитывались значения двух дискриминантных функций $F_1(\mathbf{X})$ и $F_2(\mathbf{X})$, а также зависящих от них вероятностей прогноза $P_1(\mathbf{X})$ и $P_2(\mathbf{X})$. По эмпирически найденным для каждой заблаговременности пороговым вероятностям для явлений первого и второго классов выделялись прогнозируемые области сильного ветра первого и второго классов.

В графическом пакете «ИЗОГРАФ» на карте Европы автоматически разрисовываются изолинии равной вероятности. Области прогноза сильного ветра и первого, и второго классов выделяются на этой карте изолиниями заданной пороговой вероятности (на разных картах).

В оперативной системе Гидрометцентра России АСООИ расчет вероятностей прогноза на 12-24-36ч оперативно проводился два раза в сутки.

Для Северо-Западного района Европейской территории России оценки успешности его и для явлений первого класса, и для явлений второго класса оказались наиболее высокими [4, 7, 9]. Они представлены в следующей таблице.

Таблица 1.

**Оценки независимых испытаний автоматизированного оперативного прогноза с заблаговременностью 36ч
летнего максимального ветра с $V>24\text{м/с}$ по территории Северо-Западного
региона России (2003-2005гг)**

Прогноз	Фактические данные		Сумма	Оправды- ваемость F	Критерий (T) Пирси- Обухова
	Наличия явлений	Отсутствия явлений			
Наличия явлений	n_{11} 14	n_{12} 23	n_{10} 37	$F_{я} = 38\%$	
Отсутствия явлений	n_{21} 1	n_{22} 829	n_{20} 830	$F_{от} = 99\%$	
Сумма	n_{01} 15	n_{02} 852	n_{00} 867		
Предупреж- денность наличия и отсутствия явлений	$P = 93,3\%$	$P = 97,3\%$	Общая Оправды- ваемость	$F_{об} = 97,4\%$	$T = 0,906$ $T = 1 - (1 - 0,933) -$ $(1 - 0,973) =$ $1 - a - b$

а – ошибка первого рода;
в – ошибка второго рода

Модель гидродинамико-статистического прогноза штормового ветра заблаговременностью 12-36-48ч на основе данных региональной модели ГМЦ РФ

В связи с успешным развитием региональной модели краткосрочного прогноза погоды в сигма-системе координат с горизонтальным разрешением 75x75 км (автор – Лосев В.М.) в 2007-2008гг проводилась адаптация статистических моделей для прогноза штормовых ветров по новой гидродинамико-статистической модели прогноза с использованием выходных прогностических полей региональной модели.

В 2009-2010гг. с помощью этой модели прогноза были получены успешные прогнозы максимального летнего ветра с $V>19\text{ м/с}$ и с $V>24\text{ м/с}$ по территории Европейской части России с заблаговременностью 12-24-36-48ч [9,10], что свидетельствовало об устойчивости разработанных статистических моделей штормового ветра. Авторами была проведена оценка прогноза штормового ветра над акваториями Северного, Норвежского и Баренцева морей в разные периоды 2010-2011гг. В следующих таблицах представлена средняя повторяемость штормового ветра с $V\geq15\text{ м/с}$ и повторяемость их за 2011г. Из них видно, что наибольшее количество явлений приходится на раннюю весну, предзимье и зиму. Расчет прогноза штормового ветра по гидродинамико-статистической модели с использованием прогнозов региональной модели оказался достаточно успешным. Примеры этого прогноза в сравнении с фактическими значениями скорости штормового ветра и высотой волнения приводятся на следующих слайдах.

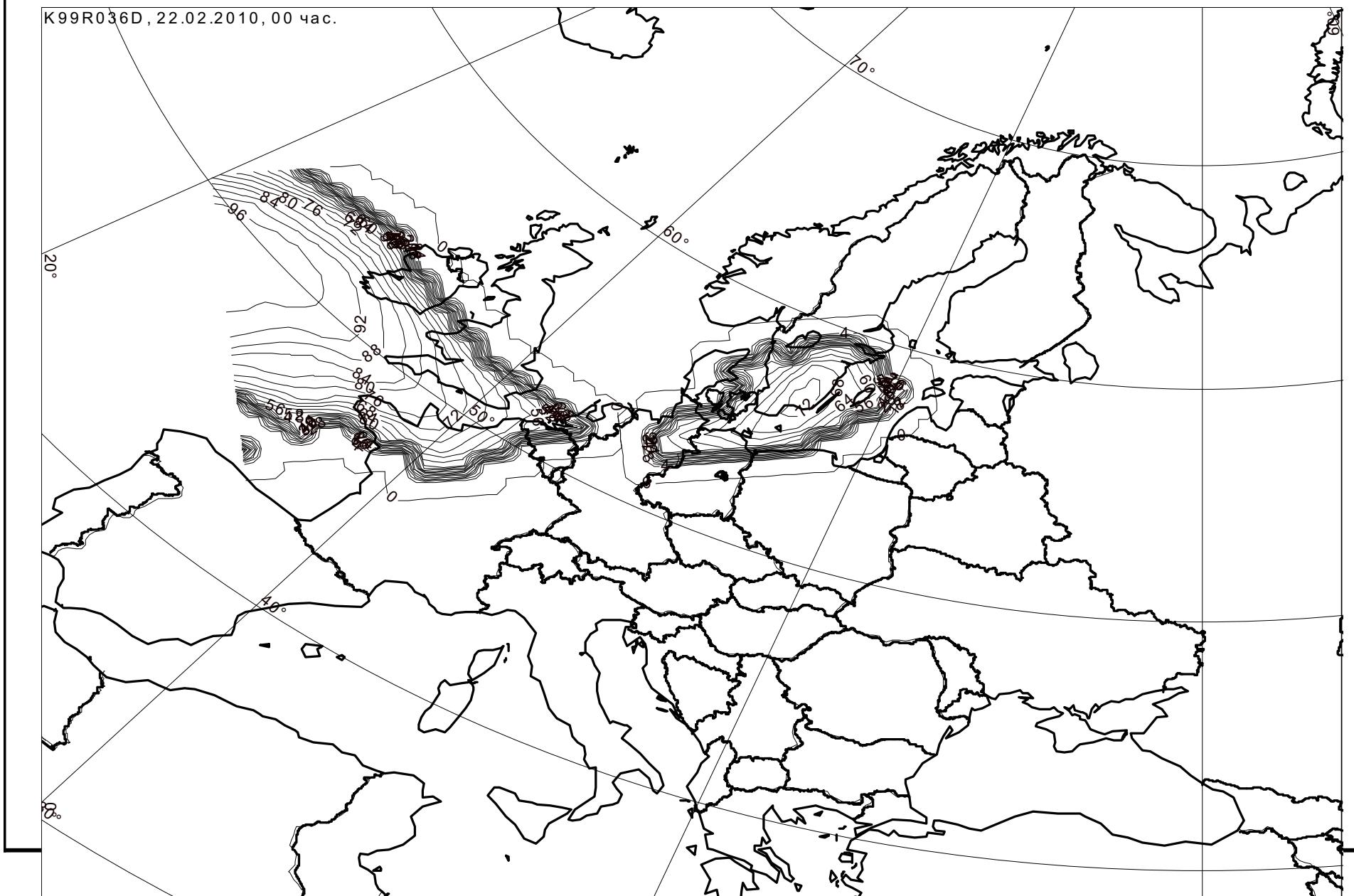
Среднее (за 10 лет) количество штормовых дней (с $V=15\text{м/с}$ и более) по территории Баренцева, Норвежского и Северного морей (рыбопромысловым районам)

Море	Месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Баренцево море		13	12	10	9	5	3	3	4	6	12	12	12
Норвежское море		19	16	14	10	5	3	4	5	11	18	17	19
Фарер. о-ва		15	16	13	8	3	1	2	6	12	13	11	16
Северное море		17	11	11	5	2	2	2	4	8	12	11	13

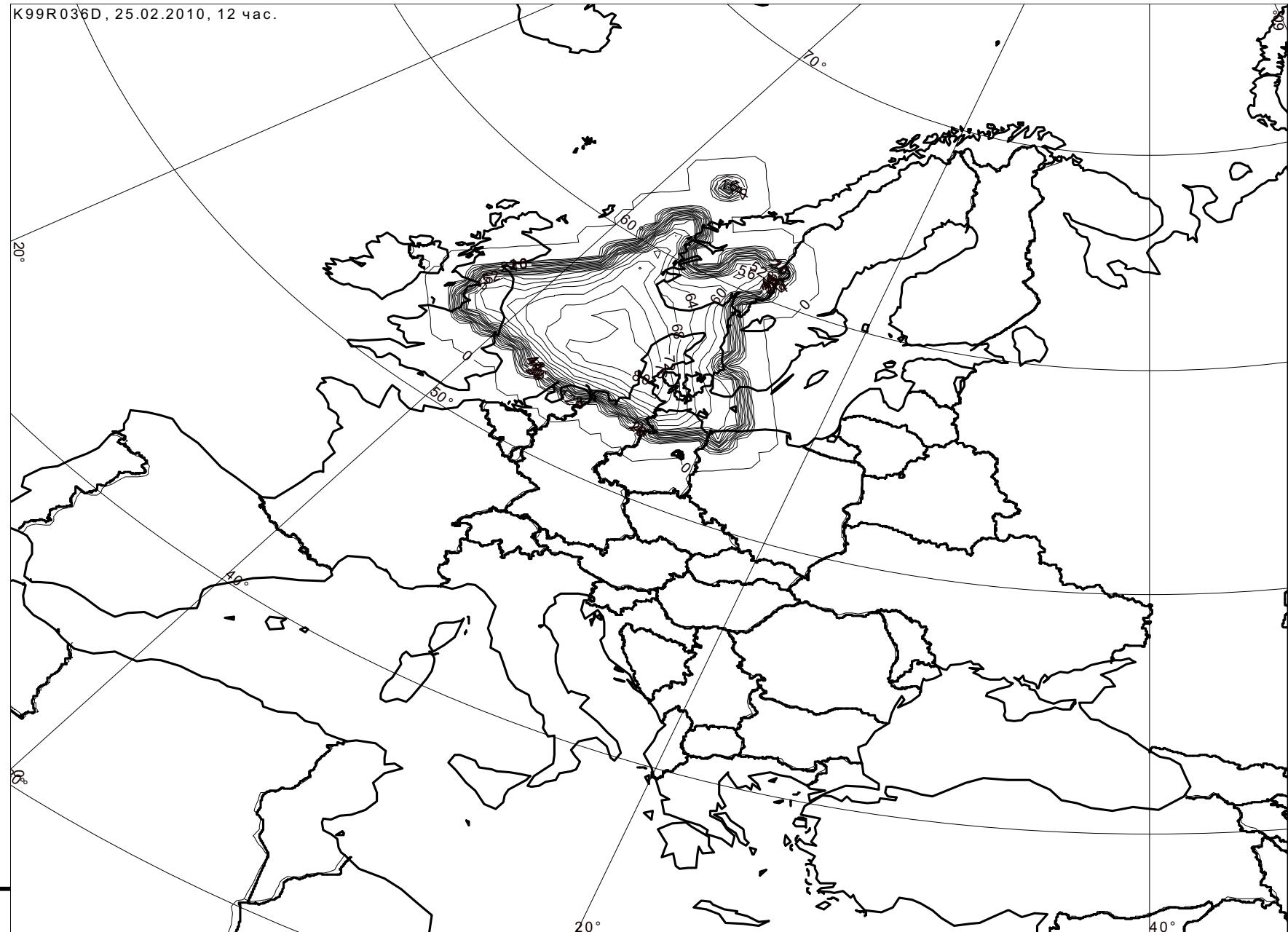
Количество штормовых дней (с V=15м/с и более) в 2011 году по территории Баренцева, Норвежского и Северного морей
 (рыбопромысловым районам)

Море	Месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Баренцево море		12	12	17	2	5	4	3	1	3	11		
Норвежское море		18	23	24	15	7	6	5	7	11	24		
Северное море		7	16	9	5	7	2	9	8	9	15		

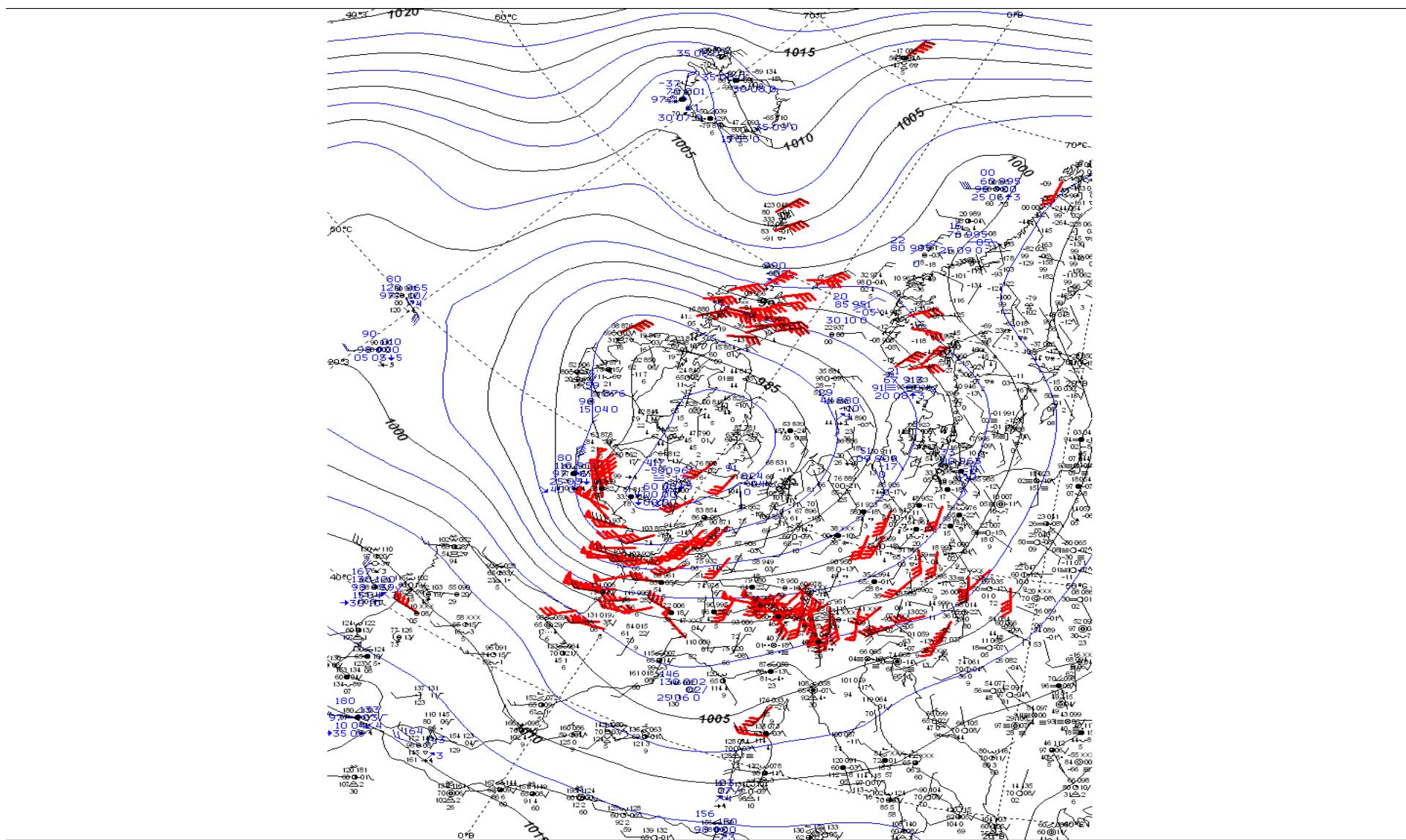
**Область прогноза штормового ветра $V \geq 15\text{ м/с}$, рассчитанная
по функции $F_1(X)$ на 23.02.2010г, ограничена изолинией $P=55\%$**



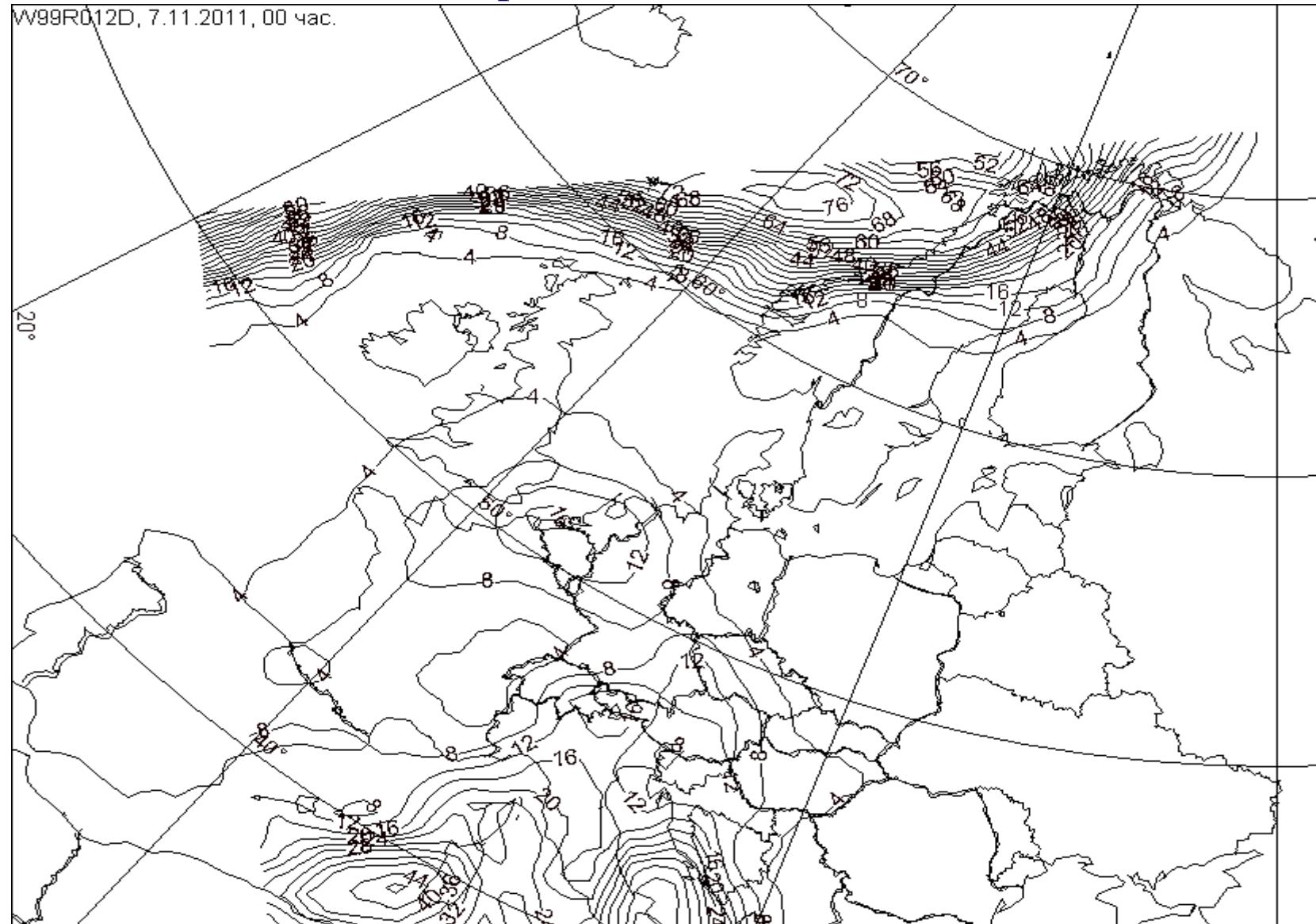
**Область прогноза штормового ветра $V \geq 15\text{м/с}$, рассчитанная
с заблаговременностью 36ч на 26.02.2010г, ограничена изолинией $P=55\%$**



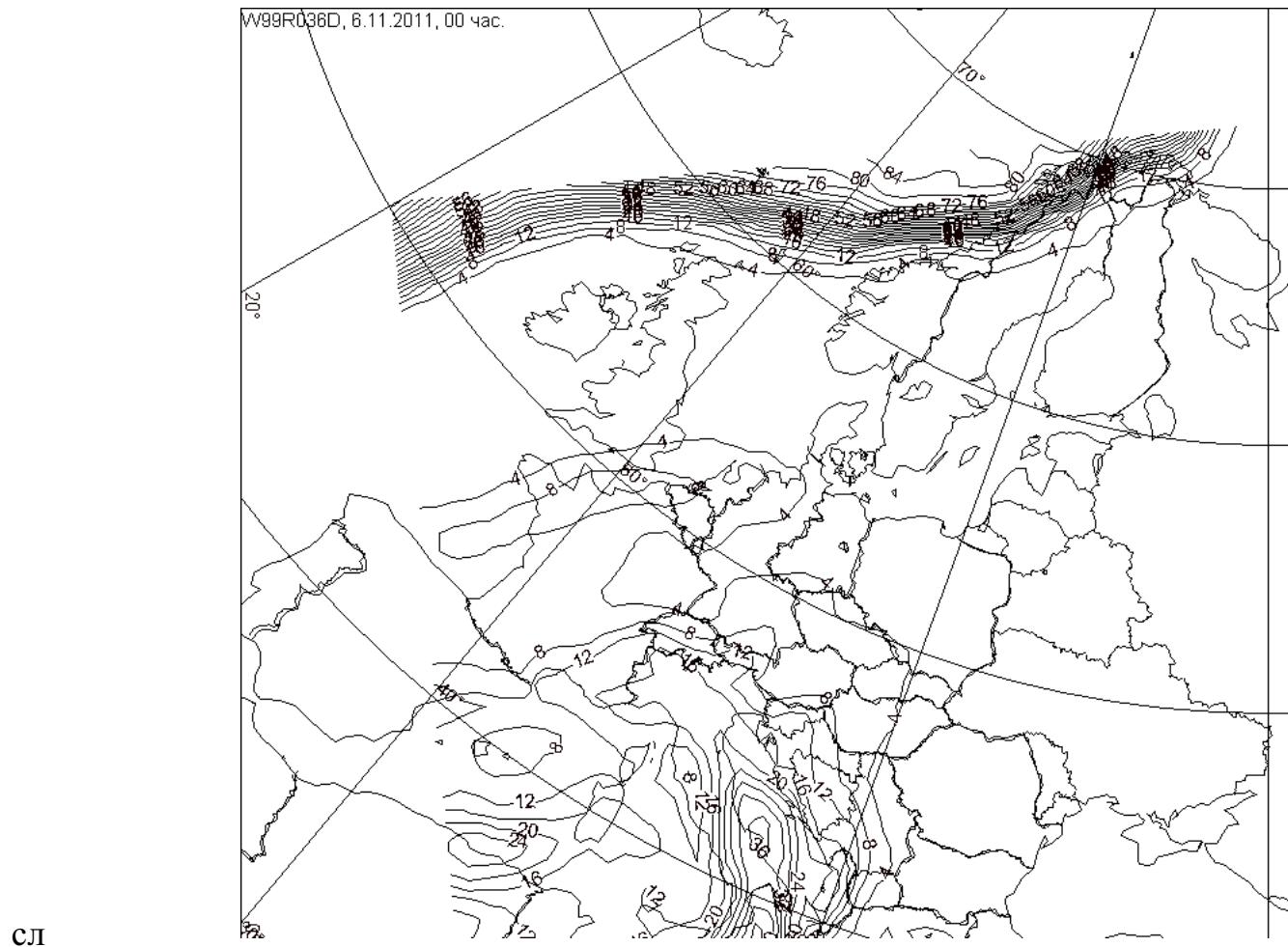
Карта значений фактической скорости ветра и его порывов на дату 26 февраля 00 ч



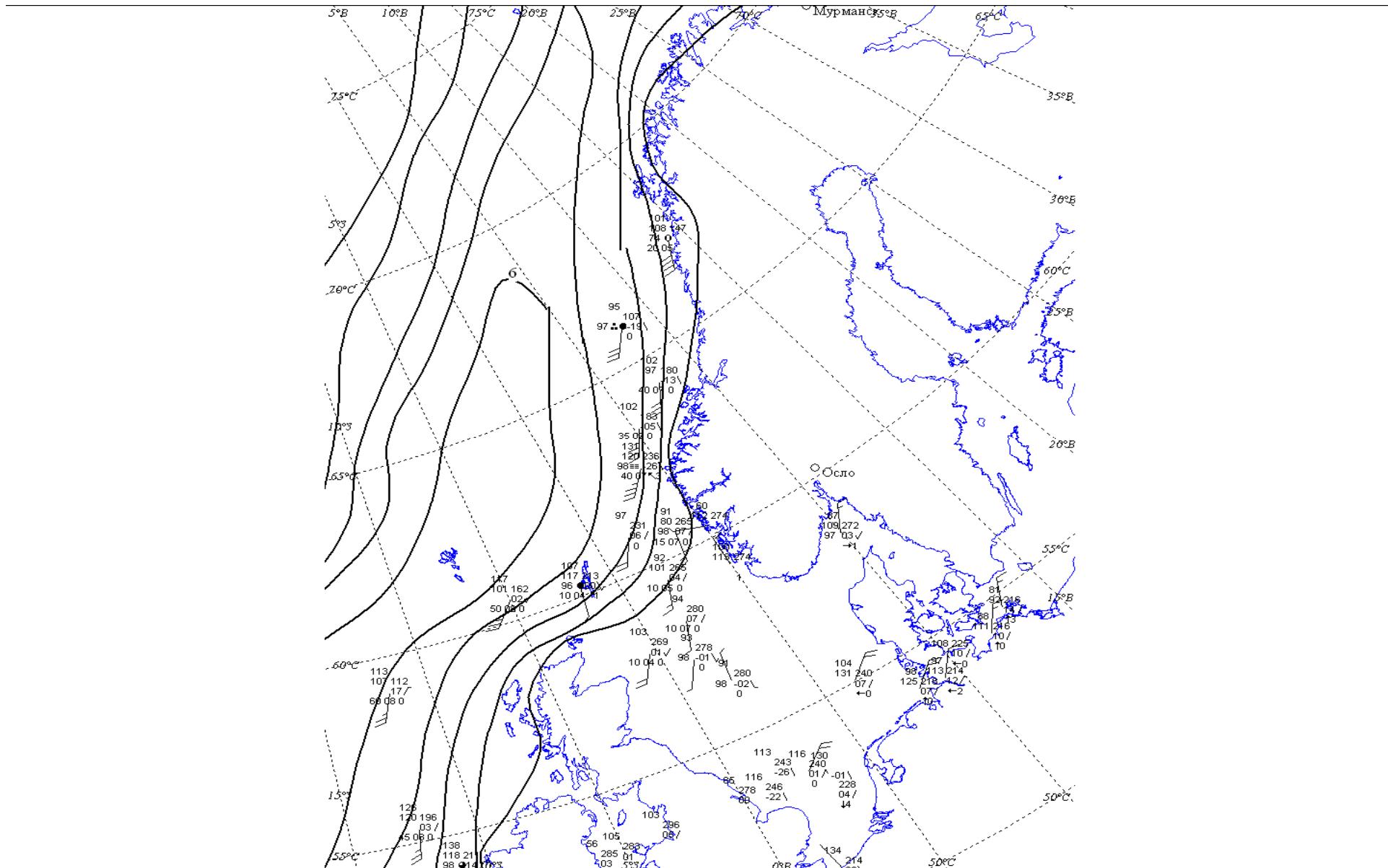
**Область прогноза штормового ветра с порывами $V \geq 25\text{м/с}$,
рассчитанная с заблаговременностью 12-18ч
на 07.11.11., ограничена изолинией $P=60\%$**



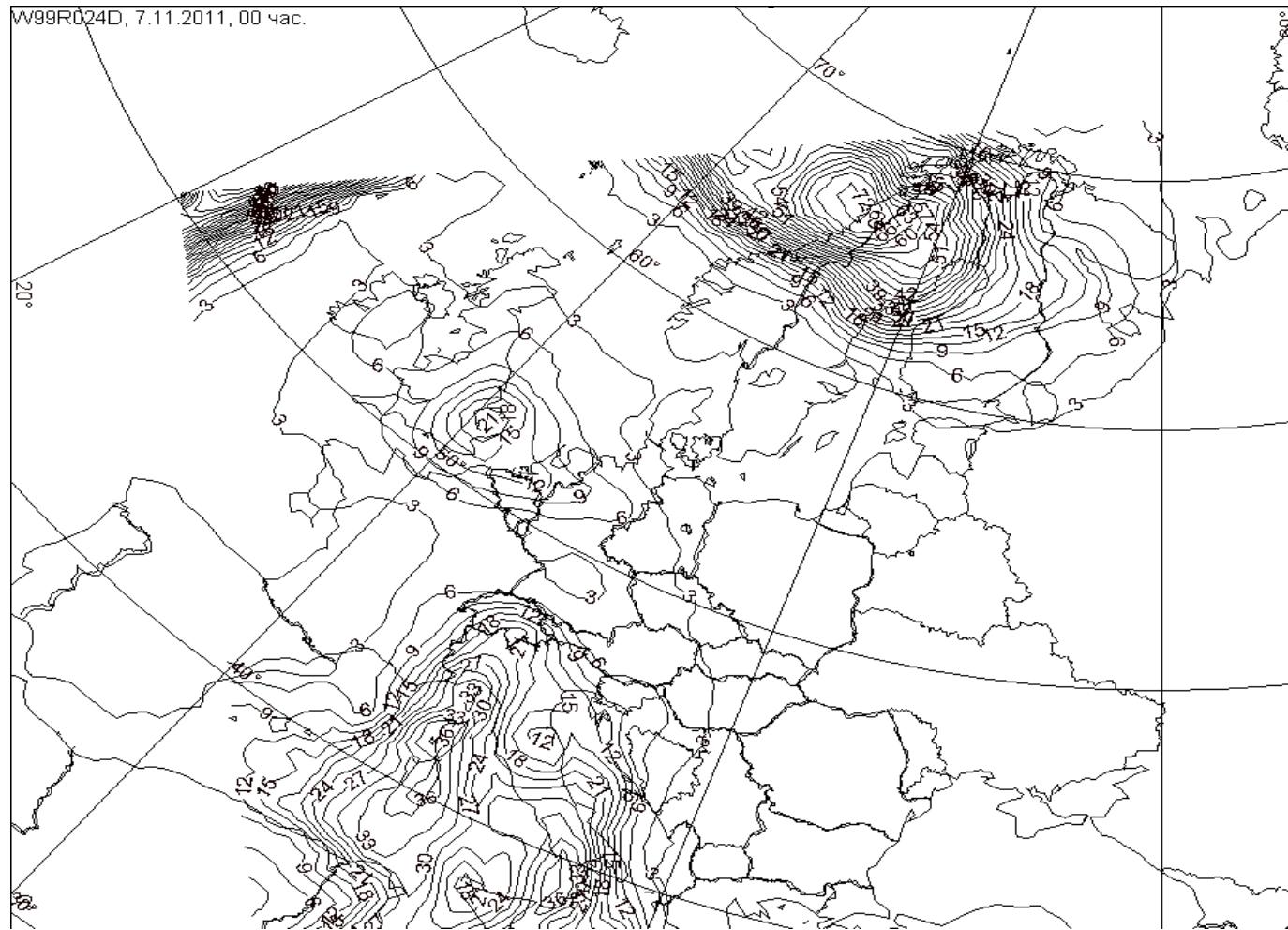
**Область прогноза с заблаговременностью 36ч штормового ветра
с порывами $V \geq 25\text{м/с}$, рассчитанная на 7.11.11., ограничена
изолинией Р=55%**



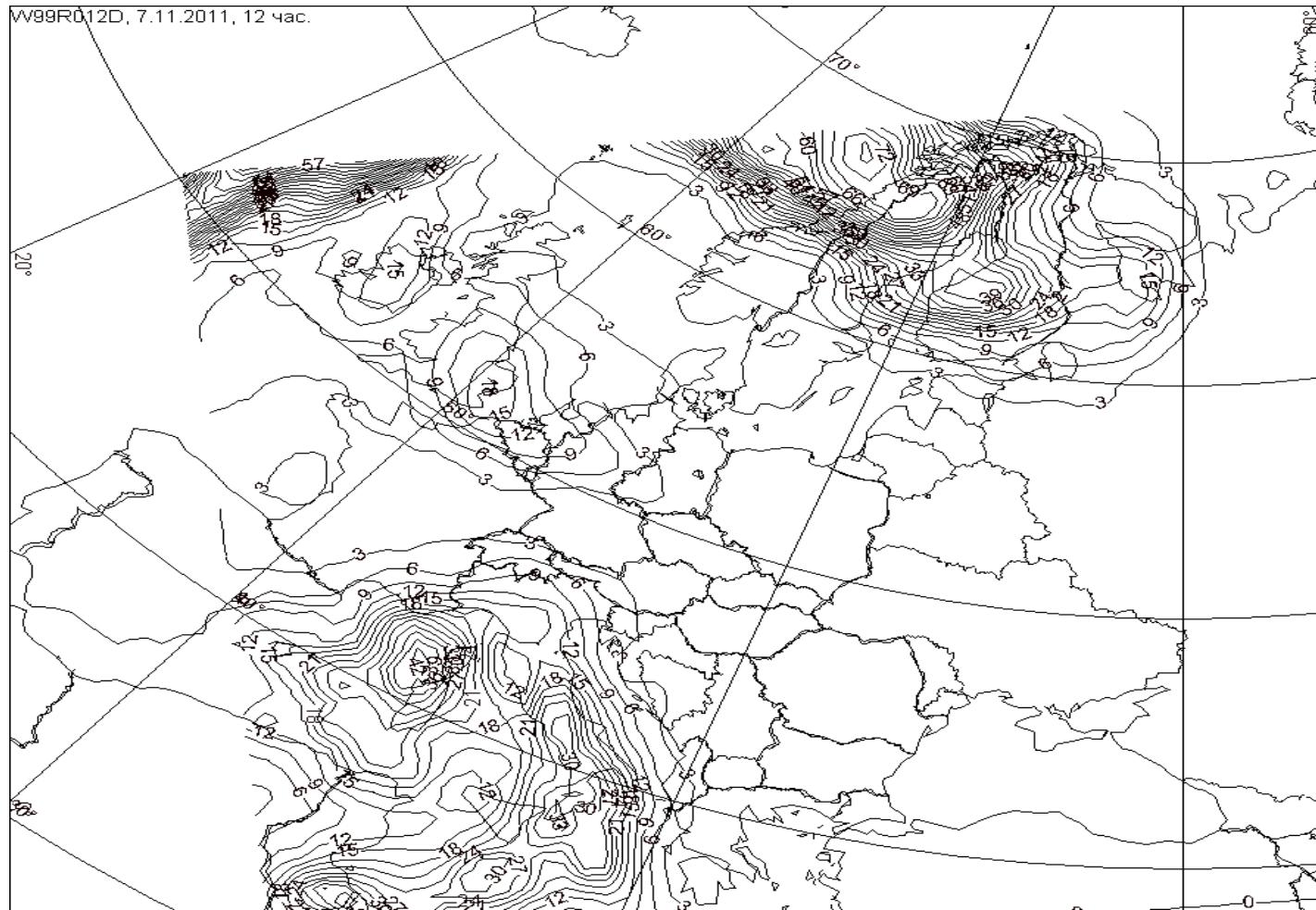
Фактические значения высоты волнения на дату 07.11.11.



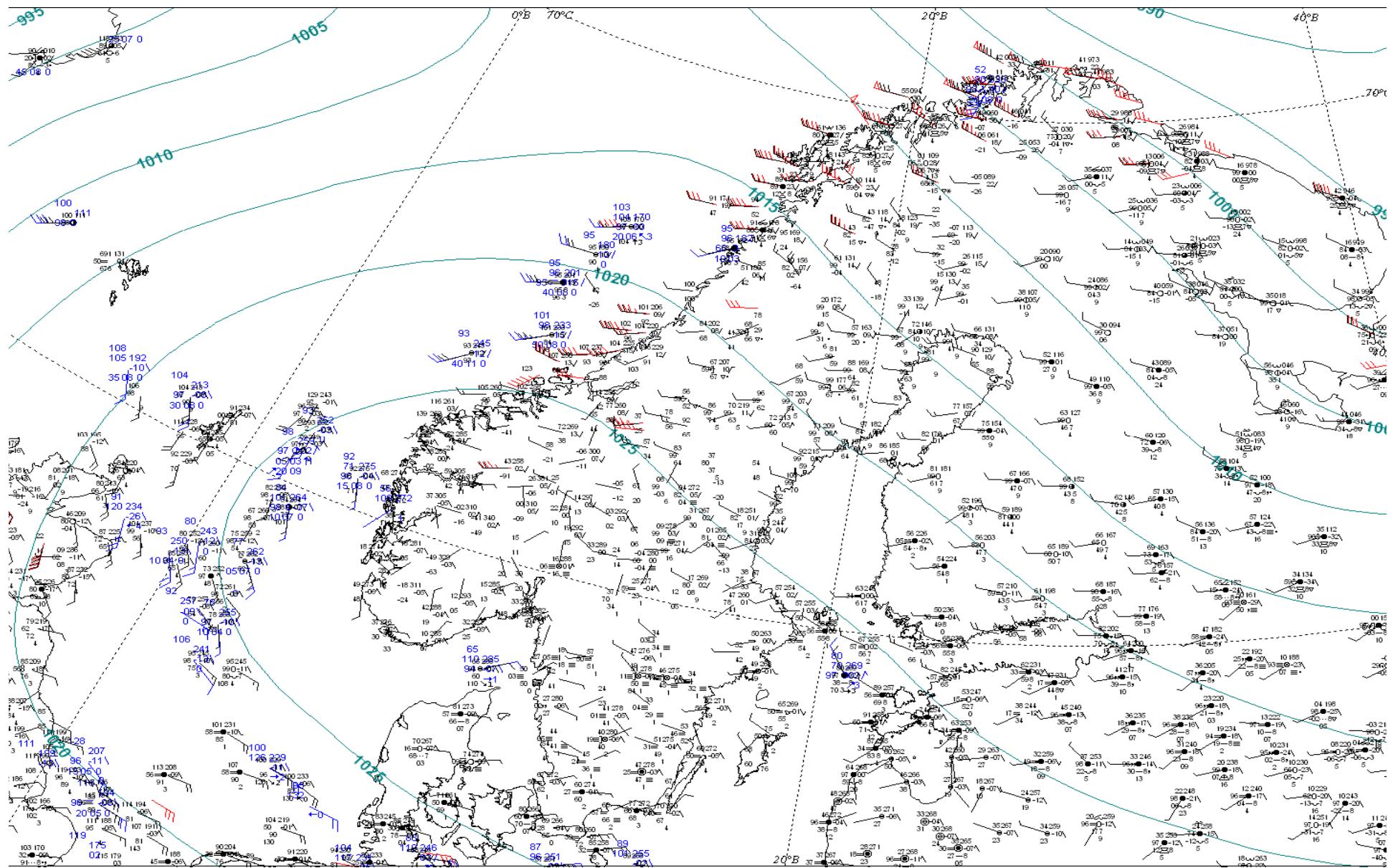
**Область прогноза штормового ветра с порывами $V \geq 25\text{м/с}$,
рассчитанная
на ночь 08.11.11 с заблаговременностью 24ч, ограничена
изолинией Р=55%**



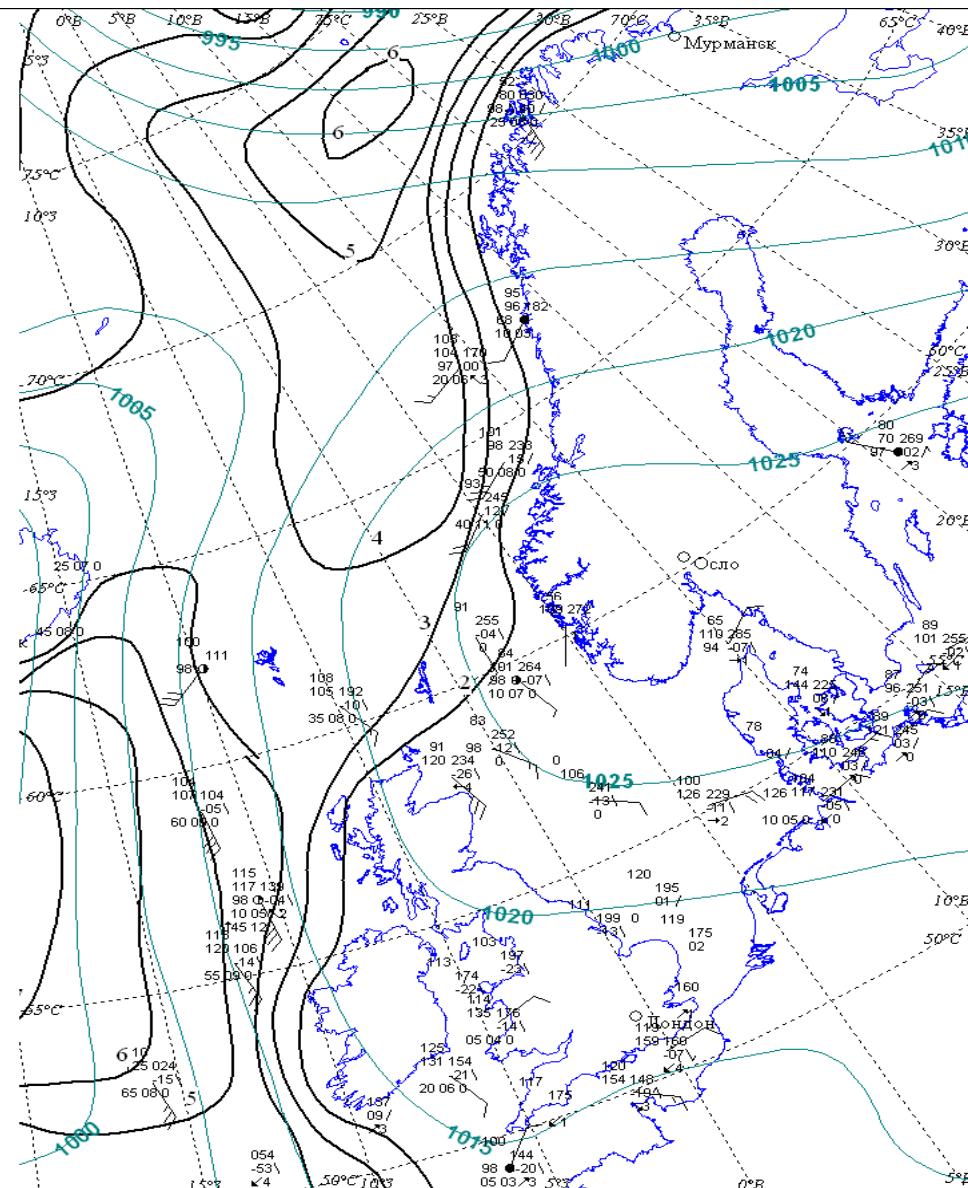
**Область прогноза штормового ветра с порывами $V \geq 25\text{м/с}$,
рассчитанная
на ночь 08.11.11 с заблаговременностью 12ч, ограничена
изолинией $P=60\%$**



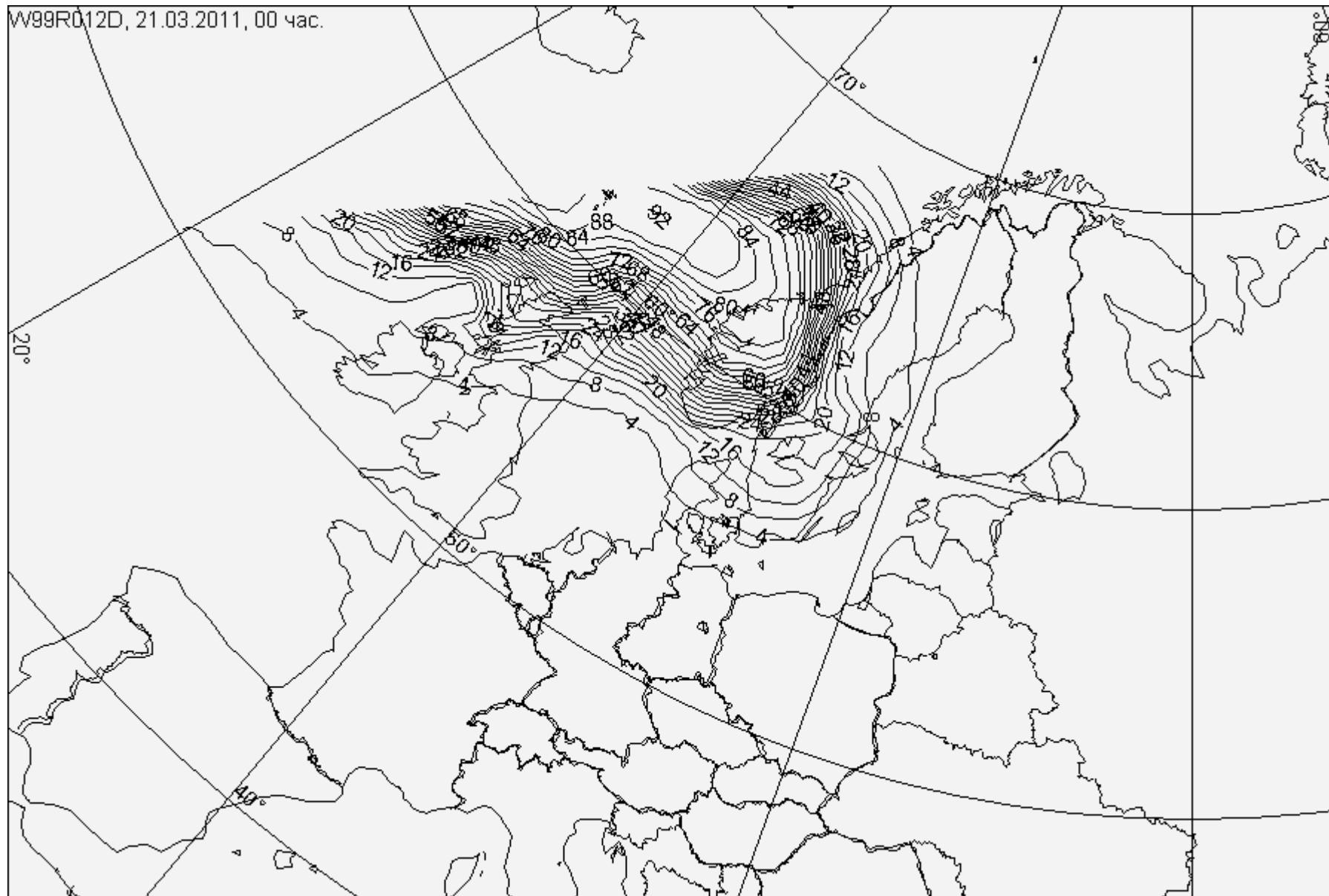
Карта фактических значений скорости ветра и его порывов на дату 08.11.11., 00ч СГВ



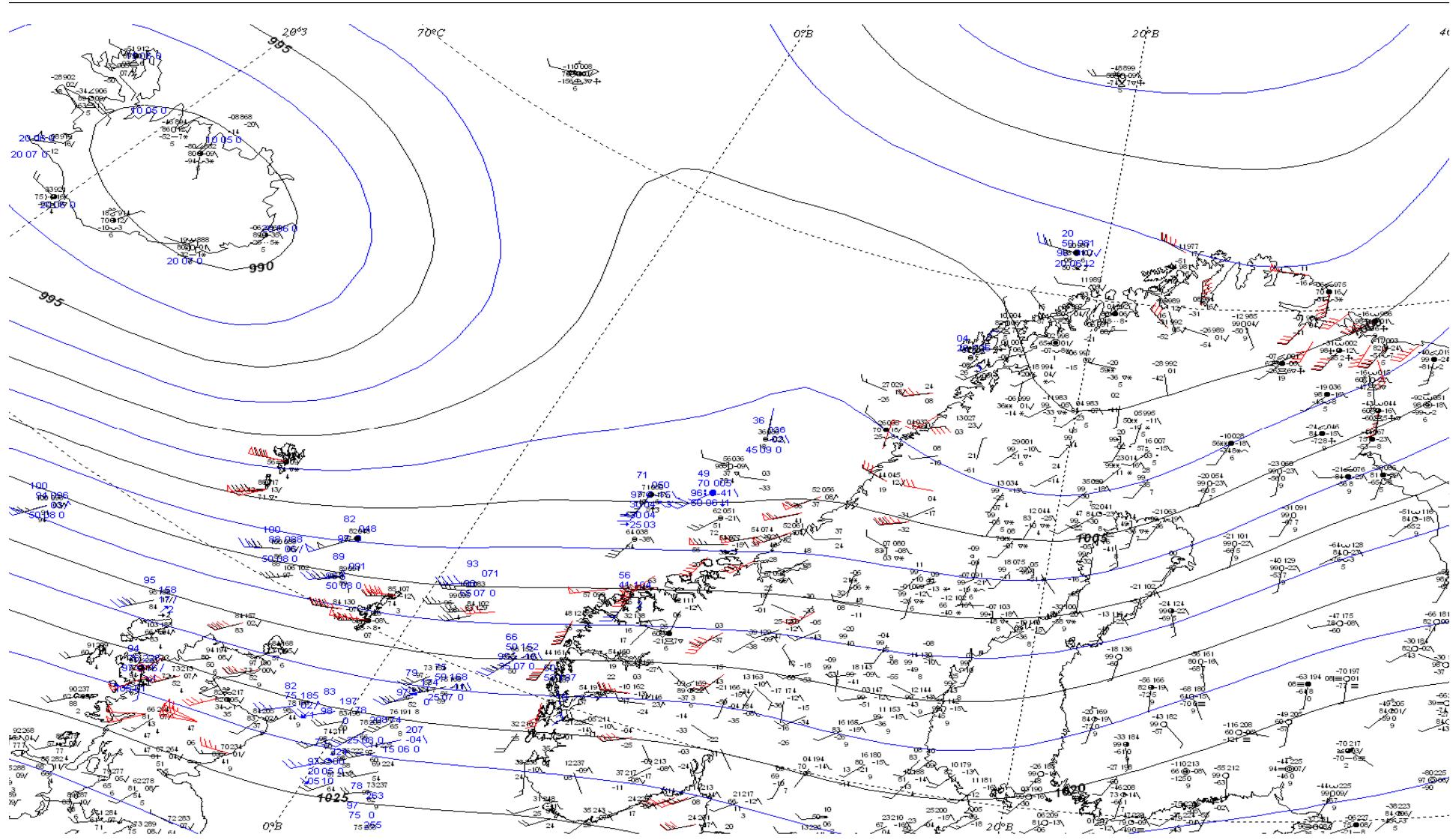
Фактические значения высоты волнения на дату 08.11.11



**Область прогноза штормового ветра с порывами $V \geq 25\text{м/с}$, рассчитанная
с заблаговременностью 12ч
на 21.03.11., ограничена изолинией $P=60\%$**

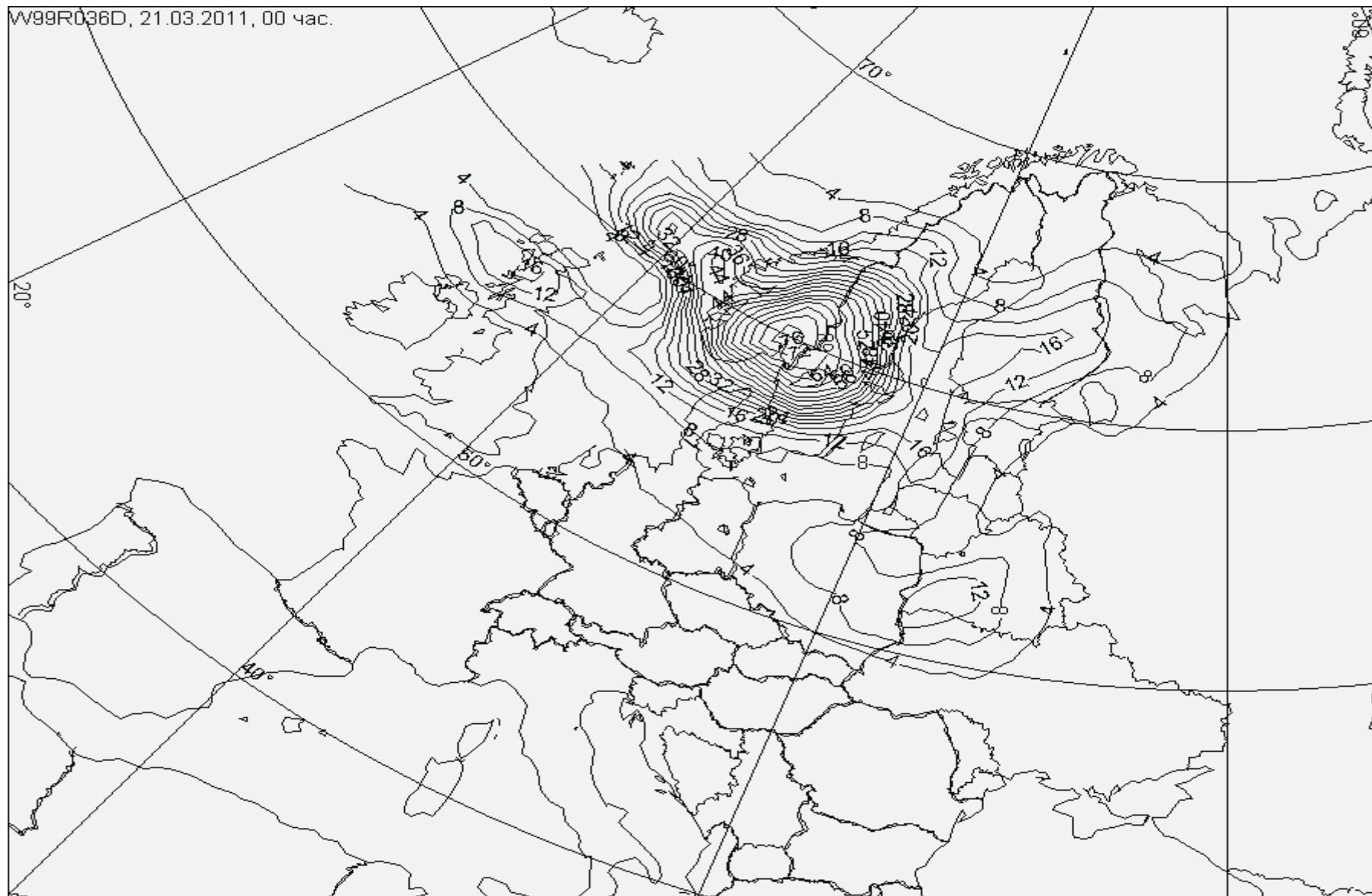


Карта фактических значений скорости ветра и его порывов на дату 21.03.11

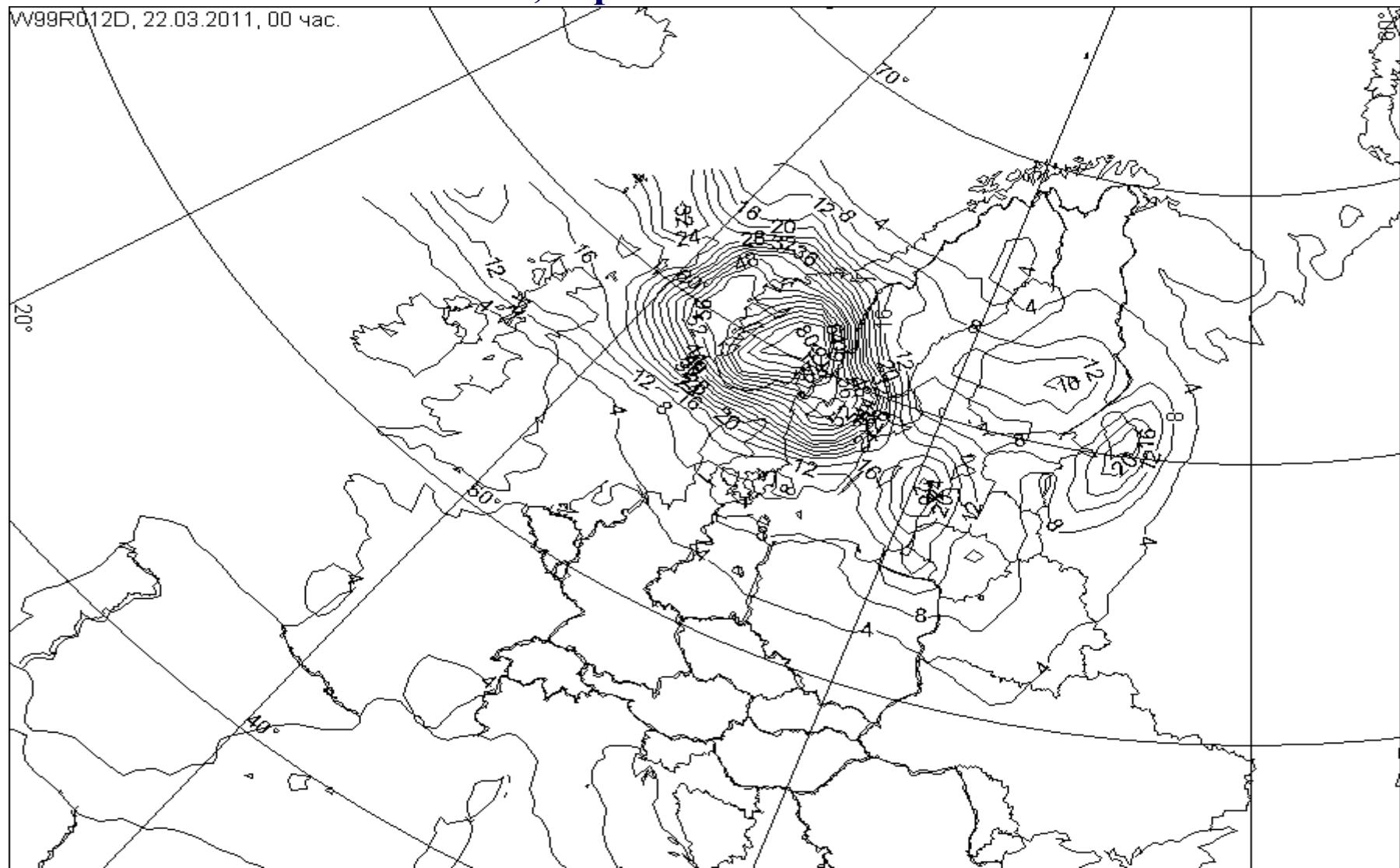


**Область прогноза штормового ветра с порывами $V \geq 25\text{ м/с}$,
рассчитанная на 22.03.11. с заблаговременностью 36ч, ограничена**

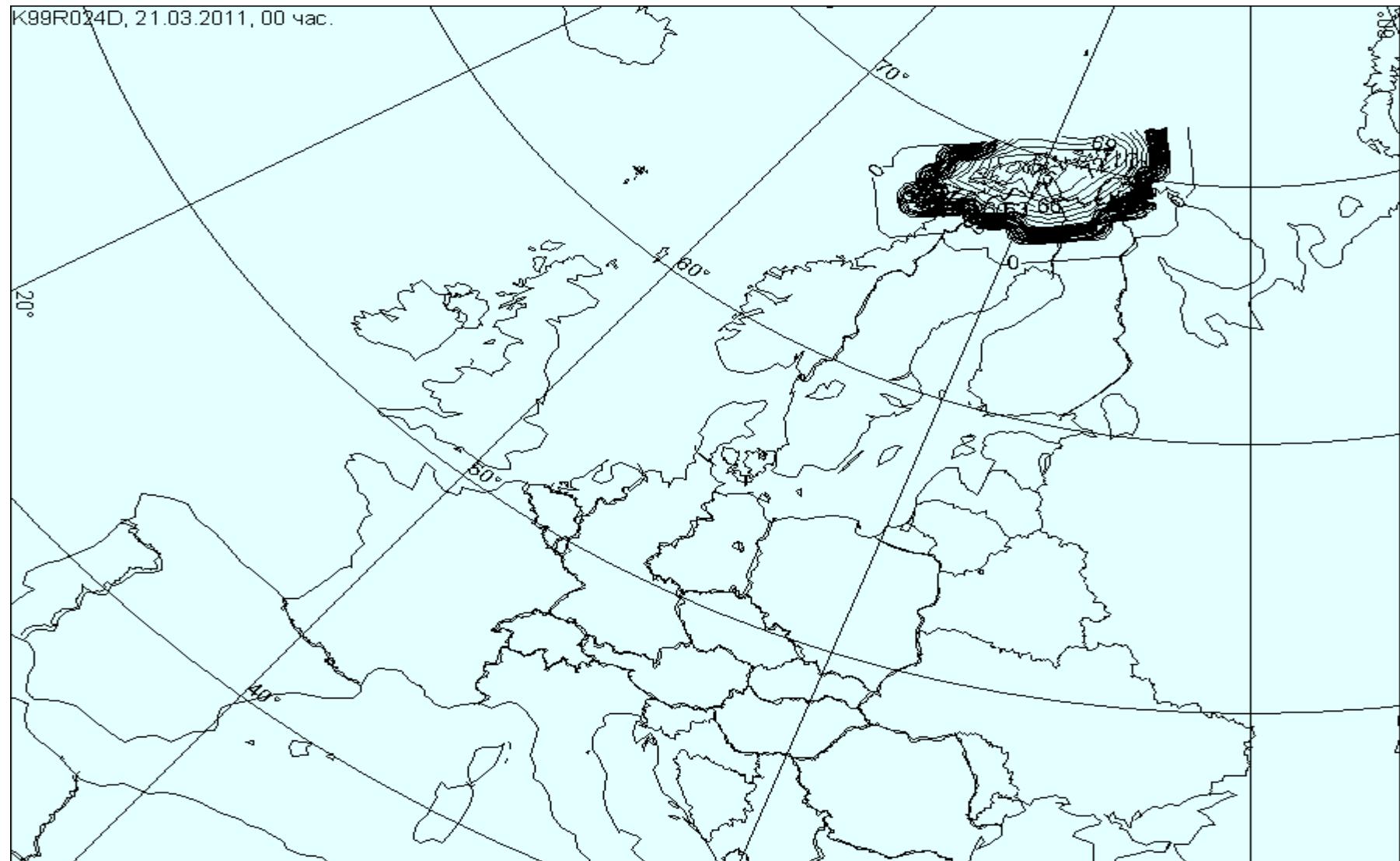
изолинией $P=55\%$



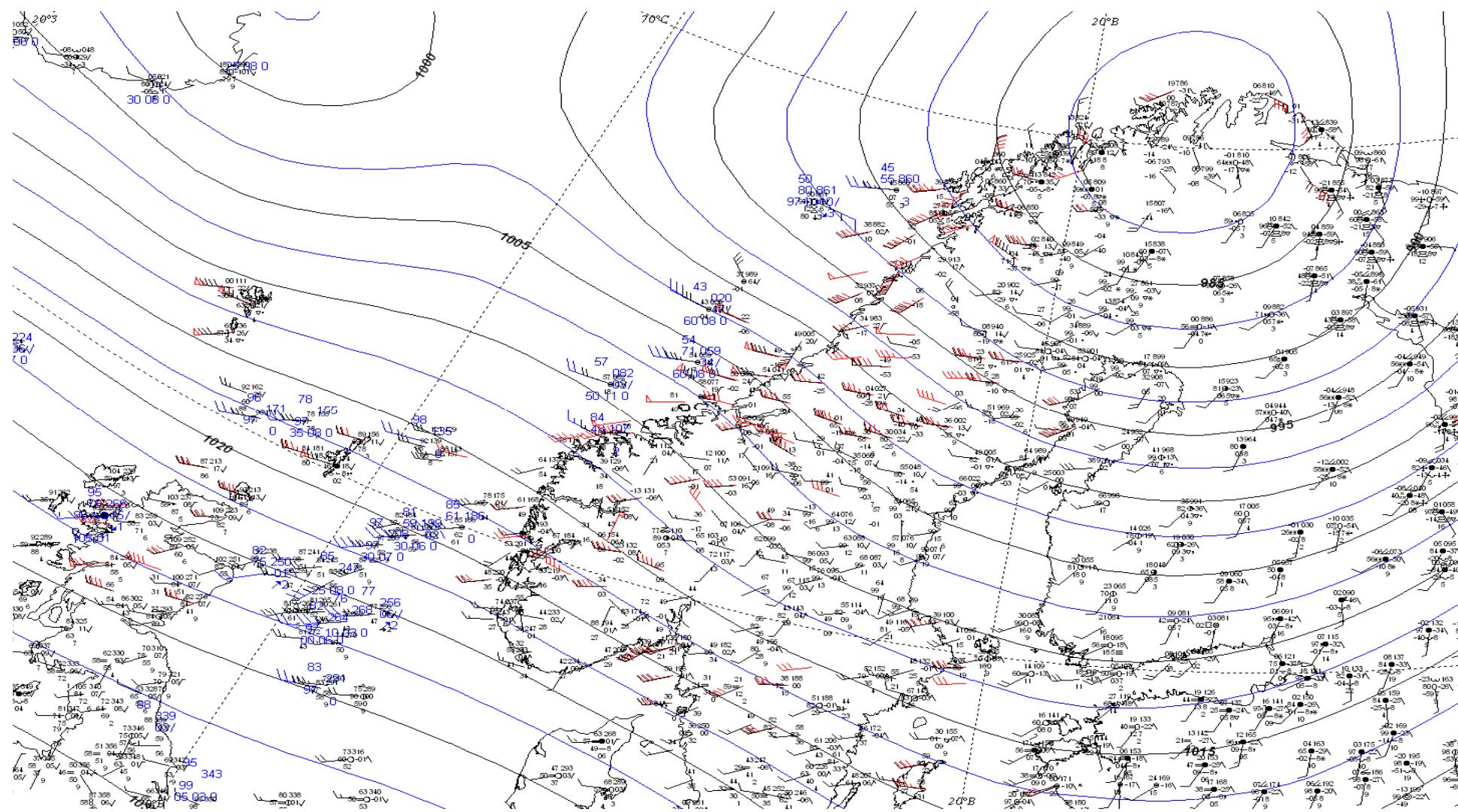
**Область прогноза штормового ветра с порывами $V \geq 25\text{ м/с}$,
рассчитанная с заблаговременностью 12ч
на 22.03.11., ограничена изолинией $P=60\%$**



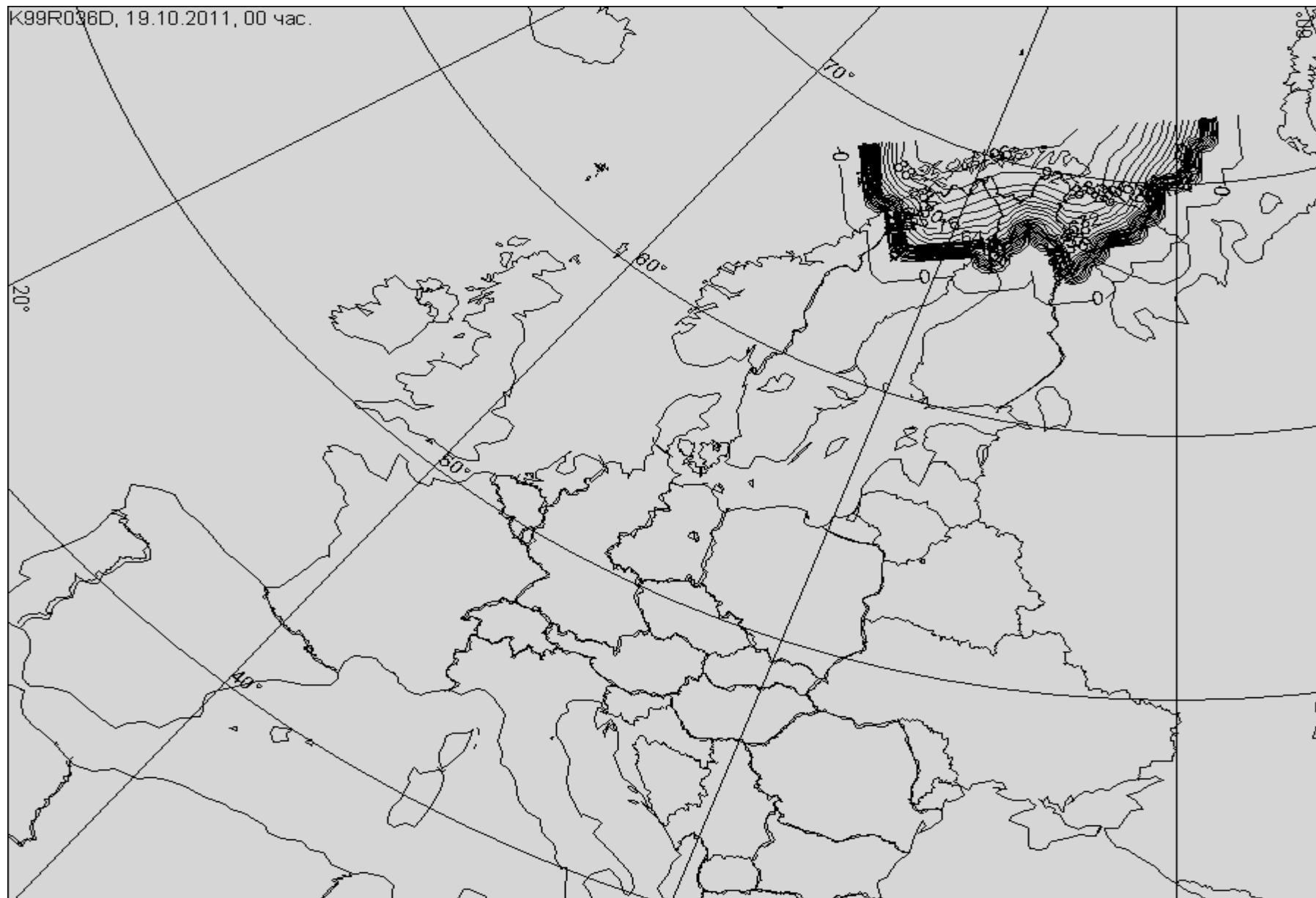
**Область прогноза штормового ветра, рассчитанная
по функции $F_1(X)$ на 22.03.2011г, ограничена изолинией $P=55\%$**



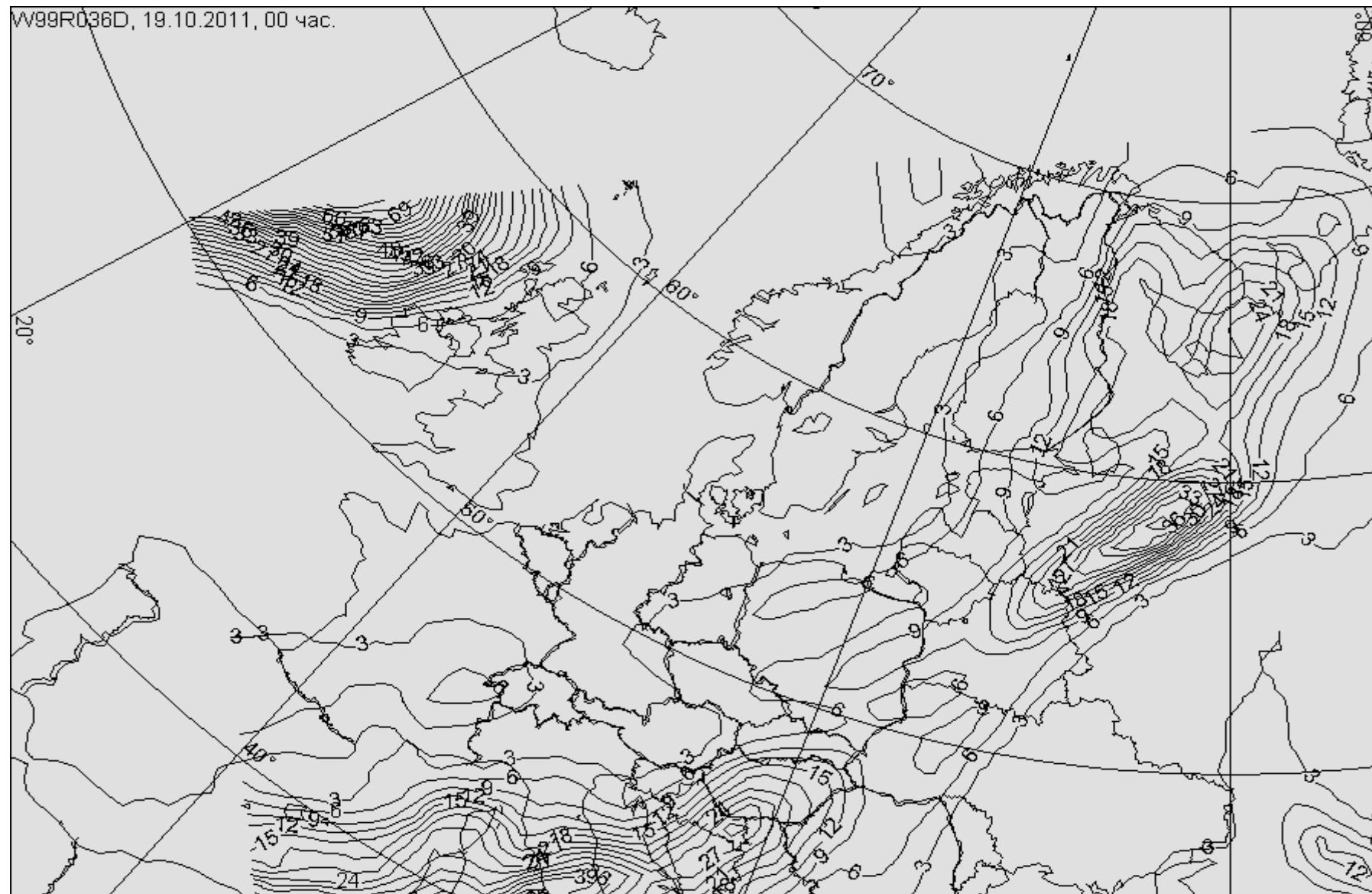
Карта фактических значений скорости ветра и его порывов на дату 22.03.11



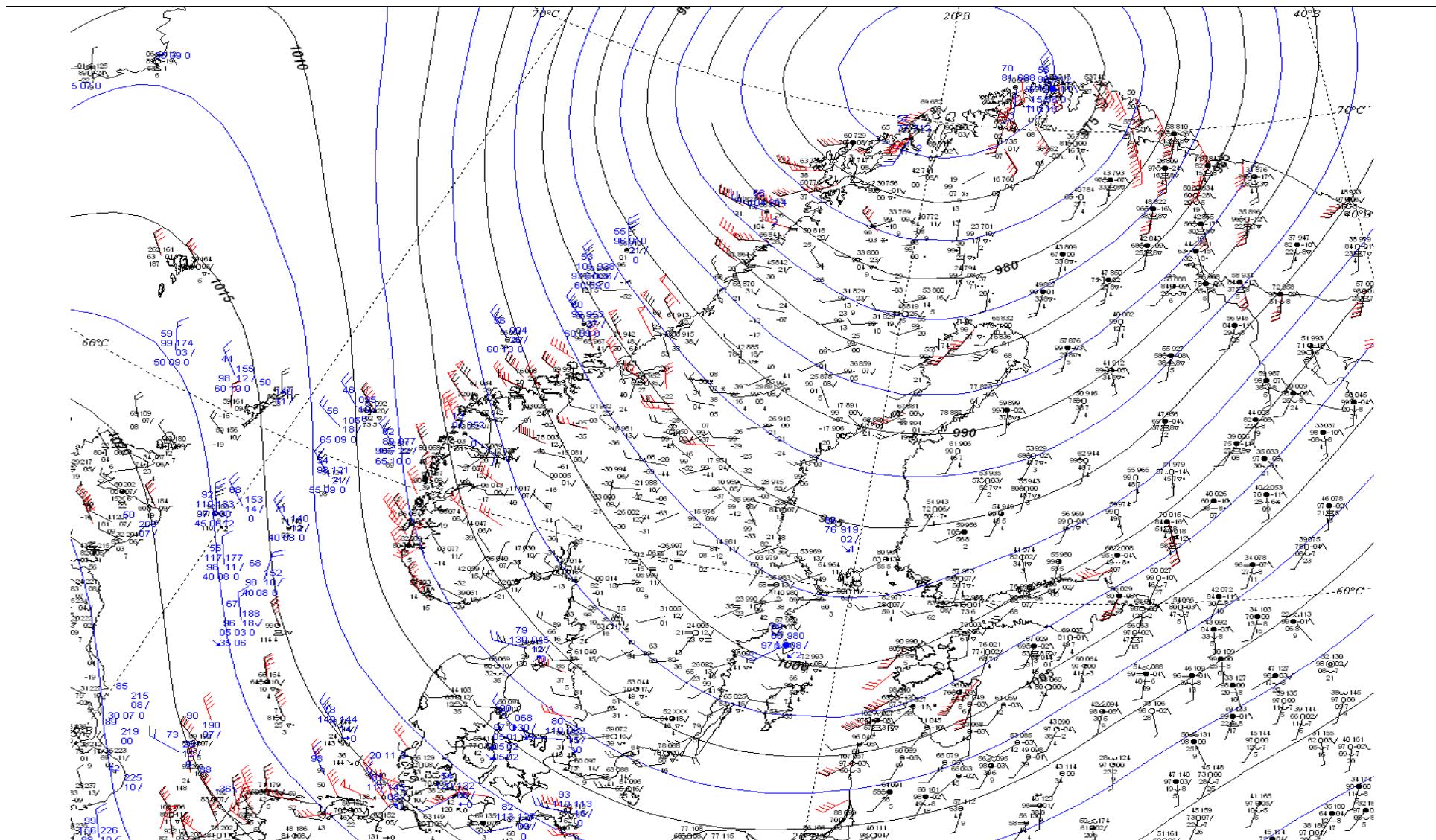
**Область прогноза штормового ветра, рассчитанная
по функции $F_1(X)$ на 20.10.2011г, ограничена изолинией $P=55\%$**



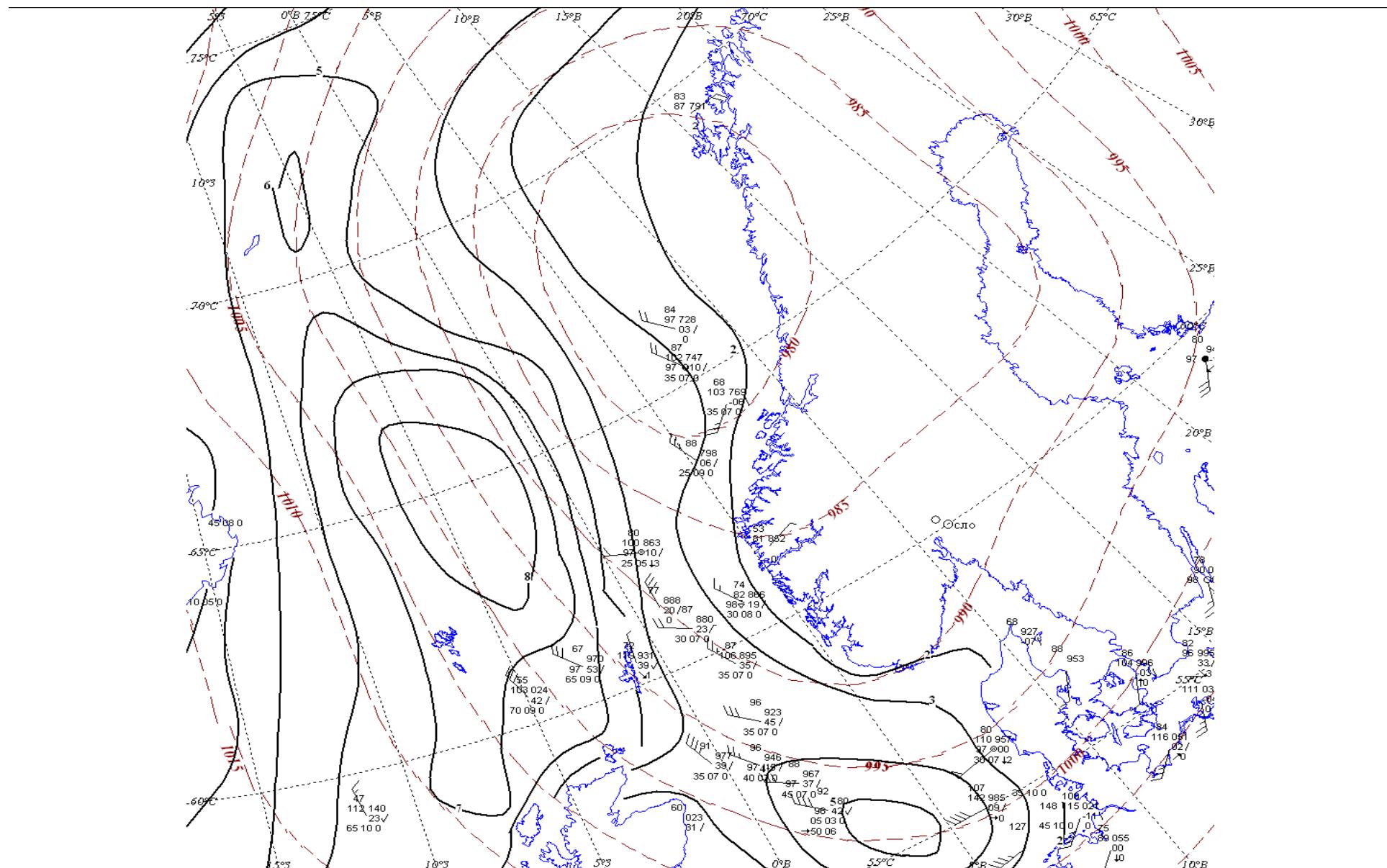
Область прогноза штормового ветра с порывами $V \geq 25\text{ м/с}$, рассчитанная на 20.10.11. с заблаговременностью 36ч, ограничена изолинией $P=55\%$.



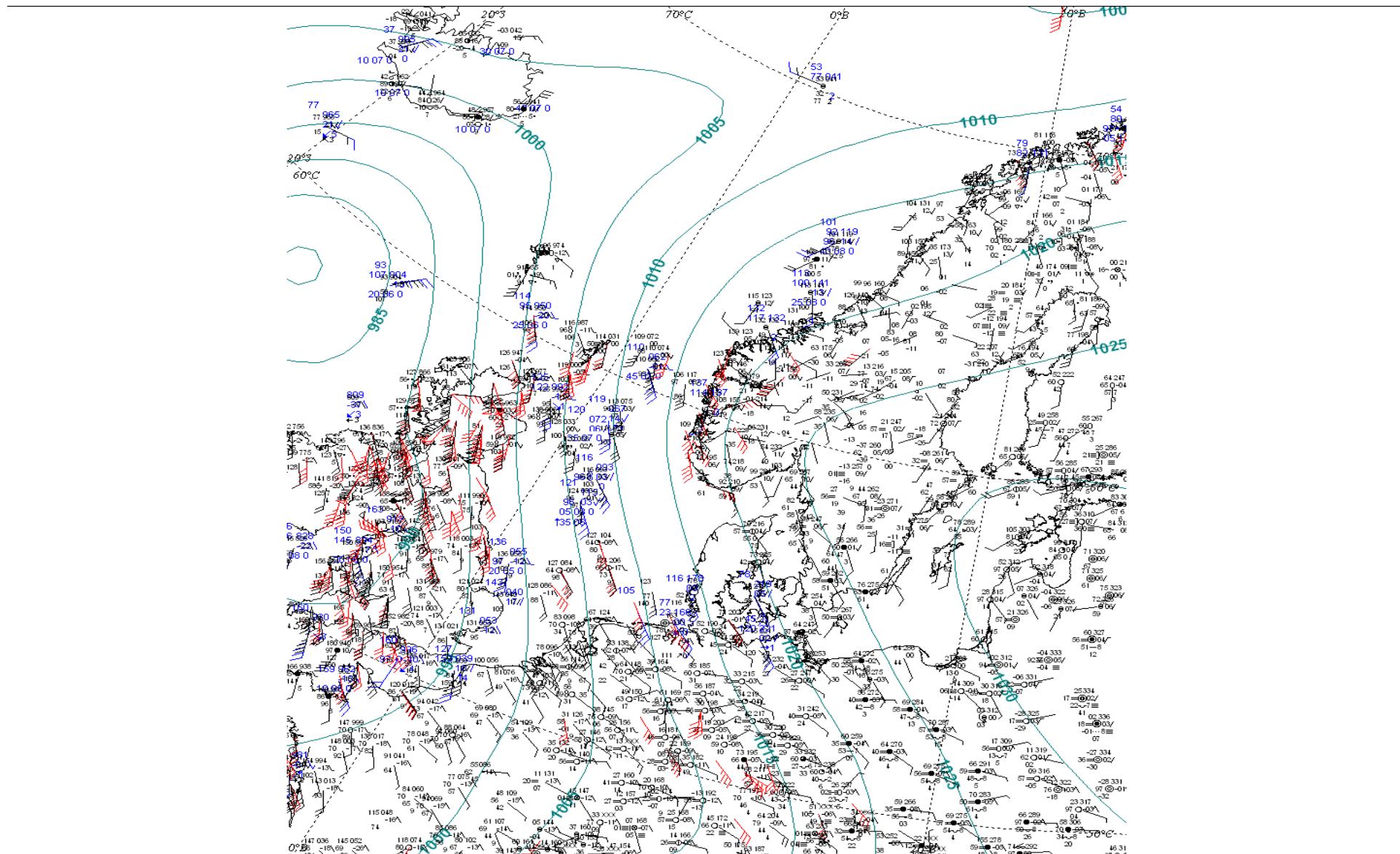
Карта фактических значений скорости ветра и его порывов на дату 20.10.11



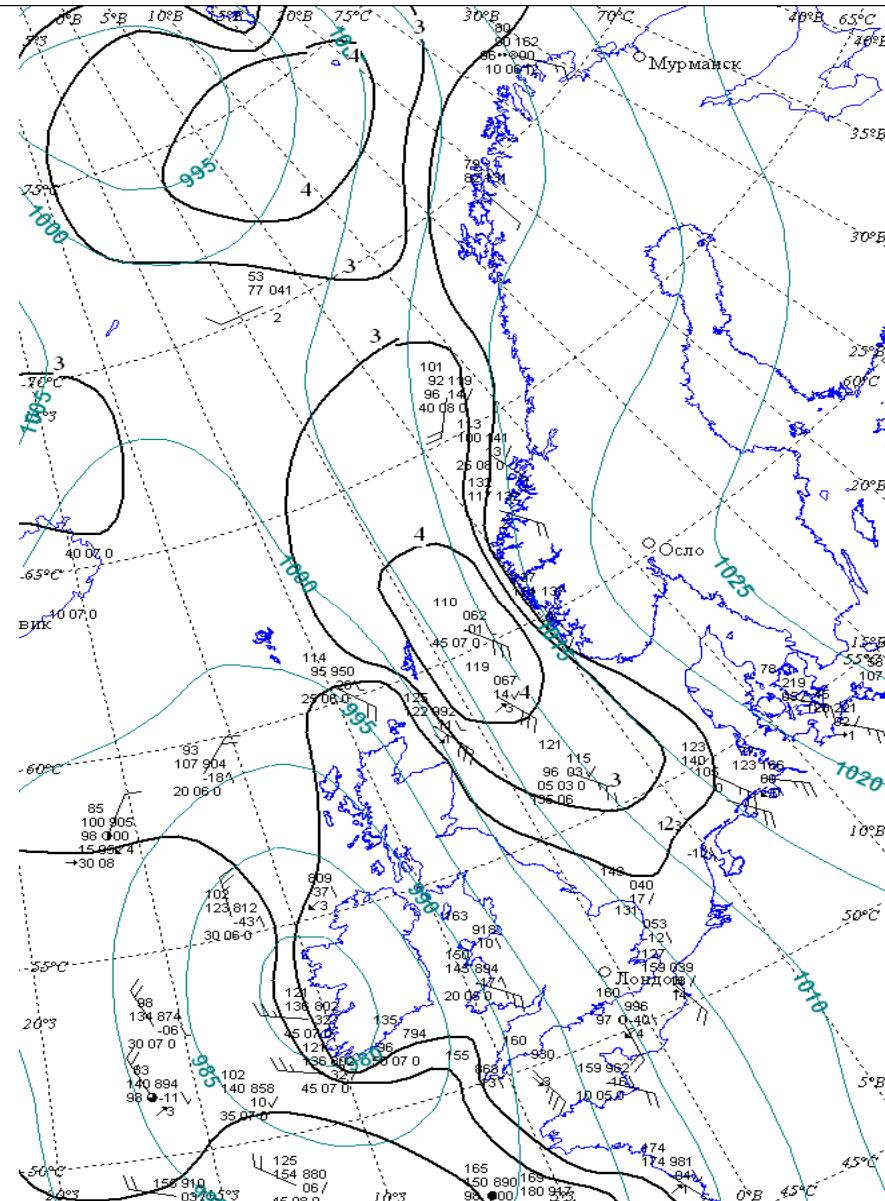
Фактические значения высоты волнения на дату 20.10.11



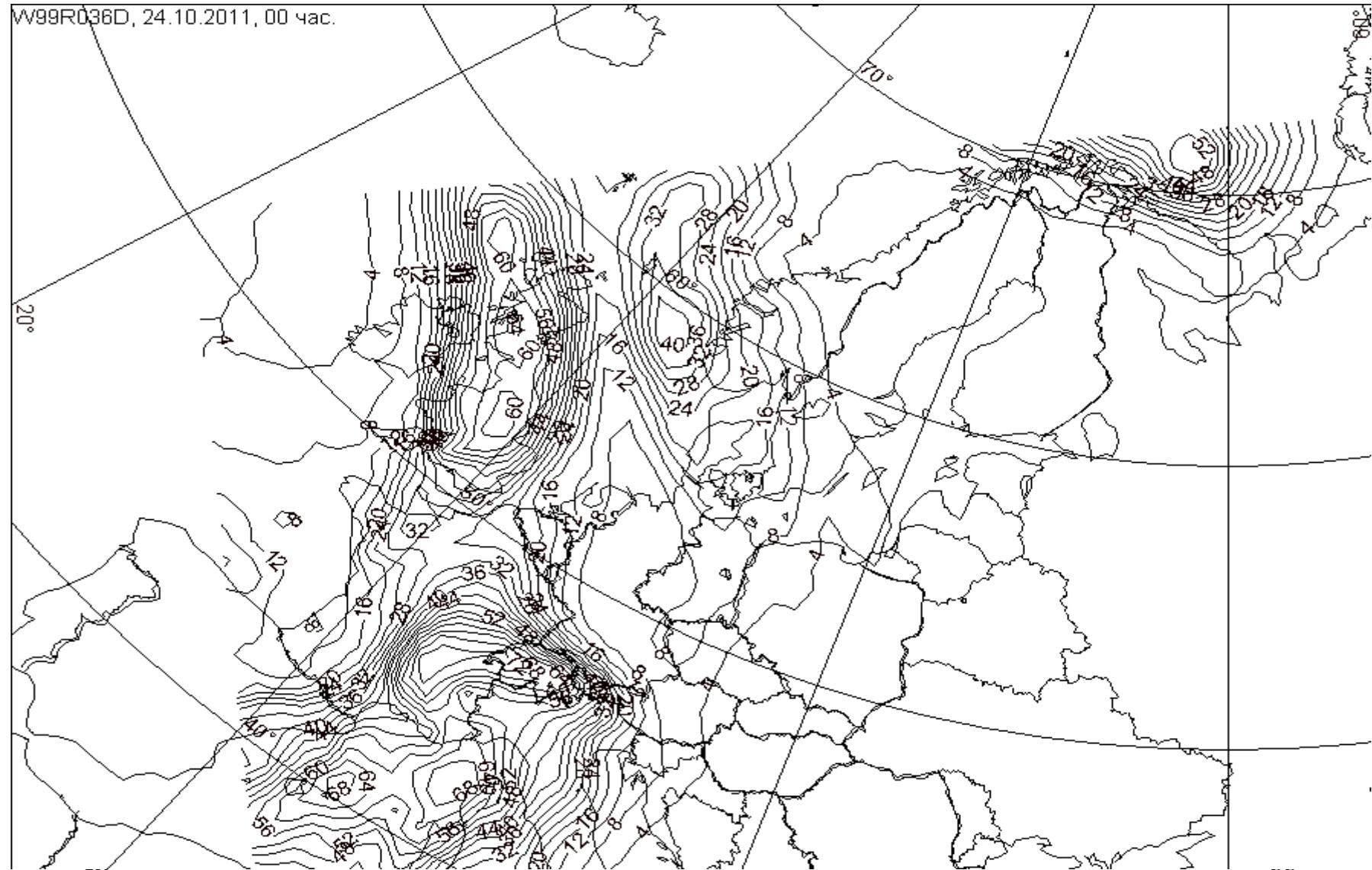
Карта фактических значений скорости ветра и его порывов на дату 24.10.11



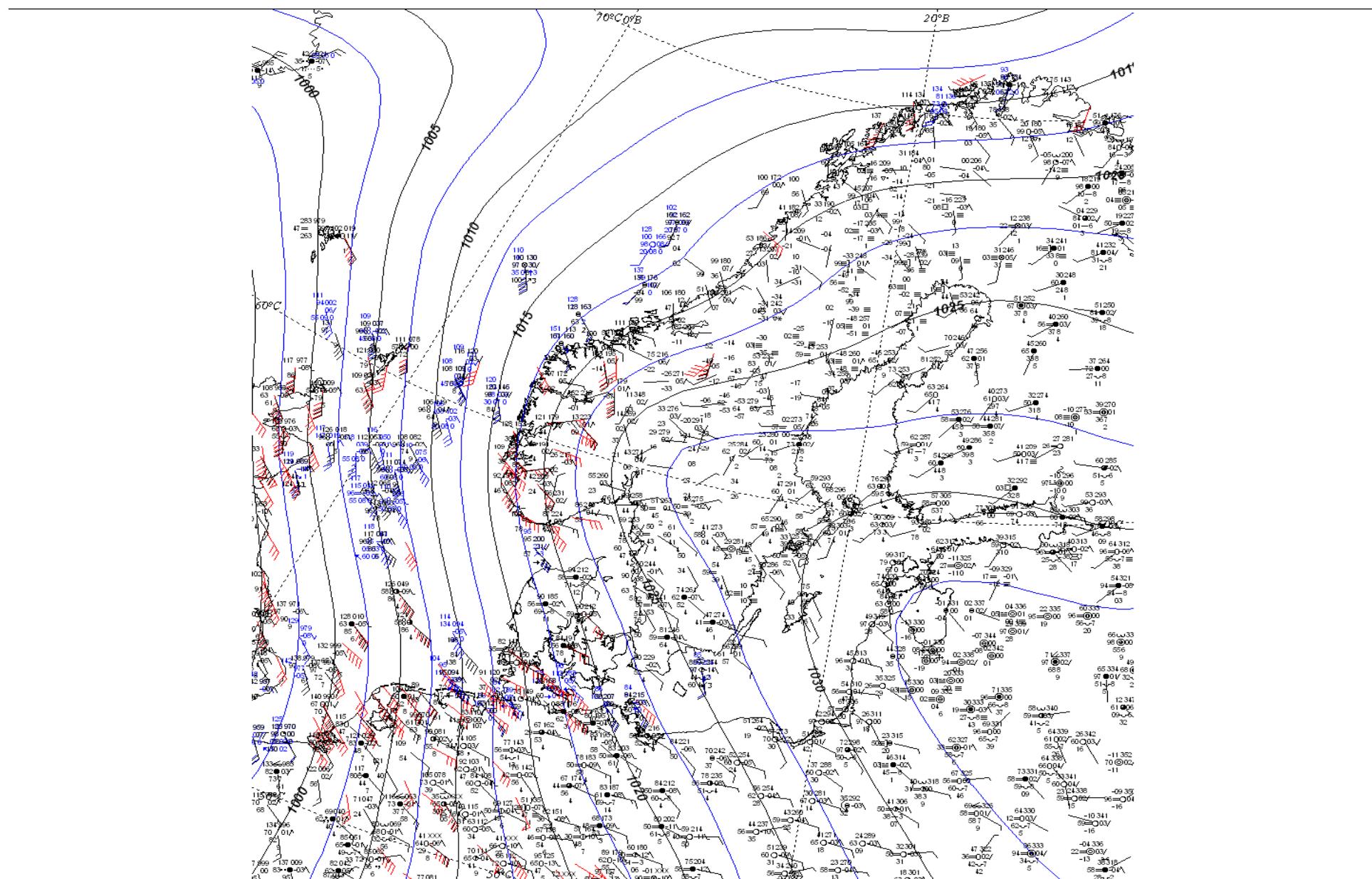
Фактические значения высоты волнения на дату 24.10.11



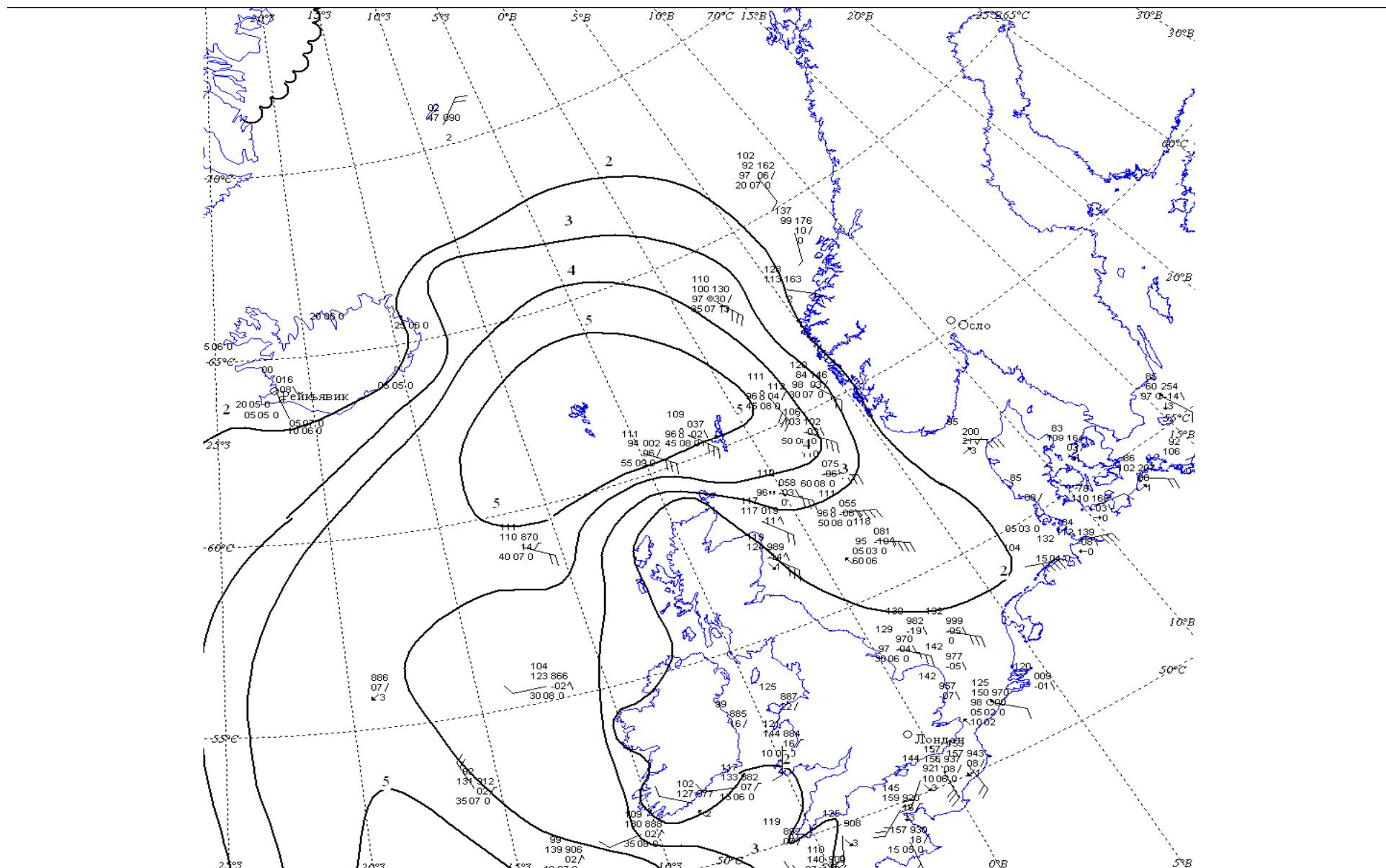
**Область прогноза штормового ветра $V \geq 25\text{м/с}$, рассчитанная
с заблаговременностью 36ч на 25.10.2011г, ограничена изолинией $P=55\%$**



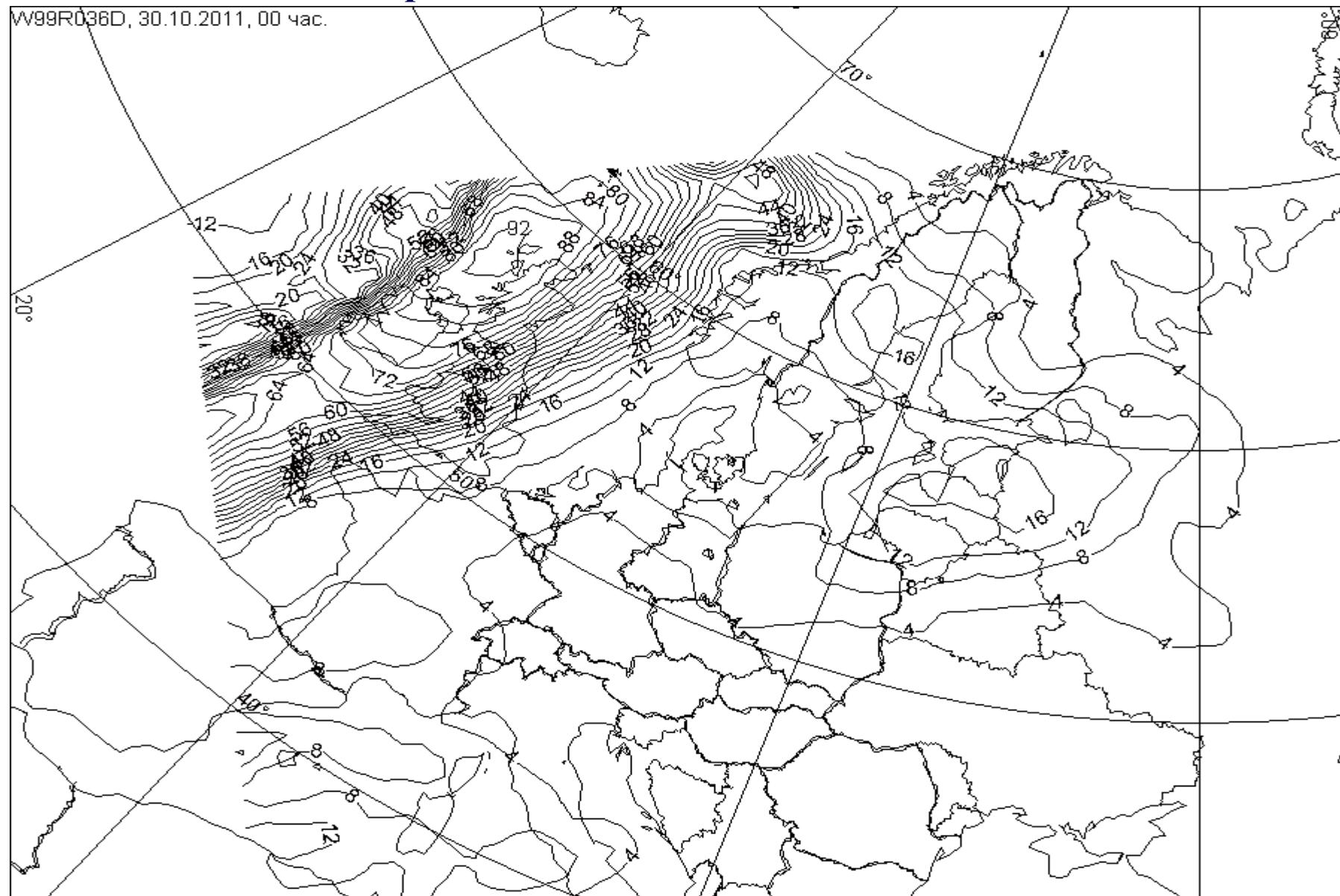
Карта фактических значений скорости ветра и его порывов на дату 25.10.11.



Фактические значения высоты волнения на дату 25.10.11



**Область прогноза штормового ветра с порывами $V \geq 25\text{м/с}$,
расчитанная с заблаговременностью 36ч на 31.10.11,
ограничена изолинией $P=55\%$**



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Верификация результатов прогноза штормового ветра на севере Европы, и, в частности, на акваториях Северного, Норвежского и Баренцева морей, основанного на статистических моделях распознавания с использованием выходной продукции различных гидродинамических моделей, свидетельствуют об устойчивости статистических моделей.

При этом ошибки гидродинамико-статистического прогноза в большой степени зависят от точности гидродинамических прогнозов параметров атмосферы, используемых в статистических моделях. При использовании выходной продукции региональной модели прогноза скорости максимальных порывов ветра и связанной с ним высоты волнения в этих морях (3-5м, 4-6м и более) оказался достаточно успешным. Практически все явления, особенно в Норвежском море, где повторяемость их выше, были предупреждены за 36ч-8ч, что является эффективной помощью в оперативной работе синоптиков. Следует отметить, что и лишних прогнозов скорости ветра с $V>24\text{м/с}$ было немного, но и тогда вместо волнения высотой 4-6м наблюдалось волнение высотой 3-4м. Локализация прогноза явлений штормового ветра связана с масштабами горизонтального разрешения моделей, используемых в настоящее время в Гидрометцентре РФ.

В Гидрометцентре России в последнее время успешно развиваются иностранные мезомасштабные модели WRF и COSMO, пока еще не дающие успешных результатов в прогнозе максимального ветра. Поэтому дальнейшее улучшение результатов прогнозирования и предупреждения этих явлений возможно, по-видимому, лишь при использовании статистического моделирования процессов, приводящих к возникновению максимальных порывов ветра как в теплый, так и в холодный периоды года.

Вместе с тем остается актуальной и задача увеличения заблаговременности прогноза. Исходя из поставленных целей, в дальнейшем представляется наиболее оптимальным вариантом использование в модели гидродинамико-статистического прогноза штормового ветра выходной продукции глобальной полулагранжевой гидродинамической модели среднесрочного прогноза Гидрометцентра России и ИВМ РАН (автор- Толстых М. А.). При этом получаемые прогнозы штормового ветра могут быть использованы в практике прогнозирования штормов всех рыбопромысловых морей России.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андерсон Т. Введение в многомерный статистический анализ. – М: Физматгиз, 1963 – 500с.
2. Переходцева Э.В. Прогноз шквалов статистическими методами классификации на основании диагностических и прогностических синхронных связей. Труды Гидрометцентра СССР, 1985, вып. 271, с. 37-60.
3. Вапник В.Н. Восстановление зависимостей по эмпирическим данным. – М.: Наука, 1979, 448с.
4. Веселова Г.К., Гайфутдинова Р.Г., Гостева И.П., Дурова Т.В., Овечкина Г.П., Пригодич Н.Ф., Татарова Н.И. Результаты испытания автоматизированного метода прогноза дневных максимальных скоростей сл

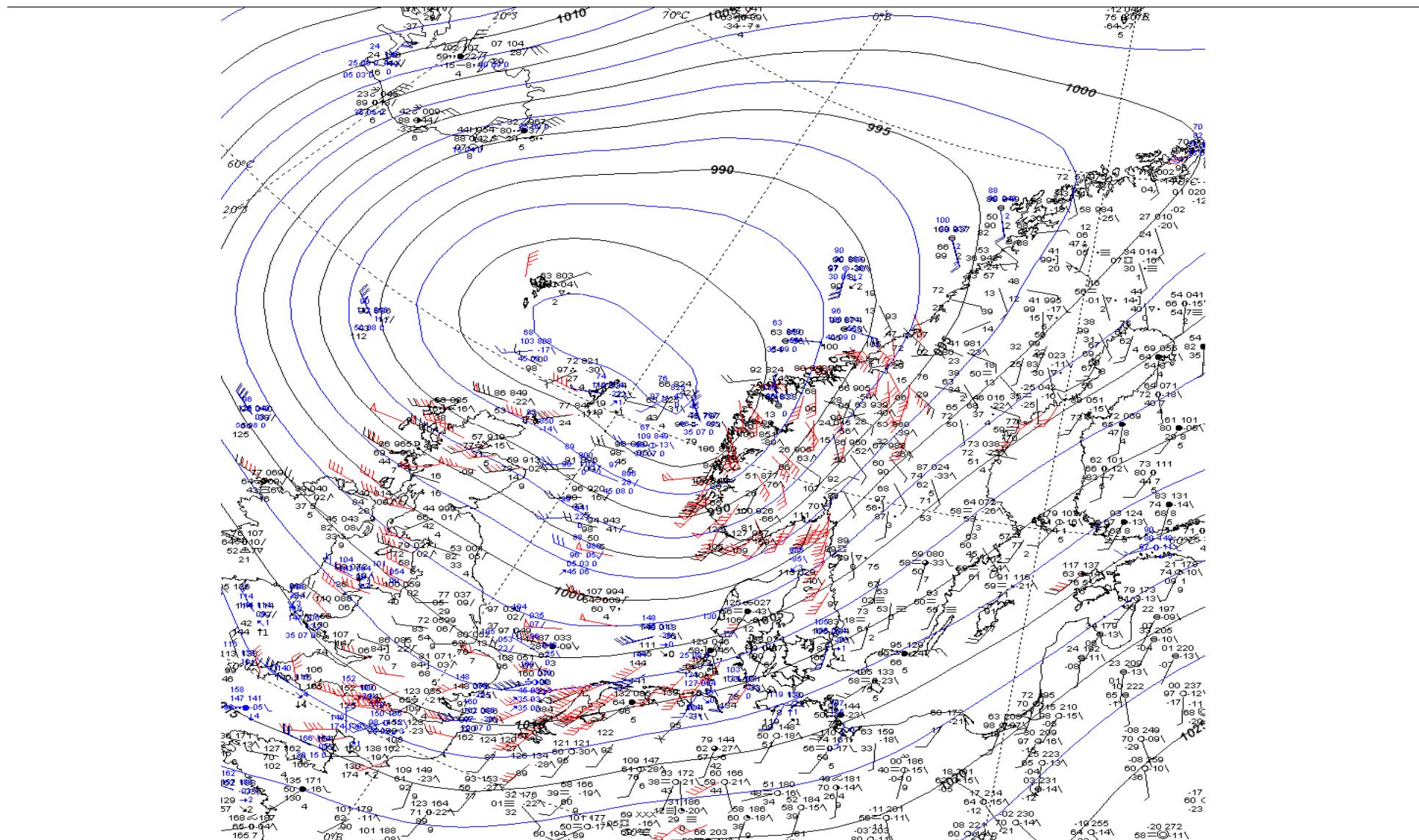
ветра (не менее 20м/с), связанных с активной конвекцией, заблаговременностью 12 и 24 ч // Информационный сборник № 23. - 1995. - С. 7-12.

5. Perekhodtseva E.V.Hydrodynamic- statistical model of forecast to 36 hours ahead of dangerous convective daytime and nighttime phenomena – squalls, tornadoes and rainfalls. Research activities in atmospheric and oceanic modeling, Report 32, 2003.
6. Переходцева Э.В. О модели прогноза летних атмосферных вихрей с горизонтальной и вертикальной осью, связанных с активной конвекцией. Тезисы международной конференции «Потоки и структуры в жидкостях», Санкт—Петербург, июль 2007г

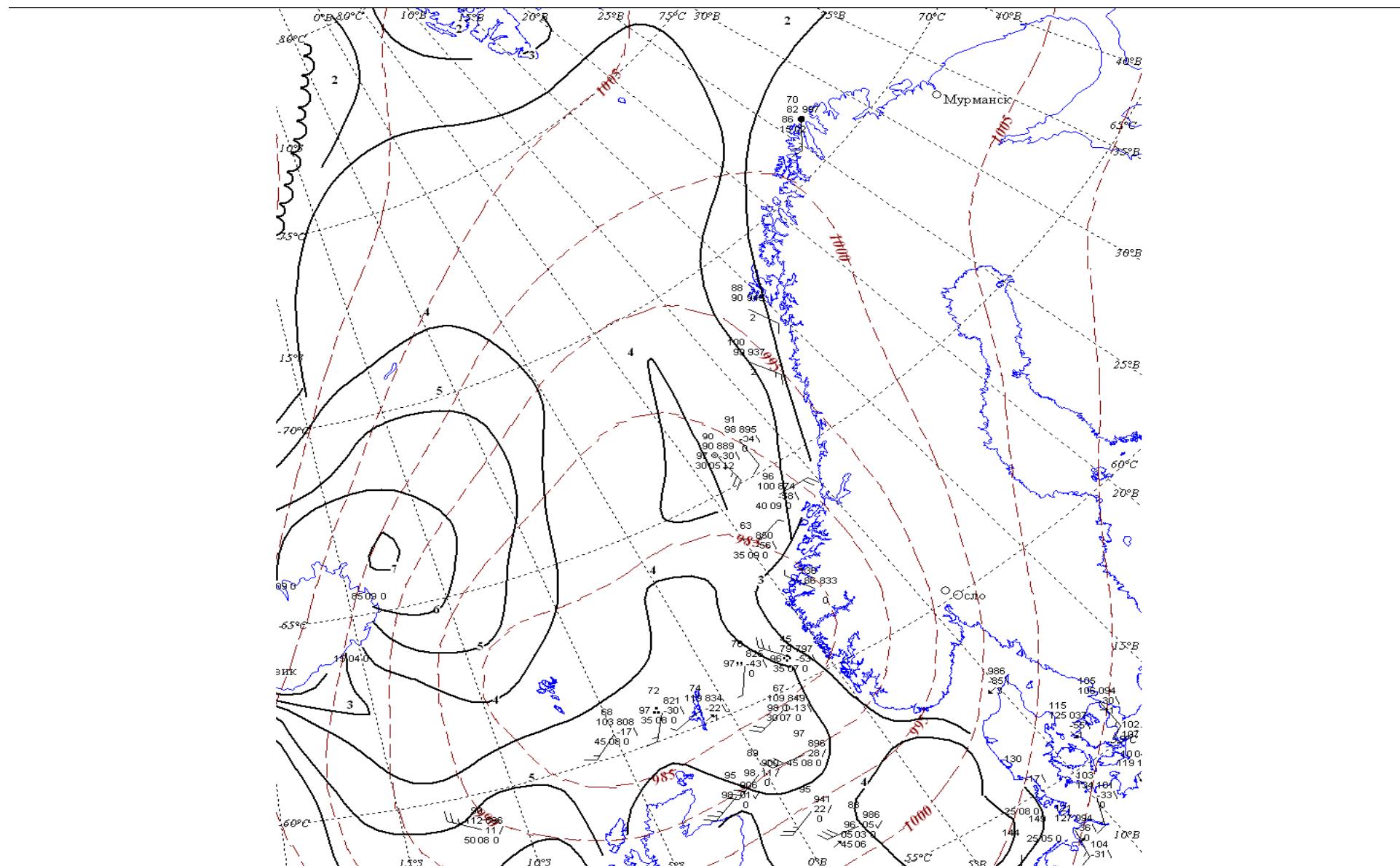
-
7. Perekhodtseva E.V. The statistical model of automated forecast of the dangerous summer wind over the North-West territory of Russia. The VI workshop on the modeling and simulation. 2009. S.-Ptr. 28.06.09-3.07.09. Proceedings. p.59-62.
 8. Переходцева Э.В. Модель гидродинамико-статистического прогноза сильных летних шквалов и смерчей. Сборник трудов 58 – ой научно-технической конференции МИРЭА. Москва, 2009. С. 58-64.
 - 9 Переходцева Э.В. Прогноз сильных шквалов и смерчей в летний период 2009 года на основе статистических моделей. Труды Гидрометцентра России. Вып. 344. – 2010, с.265-279.
 10. Переходцева Э.В. Об устойчивости гидродинамико-статистического прогноза сильных шквалов и смерчей. СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА. 2009, вып.6. т.2. с.

**Благодарю за
внимание**

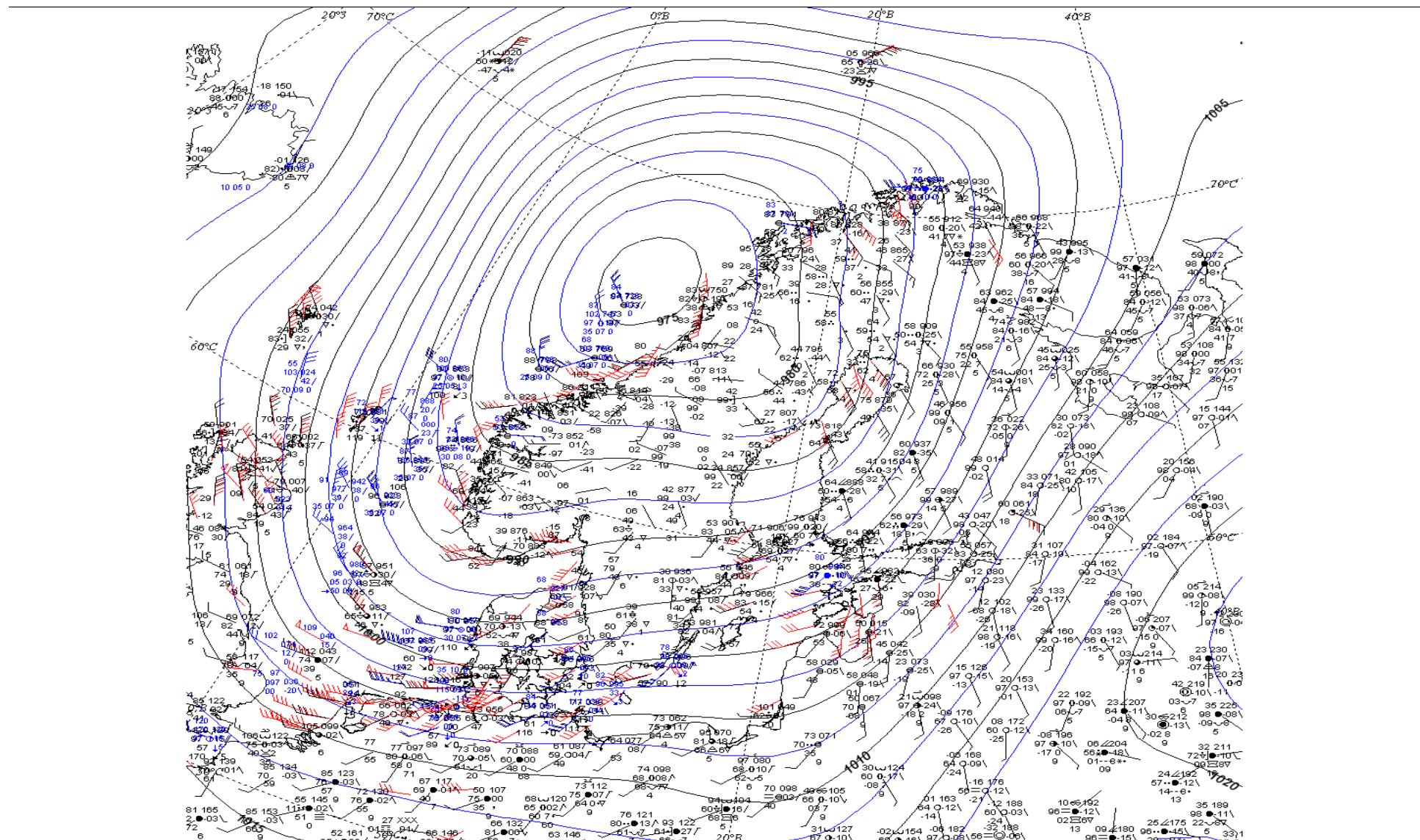
Карта фактических значений скорости ветра и его порывов на дату 18.10.11



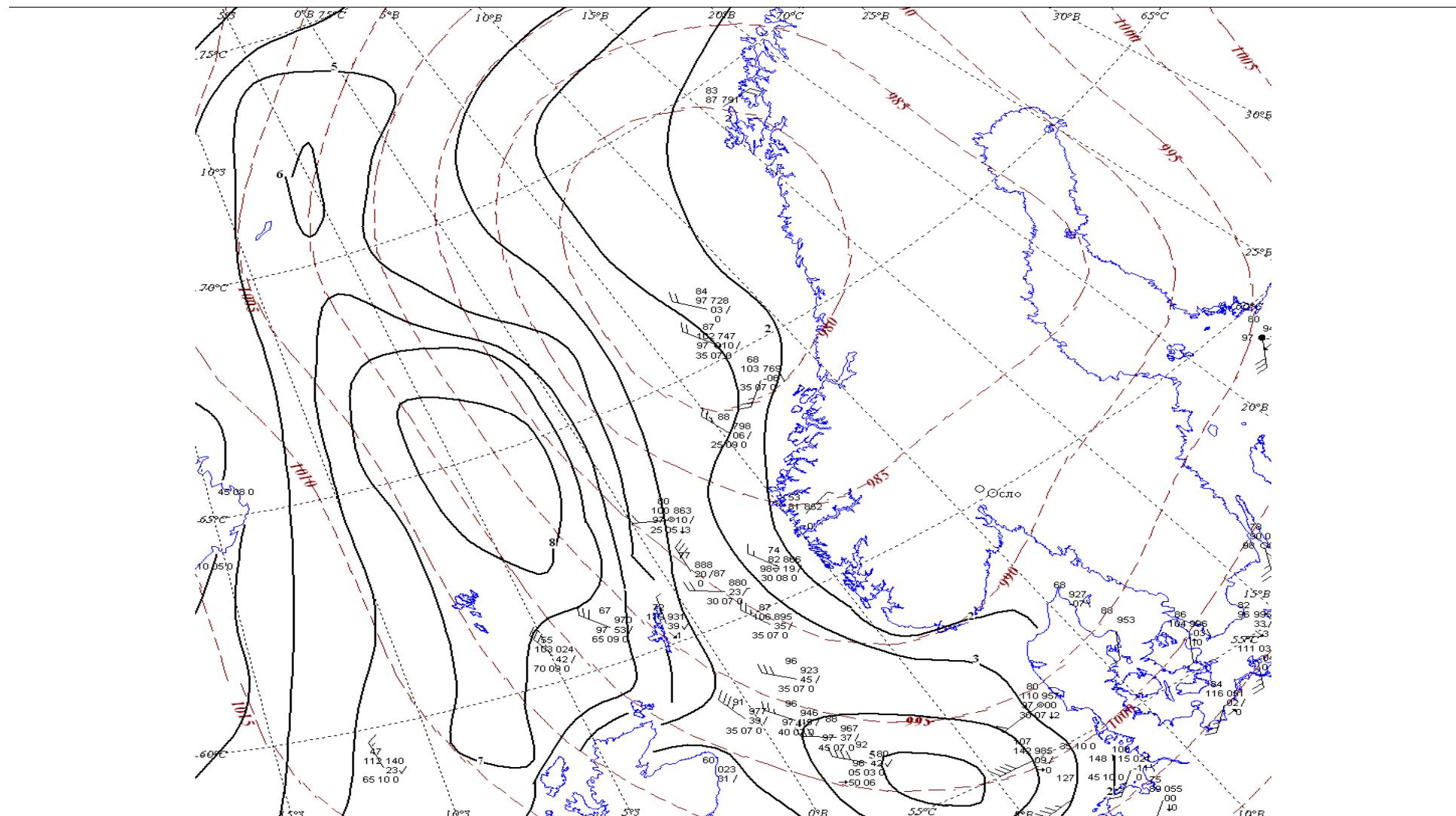
Фактические значения высоты волнения на дату 18.10.11



Карта фактических значений скорости ветра и его порывов на дату 19.10.11



Фактические значения высоты волнения на дату 19.10.11



08.11.11