

Анализ устойчивости гидродинамико-статистической модели прогноза сильных шквалов и смерчей для территории России

Э.В. Переходцева

Гидрометеорологический научно-исследовательский центр России

123242 Москва, Б. Предтеченский пер., 9-11

E-mail: perekhod@mecom.ru

В статье представлены результаты по разработке гидродинамико-статистической модели автоматизированного прогноза сильных шквалов и смерчей для территории европейской части России и Сибири. Дано описание математической модели альтернативного статистического прогноза этих явлений, и приведены результаты независимых испытаний методических прогнозов с заблаговременностью 12-36ч. Показана устойчивость статистической модели к систематическим ошибкам прогноза разных гидродинамических моделей прогноза погоды.

Ключевые слова: шквал, смерч, объективный прогноз, распознавание образов, статистическая модель, гидродинамическая модель, автоматизированный прогноз, европейская часть России, территория Сибири.

Введение

Прогнозирование сильных шквалов и смерчей (торнадо умеренных широт) даже с заблаговременностью 3ч (как штормовое предупреждение) является до настоящего времени одной из труднейших и актуальнейших задач синоптической практики. Эти локальные явления, имеющие очень небольшую повторяемость, но ежегодно наблюдающиеся на европейской части России и Сибири, приносят значительные экономические потери и даже человеческие жертвы. В настоящее время не имеется гидродинамических моделей прогноза таких явлений. Применяемые в синоптической практике графические и расчетные методы прогноза, использующие зависимость этих явлений от каких-либо двух предикторов (параметров атмосферы), в значительной мере зависят от интуиции синоптика и вследствие этого являются субъективными. Поэтому наиболее объективными методами прогноза возникновения этих опасных явлений погоды, зависящих от большого количества параметров атмосферы, являются методы многомерного статистического анализа [1].

Статистическая модель альтернативного прогноза

Для отделения метеорологических ситуаций, способствующих возникновению шквалов и смерчей, от ситуаций с грозами и ливнями нами была использована модель альтернативного прогноза, основанная на статистическом методе классификации, описанном в [1]. Модель альтернативного прогноза неблагоприятных метеорологических ситуаций представляется нами как задача распознавания образов множества векторов $X(A)$ (события A - неблагоприятные метеорологические ситуации, способствующие возникновению штормовых ветров) и множества векторов $X(B)$ (события B - благоприятные метеорологические ситуации). Для разделения этих множеств рассчитывается дискриминантная функция $F(X)$, минимизирующая средние потери [1,2].

Задаче нахождения оптимального статистического решающего правила (функции $F(X)$) предшествовала задача оптимального отбора наиболее информативного вектора-предсказателя (задача сокращения размерности пространства признаков без значительной потери информации).

Для этой цели нами был предложен и использован эмпирико-статистический метод отбора наиболее информативного вектора-предсказателя, описанный в [2]. При этом средняя выборочная матрица корреляции предикторов \mathbf{R} представлялась в диагональном виде с блоками сильно зависимых предикторов, расположенных на диагонали матрицы \mathbf{R} . С целью диагонализации матрицы \mathbf{R} ей был поставлен во взаимно-однозначное соответствие связный граф \mathbf{G} вершинами которого были сами предикторы, а ребра соответствовали бинарному коэффициенту корреляции r_{ij} предикторов i и j . В зависимости от задаваемого порога связности r стороны графа \mathbf{G} , которым соответствовали $r_{ij} > r$, были оставлены, а остальные ребра были убраны. Таким образом, связный граф \mathbf{G} распадался на некоторое количество несвязных подграфов \mathbf{G}_i и несколько изолированных вершин. Связным подграфам \mathbf{G}_i в матрице \mathbf{R} соответствовали диагональные блоки тесно связанных предикторов. В информативный вектор-предсказатель были отобраны наиболее информативные признаки – представители от каждого блока, а также достаточно информативные признаки, соответствующие изолированным вершинам.

Физико-статистический метод прогноза сильных шквалов для Европейской территории России

Объективный метод прогноза шквалов на основе статистической теории классификации был разработан нами в 1977-1984 гг. [1, 2]. На основе архива фактических значений предикторов (количеством 26) на обучающих выборках классов наличия и отсутствия явлений шквалов, смерчей и сильных ветров (скоростью свыше 19 м/с) были вычислены выборочные матрицы ковариации наличия и отсутствия этих явлений, вектора математических ожиданий для случаев наличия и отсутствия этих опасных явлений и средняя матрица корреляции \mathbf{R} . В результате вышеописанного метода диагонализации средней матрицы корреляции \mathbf{R} были выделены следующие блоки тесно связанных предикторов (параметров атмосферы). Этими блоками оказались, в первую очередь, блок предикторов, отражающих гидродинамическую неустойчивость атмосферы, блок скоростей ветра на разных уровнях, блок предикторов приземной температуры и влажности. Выбранный информативный вектор-предсказатель для прогноза шквалов и штормовых ветров скоростью более 20 м/с состоял из наиболее информативных представителей от блоков зависимых предикторов и некоторых информативных предикторов, соответствующих изолированным вершинам. В качестве критериев информативности использовались расстояние Махаланобиса [1, 2] и критерий минимальной энтропии Вапника – Червоненкиса [3]. Для выделенных шести векторов была рассчитана дискриминантная функция $F(\mathbf{X})$ для распознавания и прогноза сильных ветров, шквалов и смерчей на текущий день с заблаговременностью 12-18ч [2, 4].

После проведения в четырех Управлениях по гидрометслужбе в 1984-1985 гг. оперативных испытаний данного объективного метода прогноза он был рекомендован к использованию в синоптической практике для прогноза сильных шквалов, смерчей и ветра скоростью более 19 м/с [4]. Метод был апробирован для прогноза смерчей, наблюдавшихся в 1984-1986 гг. Результаты этих испытаний приведены в таблице 1.

Таблица 1. Объективный физико-статистический прогноз смерчей в 1984-1986 гг.

Пункт	Дата	V_{700}	H_0	$(T'-T)_{500}$	$\frac{\partial T}{\partial n_3}$	T_{\max}	Td_{\max}	$F(\mathbf{X})$
Иваново	09.06.1984	13	630	9	5	24	15,0	3,6
Зарайск	02.08.1984	22	715	3	2	21	14,6	1,9
Пенза	21.08.1986	20	630	6	4	31	16,0	7,9
Рязань	26.08.1986	22	660	7	3	30	15,0	7,3
Москва	31.08.1986	18	615	2	3	31	13,5	7,9

Из таблицы 1 видно, что во всех случаях дискриминантная функция $F(X)$ существенно больше нуля. В этом случае по статистической модели прогнозируются сильные ветры (скоростью 20 м/с и более), шквалы или даже смерчи, в то время, как синоптики во всех приведенных случаях прогнозировали грозу и усиление ветра при грозе до 15-18 м/с.

Модель гидродинамико-статистического прогноза сильных шквалов и смерчей

С целью полной автоматизации объективного метода прогноза шквалов скоростью 20 м/с и более было необходимо в оперативном режиме без участия синоптика рассчитывать значения дискриминантной функции в зависимости от значений гидродинамических прогнозов предикторов, входящих в дискриминантную функцию, используя при этом те информативные параметры атмосферы, которые прогнозируются достаточно успешно гидродинамическими моделями.

Первой отечественной оперативной гидродинамической моделью краткосрочного прогноза погоды в 1987 году в Гидрометцентре СССР стала полусферная неадиабатическая гидродинамическая модель атмосферы по полным уравнениям (автор- Беркович Л.В.). Для новых данных о явлениях шквалов и штормовых ветров множество потенциальных предикторов (параметров атмосферы) составили теперь около сорока предикторов: значения температуры, влажности, составляющих ветра и значения геопотенциала на пяти уровнях и линейно зависящие от них сдвиги ветра в средней тропосфере, индекс гидродинамической неустойчивости, вертикальный и горизонтальный градиенты температуры. В качестве их значений были взяты данные объективного анализа Гидрометцентра России в узлах сетки объективного анализа, где в определенные даты наблюдались явления сильных ветров, включая шквалы и смерчи (события А).

Тем же описанным ранее методом из множества потенциальных предикторов (параметров атмосферы) были отобраны наиболее информативные и слабо зависимые предикторы. В зависимости от их значений было рассчитано новое статистическое решающее правило прогноза этих явлений – функция $G_1(X)$, зависящая от значений давления, приземной температуры и влажности, скорости и сдвига ветра в средней тропосфере, индекса гидродинамической неустойчивости Вайтинга, вертикального и горизонтального градиента температуры. Оптимальное количество предикторов в векторе-предсказателе составило 8. Это число связано также с количеством собственных значений выборочной средней матрицы R .

После проведения оперативных испытаний в региональных метеослужбах европейской территории России гидродинамико-статистическая модель показала достаточную успешность прогнозов (критерий Пирси-Обухова (Т) для заблаговременности 12-24ч. и разных регионов составил $T=0,42-0,69$). Прогнозы шквалов и сильного ветра передавались в пять регионов по ЦКС в виде телеграмм в течение 1993-2005гг. В таблице 2 приведены оценки успешности прогнозов сильного ветра по этой гидродинамико-статистической модели [5].

Таблица 2. Показатели успешности прогноза шквалов и сильного ветра скоростью не менее 20 м/с по регионам европейской территории России

УГМС	Автор метода	Заблаговременность, ч.	N	F %	И _я %	И _{бя} %	П _я %	П _{бя} %	T
Северо-Западное	Переходцева инерц.	12	1110	92	25	99	76	92	0,68
			1110	98	56	99	39	99	0,32
	Переходцева инерц	24	1007	89	21	99	80	89	0,69
			1009	98	30	99	25	99	0,21
Центрально-Черноземных областей	Переходцева.	12	160	91	24	99	80	92	0,72
			158	91	22	99	80	91	0,71
Верхне-Волжское	Переходцева	12	955	90	22	98	55	91	0,46
			995	90	14	98	48	91	0,39
Северо-Кавказское (равнинная территория)	Переходцева	12	405	78	24	96	78	77	0,55
			400	78	21	97	79	77	0,56

Примечание: N – количество испытываемых случаев прогноза;
 F – общая оправдываемость прогноза;
 И_я – оправдываемость прогноза явления;
 И_{бя} – оправдываемость прогноза без явления;
 П_я – предупрежденность прогноза случаев с явлением;
 П_{бя} – предупрежденность прогноза случаев без явления;
 T – значения критерия Пирси-Обухова, T=1-а-в: а- ошибка «пропуска цели»;
 в- ошибка «ложной тревоги»

Аналогично для того же множества потенциальных предикторов для прогноза штормовых ветров со скоростями $V > 24$ м/с была рассчитана функция $G_2(\mathbf{X})$. В результате проведенного отбора для распознавания и прогноза таких явлений (ветров скоростью $V > 24$ м/с) был также выбран наиболее информативный вектор-предсказатель меньшей размерности (7). Для выбранных предикторов на обучающих выборках случаев наличия и отсутствия штормовых ветров скоростью свыше 24 м/с была получена новая функция $G_2(\mathbf{X})$. По результатам независимых испытаний, проведенных в трех региональных метеослужбах, технические советы этих метеослужб рекомендовали использовать в синоптической практике гидродинамико-статистические прогнозы таких опасных ветров, включая сильные шквалы и смерчи, заблаговременностью до 36ч. Критерий Пирси-Обухова T оказался также достаточно высоким. Результаты независимых испытаний приведены в таблице 3.

Таблица 3. Результаты независимых испытаний гидродинамико-статистического метода прогноза летних штормовых ветров скоростью свыше 24 м/с по территории ВВУГМС, СЗУГМС и УГМС Республики Татарстан за 2003-2005гг.

Количество прогнозируемых случаев.	Количество фактических случаев		Сумма	Оправды - ваемость прогноза, %	Предупр .прогноза а, %	Общая оправд. прогноза, %	Критери й Пирси-Обухова
	С явлением	Без явления					
Верхне-Волжское УГМС							
С явлением	n ₁₁ 11	n ₁₂ 157	n ₁₀ 168	Ия= 6,5	Пя= 68,8	F= 91,2	T= 0,60
Без явления	n ₂₁ 5	n ₂₂ 1662	n ₂₀ 1667	Ибя= 99,7	Пб.я= 91		
Сумма	n ₀₁ 16	n ₀₂ 1819	n ₀₀ 1835				
Северо-Западное УГМС							
С явлением	n ₁₁ 14	n ₁₂ 23	n ₁₀ 37	Ия= 38	Пя= 93,3	F= 97	T= 0,90
Без явления	n ₂₁ 1	n ₂₂ 829	n ₂₀ 830	Ибя= 99	Пб.я= 97		
Сумма	n ₀₁ 15	n ₀₂ 852	n ₀₀ 867				
УГМС Республики Татарстан							
С явлением	n ₁₁ 7	n ₁₂ 49	n ₁₀ 56	Ия= 12	Пя= 87,5	F= 87,5	T= 0,75
Без явления	n ₂₁ 1	n ₂₂ 344	n ₂₀ 345	Ибя= 99,7	Пб.я= 87		
Сумма	n ₀₁ 8	n ₀₂ 393	n ₀₀ 401				

Примечание:;

F – общая оправдываемость прогноза;

Ия – оправдываемость прогноза явления;

Ибя – оправдываемость прогноза без явления;

Пя – предупрежденность прогноза явления;

Пбя – предупрежденность прогноза без явления;

T- значение критерия Пирси-Обухова.

Для территории Сибири авторская оценка успешности этой модели по результатам прогнозов летних шквалов и смерчей 2004-2005гг. также оказалась достаточно успешной ($T=0,78$). Примеры рассчитанных прогнозов приводятся в следующем разделе.

Примеры гидродинамико-статистического прогноза штормовых ветров, сильных шквалов и смерчей на Европейской территории России и территории Сибири

Вероятность $P(X)$ гидродинамико-статистического прогноза штормового ветра рассчитывалась в зависимости от значений дискриминантных функций $G_1(X)$ или $G_2(X)$ в узлах декартовой сетки 150×150 км с использованием прогностических значений выходных полей полусферной гидродинамической модели краткосрочного прогноза по формуле:

$$P(X) = 1 / (1 + \text{EXP}(-G(X)))$$

Для использования в оперативной практике вместо вычисленных таким образом $P(X)$ в узлах сетки, покрывающей территорию России, стоит целая величина $100 \times P(X)$, выраженная в процентах, в более привычном для синоптиков виде; в дальнейшем эту величину также будем называть $P(X)$.

Области с вероятностями, превышающими эмпирически выбранный для разной заблаговременности разный (в зависимости от систематических ошибок прогноза) порог вероятности $P_{\text{пор}}$, выделяют прогнозируемую область возникновения таких явлений. Успешно были даны прогнозы смерчей заблаговременностью 12ч и 24ч в Москве в июле 2001 года и в Костроме в 2005 году, с заблаговременностью до 36ч в Дубне в июне 2005 года, а также прогнозы подобных явлений в других районах европейской части России. На рис. 1 изолинией пороговой вероятности $P=52\%$ (для заблаговременности 36 ч) выделяется прогнозируемая по сроку 00 ч Гринвичского времени с заблаговременностью 36 ч область опасных дневных ветров на 26 июня 2005 г. Эта область охватывает Тверскую область и часть Московской области. В этот день, действительно, в г. Дубна наблюдался смерч, принеший значительные разрушения, а во Внуково (московская область) были отмечены порывы ветра скоростью 26м/с. На рис. 2 представлена прогнозируемая с заблаговременностью 24ч (т.е. на следующий день) область опасных дневных ветров со скоростями более 24м/с, включая шквалы и смерчи, ограниченная изолинией пороговой вероятности $P=60\%$, рассчитанная 23 июля 2001г по сроку 12ч Гринвичского времени. На рис. 3 дана область прогноза шквалов, смерчей и штормовых ветров скоростью более 24м/с на текущий день 24 июля 2001 года по сроку 00ч Гринвичского времени, ограниченная также изолинией $P=60\%$. Здесь отдельно выделилась прогнозируемая область над Московским регионом и Нижегородская область. В этот день в Москве наблюдался разрушительный смерч, а в Нижегородской области порывы ветра достигали 30 м/с.

Для территории Сибири предсказания штормовых ветров ($V > 24$ м/с) даже с заблаговременностью 36 ч. оказались достаточно точными: для юга Красноярской области 18 июня 2005г, для Новосибирска 24 июня 2005г, для Алтая 24 июня 2005г ($V=37$ м/с), для Туруханска 4 июля 2005 г, полуострова Таймыр 20 июля 2005. Значение предупрежденности явлений составило 86%. Ошибка “ложной тревоги” оказалась также невысокой, и поэтому значение критерия Пирси-Обухова (T) составило $T=0,78$, что свидетельствует об успешности данной модели гидродинамико-статистического прогноза штормовых ветров [6,7]. Для уточнения и локализации прогноза смерчей нами разработана экспертная система прогноза данных явлений (ЭС). ЭС включает эмпирические синоптические правила и коэффициенты доверия – вероятности возникновения смерчей в зависимости от осуществления этих правил. Правила постоянно пополняются, а коэффициенты доверия пересчитываются каждый раз при поступлении новых данных [8]. Применение такой системы даст возможность выделить смерчи среди всех явлений штормовых ветров ($V > 24$ м/с) и локализовать их

места возникновения. В настоящее время проводится тестирование ЭС с помощью синоптиков региональных Управлений по гидрометслужбе.

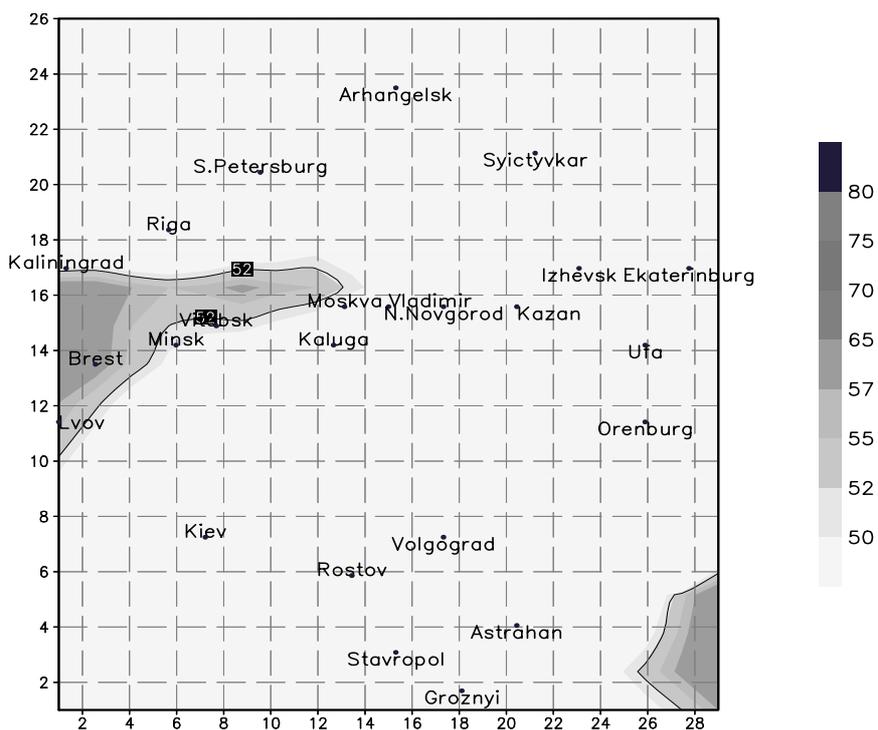


Рис. 1. Расчет прогноза опасных ветров $V > 24 \text{ м/с}$ с заблаговременностью 36 ч. на 26.06.05 по данным за 25.06.05
Обозначение: изолиния $P=52\%$ ограничивает область прогноза ветров ОЯ

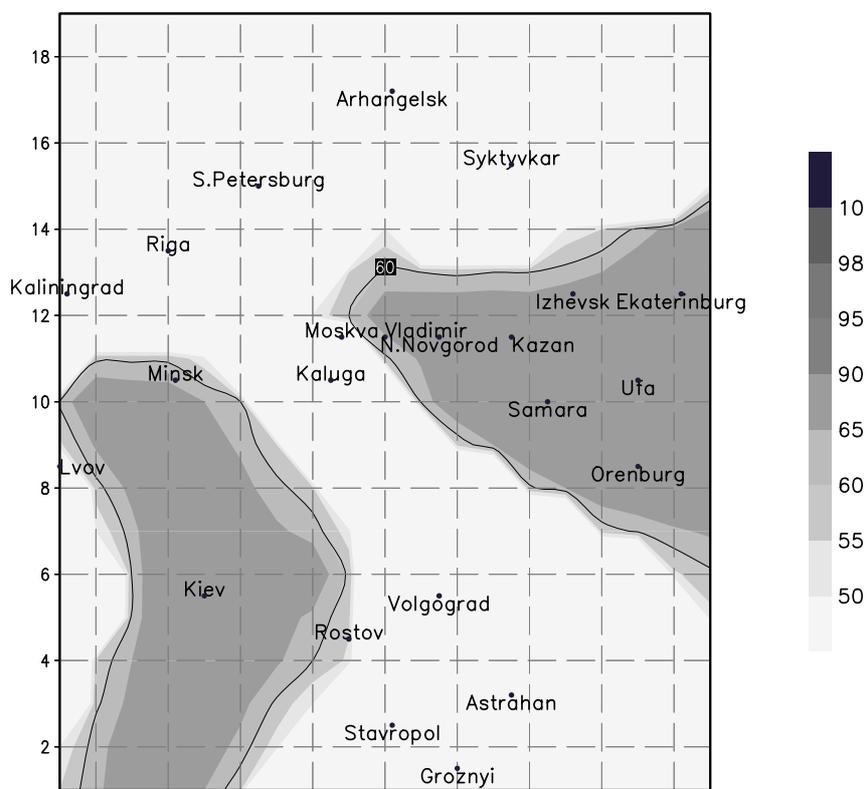


Рис. 2. Расчет прогноза опасных ветров $V > 24 \text{ м/с}$ с заблаговременностью 24 ч. на 24.07.01 по данным за 23.07.01
Обозначение: изолиния $P=60\%$ ограничивает область прогноза ветров ОЯ

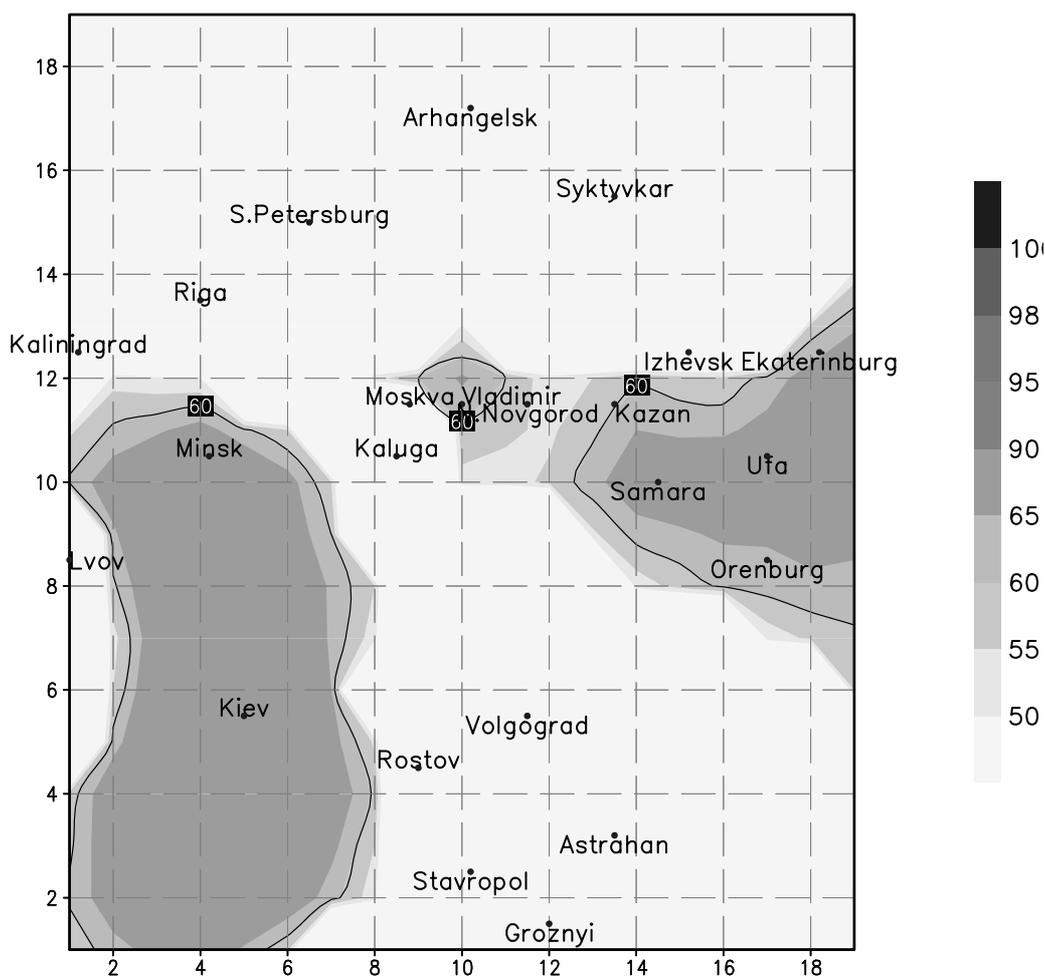


Рис. 3. Расчет прогноза опасных ветров $V > 24 \text{ м/с}$ с заблаговременностью 12ч. на 24.07.01 по данным за 24.07.01
 Обозначение: изолиния $P=60\%$ ограничивает область прогноза ветров ОЯ

Статистическая модель прогноза опасных летних ветров, шквалов и смерчей заблаговременностью 36-48 ч на основе региональной модели Гидрометцентра России

В настоящее время в Гидрометцентре России разработана новая оперативная региональная гидродинамическая модель краткосрочного прогноза погоды в сигма-системе координат (автор – Лосев В.М.). Модель показала достаточно высокие оценки успешности прогноза приземного давления и составляющих ветра. Было рекомендовано адаптировать разработанную ранее на основе статистической интерпретации выходных прогностических полей метеоэлементов полусферной модели и уже прошедшую оперативные испытания гидродинамико-статистическую модель прогноза шквалов и смерчей к гидродинамическим прогнозам региональной модели. Это было сделано автором, и в течение 2007-2008 гг. рассчитывались прогнозы летних штормовых ветров по гидродинамико-статистической модели прогноза с использованием выходных данных региональной модели с заблаговременностью 12-48 ч. В результате была получена значительная серия успешных прогнозов шквалов и смерчей по европейской территории России с заблаговременностью прогноза до двух суток. Возможность успешного использования гидродинамических прогнозов новой региональной модели, особенно с заблаговременностью прогноза 36-48 ч, показывает устойчивость разработанной ранее статистической модели объективного прогноза сильных шквалов, смерчей и максимального ветра двух градаций (со

скоростью ветра более 19 м/с и более 24 м/с) к систематическим ошибкам разных гидродинамических моделей, достаточно успешно прогнозирующих основные метеовеличины.

Увеличение заблаговременности до 48 ч оперативного автоматизированного гидродинамико-статистического прогноза с последующим его уточнением и сопоставлением с данными радиолокационных и спутниковых наблюдений позволит своевременно принять предохранительные меры для уменьшения экономических потерь и заблаговременного предупреждения населения

Литература

1. Андерсон Г. Введение в многомерный статистический анализ. М.: Физматгиз, 1963. 500 с.
2. Переходцева Э.В. Прогноз шквалов статистическими методами классификации на основании диагностических и прогностических связей // Труды ГМЦ СССР. Л.: Гидрометеоздат, 1985. Вып. 271. С. 37-60.
3. Ванник В.Н. Восстановление зависимостей по эмпирическим данным. М.: Наука, 1979. 448 с.
4. Переходцева Э.В. Объективный физико-статистический метод прогноза шквалов (20 м/с и более) на текущий день для Европейской территории. Методические указания. М., 1992. 10 с.
5. Веселова Г.К., Гайфутдинова Р.Г., Гостева И.П., Дурова Т.В. и др. 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. Л.: Гидрометеоздат, 1995. № 235. С. 7-12.
6. Perekhodtseva E.V. Hydrodynamic – statistical model of operative forecast to 12-36h ahead of storm winds including squalls and tornadoes at the territory of Siberia // Research activities in atmospheric and oceanic modeling, 2006, Rep. 48, С. 243-244.
7. Perekhodtseva E.V. The hydrodynamic statistical model of the forecast of the catastrophic phenomena like squalls, tornadoes, floods, landslides and mudflows // International conference “Analysis and Singularity”, Moscow, August 21 – 25, 2007. P. 382.
8. Переходцева Э.В., Золин Л.В. Дистанционное определение структуры облачности для расширения базы знаний экспертной системы прогноза смерчей в России // Тез. докл. IV Всерос. Открытой конф. “Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из Космоса”. Москва, 13-17 ноября 2006 г. М., 2006. С. 367.

The stability analysis of the hydrodynamic-statistical model of the severe squalls and tornadoes forecast over the territory of Russia

E.V. Perekhodtseva

*Hydrometeorological Research Center of Russia
123242 Moscow, B. Predtechenskiy line, 9-11
E-mail: perekhod@mecom.ru*

The results of the hydrodynamic-statistical model development of the squalls and tornadoes automated forecast over the territory of European part of Russia and Siberia are submitted at this paper. The mathematical model of the alternative statistical forecast of these dangerous phenomena is described too. The successful results of the independent experiences of the squalls and tornadoes automated forecast to 12-36 hours ahead are submitted here. The stability of statistical model to systematic mistakes of different forecast hydrodynamic models is shown.

Keywords: a squall, a tornado, the objective forecast, the images recognition, statistical model, hydrodynamic model, the automated forecast, the European part of Russia, the territory of Siberia.