

Э. В. Переходцева, Л. В. Золин

ГИДРОДИНАМИКО-СТАТИСТИЧЕСКИЙ ПРОГНОЗ И ЭКСПЕРТНАЯ СИСТЕМА ПРОГНОЗА СМЕРЧЕЙ НА ЕВРОПЕЙСКОЙ ТЕРРИТОРИИ РОССИИ

Введение

Объективный прогноз смерчей (торнадо) с достаточно большой заблаговременностью (12—36 ч) на европейской территории России (ЕТР) и Сибири, а также в странах Европы до настоящего времени является очень актуальной и пока не решенной проблемой синоптической практики. Несмотря на хорошо известный факт возникновения смерчей из кучево-дождевых облаков большого вертикального развития, связанных с образованием мощной конвекции, штормовое предупреждение о вероятности этого редкого и локального явления, приносящего значительные разрушения, а порой и человеческие жертвы, дается редко, так как даже в зонах активной конвекции повторяемость смерчей чрезвычайно мала.

В работе А. А. Васильева, Б. Е. Пескова и А. И. Снитковского [5] дан анализ метеорологической ситуации, способствующей возникновению смерчей, и оценена повторяемость смерчей различной интенсивности по регионам ЕТР и СНГ.

В совместной статье специалистов Гидрометцентра России [4], в течение десятилетий исследующих условия возникновения неблагоприятных и стихийных явлений и разрабатывающих методы их прогноза, отмечено, что предсказание разрушительных смерчей, которые являются стихийными явлениями небольшого пространственного и временного масштаба, наиболее сложно, так как «...неясны до конца физические условия их возникновения, и трудно установить место начала их разрушительного движения».

В настоящей статье авторы предлагают метод поэтапного прогноза смерчей с использованием разработанной гидродинамико-статистической модели прогноза сильных ветров со скоростями не менее 20—25 м/с с заблаговременностью 36, 24 и 12 ч и дальнейшего уточнения прогноза смерчей в пунктах при помощи экспертной системы прогноза. Предлагаемая заблаговременность прогноза таких явлений значительно больше, чем та заблаговременность (3 ч), с которой синоптики объявляют штормовое предупреждение о надвигающемся опасном явлении.

Модель гидродинамико-статистического прогноза сильных летних ветров

Разработка модели объективного автоматизированного гидродинамико-статистического прогноза дневных летних ветров скоростью не менее 25 м/с на ЕТР началась после того, как в оперативную практику пяти УГМС этой территории после оперативных испытаний уже был внедрен в 1994 г. по решению ЦМКП Росгидромета оперативный автоматизированный гидродинамико-статистический метод прогноза сильных ветров и шквалов скоростью не менее 20 м/с заблаговременностью 12 и 24 ч [6].

Ранее, когда применялся первый объективный статистический метод прогноза этих явлений, разработанный Э. В. Переходцевой в 1980—1985 гг. [7, 8], объективный прогноз шквалов и сильных ветров давался по значениям дискриминантной функции, полученной на большом архиве прогностических данных, рассчитанных синоптиками. Прогностическая дискриминантная функция зависела от прогностических значений 6 наиболее информативных, слабо зависимых между собой предикторов, выбранных из 26 потенциальных предикторов [7], рассчитываемых вручную синоптиком с использованием модели конвекции. В этот вектор-предсказатель вошли следующие 6 наиболее информативных, физически обоснованных и слабо зависимых предикторов:

- V_{700} — скорость ветра на изобарической поверхности 700 гПа, м/с;
- H_0 — высота нулевой изотермы над пунктом прогноза, гПа;
- $(T - T)_{500}$ — отклонение кривой состояния от кривой стратификации на уровне 500 гПа, °С;
- $\partial T / \partial n_3$ — горизонтальный контраст температуры воздуха у поверхности земли, °С/500 км;
- T_3 — максимальная температура воздуха у поверхности земли, °С;
- Td_3 — максимальное значение температуры точки росы у поверхности земли, °С.

Как показано в работе [8], применение этого объективного метода прогноза летом 1984 и 1986 гг. к прогнозу смерчей на территории Ивановской, Московской, Рязанской и Пензенской областей во всех пяти случаях позволило успешно спрогнозировать сильный ветер скоростью не менее 20 м/с заблаговременностью 12—18 ч, в то время как синоптики прогнозировали лишь сильные грозы со скоростью ветра до 15 м/с при порывах. Однако данный объективный физико-статистический метод не был полностью автоматизирован и при прогнозе возникновения сильного ветра скоростью не менее 20 м/с не предусматривал конкретного явления «смерч».

В модели гидродинамико-статистического прогноза сильных ветров полученная новая дискриминантная функция, зависящая от значений девяти выходных полей оперативной полусферной гидродинамической модели краткосрочного прогноза погоды (автор Л. В. Беркович [1]), автоматически рассчитывалась в оперативной системе АСООИ Гидрометцентра России. Полученный информативный вектор-предсказатель размерности для расчета этой функции был выбран из 40 потенциальных предикторов — значений полей метеоэлементов объективного анализа, которые можно спрогнозировать при помощи полусферной модели с заданной заблаговременностью 12—48 ч. При выборе информативного вектора-предсказателя использован метод диагонализации средней матрицы корреляции и выбора наиболее информативных предикторов от каждого диагонального блока этой матрицы, описанный в работе [7].

Успешность гидродинамико-статистического прогноза сильных ветров и шквалов скоростью не менее 20 м/с заблаговременностью 12 и 24 ч для равнинных частей ЕТР по критерию Пирси—Обухова (T) составила 0,47—0,62 [6]. Показатели успешности этого метода в сравнении с результатами синоптического и инерционного прогноза приведены в табл. 1.

Разработанная модель оперативного гидродинамико-статистического прогноза сильных ветров со скоростями не менее 25 м/с, для про-

Таблица 1

Показатели успешности прогноза скорости ветра не менее 20 м/с по регионам ЕТР по методу Переходцевой [7]

УГМС	Заблаговременность, ч	N	$F\%$	$I_{я}\%$	$I_{б.я}\%$	$П_{я}\%$	$П_{б.я}\%$	T
Северо-Западное	12	1110	92	25	99	76	92	0,69
		1110	98	56	99	39	99	0,32
	24	1007	89	21	99	80	89	0,69
		1009	98	30	99	25	99	0,21
Центрально-Черноземных областей	12	160	91	24	99	80	92	0,72
	24	158	91	22	99	80	91	0,71
Верхне-Волжское	12	955	90	22	98	55	91	0,46
	24	995	90	14	98	48	91	0,39
Северо-Кавказское (равнинная часть)	12	405	78	24	96	78	77	0,55
	24	400	78	21	97	79	77	0,56

Примечание: N — число испытываемых случаев прогноза, F — общая оправдываемость, $I_{я}$ и $I_{б.я}$ — оправдываемость прогноза случаев наличия и отсутствия явления соответственно, $П_{я}$ и $П_{б.я}$ — предупредительность прогноза случаев наличия и отсутствия явления соответственно, T — значения критерия Пирси-Обухова.

Что означают вторые строчки данных по Северо-Западному УГМС для обеих заблаговременностей

гноза которых также пока нет адекватной гидродинамической модели, включает в себя полученные нами на данных объективного анализа новые статистические решающие правила распознавания и прогноза этих опасных явлений. Эти решающие правила также рассчитаны в оперативной системе АСОИИ в зависимости от выходных данных полусферной гидродинамической модели атмосферы — прогностических полей метеоэлементов заданной заблаговременности.

Задаче построения дискриминантной функции предшествовал отбор наиболее информативного вектора-предсказателя без значительной потери информации. Этот вектор-предсказатель также найден методом диагонализации выборочной средней матрицы корреляции R [7]. В качестве критериев информативности предикторов использованы:

- расстояние Махаланобиса,
- критерий минимальной энтропии Вапника—Червоненкиса [3].

В оперативной модели прогноза значения прогностической дискриминантной функции $U(X)$ и вычисляемая по ним вероятность возникновения опасных ветров $P(X) = 1/[1 + \exp(-U(X))]$ рассчитаны в узлах сетки оперативной полусферной гидродинамической модели. Сетка с размером ячейки 150×150 км покрывает ЕТР.

Изолиния полученной на обучающей выборке пороговой вероятности P выделяет на карте ЕТР область прогнозируемых штормовых ветров, в числе которых могут быть шквалы и смерчи.

По описанной модели дается оперативный прогноз опасных ветров заблаговременностью 12 и 24 ч, который по результатам независимых испытаний в 1999 г. был рекомендован как основной метод прогнозирования таких явлений по территориям ответственности Северо-Западного, Верхне-Волжского и Северо-Кавказского УГМС. Как вспомогательный метод к синоптическому он рекомендован в УГМС Центрально-Черноземных областей (ЦЧО), а также для территории Москвы и Московской области [2, 11]. Значения критерия Пирси—Обухова, полученные при испытаниях модели по этим УГМС, изменялись от 0,62 до 0,75.

Метод прогноза опасных ветров заблаговременностью 36 ч по результатам независимых испытаний 2003—2005 гг., проведенных в трех УГМС (Верхне-Волжском, Северо-Западном и Республики Татарстан), рекомендован в качестве вспомогательного и консультативного метода. Результаты независимых испытаний за 2003—2005 гг. гидродинамико-статистического метода прогноза летних опасных ветров скоростью не менее 25 м/с заблаговременностью 36 ч по территории указанных УГМС приведены в табл. 2.

Таблица 2
Результаты независимых испытаний гидродинамико-статистического метода прогноза летних опасных ветров по территориям ответственности УГМС

Прогнозируемый случай	Число фактических случаев		Сумма	Оправданность прогноза, %	Предупрежденность прогноза, %	Общая оправданность прогноза, %	Критерий Пирси—Обухова
	С явлением	Без явления					
Верхне-Волжское УГМС							
С явлением	n_{11} 11	n_{12} 157	n_{10} 168	6,5	68,8	91,2	0,66
Без явления	n_{21} 5	n_{22} 1667	n_{20} 1667	99,7	91,3		
Сумма	n_{01} 16	n_{02} 1819	n_{00} 1835				
Северо-Западное УГМС							
С явлением	n_{11} 14	n_{12} 23	n_{10} 37	38	93,3	97,2	0,91
Без явления	n_{21} 1	n_{22} 829	n_{20} 830	99	97,3		
Сумма	n_{01} 15	n_{02} 852	n_{00} 867				
УГМС Республики Татарстан							
С явлением	n_{11} 7	n_{12} 49	n_{10} 56	12	87,5	87,5	0,75
Без явления	n_{21} 1	n_{22} 344	n_{20} 345	99,7	87		
Сумма	n_{01} 8	n_{02} 393	n_{00} 401				

Примечание: n_{00} — число всех испытываемых случаев, n_{01} — число фактических случаев с явлением, n_{02} — число фактических случаев отсутствия явления, n_{11} — число предупрежденных случаев с явлением, n_{12} — число предупрежденных случаев без явления, n_{21} — число рассчитанных случаев прогнозов с явлением, n_{22} — число рассчитанных случаев прогнозов без явления, n_{20} — число рассчитанных случаев не предупрежденных явлений, n_{21} — число рассчитанных случаев «ложных» прогнозов явления.

**Оперативный расчет областей прогнозируемого опасного ветра
и статистический метод расчета скорости опасного ветра
в пунктах выделенной области**

На рис. 1 изолинией пороговой вероятности $P = 52\%$ (для заблаговременности 36 ч) выделена прогнозируемая на 26 июня 2005 г. по сроку 00 ч ВСВ с заблаговременностью 36 ч область дневных опасных ветров. Эта область охватывает Тверскую и часть Московской области. Действительно, в этот день в Дубне наблюдался смерч, принесший значительные разрушения, а во Внуково (Московская область) были отмечены порывы ветра скоростью 26 м/с.

На рис. 2 и 3 приведены ограниченные изолинией пороговой вероятности $P = 60\%$ (для заблаговременностей 12 и 24 ч) прогнозируемые на 24 июля 2001 г. области дневных опасных ветров, рассчитанные по срокам 12 ч ВСВ 23 июля и 00 ч ВСВ 24 июля 2001 г. Прогнозируемая на ЕТР область включает в себя Московскую и Нижегородскую области. В этот день в Москве наблюдался разрушительный смерч, а в Нижегородской области скорость ветра при порывах достигала 30 м/с.

Чтобы уточнить прогноз скорости ветра в пунктах по территории, для которой дается прогноз опасных ветров, предлагается рассчитать

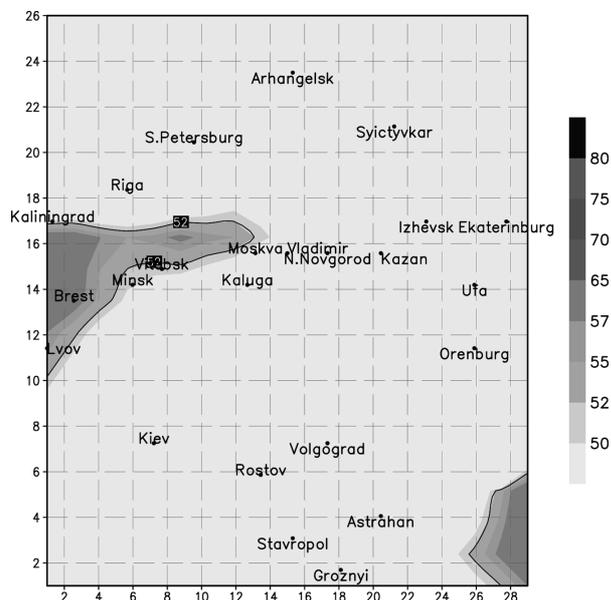


Рис. 1. Область прогноза дневных ветров скоростью $V > 24$ м/с с заблаговременностью 36 ч на 26 июня 2005 г., рассчитанная по сроку 00 ч ВСВ 25 июня 2005 г.

Рис. 2. Область прогноза дневных ветров скоростью $V > 24$ м/с с заблаговременностью 24 ч на 24 июля 2001 г., рассчитанная по сроку 12 ч ВСВ 23 июля 2001 г.

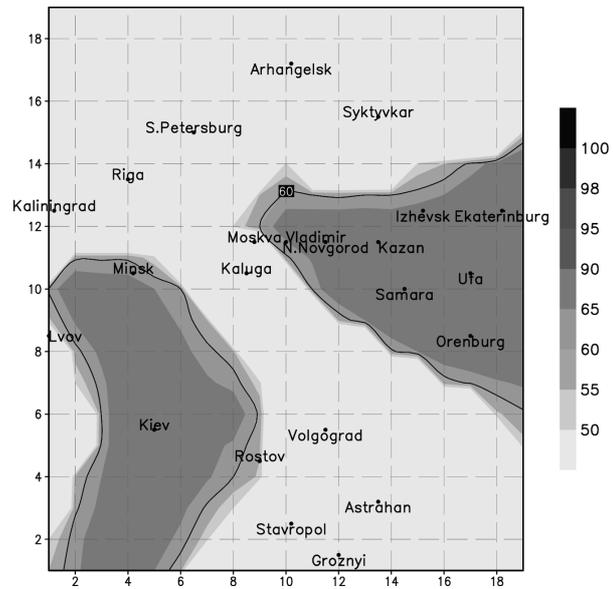
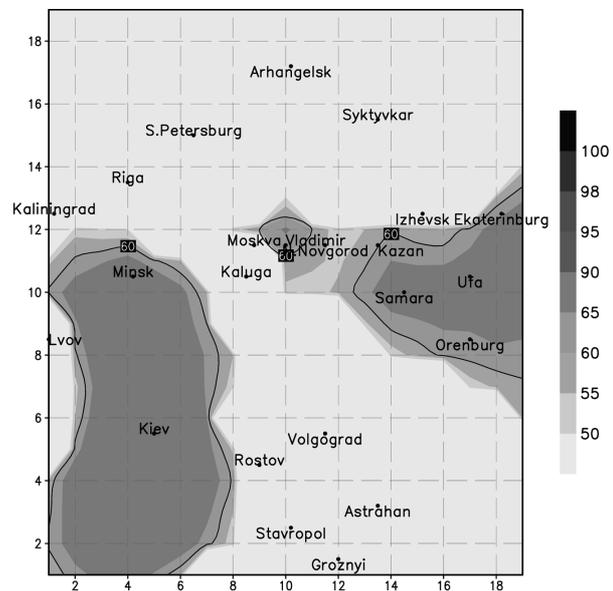


Рис. 3. Область прогноза дневных ветров скоростью $V > 24$ м/с с заблаговременностью 12 ч на 24 июля 2001г., рассчитанная по сроку 00 ч ВСВ 24 июля 2001 г.



ожидаемую скорость дневного ветра с заблаговременностью 12—18 ч по уравнению регрессии. Уравнение регрессии построено на обучающей выборке фактических данных о скорости сильного ветра в диапазоне 18—45 м/с. Уравнение регрессии зависит от шести предикторов: V_{700} , H_0 , $(T - T)_{500}$, $\partial T / \partial n_3$, T_3 и Td_3 .

Среднеквадратическое отклонение вычисляемой по уравнению регрессии скорости ветра на независимой выборке составило 2,7 м/с при средней скорости ветра 29 м/с, что свидетельствует о достаточной близости прогнозируемого и фактического значений. При расчете в заданном пункте очень высокой прогнозируемой скорости ветра (более 30 м/с) можно с большой вероятностью ожидать в данном районе возникновения смерчей.

Программу расчета скорости сильного ветра, составленную на языке ПАСКАЛЬ, можно включить в состав автоматизированного рабочего места синоптика (АРМ).

О разработке экспертной системы прогноза смерчей в заданных пунктах

Чтобы далее уточнять прогноз смерчей, можно использовать разработанную авторами экспертную систему их прогноза, включающую в себя качественные признаки метеорологических ситуаций, при которых они могут возникать [9, 10]. Отбор таких качественных признаков обусловлен эмпирическими знаниями синоптика об этом явлении, которые применяются в оперативной синоптической практике. Эти качественные признаки входят в базу знаний, снабженную широким набором правил возникновения смерчей в различных ситуациях с заданным экспертом коэффициентом доверия, который пересчитывается каждый раз при поступлении новой информации.

Таким образом, система способна к самообучению. Она апробирована на некоторых данных о смерчах в Волго-Вятском районе и Республике Татарстан и показала хорошие результаты уточненного прогноза смерчей. Действительно, при всех случаях анализируемых смерчей наблюдалась инверсия температуры в пограничном слое атмосферы, наблюдались на высоте 700—500 гПа большие скорости ветра, влажность воздуха у поверхности земли была достаточно высокой, а его температура у поверхности не всегда была в диапазоне 26—35 °С, как часто предполагается в научной литературе для таких явлениях.

Наряду с указанными правилами в экспертной системе прогноза смерчей используются и другие, их общее число более 30. Поскольку система способна к самообучению, то для дальнейшего успешного ее применения

необходимо провести значительное число тестов, что и намерены сделать авторы с помощью оперативных синоптиков региональных УГМС.

Разработанная экспертная система создана на языке ПАСКАЛЬ, допускает дальнейшее развитие с целью включить ее в состав АРМ. На рис. 4 и 5 приведена схема разработанной экспертной системы.



Рис. 4. Фазы разработки экспертной системы.

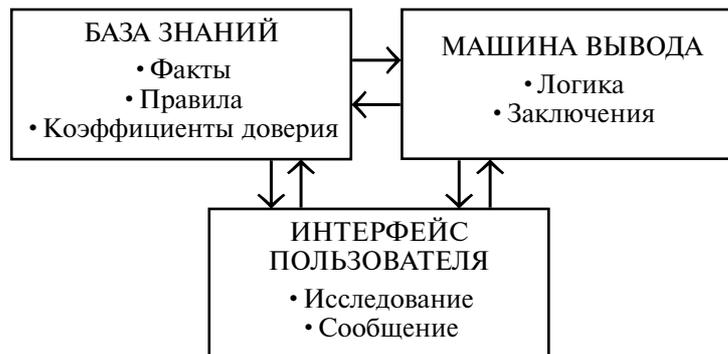


Рис. 5. Схема машинной части экспертной системы.

Таким образом, последовательное применение гидродинамико-статистического автоматизированного метода прогноза сильных ветров со скоростью не менее 20—25 м/с с достаточно большой заблаговременностью 36 и 24 ч, а затем уточнение прогноза смерчей на текущий день при помощи расчета скорости ветра и с использованием экспертной системы прогноза позволяет своевременно принять предохранительные меры и предотвратить или уменьшить ущерб, наносимый такими опасными природными явлениями, как смерчи и сильные штормовые ветры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беркович Л. В., Ткачева Ю. В. Развитие неадиабатической полушарной прогностической модели атмосферы // Тр. ГМЦ СССР. — 1986. — Вып. 277. — С. 3—29.
2. Булдовский Г. С., Шакотко 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. — **В каком городе издано?**, 2001. — С. 34—37.
3. Вапник В. Н. Восстановление зависимостей по эмпирическим данным. — М.: Наука, 1979. — 447 с.
4. Васильев А. А., Белинский О. Н., Алексеева А. А., Песков Б. Е. и др. Прогноз неблагоприятных условий погоды и возможности его совершенствования // 70 лет Гидрометцентру России. — СПб., 1999. — С. 190—200.
5. Васильев А. А., Песков Б. Е., Снитковский А. И. Смерчи, шквалы и град 8—9 июня 1984 г. // Метеорология и гидрология. — 1985. — № 8. — С. 5—15.
6. 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 № 235. — **В каком городе издано?**, 1995. — С. 7—12.
7. Переходцева Э. В. Прогноз шквалов статистическими методами классификации на основании диагностических и прогностических связей // Тр. ГМЦ СССР. — **В каком году издан?** — Вып. 271. — С. 37—60.
8. Переходцева Э. В. Объективный физико-статистический метод прогноза шквалов (20 м/с и более) на текущий день для Европейской территории. Методические указания. — М.: **В каком издательстве или какой организацией издано?**, 1992. — 10 с.
9. Переходцева Э. В. О моделировании экспертных систем прогноза экстремальных величин скорости ветра и осадков в умеренных широтах // Тез. докл. Всерос. конф. «Современные методы теории функций и смежные проблемы». — Воронеж, 2003. — С. 175.
10. 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 методы дистанционного зондирования Земли из Космоса». — Москва, 13—17 ноября 2006. — М., 2006. — С. 387.
11. Perekhodtseva E. V. Statistical models for operative forecast of dangerous convective phenomena like rainfalls, squalls and tornadoes in the European part of Russia and in Europe // Тез. докл. Междунар. конф. «Kolmogorov and contemporary mathematics». — М., 2003. — С. 535.