

Э. В. Переходцева (Москва, ФГБУ «Гидрометцентр России»). **Стохастические модели распознавания и прогноза метеоситуаций, вызывающих сильные шквалы, смерчи и сильные ливни.**

Возникновение летнего штормового ветра со скоростью $V > 24$ м/с и смерчей, а также сильных ливней непосредственно связано с активной конвекцией, развитием мощной кучево-дождевой облачности и с высокой скоростью нисходящих потоков у Земли. Эта облачность образуется там, где атмосфера у Земли стратифицирована неустойчиво и достаточно велика влажность воздуха в тропосфере. Однако для возникновения этих явлений в атмосфере должны сложиться определенные аэросиноптические и термодинамические условия, характеризующиеся значениями целого ряда параметров (предикторов). Возникновение этих явлений чаще всего связано с прохождением холодного фронта, или даже нескольких фронтов. Синоптический прогноз таких явлений практически не осуществляется, лишь иногда с заблаговременностью 3 ч дежурным синоптиком дается штормовое предупреждение об этих опасных явлениях. Чаще всего синоптики прогнозируют грозы с порывами ветра 10–15–17 м/с. Бурно развивающиеся в разных странах гидродинамические модели прогноза погоды (ГДМА) пока еще не дают успешных прогнозов ни штормового ветра со скоростью $V \geq 25$ м/с (и тем более смерчей), ни сильных ливней. В настоящее время в ряде институтов и лабораторий в России и за рубежом исследуется поведение неоднородной несжимаемой жидкости в канале при малых возмущениях, изучается возникновение турбулентности, зон гидродинамической неустойчивости и вихреобразования в жидкости при определенных условиях. Однако полученные авторами интересные результаты пока не применимы буквально к прогнозу описанных выше природных явлений в силу того, что в атмосфере существуют иные условия, отличные от условий, представленных в моделях с несжимаемой жидкостью.

Первая достаточно успешная статистическая модель распознавания и прогноза на текущий день шквалов, смерчей и сильного ветра скоростью 20 м/с и более и основанный на ней объективный физико-статистический метод прогноза этих явлений были разработаны на основе байесовского подхода в 1985 году [1, 2]. В данной модели метеорологическая ситуация, способствующая возникновению указанных явлений, представлялась как многомерный вектор $X(A) = (x_1(A), x_2(A), \dots, x_n(A))$, где n — число потенциальных, выбранных эмпирически физически обоснованных параметров атмосферы ($n = 26$). Выборка векторов наличия явлений A — архив $\{X(A)\}$ составила 121 вектор, а их отсутствия — архив $\{X(B)\}$ составил 181 вектор. С целью уменьшения размерности пространства признаков n были проведены с помощью теории графов диагонализация средней матрицы корреляции R_{cp} [2], и отбор наиболее информативных предикторов — представителей диагональных блоков. В качестве критериев информативности использовались критерии — расстояние Махаланобиса и минимальная энтропия Вапника–Червоненкиса [1, 2]. В результате для распознавания и прогноза в неустойчиво стратифицированной атмосфере явлений класса A был выбран вектор-предсказатель из шести наиболее информативных слабо зависимых предикторов, включающих скорость ветра в тропосфере, температуру и влажность у Земли, уровень нулевой изотермы, горизонтальный градиент приземной температуры. Про-

гноз шквалов, смерчей и сильного ветра осуществлялся по значениям линейной дискриминантной функции $U(X)$, зависящей от шести отобранных предикторов:

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

Исходя из оценки наносимого при таких явлениях ущерба, обычно принимается, что цена «пропуска цели» значительно больше цены «ложной тревоги», т.е. $C(B/A) \gg C(A/B)$. Прогноз явлений A скоростью 20 м/с и более давался при значении $U(X) > 0,5$. При значении $U(X) > 3$ вероятно возникновение смерчей в самом пункте прогнозирования или его окрестности $R = 150$ м. В устойчивой атмосфере или при $U(X) < 0,5$ дается прогноз явления B , т.е. отсутствие явления A . При расчете прогноза скоростей ветра, наблюдававшихся при смерчах в городах Иваново, Пенза, Рязань, Москва в 1984–1986 гг. прогностическая функция оказалась существенно выше 3-х, поэтому вероятность смерчей и штормового ветра по нашему правилу $P = 1/(1 + \exp\{-U(X)\})$ была очень велика. Синоптики прогнозировали в этих метеоситуациях лишь грозы и порывы ветра скоростью $V = 15\text{--}17$ м/с.

Полная автоматизация прогноза вышеуказанных явлений оказалась возможной в связи с введением в эксплуатацию первой оперативной гидродинамической модели краткосрочного прогноза по полным уравнениям в 1988 году (автор — Беркович Л. В.). В связи с этим была создана на новых архивах данных новая модель распознавания и последующего прогноза с использованием прогностических полей этой первой оперативной модели Гидрометцентра СССР. Она была разработана аналогичными методами. В результате были рассчитаны новые статистические решающие правила $F_1(X)$ и $F_2(X)$ для прогноза на 12–24–36 ч сильного летнего ветра двух классов (для $V > 19$ м/с) и (для $V > 24$ м/с) соответственно. Модели прогноза успешно были испытаны в пяти Управлениях по гидрометеорологии и рекомендованы к использованию в синоптической практике, так как предупредительность этих опасных явлений и значение критерия Пирси–Обухова существенно превышали соответствующие значения прогноза синоптиков [7]. В течение 15 лет после испытаний прогнозы передавались оперативно в эти пять Управлений два раза в сутки. С 2007 года проходила адаптация и авторские испытания полученных решающих правил прогноза к выходным полям новой региональной гидродинамической модели с меньшим горизонтальным разрешением 75×75 км [4]. Как всегда, необходимо было получить результаты оперативных независимых испытаний по исследуемой территории европейской части России. Такие испытания были проведены в Гидрометцентре России в течение 2010–2011 гг.

С 2012 года решением Центральной методической комиссии оперативный метод штормового ветра, смерчей и сильных шквалов скоростью 25 м/с и более на текущий день рекомендован к оперативному использованию на этой территории, с 2014 года метод рекомендован для оперативного использования при прогнозе этих явлений на следующие сутки с заблаговременностью прогноза 36 ч. Поскольку региональная модель дает метеорологические прогнозы метеоэлементов, входящих в дискриминантные функции, с заблаговременностью до 48 ч, то наша гидродинамико-статистическая модель также дает прогноз вышеуказанных явлений до 2-х суток [6, 8]. В докладе будут представлены соответствующие примеры прогноза смерчей в Москве и Московской области, в Санкт-Петербурге, в Тамбове, в Сочи, очень разрушительного смерча в Башкирии (29.08.2014 г) и др. Предупредительность явлений ветра с $V \geq 25$ м/с по другим нашим и зарубежным гидродинамическим моделям атмосферы составляет около 20%, практически всегда дается отсутствие этих явлений (предупредительность отсутствия — 99–98%).

При разработке статистических моделей распознавания и прогноза полусуточных осадков и ливней количеством $Q \geq 15$ мм/12 ч и $Q \geq 45$ мм/12 ч нами был использован тот же подход [1]. В результате из 38-ми были отобраны 7 наиболее информативных и мало зависимых параметров, по которым были рассчитаны соответственно две дискриминантные функции распознавания и прогноза осадков двух классов.

В 2014 г. по результатам испытаний прогноза ливней количеством более 15 мм/12 ч гидродинамико-статистический метод прогноза таких осадков также был рекомендован к оперативному использованию, превысив по качеству прогноза (предупрежденности и критерию Пирси–Обухова) прогнозы сильных неблагоприятных осадков по другим российским и зарубежным моделям, в том числе и мезомасштабным.

Таблица. Автоматизированные оценки прогноза опасного ветра, включая шквалы и смерчи, по территории европейской части России за 2014–2015 гг

| Год Прогноза | Заблаговременность | Число случаев с $V \geq 25$ м/с | Число случаев с $V \geq 22$ м/с | Общее число случаев | Преду- | Преду- | Значение критерия Пирси–Обухова |
|-----------------|--------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------|-----------------------|--------------------------|---------------------------------|
| | | | | | преж. наличия явления | преж. отсутствия явления | |
| 2014 | 12 ч | 48 | 150 | 46918 | 66,7% | 90% | 0,567 |
| | 36 ч | 48 | 150 | 46918 | 66,7% | 89% | 0,567 |
| 2015 | 12 ч | 41 | 159 | 48654 | 75% | 85,7% | 0,607 |
| | 36 ч | 39 | 159 | 48654 | 77% | 83,7% | 0,607 |

В докладе будут представлены многочисленные примеры такого прогноза. Эти методы прогноза сильных полусуточных осадков можно успешно использовать при прогнозировании наводнений на Северном Кавказе и на других территориях, а также селей и оползней в горных районах [5, 9]. В настоящее время проводятся оперативные независимые испытания сильных полусуточных осадков количеством $Q \geq 15$ мм/12 ч с заблаговременностью 12–36 ч для территории Западной и Средней Сибири, для чего разработана новая технология расчета и передачи карт прогноза в центральные города Сибири. Территория прогноза постепенно расширяется по мере поступления успешных результатов независимой проверки методов прогноза, основанных на разработанных нами стохастических моделях распознавания и прогноза неблагоприятных и опасных конвективных явлений, таких, как шквалы, смерчи, штормовые летние ветры и сильные и опасные летние осадки.

В заключение можно сказать, что дальнейшее повышение точности всех представленных гидродинамико-статистических моделей прогноза с заблаговременностью 12–48 ч следует ожидать при улучшении качества гидродинамических прогнозов и уменьшении пространственного разрешения гидродинамических моделей с целью локализации возникновения этих опасных и неблагоприятных явлений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Андерсон Т.* Введение в многомерный статистический анализ. М.: Физматгиз, 1963, 500 с.
2. *Переходцева Э. В.* Прогноз шквалов статистическими методами классификации на основании диагностических и прогностических синхронных связей. — Труды Гидрометцентра СССР, 1985, в. 271, с. 37–60.
3. *Переходцева Э. В., Золин Л. В.* Гидродинамико-статистическая модель и экспертная система прогноза смерчей на европейской территории России. — Труды Гидрометцентра России, 2008, в. 342, с. 45–54.
4. *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, в. 6, с. 155–162.
5. *Переходцева Э. В.* О гидродинамико-статистическом прогнозе до двух суток явлений сильного ветра и сильных осадков для территории Северного Кавказа. — Труды Гидрометцентра России, 2012, с. 113–126.

6. *Переходцева Э. В.* Условия возникновения смерчей и штормового ветра на европейской территории России и их прогнозирование на основе гидродинамико-статистических моделей прогноза. — Турбулентность, динамика атмосферы и климата. М.: ГЕОС, 2014, с. 191–199.
7. *Perekhodtseva E. V.* Hydrodynamic-statistical model of forecast to 36h ahead of dangerous convective phenomena –squalls, tornadoes and rainfalls. — Research activities in atmospheric and oceanic modeling, 2002, Rep. 32, part 2, p. 221–223.
8. *Perekhodtseva E. V.* On the operative hydrodynamic-statistical forecast of summer storm winds and heavy precipitation over the North-West territory of Russia including territory of Karelia. — Computational information technologies for environmental sciences. Selected and reviewed paper presented at conference CITES-2013. Petrozavodsk, 2013, с. 73–77.
9. *Perekhodtseva E. V.* On the stochastic models of dangerous floods prediction. — Eight international workshop on simulation/ Vienna, 21.09.15–25.09.15, с. 117–119.