

УДК 551.509.39

## **Неопределенности в прогнозе опасных явлений погоды и возможные пути их снижения**

*А.А. Васильев, Е.В. Васильев, Т.Г. Дмитриева*

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр  
Российской Федерации, г. Москва, Россия  
syno@inbox.ru; tdsin@mecom.ru*

Обсуждается влияние процессов в пограничном слое атмосферы на образование опасных явлений погоды. Показана необходимость учета местных условий на развитие сильных вертикальных движений в нижнем слое атмосферы, оказывающих влияние на эволюцию опасных явлений. Предлагается объективный способ определения зон развития таких движений в ячейках мезомасштабной сетки на основании крупномасштабных географических карт и метеорологических критериев.

*Ключевые слова:* пограничный слой атмосферы, вертикальные движения, мезомасштабные модели, предсказуемость опасных явлений погоды

## **Uncertainty in prediction of severe weather events and the possible ways of their reduction**

*A.A. Vasil'ev, E.V. Vasil'ev, T.G. Dmitrieva*

*Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia  
syno@inbox.ru; tdsin@mecom.ru*

The influence of the atmospheric boundary layer on the development of severe weather events is discussed. It is stressed that local conditions lead to the formation of strong vertical motions (wind) which may significantly affect the intensity of the events. The qualitative but rather objective method is proposed to identify such motions in the cells of mesoscale model grids using geographical maps and existing meteorological criteria.

*Keywords:* atmospheric boundary layer, vertical motions, mesoscale models, predictability of severe weather events

В последние годы достигнут значительный прогресс в мезомасштабном моделировании атмосферных процессов и их прогнозировании. Вместе с тем прогноз опасных явлений сохраняет ряд неопределенностей, особенно в отношении точного места их образования, времени возникновения и интенсивности [5, 6]. Причины, приводящие к этим неопределенностям, известны. Главной из них справедливо считается сложность учета численными моделями процессов, происходящих в пограничном слое.

Пограничный слой играет огромную роль во всей системе Земля – атмосфера. Именно благодаря трансформации тепла и влаги солнечная энергия передается в атмосферу от поверхности Земли и вызывает в ней движение воздуха. Толщина пограничного слоя определяется также

и динамическими воздействиями земной поверхности. В динамической метеорологии за верхнюю границу пограничного слоя принимают высоту, на которой фактический и геострофический ветер совпадают. В умеренных широтах она составляет в среднем 1000–1500 м, но претерпевает значительные изменения в глобальном масштабе. Например, в экваториальной зоне, где параметр Кориолиса равен нулю, можно даже допустить, что толщина пограничного слоя совпадает с толщиной тропосферы, хотя и признается, что там формируется пограничный слой со своими специфическими особенностями [1]. В полярных районах, наоборот, пограничный слой, особенно в холодный период года, может вообще исчезать.

В мезо- и локальном масштабах высота пограничного слоя может также существенно изменяться как в пространстве, так и во времени. Именно поэтому все численные модели имеют наибольшее вертикальное разрешение вблизи земной поверхности. Что касается расчетов потоков тепла и влаги, радиации, конвекции, облачности, осадков, и других характеристик, то они производятся с помощью так называемых параметризационных схем. Параметризационные схемы вносят большой вклад в точность прогноза опасных явлений, однако они не в состоянии учесть все процессы, происходящие в пограничном слое, особенно те из них, которые пока не поддаются строгому математическому описанию. Поэтому многие из этих схем строятся на эмпирических данных, которые не в состоянии оценить значительные и быстрые изменения в пограничном слое, происходящие при развитии опасных явлений [2, 5, 9]. С другой стороны, именно эти изменения приводят к образованию значительных вертикальных движений в нижнем слое, которые влияют главным образом на эволюцию того или иного опасного явления, в том числе и на траекторию его движения.

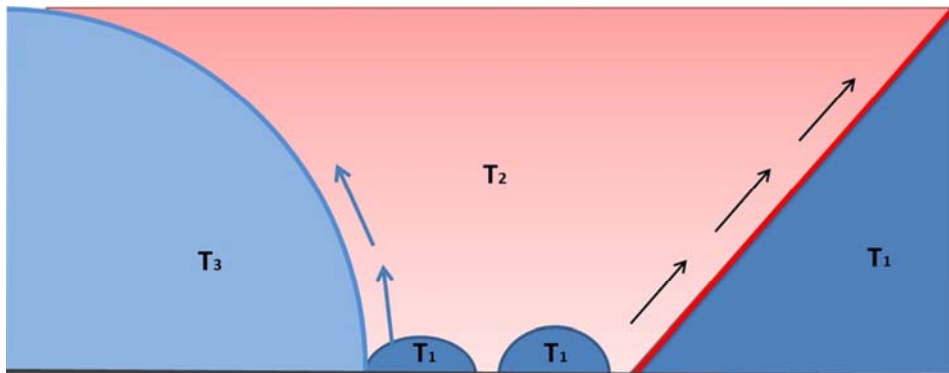
Например, давно известно, что все численные модели такого опасного явления как смерч, несмотря на их несовершенство, приводят к заключению, что его размер и интенсивность в значительной степени определяются процессами в пограничном слое [4]. Установлено также, что для образования смерчей желателен подток влажного теплого воздуха в нижнем слое до высоты 1,0–1,5 км и наличие слоя инверсии или изотермии выше этого слоя.

При таких условиях образование материнского кучево-дождевого облака происходит взрывным образом [4]. Нетрудно предположить, что именно высота и мощность слоя инверсии или изотермии и определяет траекторию движения смерча в нижнем слое и ее отклонение от траектории движения материнского кучево-дождевого облака. В одних случаях воронка смерча, достигая поверхности Земли, движется вдоль реки, а в других – то поднимается вверх, пропуская поле, то обрушивается на лесной массив или строения. Шквалы, несмотря на более упорядоченный характер развития, также над некоторыми поверхностями усиливаются, а над некоторыми ослабевают. Причем распределение высоты и мощности

задерживающего слоя по площади на пути движения смерча или шквала в первую очередь зависит от пространственного распределения вертикальных движений в нижнем слое.

Зимой примером определяющего влияния структуры пограничного слоя на характер погоды может служить процесс потепления воздуха у поверхности Земли после прохождения холодного фронта (рис. 1) [7]. Этот известный и парадоксальный на первый взгляд факт хорошо объясняется, наоборот, отсутствием сильных вертикальных движений. В этом случае при прохождении теплого фронта теплый (более легкий!) воздух медленно скользит по холодному, оставляя в некоторых местах линзы холодного воздуха, не разрушенные турбулентностью. При этом в случае выпадения дождя могут развиваться в линзах холода гололедно-изморозевые явления или происходить налипание мокрого снега на деревьях и проводах. Перемещающийся вслед за теплым холодный фронт, температура воздуха в котором хотя и ниже температуры теплого воздуха, но выше, чем в линзах сохранившегося холода, разрушает эти линзы вертикальными движениями и турбулентностью, и локальная температура воздуха повышается.

Таким образом, точный учет вертикальных движений в пограничном слое является основой правильного прогноза опасных явлений погоды.



**Рис. 1.** Схема образования линз холода в пограничном слое атмосферы за теплым фронтом.  $T_1$  – температура холодного воздуха перед теплым фронтом;  $T_2$  – температура теплого воздуха,  $T_3$  – температура холодного воздуха за холодным фронтом.

**Fig. 1.** The scheme of cold lens formation in the atmospheric boundary layer behind the warm front.  $T_1$  is temperature of cold air in front of the warm front,  $T_2$  is temperature of warm air,  $T_3$  is temperature of cold air behind the cold front.

К сожалению, мезомасштабные модели, несмотря на их негидростатичность, еще плохо справляются с этой задачей. Особенно это относится к территории со сложным рельефом и растительностью, когда деформация потока и конвекция приводят к значительным отклонениям локальных

значений метеорологических параметров по сравнению со средними значениями в ячейках мезомасштабной сетки. В этом случае требуется адекватное описание не только средних значений в ячейке, но и пространственных изменений внутри каждой ячейки таких параметров, как преобладающий тип растительности, почвы, рельефа и т. д. [10]. К сожалению, необходимой для такого воспроизведения плотности наблюдений нет и вряд ли будет в ближайшем будущем.

Определенный успех может быть связан лишь с учетом в моделях данных радиолокационных наблюдений, которые имеют разрешение, совпадающее с разрешением мезомасштабных моделей. Хотя радиолокационные наблюдения и не измеряют непосредственно необходимые для прогноза параметры, они содержат ценную информацию о развитии опасных явлений, и их использование, несомненно, будет способствовать успеху в прогнозировании погоды.

В настоящее время наиболее эффективный способ снижения неопределенности в прогнозировании опасных явлений заключается в подробном анализе текущих условий погоды с использованием всех имеющихся в распоряжении прогнозиста средств наблюдения, включая радиолокационные, спутниковые наблюдения и данные наблюдений с любых автоматизированных систем. Используя выходную продукцию численных мезомасштабных моделей и результаты такого подробного анализа, синоптик может оценить степень уверенности развития тех или иных опасных явлений и определить потенциальные сценарии их дальнейшей эволюции.

Следующий способ заключается в изучении и учете региональных и локальных условий, влияющих на изменение погоды. В общем виде эти условия перечислены во многих руководящих документах. Главные из них следующие:

- влияние орорафии на изменение ветра, облачности и осадков;
- развитие бризовой циркуляции и горно-долинных ветров;
- изменение интенсивности турбулентности и вертикального градиента температуры в зависимости от времени суток;
- усиление ветра над морем по сравнению с ветром над сушей при одном и том же барическом градиенте;
- тенденция развития гроз над определенными локальными районами;
- увеличение вероятности образования тумана в долинах рек и гор;
- влияние состояния почвы на развитие туманов, гроз и других явлений.

Правильный учет таких влияний позволяет определить систематические ошибки при прогнозе опасных явлений мезомасштабными моделями и тем самым повысить точность прогноза.

Для определения степени влияния местных условий желательно каким-то образом объективизировать оценку такого влияния.

Выше уже говорилось о том, что большинство опасных явлений связано с возникновением в пограничном слое значительных вертикальных движений, вследствие этого задача состоит в объективизации хотя бы качественной оценки развития таких движений при синоптических ситуациях, способствующих развитию того или иного опасного явления.

Например, известно, что в центральных областях России опасные конвективные явления, как правило, связаны с выходом южных циклонов и юго-западным переносом на высотах. При таких синоптических ситуациях следует в первую очередь оценить возможное влияние местных особенностей на развитие вертикальных движений в нижнем слое.

Линзы холода в пограничном слое образуются, наоборот, при синоптических ситуациях, способствующих медленному перемещению теплого фронта, что не вызывает больших вертикальных движений воздуха.

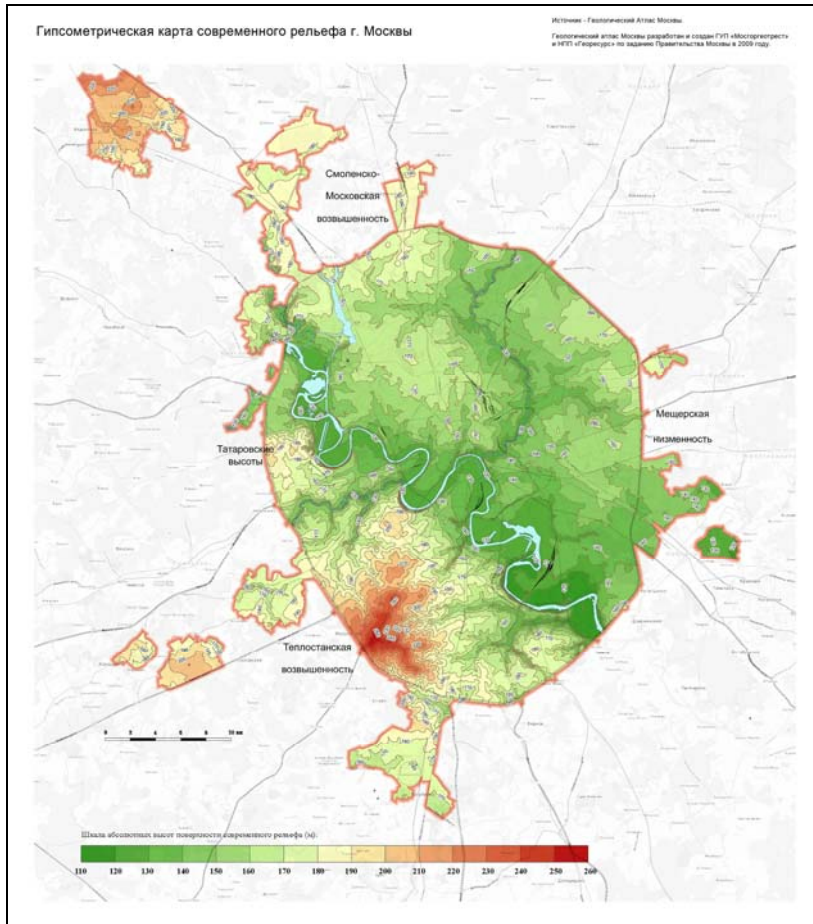
Вертикальные движения в каждой ячейке мезомасштабной географической сетки можно оценить качественно по десятибалльной шкале на основании известных критериев развития вертикальных движений в зависимости от высоты рельефа, альbedo подстилающей поверхности, скорости и направления ветра, степени устойчивости и других параметров атмосферы. Естественно, что для более объективной оценки желательно использовать все имеющиеся данные наблюдений и в первую очередь данные метеостанций с учетом их местоположения (так называемых «метаданных»), данные радиолокаторов, спутников, а также выходные данные мезомасштабных моделей [5, 8].

Следует подчеркнуть, что речь идет о выявлении движений, связанных не с большими градиентами давления, которые довольно хорошо определяются численными моделями, а дополнительных движений, вызванных конвекцией и деформацией потока под влиянием орографических и других препятствий. Согласно результатам, полученным на основании данных измерений на высотных метеорологических мачтах в Москве и Обнинске, вертикальная составляющая модуля вектора ветра в среднем составляла 5–20 % горизонтальной составляющей, а в некоторых случаях достигала 70 % [3].

Очевидно, что для качественного выявления таких вертикальных движений необходимо иметь крупномасштабные карты, хорошо отражающие рельеф местности, растительность, морфологию, а также степень застройки. На рис. 2 приведена физическая карта Москвы с отображением рельефа. На рисунке видна неоднородность подстилающей поверхности, как в отношении рельефа, так и ее отражательной способности, которая, несомненно, оказывает влияние на образование дополнительных вертикальных движений, эволюцию и траекторию перемещения опасных явлений. Даже по этой карте, довольно мелкого масштаба, можно сказать, что при юго-западном процессе наибольшие восходящие движения, вызванные деформацией потока, следует ожидать в районе Воробьевых гор, а нисходящие – в долине реки Москвы. Знание более детальной

информации о подстилающей поверхности позволит в каждом квадрате сетки (соизмеримой с шагом сетки мезомасштабной модели) качественно определить в баллах наиболее вероятные зоны усиления или ослабления опасного явления, а также его наиболее вероятную траекторию.

При достаточной статистической обеспеченности случаев такие карты могут служить дополнительным объективным фактором более точного прогноза того или иного опасного явления.



**Рис. 2.** Карта г. Москвы с указанием рельефа местности.  
**Fig. 2.** The map of Moscow with terrain.

## Выводы

1. При мезомасштабном прогнозировании опасных явлений погоды требуется учет не только средних значений метеорологических параметров в ячейке сетки, но и пространственного изменения значений этих параметров внутри каждой ячейки.

2. Эти изменения во многом зависят от влияния местных условий на развитие вертикальных движений в пограничном слое.

3. Вертикальные движения в каждой ячейке мезомасштабной географической сетки можно оценить качественно по десятибалльной шкале на основании известных критериев влияния рельефа и конвекции. Ячейки с наибольшим количеством баллов будут определять наиболее вероятные зоны опасных конвективных явлений, а с наименьшим – зоны туманов и гололедно-изморозевых отложений.

Оценку рекомендуется проводить при синоптических ситуациях, способствующих развитию того или иного опасного явления.

### Список литературы

1. Белов П.Н., Борисенков Е.П., Панин Б.Д. Численные методы прогноза погоды. Л.: Гидрометеоиздат, 1989. 376 с.
2. Калинин Н.А. Мониторинг, моделирование и прогноз состояния атмосферы в умеренных широтах. Пермь: Перм. гос. нац. исслед. ун-т, 2015. 308 с.
3. Клинов Ф.Я. Нижний слой атмосферы в условиях опасных явлений погоды. Л.: Гидрометеоиздат, 1978. 255 с.
4. Природные опасности России. Том 5. Гидрометеорологические опасности // Под ред. Г.С. Голицына и А.А. Васильева. М.: КРУК, 2001. 295 с.
5. Ривин Г.С., Розинкина И.А., Вильфанд Р.М. и др. Система COSMO-Ru негидростатического мезомасштабного краткосрочного прогноза погоды Гидрометцентра России: второй этап реализации и развития // Метеорология и гидрология. 2015. № 6. С. 58-70.
6. Руководство по Глобальной системе обработки данных // ВМО-№ 305. Женева: ВМО, 1997. 210 с.
7. Руководство по краткосрочным прогнозам погоды. Часть 1. Л.: Гидрометеоиздат. 1986. 293 с.
8. Справочник потребителей спутниковой метеорологии // Под ред. В.В. Асмуса, О.Е. Милехина. СПб.: Гидрометеоиздат, 2005. 112 с.
9. Толстых М.А., Шашкин В.В., Фадеев Р.Ю. и др. Система моделирования атмосферы для бесшовного прогноза. М.: Триада лтд, 2017. 166 с.
10. Mountain Weather Research and Forecasting. Recent Progress and Current Challenges // F.K. Chow, S.F. De Wekker, B.I. Snyder (Eds.) Springer, 2013. 750 p.

### References

1. Belov P.N., Borisenkov E.P., Panin B.D. Chislennyye metody prognoza pogody. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1989, 376 p. [in Russ.].
2. Kalinin N.A. Monitoring, modelirovanie i prognoz sostoyaniya atmosfery v umerennykh shirotah [Monitoring, simulation and atmospheric conditions forecasting in temperate latitudes]. Perm: Perm State Univ. Publ., 2015, 308 p. [in Russ.].
3. Klinov F.Ya. Nizhnii sloi atmosfery v usloviyakh opasnykh yavlenii pogody. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1978, 255 p. [in Russ.].
4. Prirodnye opasnosti Rossii. Tom 5. Gidrometeorologicheskie opasnosti. Moscow: KRUK Publ., 2001, 295 p. [in Russ.].
5. Rivin G.S., Rozinkina I.A., Vil'fand R.M., Alferov D.Y., Astakhova E.D., Blinov D.V., Bundel' A.Y., Kazakova E.V., Kirsanov A.A., Nikitin M.A., Perov V.L., Surkova G.V., Revokatova A.P., Shatunova M.V., Chumakov M.M. The COSMO-Ru system of nonhydrostatic mesoscale short-range weather forecasting of the Hydrometcenter of Russia: the second stage of implementation and development. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2015, no. 6, pp. 400-410.

6. Manual on the Global Data-processing System. *WMO-No. 305*. Geneva: WMO, 1997, 210 p. [in Russ.].
7. Rukovodstvo po kratkosrochnym prognozam pogody. Chast' 1. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1986, 293 p. [in Russ.].
8. *Spravochnik potrebitelei sputnikovoi meteorologii*. Saint Petersburg: Gidrometeoizdat Publ., 2005, 112 p. [in Russ.].
9. Tolstykh M.A., Shashkin V.V., Fadeev R.Yu., Shlyayeva A.V., Mizyak V.G., Rogutov V.S., Bogoslovskii N.N., Goyman G.S., Makhnorylova S.V., Yurova A.Yu. Atmosphere modelling system for seamless prediction. Moscow: Triada ltd Publ., 2017, 166 p. [in Russ.].
10. Mountain Weather Research and Forcasting. Recent Progress and Current Challenges // F.K. Chow, S.F. De Wekker, B.I. Snyder (Eds.), Springer, 2013, 750 p.

*Поступила в редакцию 21.01.2018 г.  
Received by the editor 21.01.2018.*