

СОВМЕСТНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЧИСЛЕННЫХ МЕЗОМАСШТАБНЫХ И КОНЦЕПТУАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ ПРИ ОПЕРАТИВНОМ ПРОГНОЗЕ ОПАСНЫХ ЯВЛЕНИЙ ПОГОДЫ

А.А. Васильев, Р.М. Вильфанд, А.Д. Голубев

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации*

Широко известно, что большой прогресс, достигнутый в численном прогнозировании погоды, относится главным образом к воспроизведению крупномасштабных атмосферных систем. Прогнозы таких систем, оперативно выпускаемые международными центрами, часто приемлемы для прямого их использования без какого-либо вмешательства человека, особенно если речь идет о метеорологических образованиях в свободной атмосфере.

Однако численные прогнозы, касающиеся приземной структуры атмосферы, все еще требуют корректировки синоптика. Особенно это касается прогнозов опасных явлений погоды. Такие прогнозы часто связаны с неопределенностью в отношении местоположения ожидаемого явления, точного времени его возникновения и интенсивности [13].

Причины этих неопределенностей по мере интенсивности развития мезомасштабных моделей постепенно устраняются, но требования практики вызывают необходимость использовать все имеющиеся уже сейчас в распоряжении синоптика средства для уточнения прогноза.

Для определения вероятности развития того или иного опасного явления, особенно тех явлений, математическое моделирование которых на данном этапе развития науки затруднено,

прогнозист должен знать физические условия развития опасного явления, его структуру и жизненный цикл, а также местные особенности, влияющие на его эволюцию, иначе говоря, его концептуальную модель.

Именно знание концептуальной модели того или иного явления вселяет в прогнозиста уверенность в отношении необходимости внесения тех или иных изменений в прогностическую продукцию мезомасштабной модели.

Концептуальные модели формируются на основании комплексного изучения явления – экспериментальных, эмпирических и статистических данных, а также теоретических выводов и предположений. На основе таких моделей можно правильно интерпретировать данные имеющихся средств наблюдения, например спутниковые изображения, данные метеорологических радиолокаторов и других автоматизированных систем, и, самое главное, уточнять прогноз опасных явлений, полученный по мезомасштабной численной модели. Концептуальные модели многих опасных явлений погоды изложены в публикациях и учебниках [11, 12]. В качестве примера можно привести модель жизненного цикла грозового облака, модель фронта порывистости, образующегося вокруг движущегося грозового облака, а также модель суперячейковой системы облаков. Изучение возмущений в поле ветра под кучево-дождевыми облаками, а также анализ эмпирических данных привели к созданию концептуальной модели микрошквалов (downbursts), локализуемых в зоне осадков и приводящих к сильным нисходящим движениям. Экспериментальными исследованиями было установлено, что ливневые осадки способствуют передаче вниз количества движения из средней и даже верхней тропосферы, где скорости ветра гораздо больше, чем в пограничном слое [13]. Хорошо изучена и роль орографии в генерации мезомасштабных опасных явлений и их локализации. Воздушный поток, встретив на своем пути горное препятствие, деформируется, в результате чего возникают сильные вертикальные движения, турбулентность, вызывающая большие перегрузки воздушных судов, а также местные ветры разрушительной силы. С большой степенью достоверности к концептуальным моделям можно

отнести и широко известные модели развития многих синоптических процессов, изложенные в руководствах по краткосрочным прогнозам погоды и прогнозам метеорологических условий для авиации [11, 12].

В качестве примера рассмотрим возможность использования концептуальной модели Новороссийской боры для уточнения ее прогноза, полученного на основании расчетов по мезомасштабной численной модели. Бора представляет собой нисходящий холодный шквалистый ветер с гор. Максимальная скорость этого ветра в г. Новороссийске может достигать 40 м/с и более, а на Мархотском перевале – 60 м/с и более [10, 16].

Хотя наиболее ярко бора проявляется в Новороссийске, строго говоря, борю можно называть сильным северо-восточный ветер на участке от Анапы до Туапсе, поскольку природа этого ветра одинакова. Все исследователи боры приходят к единому выводу, что необходимым ее условием является наличие холодного антициклона к северу от Черного моря и области пониженного давления над Черным морем. Подойдя к Кавказскому хребту, холодный воздух антициклона не может преодолеть Главный Кавказский хребет и начинает обтекать его с боков и переваливать в тех местах, где высота хребта ниже верхней границы холодного воздуха. Это явление называют в метеорологии орографической окклюзией. Поскольку горы южнее Туапсе всегда выше слоя холодного воздуха, то и боры там не бывает. Следует отметить, однако, что это признаваемое всеми условие является необходимым, но не достаточным для прогноза боры.

Экспериментальные исследования, выполненные еще в 1965 году [3, 4], показали, что сильный ветер на побережье во время боры, переваливая через Мархотский перевал, возникает не в результате ускорения потока при его падении с гор, как считалось ранее, а в результате изменения траектории падения уже существующего на наветренной стороне низкотропосферного струйного течения. Такое струйное течение всегда существует на периферии антициклона, тем более, что, встречая на пути Кавказские горы, скорость ветра в нем усиливается благодаря влиянию хребта как твердой стенки.

На рис. 1, взятом из [3], приведен вертикальный разрез атмосферы по маршруту Краснодар – Джугба, построенный по данным полетов самолета ЛИ-2, специально оборудованного для изучения турбулентности во время боры.

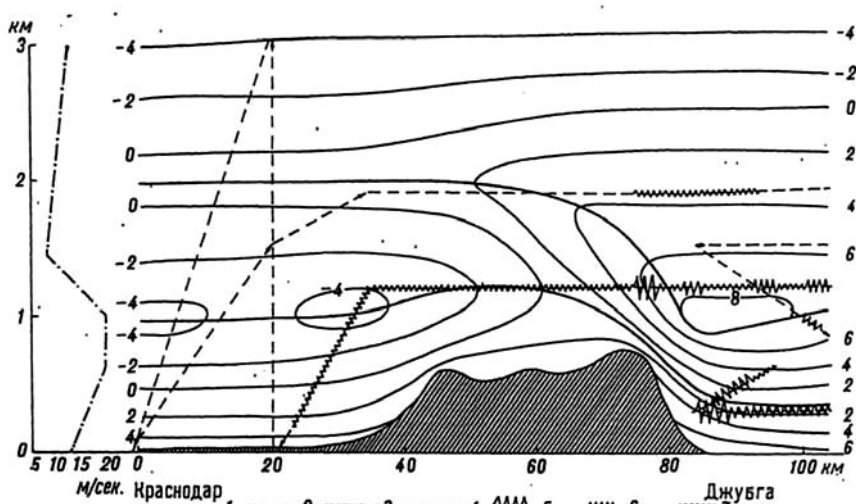


Рис. 1. Вертикальный разрез по маршруту Краснодар – Джугба 1 ноября 1963 г.: траектория полета самолета (1); изотермы (2); верхняя и нижняя границы слоя инверсии (3); профиль ветра в Краснодаре (4); приращения перегрузок от $\pm 0,4$ до $\pm 0,5$ g (5); от $\pm 0,2$ до $\pm 0,4$ g (6); от $\pm 0,2$ g (7).

На рисунке виден слой инверсии температуры, высота которого с наветренной стороны Кавказского хребта больше, чем на подветренном склоне, что подтверждает факт падения холодного воздуха после переваливания через хребет. В профиле ветра с наветренной стороны хорошо заметно и низкотропосферное струйное течение с ярко выраженным максимумом скорости на высотах 0,7–1,0 км, т. е. у нижней границы инверсионного слоя. Падение этой струи с подветренной стороны хребта вместе с опусканием слоя инверсии и вызывает сильный шквалистый ветер у поверхности Земли.

Очевидно, что чем выше расположено низкотропосферное струйное течение с наветренной стороны хребта и чем больше скорость в нем, тем ближе будет траектория его падения на подветренной стороне. При пологом падении струи бора отмечается далеко в море – так называемая «верховая бора».

Траектория падения холодного воздуха во многом зависит и от разности значений температуры между холодным воздухом с наветренной стороны и теплым над Черноморским побережьем. Чем больше эта разность, тем круче траектория падения струи, вызывающей сильный ветер.

Исходя из изложенной концептуальной модели, для прогноза боры желательно знать следующие параметры:

- траекторию холодного антициклона, перемещающегося на Северный Кавказ;
- распределение с высотой скорости ветра и температуры в нижнем 1,5-километровом слое с наветренной стороны хребта;
- разность значений температуры воздуха на нижней границе инверсии с наветренной стороны и температуры воздуха на этом же уровне с подветренной.

Траектория антициклона характеризует толщину и температуру слоя воздуха, перемещающегося на Северный Кавказ, а также степень влияния Главного Кавказского хребта на направление низкотропосферного струйного течения и увеличение его скорости. Хотя ряд исследователей называют Новороссийской борой любой северо-восточный ветер, истинная бора отмечается только при полярных и особенно ультраполярных вторжениях холода. Напомним, что бора – это местный ветер, а местное население считает, что бора бывает только в холодное время года и отмечается обычно 3 или 7 дней, что соответствует средней продолжительности полярных и ультраполярных вторжений. Поэтому разделение боры на пять типов (стоковая, внутримассовая, муссонная, фронтальная и смешанная), сделанное еще в 1959 году [14] и до сих пор используемое в научной литературе, относится к любому ветру с гор (даже к бризовой циркуляции) и имеет теперь лишь познавательный характер. Настоящей борой можно называть лишь фронтальную бору, и то условно, поскольку главную роль в ее образовании играет орография местности.

В настоящее время траектория вторжения холодного антициклона на Северный Кавказ хорошо определяется по данным численных моделей по крайней мере за трое суток. Что касается профиля скорости ветра и температуры, то его определить трудно, поскольку существующая сеть радиозондирования довольно редка. В этом случае можно воспользоваться прогностическими значениями переменных, полученными по расчетам мезомасштабной модели, и по их данным построить соответствующий профиль. Поскольку вертикальное разрешение мезомасштабной модели в области пограничного слоя значительно лучше, чем в свободной атмосфере, количество расчетных поверхностей позволяет с достаточной степенью точности определить как уровень и скорость максимального ветра в низкотропосферном струйном течении, так и слой инверсии и температуру воздуха на его нижней границе. По данным мезомасштабной модели можно оценить и третий параметр – разность значений температуры воздуха с наветренной и подветренной сторон хребта. На основании перечисленных параметров можно уточнить место, время и интенсивность боры, спрогнозированной по мезомасштабной модели.

С другой стороны, негидростатические мезомасштабные модели позволяют лучше понять механизм и физику того или иного опасного явления и тем самым уточнить их концептуальную модель. Именно мезомасштабное численное моделирование доказало необходимость наличия низкотропосферного струйного течения с наветренной стороны хребта для развития боры [1, 2, 5, 8].

Примером такого уточнения может служить и использование результатов мезомасштабного моделирования при анализе и прогнозе выпадения сильных ледяных дождей 25–26 декабря 2010 г. над центром европейской части России [6, 7]. В эти дни в Московской и соседних с ней областях сильные ледяные дожди привели к образованию гололеда на проводах и деревьях, что вызвало обрывы проводов, падение опор линий электропередачи и деревьев. Самолеты в аэропортах Москвы покрылись слоем льда, 801 рейс был задержан и 408 рейсов отменено.

Концептуальная модель образования ледяного дождя широко известна [9, 10, 12, 15]. Она предполагает наличие в нижней тропосфере слоя с положительной температурой при отрицательных ее

значениях выше и ниже этого слоя. В этом случае на кривой стратификации температуры с положительными ее значениями слой имеет вид «теплого носа» [15]. Твердые осадки, выпадающие из слоя с отрицательной температурой, тают в теплом воздухе, а затем, в приземном слое с отрицательной температурой, покрываются ледяной коркой. При падении на земную поверхность или предметы, на ней расположенные, ледяные шарики разбиваются, и выпадающая из них вода образует гололед. Следовательно, для более точного определения интенсивности ледяного дождя и места его выпадения нужно знать детальное распределение температуры как по вертикали, так и по площади. Такое распределение можно получить только на основании прогностических значений мезомасштабных моделей, имеющих высокое разрешение в нижнем слое, особенно в пограничном слое. Ведь часто слой с положительной температурой бывает небольшим и его трудно определить крупномасштабными численными моделями и синоптическими методами.

На рис. 2 приведен вертикальный разрез атмосферы при сильном ледяном дожде, взятый из [6]. Разрез составлен на основании прогностических значений температуры, рассчитанных по мезомасштабной модели. На рисунке хорошо видно проникновение теплого воздуха с положительными значениями температуры. Изотерма 0°C проходит от поверхности Земли в районе Наро-Фоминска до высоты 1 км в районе Юрьева-Польского, а затем снова повышается, но уже в обратном направлении. При этом самый нижний слой воздуха сохраняет отрицательные значения температуры. Имея результаты расчета прогностических значений температуры воздуха по мезомасштабной модели, в данном случае синоптики правильно спрогнозировали выпадение ледяного дождя. В то же время подобный случай ледяного дождя, наблюдавшийся в Москве 1 декабря 1981 года, спрогнозирован не был, поскольку тогда мезомасштабные модели еще не применялись в оперативной работе и синоптики не располагали детальными прогностическими данными о распределении температуры в пограничном слое атмосферы.

Приведенные примеры наглядно демонстрируют возможность уточнения концептуальных моделей опасных явлений погоды

с помощью выходных данных мезомасштабных моделей. С другой стороны, знание концептуальных моделей дает возможность определить систематические ошибки численных моделей при прогнозе опасных явлений и тем самым свести к минимуму неопределенность в отношении их прогнозирования.

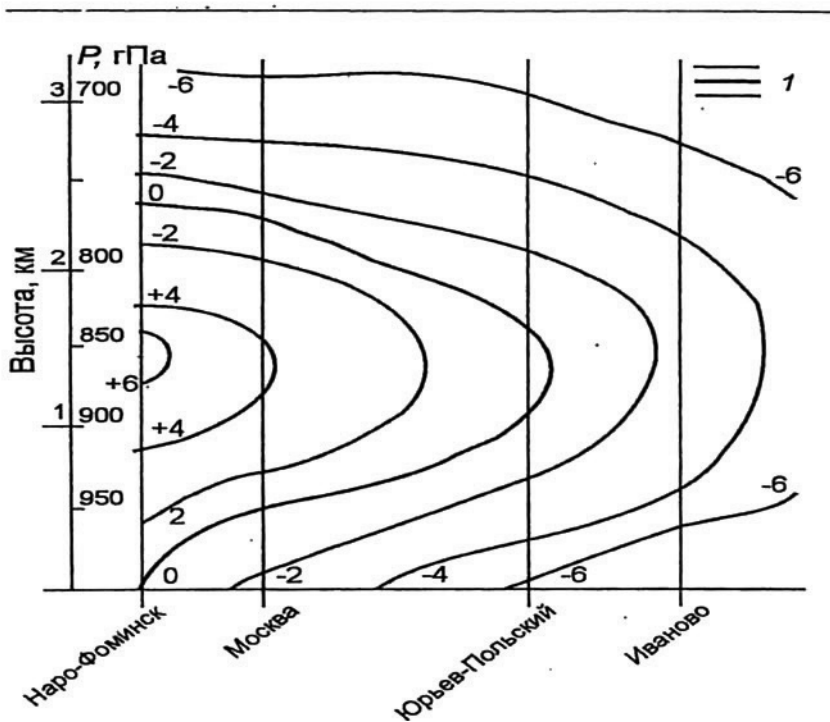


Рис. 2. Вертикальный разрез атмосферы в направлении перемещения теплого воздуха, построенный по прогностическим значениям температуры мезомасштабной модели WRF-ARW на 21 ч ВСВ 25 декабря 2010 г.: 1 – изотермы, °С.

Кроме того, совершенствование концептуальных моделей будет способствовать более детальному математическому описанию физических процессов в пограничном слое атмосферы и тем самым повышению прогностических возможностей при мезомасштабном моделировании атмосферы.

В заключение отметим, что успехи в численном моделировании атмосферы будут способствовать как пересмотру концептуальных моделей локального масштаба, так и совершенствованию описания крупных погодных систем, физическая структура которых казалось бы давно установлена и признана неоспоримой [17].

Список использованных источников

1. Блинов Д.В., Перов В.Л., Песков Б.Е., Ривин Г.С. Экстремальная бора 7–8 февраля 2012 г. в районе г. Новороссийск и ее прогноз по модели COSMO-Ru // Вестник МГУ. Сер. 5. География. – 2013. – № 4. – С. 36–43.

2. Блинов Д.В., Перов В.Л., Песков Б.Е., Ривин Г.С., Розинкина И.А. Моделирование экстремальных орографических усиления ветра на Черноморском побережье Кавказа (Новороссийская бора) по прогностической модели COSMO-Ru Гидрометцентра России // Труды международной конференции, посвященной памяти академика А.М. Обухова, 13–16 мая 2013 г. – М.: ИФА РАН, 2014. – С. 385–390.

3. Васильев А.А., Решикова А.А. Экспериментальные исследования турбулентности во время боры на воздушной трассе Адлер – Новороссийск // Труды ЦИП. – 1966. – Вып. 157. – С. 94–100.

4. Васильев А.А. Болтанка вертолетов на Черноморском побережье Кавказа при ветрах типа боры // Труды ЦИП. – 1965. – Вып. 146. – С. 11–20.

5. Вильфанд Р.М., Ривин Г.С., Розинкина И.А. Система COSMO-Ru негидростатического мезомасштабного краткосрочного прогноза погоды Гидрометцентра России: первый этап реализации и развития // Метеорология и гидрология. – 2010. – № 8. – С. 5–17.

6. Вильфанд Р.М., Голубев А.Д. Метеорологические условия выпадения ледяных дождей 25–26 декабря 2010 г. над центром Европейской части России // Лед и снег. – 2011. – № 4 (115). – С. 119–124.

7. Голубев А.Д., Кабак А.М., Никольская Н.А. и др. Ледяной дождь в Москве, Московской области и прилегающих областях центра Европейской территории России 25–26 декабря 2010 года // Труды Гидрометцентра России. – 2013. – Вып. 348. – С. 214–230.

8. Ефимов В.В., Барабанова В.С. Моделирование Новороссийской боры // Метеорология и гидрология. – 2013. – № 3. – С. 47–55.

9. Калинин Н.А., Смородин Б.Л. Редкое явление замерзающего дождя в Пермском крае // Метеорология и гидрология. – 2012. – № 8. – С. 27–35.
10. *Российский гидрометеорологический энциклопедический словарь*. Том 1 // под ред. А.И. Бедрицкого. – СПб.; М.: Летний сад, 2008. – 333 с.
11. *Руководство по прогнозированию метеорологических условий для авиации*. – Л.: Гидрометеоиздат, 1985. – 300 с.
12. *Руководство по краткосрочным прогнозам погоды*. Ч. 1. – Л.: Гидрометеоиздат, 1986. – 293 с.
13. *Руководство по глобальной системе обработки данных* // ВМО-№ 305. – Женева, Швейцария: Секретариат ВМО. – 1993.
14. *Труды Морского гидрофизического института АН СССР*. Т. 14. – 1959.
15. Шакина Н.П., Скриптунова Е.Н., Иванова А.Р. Условия выпадения замерзающих осадков в некоторых аэропортах России и СНГ. Аэропорты Московского аэроузла // Метеорология и гидрология. – 2003. – № 6. – С. 40–58.
16. *Glossary of meteorology* // ed. R.E. Huschke. – Boston, Massachusetts: American meteorological society, 1959. – 638 с.
17. Schults D.M, Vaughan G. Occluded fronts and the occlusion press. A fresh look at conventional wisdom // BAMS. – April 2011. – Vol. 92. – P. 443–466.

Поступила в редакцию 28.01.2016 г.