



Прогноз развития зон активной конвекции с особо опасными явлениями на основе региональной модели Гидрометцентра России

А.А. Алексеева, В.М. Лосев, Б.Е. Песков,

Е.В. Васильев, А.Е. Никифорова

Гидрометцентр России

Опасные явления погоды, и в частности, сильные шквалы, ливни и град, связанные с зонами активной конвекции (ЗАК), относясь к мезометеорологическим явлениям погоды, образуются в результате сложного взаимодействия макро-, мезо- и микромасштабных атмосферных процессов. Площадь, охваченная этими явлениями, во много раз меньше расстояния между пунктами метеорологических и аэрологических наблюдений. Все это и обуславливает трудность их исследования и предсказания, в т.ч. непосредственно в рамках численных моделей. Достижения в развитии отечественных гидродинамических моделей, качество прогнозирования которых хотя все еще и уступает лучшим зарубежным моделям, позволяют со сравнимой точностью использовать их выходные данные для прогноза опасных конвективных явлений.

Большинство методов прогноза конвективных явлений в рамках исследований данного направления [1] разработано по принципу «идеального прогноза», т.е. для их разработки использованы фактические метеорологические параметры атмосферы. В последнее время разработан метод альтернативного прогноза шквалов подходом MOS на выходных данных региональной модели.

К настоящему времени в оперативную практику Гидрометцентра России решением ЦМКП Росгидромета в 2006 г. внедрены методы альтернативного прогноза ливней и шквалов в градации ОЯ и метод прогноза максимального количества осадков. Методы альтернативного прогноза ливней и шквалов в 3-х градациях, включая градации ОЯ, проходят оперативные испытания в рамках плана Росгидромета.

Выходные данные региональной модели Гидрометцентра России удовлетворяют почти всем требованиям к данным для физико-синоптического прогноза конвективных явлений, за исключением того, что модель не генерирует в оперативном режиме в базу данных (БД) данные о влажности у поверхности земли. Прогноз этого





поля находится в стадии разработки и авторских испытаний. И, конечно, желательно бы иметь данные о влажности до больших высот, а также весь комплект используемых данных с более детальным вертикальным разрешением. Частично эти проблемы приходится решать в рамках методов прогноза конвективных явлений путем использования блока физико-статистического прогноза приземной влажности.

Основой метода прогноза максимального количества осадков является определение количества выпавших осадков по влагосодержанию облака с учетом того известного факта, что большая часть сконденсированной в облаке влаги остается в атмосфере и не участвует в осадкообразовании. Такой учет осуществляется с помощью коэффициента генерации осадков (k_0) — отношения фактически выпавших осадков к общему количеству генерируемой облаком влаги.

В основе прогноза максимального количества смешанных осадков (обложных и ливневых) лежит формула вида [3]:

$$Q \max_1 = b k_0 Wm \quad (\text{мм/12 ч}) \quad (1)$$

где $b = 4,36 \text{ мм} \cdot \text{с/м}$;

Wm — максимальная конвективная скорость, м/с;

k_0 — коэффициент генерации осадков, выраженный через упорядоченные вертикальные движения на уровне 850 гПа.

Количество осадков в случаях, когда дождь ливневого характера вносит основной вклад в общую сумму осадков, рассчитывается как функция только максимальной конвективной скорости:

$$Q \max_1 = c Wm \quad (\text{мм/12 ч}). \quad (2)$$

Причем, коэффициент регрессионной зависимости c определяется значениями влажности в слое 850—700 гПа и вертикальных упорядоченных движений на уровне 850 гПа.

Ранее проведенные исследования [3] показали, что при сильных ливнях, чем больше величина максимальной конвективной скорости, тем меньше разница между максимальной и средней интенсивностью осадков, продолжительностью ливневой части дождя и общей продолжительностью дождя. В связи с этим в формулу прогноза максимального количества осадков со средней интенсивностью конвективных осадков введен коэффициент на интенсивность конвекции $L = f(Wm)$.





Для смешанных и ливневых осадков при средней интенсивности конвективных осадков уравнения регрессии имеют вид:

$$Q \max_2 = L b k_0 W m \quad (\text{мм/12 ч}) \quad (3)$$

$$Q \max_2 = L c W m \quad (\text{мм/12 ч}) \quad (4)$$

Согласно А.А. Акулиничевой [2] отношение продолжительности ливневой части дождя к общей продолжительности дождя характеризуется плотностью конвективных струй χ , средние значения которой для летних месяцев находятся в интервале 0,29—0,38.

Окончательная формула прогноза максимального количества осадков имеет вид:

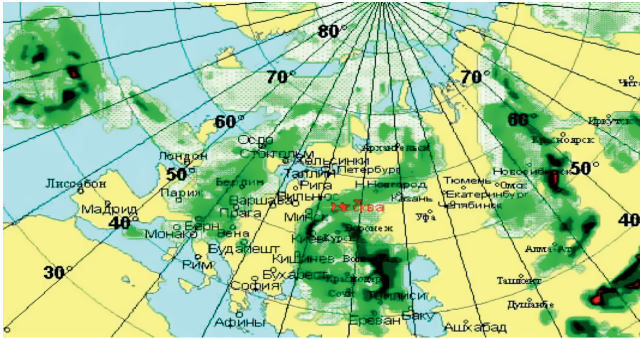
$$Q \max = Q \max_1 \cdot \chi + Q \max_2 \cdot (1 - \chi) \quad (\text{мм/12 ч}) \quad (5)$$

Пример прогноза максимального количества осадков по данному методу представлен на рис. 1.

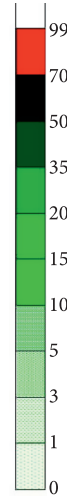
Как показала практика применения данного метода в разных регионах европейской территории России, метод завышает число прогнозируемых случаев с осадками и количество осадков. Это объясняется, во-первых, тем, что в прогностических модельных сглаженных полях, на основе которых строится стратификация температуры, тонкие задерживающие слои проявляются не всегда. В то время как, в таких случаях тонкие задерживающие слои вблизи уровня конденсации (~850 гПа) могут прерывать подъем термика и облачного элемента до возникновения в них осадков, несмотря на большую потенциальную неустойчивость атмосферы в более высоких слоях, не реализованную в такой ситуации. В рамках усовершенствования данного метода этот недостаток исправляется учетом лапласиана приземного давления L , характеризующего антициклоничность ($L < 0$) и циклоничность ($L > 0$) поля давления.

Во-вторых, при формировании скоплений и гряд мощных кучево-дождевых (Сб) облаков размером ~100 км, многочисленных восходящих конвективных потоков и масс облачных элементов в них, существующих несколько часов, большую роль должен играть значительный приток влажного воздуха у поверхности земли. Это объясняет указанную выше роль циклоничности (из уравнения неразрывности). При отсутствии достаточно длительного обеспечения Сб влажным воздухом устремляющийся вверх облачный элемент (струя, поток, ячейка, скопление облаков) будет небольшим и кратковременным, с малым количеством осадков, особенно в условиях

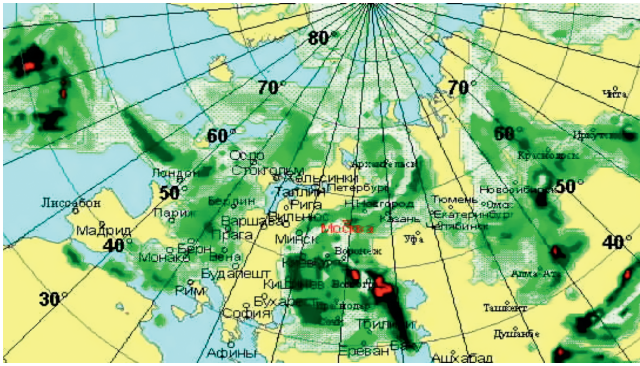




мм/12 ч



а) 12 ч ВСВ. Заблаговременность 24 ч.



б) 12 ч ВСВ. Заблаговременность 12 ч.

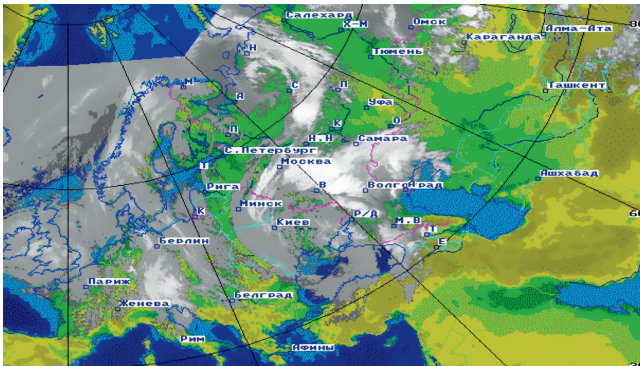


Рис. 1. Прогностические карты максимального количества осадков на 06.06.2001 г., рассчитанные на основе данных региональной численной модели, и снимок облачности с ИСЗ.





сухого окружающего воздуха. Поскольку приземная влажность прогнозируется в методе не в достаточной степени точно, этот фактор учитывается через дефицит влажности в нижней части тропосферы D_8 , являющийся также показателем тонких задерживающих слоев.

На количество осадков оказывает также влияние скорость переноса кучево-дождевого облака \vec{v} , которая связана со скоростью ветра в тропосфере. Слишком быстрое прохождение Сб над станцией наблюдения уменьшает количество выпадающих осадков. С другой стороны, малоподвижность облака при слабом ветре снижает интенсивность дождя из-за уменьшения радиационного прогрева у поверхности земли.

Усовершенствованное уравнение для прогноза максимального количества осадков с учетом вышеперечисленных факторов имеет вид [5]:

$$Q_{np} = a''Q \max(bL_0 - |L - L_0|)(b'|\vec{v}|_0 - \left| |\vec{v}| - |\vec{v}|_0 \right|)(b''D_0 - |D_8 - D_0|) + c'', \quad (6)$$

где b, b', a'', b'', c'' — коэффициенты регрессионной зависимости, L_0, \vec{v}_0, D_0 — оптимальные значения лапласиана приземного давления, скорости переноса и дефицита точки росы на уровне 850 гПа.

Предложенные уточнения делают метод прогноза летних дождей физически еще более обоснованным и практически значимым. При этом повышаются все или большинство важнейших характеристик качества прогнозирования.

Прогноз ливней в градации ОЯ осуществляется по дискриминантной функции, позволяющей по набору признаков с помощью выбранного решающего правила определить, к какому классу относится рассматриваемый объект: к классу «ливни в градации ОЯ» или к классу «без ливней в градации ОЯ». Для оценки качества разделения классов использовались такие характеристики, как: 1) выборочное расстояние Махаланобиса; 2) предупредительность и оправдываемость каждого из классов.

Отбор предикторов, определяющих выпадение ливней в градации ОЯ, производился на основе физической сущности происходящего процесса, т.е. исходя из условий и механизма образования ливней в градации ОЯ. Т.к. главной причиной образования ливней в градации ОЯ является вертикальная неустойчивость атмосферы, мерой интенсивности поднятия восходящего воздуха за счет конвекции выбрана величина максимальной конвективной скорости (W_m). Одним из основных факторов, влияющим на количество осадков, является





влажность у поверхности Земли и степень увлажнения восходящего воздуха. Точка росы у поверхности Земли (T_d) характеризует массовую долю влаги у поверхности Земли и влияет на высоту уровня конденсации. Степень увлажнения восходящего воздуха оценивается средним дефицитом влажности в слое 850—700 гПа (d_{8-7}). Лапласиан приземного давления (ΔP) характеризует конвергенцию воздушных масс в нижнем слое тропосферы, благоприятствующую развитию суперячеевых кучево-дождевых облаков. Он косвенно определяет знак и модуль упорядоченных вертикальных движений на уровне 850 гПа, которые вносят вклад в интенсивность и количество ливней в градации ОЯ. Наибольшая информативность этих параметров подтверждена их ранжированием с помощью коэффициента точечно-биссерийальной корреляции, который наиболее удобен для выявления связи между предикторами и двумя классами явлений, исключая друг друга.

Таким образом, дискриминантная функция (L) является функцией (F) от следующих 4-х параметров атмосферы:

$$L = F(W_m, T_d, \Delta P, d_{8-7}). \quad (7)$$

Прогноз шквалов в градации ОЯ осуществляется по дискриминантной функции, полученной подходом, аналогичным прогнозу ливней в градации ОЯ.

Наиболее информативным предиктором при прогнозе шквалов в градации ОЯ является максимальная конвективная скорость (W_m). Очевидна физичность данного предиктора. Только при наличии мощной восходящей струи (среднее значение $W_m=28,2$ м/с) может накопиться достаточно влаги, которая затем, обрушиваясь вниз, создает мощный нисходящий поток и шквал.

Другим наиболее информативным предиктором является лапласиан приземного давления ($\text{гПа}/(300 \text{ км})^2$), отражающий циклоничность у земли и, как следствие, конвергенцию горизонтальных приземных потоков воздуха, необходимых для обеспечения подъема массы достаточно влажного и теплого воздуха восходящими потоками. Одной только вертикальной неустойчивости недостаточно для создания мощных запасов влаги в кучево-дождевом облаке, необходима «подпитка» для восходящих движений за счет конвергенции горизонтальных потоков. Этот параметр важен и потому, что позволяет выделять зону полного отсутствия шквалов. Большое количество случаев со шквалами наблюдается при лапласиане $0-4$ ($\text{гПа}/(300 \text{ км})^2$). Это вполне объяснимо, поскольку при лапласиане $\gg 5$ чаще всего образуется много слоистой облачности, что приводит к уменьшению прогрева





воздуха у земли, и, как следствие этого, уменьшению энергии неустойчивости и снижению конвективных скоростей. При лапласиане $\ll -10$ шквалы не развиваются и с большой вероятностью можно прогнозировать их отсутствие. Появление шквалов при небольших отрицательных значениях лапласиана приземного давления объясняется тем, что при небольшой антициклоничности иногда образуются локальные ложбины, которые можно заметить на приземных картах при проведении изобар через 1 гПа. Наиболее благоприятная синоптическая ситуация создается при значениях лапласиана приземного давления в диапазоне 1—3 (гПа/(300 км)²), когда образующиеся линии шквалов или неустойчивости создают конвергенцию потоков при безоблачной в первой половине дня погоде. Случаи без шквалов при небольшом положительном лапласиане от 2 до 4 обязаны так называемым «сухим фронтам» с сухим и слабо неустойчивым воздухом. Эти случаи хорошо отражаются таким предиктором, как максимальная конвективная скорость (W_m). Поэтому использование сочетания этих предикторов (W_m и лапласиана приземного давления) для прогноза шквалов в градации ОЯ в большей степени уменьшает недостатки использования их по отдельности.

Таким образом, дискриминантная функция (L1) для прогноза шквалов в градации ОЯ является функцией (F) от таких параметров, как:

$$L1 = F(W_m, \Delta P). \quad (8)$$

Для прогноза максимальной скорости ветра при шквале разработано прогностическое уравнение:

$$V_{\phi} = a \cdot W_m^n \left[\left(|\vec{V}|_7^5 + b \right) (\nabla^2 p_{300} + c) \right]^m + d \cdot \left(|\vec{V}|_7^5 + g \right)^k + f \cdot |\vec{V}|_7^5 - CC, \quad (9)$$

где W_m — максимальная конвективная скорость, м/с;

$|\vec{V}|_7^5$ — модуль средней векторной скорости ветра в слое 700—500 гПа, м/с;

$\nabla^2 p_{300}$ — лапласиан приземного давления, гПа/300 км²;

a, b, c, d, g, f, CC — эмпирические коэффициенты.

Эмпирические коэффициенты и степенные показатели входящих в уравнение предикторов меняются в зависимости от периода сезона возможного возникновения шквалов.

Пример прогноза шквалов в градации ОЯ и максимальной скорости ветра при шквале представлен на рис. 2.



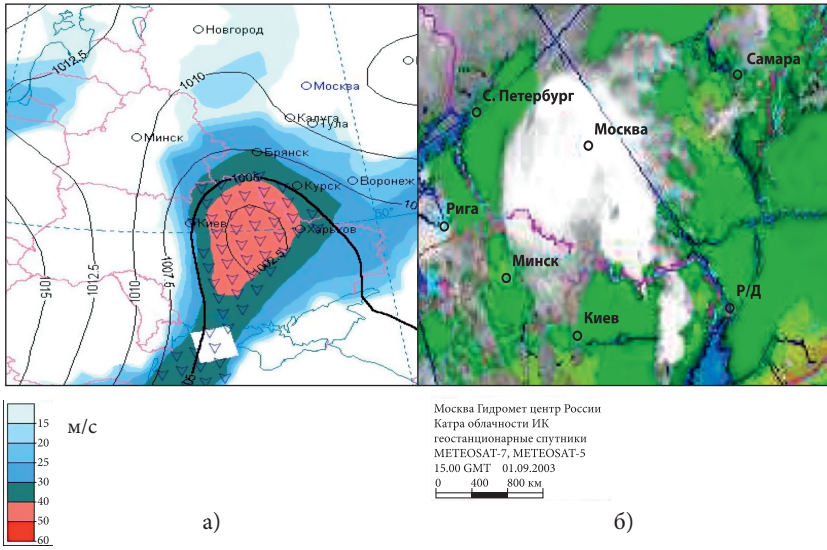


Рис. 2. Прогноз шквалов в градации ОЯ (значки шквала), скорости ветра (м/с) при шквалах (закрашенные области) и барического поля на уровне 1000 гПа (изолинии) на срок 12 (а) ВСВ 01.09.2003 г. по исходному сроку 12 ВСВ 31.08.2003 г. (заблаговременность 24 ч) и карта облачности ИК геостационарных спутников METEOSAT-7 и METEOSAT-5 срок 15 (б) ВСВ 01.09.2003 г.

На основе вышеописанных методов разработаны 2 комплексных метода альтернативного прогноза шквалов и ливней в 3-х градациях, которые в настоящее время испытываются в Центральном федеральном округе (ЦФО). Пример прогноза приведен на рис. 3.

Кроме того, новой разработкой данного направления является комплексный метод альтернативного прогноза шквалов, базирующийся на десяти вариантах прогноза шквалов, каждый из которых представляет собой прогноз шквалов по дискриминантным функциям выделенных кластеров в оптимальном диапазоне значений информативных для возникновения шквалов предикторов (максимальной конвективной скорости, лапласиана приземного давления с шагом расчета 150 км; упрощенной оценки максимальной конвективной скорости через линейную комбинацию предикторов, характеризующую отклонение кривой состояния от кривой стратификации на поверхности 700 гПа по методу частицы, поднимающейся от Земли; разности температур воздуха на поверхностях 850 и 700 гПа; предиктора, рассчитанного по скорости ветра на уровне 700 гПа,



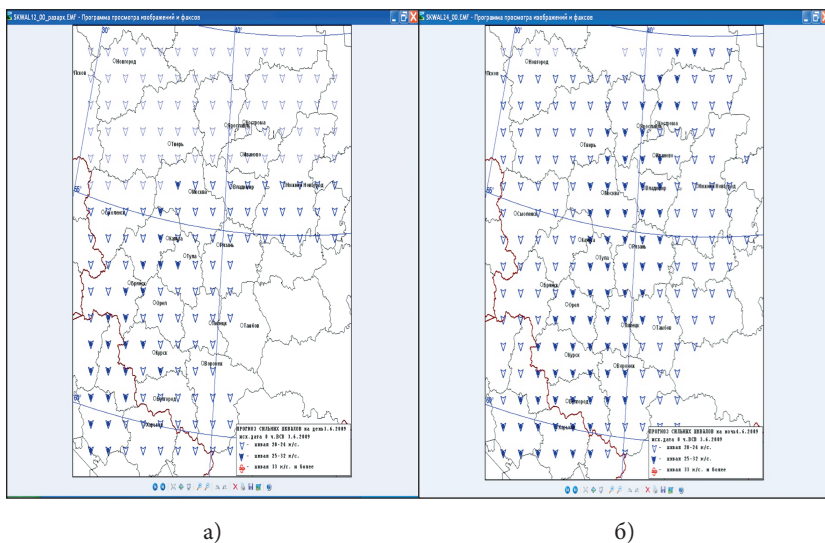


Рис. 3. Прогноз сильных шквалов на день 03.06.2009 г. с заблаговременностью 12 ч (а). Прогноз сильных шквалов на ночь 04.06.2009 г. с заблаговременностью 24 ч (б).

температуры воздуха и температуры точки росы у земли; полной скорости ветра у Земли при шквале) [4].

Комплексный метод прогнозирует:

- ситуации «без шквалов» (цифра 0 на карте);
- «шквал» (со скоростью 15—21 м/с, цифра 3 на карте);
- «вероятен сильный шквал» (со скоростью 22—24 м/с, цифра 5 на карте);
- «сильный шквал» (со скоростью 22—24 м/с, цифра 6 на карте);
- «вероятен очень сильный шквал» (со скоростью 25—32 м/с, цифра 7 на карте);
- «очень сильный шквал» (со скоростью 25—32 м/с, цифра 8 на карте);
- «очень сильный и локально ураганный шквал» (со скоростью ≥ 33 м/с, число 10 на карте).

Правила формирования прогноза комплексным методом выработаны на основе анализа положительных для практики прогнозирования сторон каждого варианта прогнозов.

Пример прогноза по этому методу приведен на рис. 4.



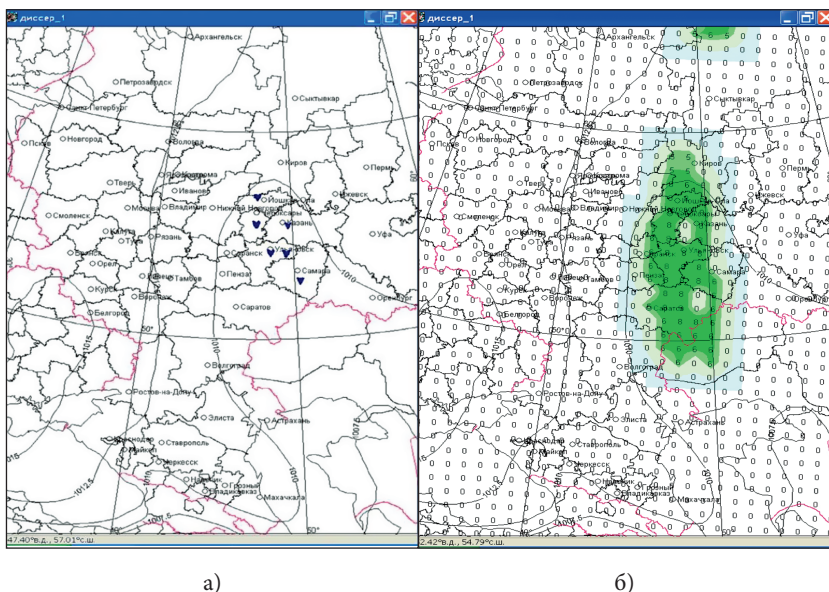


Рис. 4. Карта фактически наблюдаемых сильных шквалов (а) и карта прогноза шквалов на 12.00 ВСВ 01.07. 2007 г. по комплексному методу (б).

Прогноз града в 2-х градациях (ОЯ и НЯ) осуществляется на основе комплексирования альтернативного прогноза града в градации ОЯ и прогноза размера градин.

Прогноз опасной совокупности конвективных явлений разработан на основе выше указанных методов с учетом требований практики, т.к. известно, что совокупность по отдельности неопасных конвективных явлений может приводить к ущербу в тех случаях, когда интенсивность каждого явления совокупности достигает примерно 75% от критерия ОЯ. Методом может прогнозироваться как отдельное конвективное явление (ливень, град, шквал) в градации ОЯ или НЯ, так и их комплексы. На прогностической карте явлению или комплексу соответствует определенная присвоенная цифра.

Пример прогноза этим методом представлен на рис. 5, типизация явлений — в таблице 1.

В последнее время в Гидрометцентре России разработан программный комплекс прогноза опасных конвективных явлений (ливней, шквалов, града, комплексов конвективных явлений с детализацией типа и интенсивности) с заблаговременностью не менее 24 часов

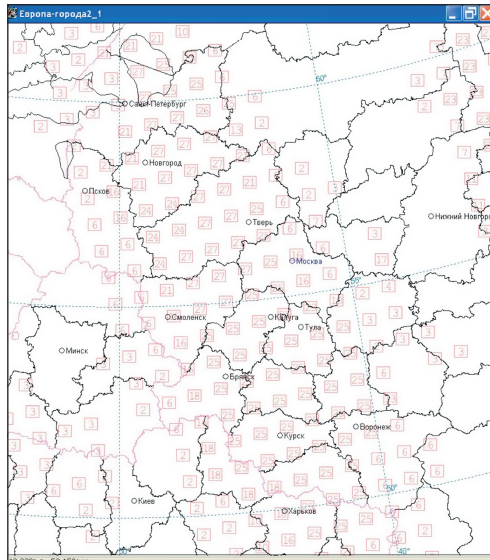


Рис. 5. Прогноз конвективных комплексов НЯ и ОЯ на 13 июля 2007 г. (дневное время) с заблаговременностью 12 ч.

на основе выходных данных региональной модели Гидрометцентра России. Особенностью комплекса является единая реализация технологий регионального прогнозирования и прогноза опасных и неблагоприятных конвективных явлений погоды, ежечасная дискретность расчета прогнозов конвективных НЯ и ОЯ, расчет прогностических карт явлений за период 12 ч, более широкий диапазон прогнозируемых конвективных явлений. На сегодняшний день это прогнозы:

- ливней в 3-х градациях: сильные (от 11 до 35 мм/12 ч), НЯ (от 35 до 50 мм/12 ч) и ОЯ (50 и более мм/12 ч);
- шквалов в градациях: НЯ (от 20 до 24 м/с), ОЯ (от 25 до 33 м/с), ураганной силы ветра 33 м/с и более);
- града в градациях: НЯ (диаметр менее 2 см) и ОЯ (диаметр 2 см и более);
- конвективных комплексов НЯ и ОЯ с детализацией типа явления (все конвективные явления данных градаций);
- максимального количества осадков;
- максимальной скорости ветра при шквале;
- прогноз шквалов любой градации комплексным методом.





Таблица 1

Типизация явлений		Цифры «кода»
Тип явления	Детализация типов	
Одно явление в градации НЯ	Град	1
	Шквал	2
	Ливень	3
Комплексы двух явлений в градации НЯ	Ливень и град	4
	Шквал и град	5
	Ливень и шквал	6
Комплекс трех явлений в градации НЯ	Ливень, град и шквал	7
Одно явление в градации ОЯ	Град	8
	Шквал	10
	Ливень	11
Комплексы двух явлений в градациях ОЯ и НЯ	Шквал ОЯ и град НЯ	12
	Ливень ОЯ и шквал НЯ	13
	Ливень ОЯ и град НЯ	14
	Шквал НЯ и град ОЯ	15
	Ливень НЯ и шквал ОЯ	16
	Ливень НЯ и шквал ОЯ	17
Комплексы двух явлений в градациях ОЯ	Ливень и шквал	18
	Шквал и град	19
	Ливень и град	20
Комплексы трех явлений: двух в градации НЯ и одного в градации ОЯ	Ливень и град в градации НЯ, шквал в градации ОЯ	21
	Ливень и шквал в градации НЯ, град в градации ОЯ	22
	Град и шквал в градации НЯ, ливень в градации ОЯ	23
Комплексы трех явлений: двух в градации ОЯ и одного в градации НЯ	Град и шквал в градации ОЯ, ливень в градации НЯ	24
	Ливень и шквал в градации ОЯ, град в градации НЯ	25
	Ливень и град в градации ОЯ, шквал в градации НЯ	26
Комплексы трех явлений в градации ОЯ	Ливень, град и шквал в градации ОЯ	27





Программный комплекс находится в режиме совершенствования, как за счет развития методов прогнозирования опасных конвективных явлений, так и за счет усовершенствования региональной модели (параметризации физических процессов, увеличения пространственного разрешения модели). Таким образом, в последнее десятилетие разработан целый комплекс методов прогноза опасных явлений, охватывающий все явления конвективного характера. Методы постоянно совершенствуются и базируются на региональной модели с ежечасной дискретностью прогноза. Уточнять прогнозы с меньшей (несколько часов) заблаговременностью рекомендуется на основе использования радиолокационных и спутниковых данных, а также детального анализа текущих изменений синоптической ситуации.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Алексеева А.А.* Летние конвективные явления // Монография «Гидрометеорологические опасности». Тематический том. / Под ред. Г.С. Голицына. А.А. Васильева. М.: Издательская фирма «КРУК», 2001. С. 127—159.
2. *Акулиничева А.А.* Параметры дождей над районами Поволжья // Труды Гидрометцентра СССР, 1969, вып. 57. С. 113—118.
3. *Глушкова Н.И.* Исследование физико-статистических условий образования осадков // Труды Гидрометцентра СССР, 1985, вып. 266. С. 10—20.
4. *Васильев Е.В., Алексеева А.А., Песков Б.Е.* Условия возникновения и краткосрочный прогноз сильных шквалов // Метеорология и гидрология, 2009, № 1. С. 5—15.
5. *Песков Б.Е., Алексеева А.А., Никифорова А.Е.* Усовершенствование метода прогноза летних осадков // Метеорология и гидрология, 2008, № 10. С. 52—61.

