

## Развитие методов диагноза и прогноза летних шквалов и ливней с учетом спутниковых и наземных измерений

Б.Е. Песков<sup>1</sup>, Т.Г. Дмитриева<sup>1</sup>, М.В. Бухаров<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации,  
123242 Москва, Большой Предтеченский пер., 11/13.

E-mail: tdsin@rambler.ru;

<sup>2</sup> «Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «Планета»,  
123242, Москва, Б.Предтеченский пер., 7.

E-mail: bmv@planet.iitp.ru

На примере анализа по спутниковой и синоптической информации пяти случаев сильных шквалов и ливней уточнено влияние скорости ветра в средней тропосфере, влажности и географических условий. Получена формула диагноза и прогноза на 1 час силы шквала и количества осадков в ливне при грозе. Введена поправка на адвекцию температуры. Предложено дальнейшее уточнение автоматизированной методики с использованием спутниковой информации для определения зон отсутствия и невозможности особо сильных (катастрофических) шквалов по материалам 2010–11 гг.

**Ключевые слова:** спутниковая информация, температура излучающей поверхности, автоматизированный метод, шквалы, местные географические условия, кучево-дождевые облака, приземные данные.

### Введение

Повышение надежности штормовых предупреждений о возможности возникновения сильных летних шквалов в конкретных районах в ближайшие часы является одной из важных задач метеорологии. Основные проблемы, возникающие при ее решении, обусловлены недостаточной точностью выходных данных современных численных прогнозов, используемых для определения времени, места возникновения и силы шквала, а также редкостью обновления прогнозов (через 6 или 12 ч). Это приводит к необходимости синоптикам дополнительно анализировать фактические наземные и спутниковые наблюдения для уточнения возможности и места возникновения шквалов и сопутствующих ливней с учетом синоптических и географических признаков.

Исследования, проведенные в последние годы, позволили создать методику автоматизированной оценки максимальной скорости порывов ветра у земли по спутниковой информации (Бухаров и др., 2008) и показали необходимость ее уточнения при распознавании сильных ночных шквалов вблизи крупных водных объектов (Дмитриева и др., 2011). Разработаны методы уточнения результатов численных прогнозов при определении сильных ливней (Песков, Дмитриева, 2010) и сильных шквалов (Дмитриева, Песков, 2012).

Менее изученными оказались вопросы уточнения методов автоматизированного метеорологического диагноза информации с геостационарных спутников и численного прогноза шквалов со скоростями ветра до 28 м/с, которые наблюдались в 2011 г. на европейской территории России. Учитывая это, целью работы является анализ правильности диагноза и прогноза таких шквалов и сопутствующих им ливней и, при необходимости, обоснование алгоритмов коррекции, которые бы позволили повысить точность получаемых оценок.

Вначале кратко рассмотрим, каким образом синоптик может дополнительно проверять и уточнять диагностические и прогностические данные о силе ветра и количестве ливневых осадков при шквалах. Для этого воспользуемся соотношениями, полученными в результате проведенного анализа, которые являются дальнейшим развитием известных статистических взаимосвязей между метеорологическими параметрами и скоростью шквалов (Васильев и др., 2009).

## Соотношения для оценки силы шквалов и количества осадков при ливнях

**1. Оценка по спутниковым и прогностическим данным.** Рассмотрим ситуации, когда по спутниковым снимкам диагностируются кучево-дождевые облака с грозами при высоте верхней границы облаков не менее 13.5 км, а шквалы не распознаются. Если в таких районах существуют условия для местной приземной циркуляции, которая способна дополнительно активизировать конвективные процессы в атмосфере, то упрощенные выражения для оценки силы возможного шквала ( $V_{ш}$ ) и количества ливневых осадков ( $Q_{л}$ ) имеют вид:

$$V_{ш} \approx \Phi [0,1 (H_{в}, \text{ км})^2 + 0,02 (V_{500}, \text{ м/с})^2 ], \quad (1)$$

$$Q_{л} \approx \Phi [V_{ш} - 0,08 (V_{500}, \text{ м/с})^2 + 35], \quad (2)$$

где  $V_{500}$  – скорость ветра (м/с) на поверхности 500 гПа по прогнозу любой модели на об-считываемый момент,  $H_{в}$  – фактическая (по ИСЗ или МРЛ) высота (км) вершин кучево-до-ждевых облаков (Cb),  $\Phi \approx 1$  (показатель холодного фронта или квазистационарного фронта с волнами).

Если на этот момент времени имеется возможность дополнительно оценить контраст и адвекцию температуры на поверхности 850 гПа, то более точное выражение для показателя фронта  $\Phi$  имеет вид:

$$\Phi \approx 0,55 (0,003H_{в}^2 + 0,002 T_{850}^2 + 0,03 \Delta T^{\circ}\text{C}/600 \text{ км}) \times (1 - 0,1\Delta T^{\circ}\text{C}/6 \text{ ч}),$$

где  $\Delta T^{\circ}\text{C}/600 \text{ км} = [(\Delta T/\Delta x)^2 + (\Delta T/\Delta y)^2]^{0,5}$  – контраст температуры на поверхности 850 гПа,  $\Delta T^{\circ}\text{C}/6 \text{ ч} \approx -0,1(u\Delta T/\Delta x) + v\Delta T/\Delta y$  – адвекция температуры на поверхности 850 гПа,  $u, v$  м/с,  $\Delta x, \Delta y = 600 \text{ км}$ .

**2. Оценка по спутниковым и фактическим данным.** В случаях, когда кроме наиболее надежных данных о значениях  $H_{в}$  и  $V_{500}$ , имеются фактические значения приземной темпе-ратуры воздуха ( $T_3$ ), точки росы ( $T_{д3}$ ) и контраста ( $\Delta T_3^{\circ}\text{C}/300 \text{ км}$ ), который оказывается не меньше  $6^{\circ}\text{C}/300 \text{ км}$ , для оценки  $V_{ш}$  и  $Q_{л}$  справедливы выражения:

$$V_{ш}, \text{ м/с} \approx 0,15 (H_{в}, \text{ км})^2 + (V_{500}, \text{ м/с} - 20) + (T_{д3} - 18) + (T_3 - 30), \quad (3)$$

$$Q_{л}, \text{ мм} \approx 0,15 (H_{в}, \text{ км})^2 - (V_{500}, \text{ м/с} - 20) + (T_{д3} - 18) + (T_3 - 30). \quad (4)$$

Отметим, что вместо фактических значений  $\Delta T_3$ ,  $T_3$ ,  $T_{д3}$  допускается с меньшей точно-стью использование и их прогноза, полученного по моделям высокого пространственного разрешения ( $\leq 3 \text{ км}$ ), например (Вельтищев и др., 2011; Вильфанд и др., 2010).

**3. Оценка с учетом индекса гигротермодинамической неустойчивости.** Впервые вве-денный в работе (Песков, Дмитриева, 2010) индекс ( $I$ ) гигротермодинамической неустойчи-вости является комплексной характеристикой, используемой для прогноза сильных ливней:  $I = T_d + (T - T_{\min}) + (T - T_{\max}) - 2\Delta p/3 \text{ ч}$ , где  $T_{\min}$  и  $T_{\max}$  – минимальная и максимальная темпе-ратура в радиусе до 150 км от об-считываемой точки с  $T$ ,  $T_d$  (точкой росы) и  $\Delta p/3 \text{ ч}$  (измене-нием давления за 3 ч). Установленное влияние скорости переноса на поверхности 500 гПа, а также температуры воздуха у земли и ее дефицита позволяет следующим образом оценить силу шквала и количество осадков при ливне по величине уточненных для них значений индексов  $I_{ш}$  и  $I_{л}$  соответственно:

$$V_{ш}, \text{ м/с} \approx I_{ш} = I + (V_{500} - 20) + (T_d - 18) + (T - 30), \quad (5)$$

$$Q_{л}, \text{ мм} \approx I_{л} = I - (V_{500} - 20) + (T_d - 18) + (T - 30). \quad (6)$$

Согласно (5) и (6), справедливых при  $V_{500} > 10$  м/с, добавка к I тем больше, чем выше T и Td и чем больше  $V_{500}$  для шквала, и меньше  $V_{500}$  для ливня. Ветер сверху частично приносится ливнем к земле и быстрее переносит Cb, укорачивая ливень над пунктом.

Слабый ветер в тропосфере ( $V_{500} < 10$  м/с) препятствует развитию самого Cb (нет его небольшого наклона, из-за чего нисходящий поток в осадках препятствует усилению восходящего потока). В таких случаях формула расчета уточненного значения индекса Iш имеет вид:

$$Iш = I + 0,175 (V_{500} - 20) | V_{500} - 20 | + (Td - 18) + (T - 30). \quad (7)$$

Используя соотношения (1)–(7), рассмотрим, насколько точнее оказывается оценка скорости ветра при шквале и количества ливневых осадков в случаях со шквалами, зарегистрированными на европейской территории России в 2011 г.

### Анализ наблюдавшихся шквалов

Для анализа воспользуемся фактическими измерениями, численными прогнозами и оценками метеорологических условий по фрагментам карт, представленным на рис. 1 – рис. 5. Карты построены по результатам автоматизированной дешифровки спутниковых снимков в моменты, ближайšie к времени наблюдения шквалов.

12.07.11 (рис. 1) в регионе Санкт-Петербурга отмечены шквалы 12–23 м/с и ливни 10–45 мм. Автоматизировано диагностировались по методике (Бухаров и др., 2008) грозы со шквалом (рис. 1а), с порывами V до 27 м/с (рис. 1б, около s) при высоте (Hв) верхней границы кучево-дождевых облаков (Cb) до 14.5 км (рис. 1в), температуре (Тв) излучающей поверхности до  $-65^\circ$  (рис. 1г), фронтальном контрасте на поверхности 850 гПа ( $\Delta T_{850}$ ) до  $3^\circ\text{C}/100$  км (рис. 1д).

Более слабые шквалы объясняются, очевидно, не сильными ветрами в средней тропосфере (на поверхности 500 гПа  $V_{500} \approx 12$  м/с при оптимальной 15–20 м/с) и отрицательным, в основном, влиянием днем местных географических условий: относительно холодных низменных болот, озер и рек с небольшими теплыми возвышенностями и городом. Поправка к диагнозу до  $-4, -15$  м/с, но альтернативный диагноз отсутствия особо сильных шквалов ( $\geq 28$  м/с) оправдался полностью.

08.07.11 (рис. 2) в Московском регионе отмечены шквалы 13–25 м/с и ливни 24–54 мм. Автоматизировано правильно диагностировались на фронте: отсутствие особо сильных шквалов ( $\geq 28$  м/с), грозы, ливни, град с порывами ветра V до 10 м/с при высоте Cb (Hв) до 12 км, Тв  $-55, -58^\circ$  (рис. 2а, б). На рисунках видно приближение фронта к Москве (Ms).

Фактические порывы ветра 13–20 м/с, то есть  $V < 28$  м/с, как и их диагноз были связаны с  $Hв < 13.5$  км и с относительно слабыми тропосферными ветрами ( $V_{500} \approx 9$  м/с).

Шквал в одной точке 25 м/с объясняется, очевидно, резким контрастом T на фронте с волнами у земли и положительным влиянием днем местных географических условий: относительно теплых полей и большого городского агломерата с меньшими по площади холодными лесами, речками и их долинами. Поправка к диагнозу до  $+3, +15$  м/с.

17.07.11 (рис. 3) в малом числе точек был шквал 16–21 м/с, в одной точке (Верховье) на северо-востоке Орловской области — порыв ветра до 26 м/с при ливнях в этом регионе 20–58 мм. Автоматизировано правильно диагностировались на фронте шквалы, но не особо сильные,  $V \ll 28$  м/с (грозы со шквалами 10–15 м/с), ветры в средней тропосфере 13–16 м/с (слабее оптимальных). Локальный шквал 26 м/с связан, очевидно, с сильно способствующими географическими особенностями: прогретыми обширными полями лесостепных водоразделов одной из самых высоких частей Средне-Русской возвышенности. Поправка к диагнозу до  $+6, +16$  м/с. На рис. 3а, б, в для периода 19–21 ч мск показаны южнее Калуги (К) особо мощные облака Cb с Hв до 14.5 км, где Тв  $\approx -65^\circ\text{C}$  (белесое пятно) и местами гроза со шквалом.

В этот день между Средне-Русской и Смоленско-Московской возвышенностями (в Малоярославце) диагностировавшийся шквал 22 м/с не отмечен (поправка к диагнозу -12 м/с), хотя локальный ливень 66 мм здесь был в четком, строго круговом мезомасштабном конвективном комплексе (МКК), особенно высоким в центре.

28.07.11 (рис. 4) в Московском регионе были шквалы 18–25 м/с с ливнями 14–50 мм. Автоматизированно правильно диагностировались: отсутствие шквалов  $\geq 28$  м/с, фронтальные грозы в Сб с Нв лишь до 12.5 км, где  $T_v \approx -60^\circ$  (рис. 4а, б), слабые тропосферные ветры 3–6 м/с (на 9–17 м/с слабее оптимальных для особо сильного шквала). С этой скоростью смещалась к Москве (на рис. 4 обозначена Ms) из Калужской области (К) вся фронтальная полоса. Усилению шквалов способствовали отмеченные в п.2.2 местные условия и резкий рост к вечеру контрастности  $\Delta T$  на фронте у земли за счет холодных ливней за ним при Т перед ним  $33.5^\circ$ . Поправка к диагнозу до +8, +15 м/с.

25.05.11 (рис. 5) западнее Курска отмечен шквал 18 м/с при ожидаемых по моделям шквалах 23–32 м/с на контрастном холодном фронте (рис. 5а, западнее К). Автоматизированно диагностировались также шквалы 25–40 м/с на Украине (между Киевом и Курском на рис. 5б). Фронт здесь выражен в резком (до  $80^\circ$ ) повороте ветра у земли, тогда как его наклон к поверхности 850 гПа (рис. 5а) в 2 раза меньше оптимального. Через час, в 18 ч мск диагностируется резкое ослабление (до  $V 20$  м/с) шквалов (правый из рис. 5б восточнее Киева). Ослабление проявлялось в понижении высоты вершин Сб (соответствующем повышению их  $T_v$ ) и в сокращении площади с высокими Сб. Несмотря на способствующие географические условия (повышение местности к наветренной стороне Средне-Русской возвышенности), средняя тенденция к ослаблению проявлялась и позже в связи, очевидно, с подходом фронта к экстремально сухому воздуху с влажностью 10–23% при оптимальной 50%.

Основной вывод по отношению к шквалам, наряду с влиянием  $V$  ветра в средней тропосфере, касается влияния влажности и географических условий. В первом приближении оно таково: оценка по (Бухаров и др., 2008) в среднем меньше на  $\sim 10$  м/с в местности  $\geq 100$  км х 100 км высотой меньше средней по европейской территории России (без гор); оценка меньше на  $\sim 5$  м/с в такой же местности, но с локальными ( $\sim 50$  км х 50 км) возвышенностями; оценка больше на 5 м/с в местности со средней по территории высотой и больше на  $\sim 10$  м/с в местности выше средней.

Рассмотрим статистику по всем ситуациям. На 90 % территории наблюдались неопасные шквалы ( $\leq 22$  м/с) и локально шквалы 23–26 м/с (на грани опасных без существенного ущерба). В таблице 1 приведены оценки их прогнозов.

Таблица 1. Оценка прогноза  $V_{ш}$  неопасных шквалов ( $\leq 22$  м/с) на 90% территории и локальных  $V_{max}$  от 23 до 26 м/с

Относительное количество правильных прогнозов $V_{ш} \leq 22$ м/с, %	По методике (Бухаров и др., 2008)	По движению центра МКК	По формуле (2)	По Иш (7)	По численным моделям	По минимуму (max)	
						(Бухаров и др., 2008) и Иш	(Бухаров и др., 2008) и модели
	67	67	50	83	67	100	83
Средняя абсолютная ошибка, $V_{max}$ , м/с	9,3	7,3	6,5	3,0	4,7	(4,8)	(5,7)
Средняя квадратическая ошибка, м/с	10,2	8,8	9,2	3,2	5,2	(5,4)	(6,2)
$(V_{max}-V_{ш})_{cp}$	2,7	4,0	4,2	1,4	2,3	(1,8)	(1,0)



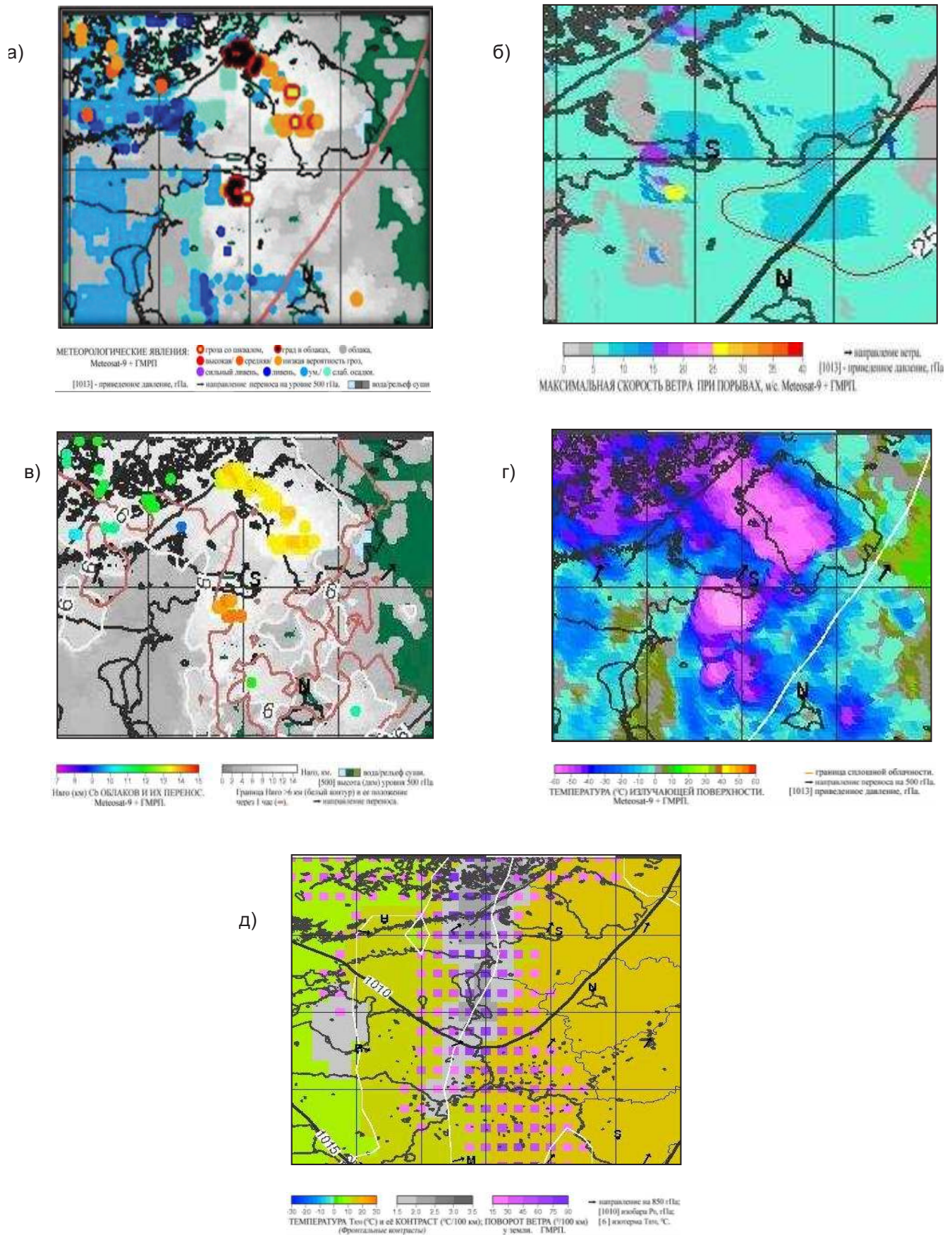


Рис. 1. Фрагменты карт метеорологических явлений (а), максимальной скорости ветра у земли (б), высоты верхней границы облаков (в), радиационной температуры (г) и фронтальных контрастов на поверхности 850 гПа (д) на 15 ч мск 12.07.11 г.

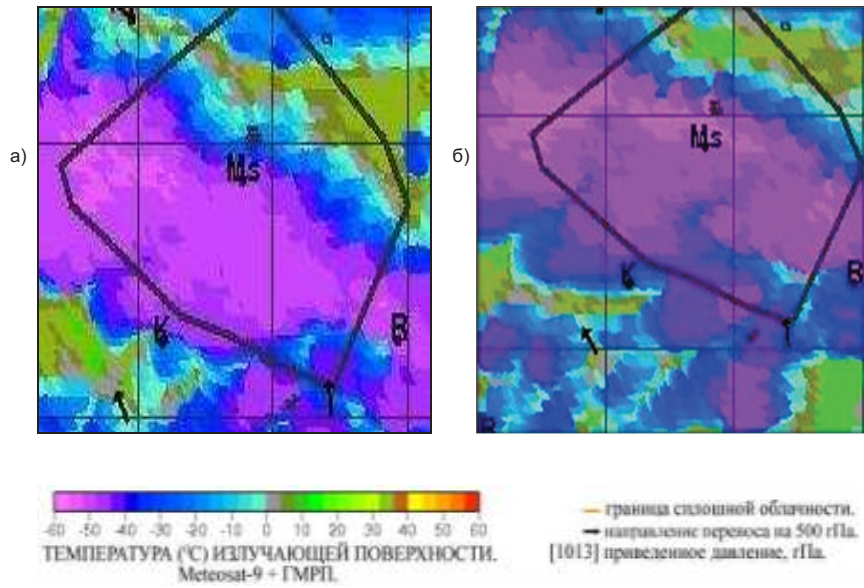


Рис. 2. Фрагменты карт радиационной температуры 8.07.11 в 17 ч 30 мин (а) и в 18 ч 30 мин мск (б)

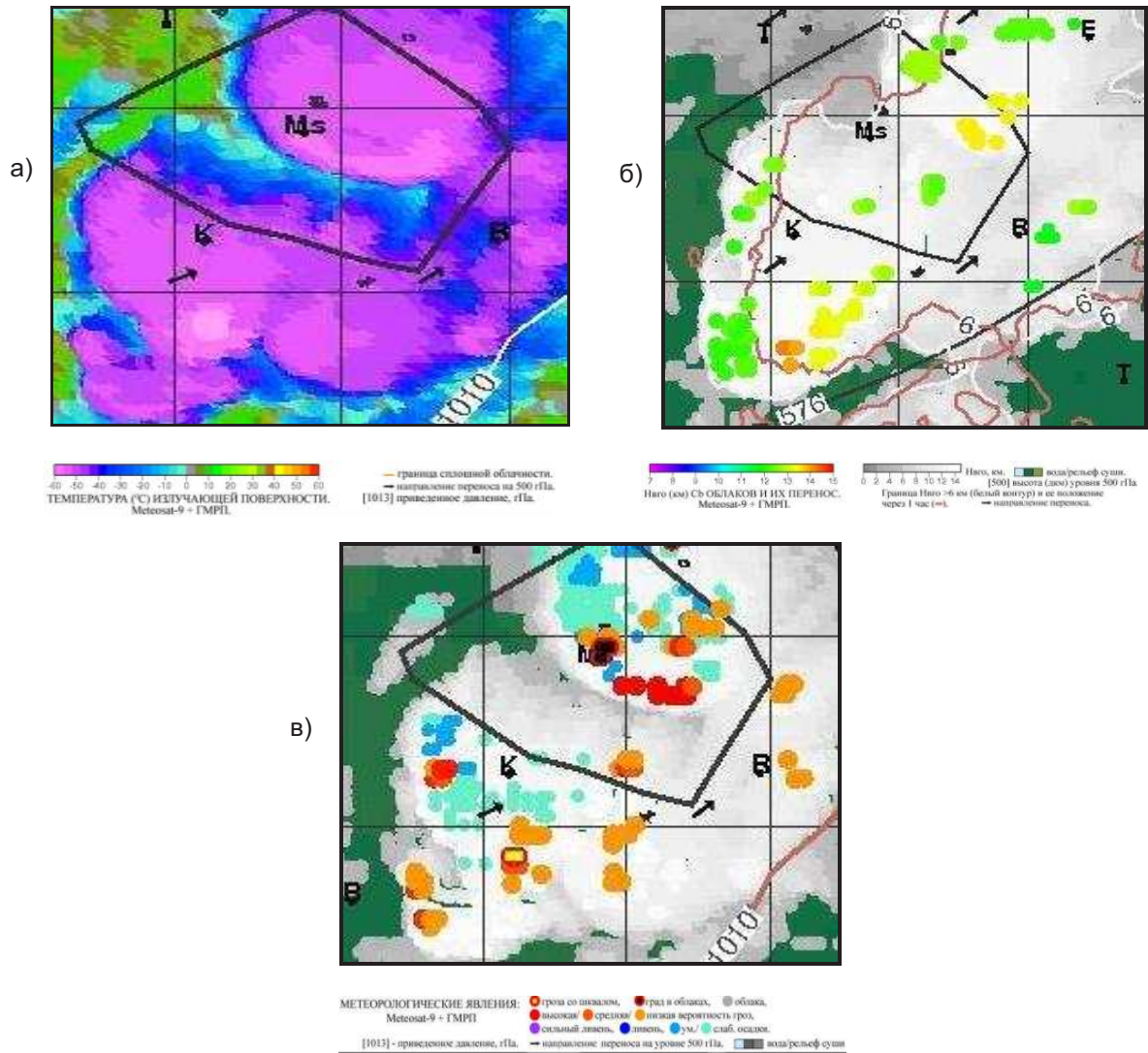


Рис. 3. Фрагменты карт радиационной температуры (а), высоты верхней границы кучево-дождевых облаков (б) и метеорологических явлений (в) 17.07.11 г. Спутниковая съемка проведена в 19 ч 45 мин (а, в) и 20 ч 45 мин мск (б)



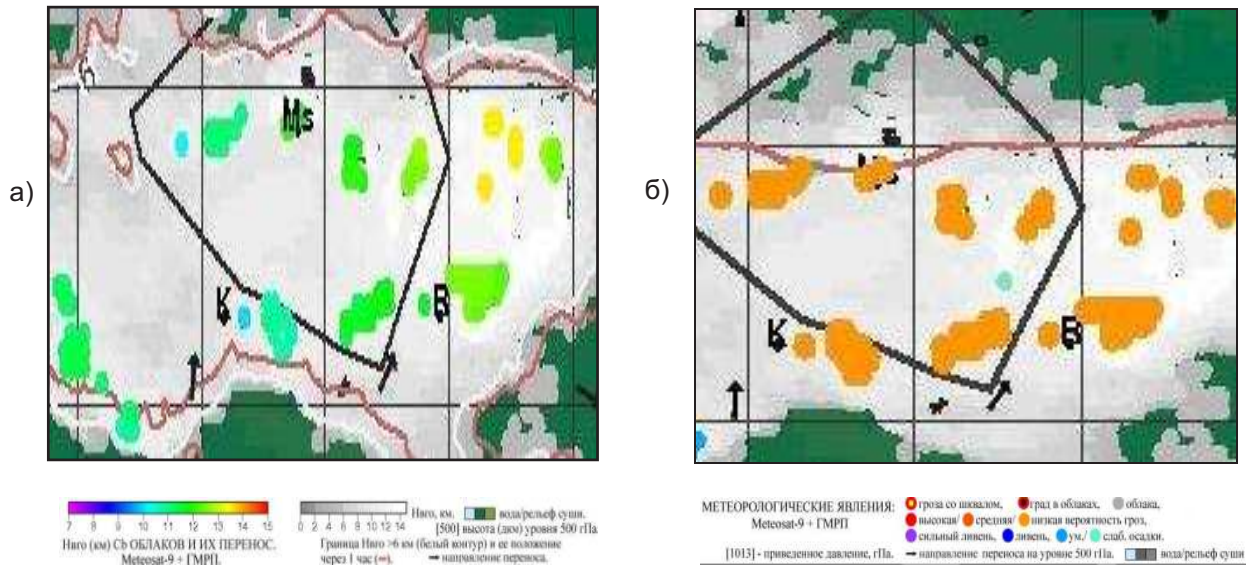


Рис. 4. Фрагменты карт высоты верхней границы кучево-дождевых облаков (а) и метеорологических явлений (б) 28.07.11 в 22 ч 45 мин мск

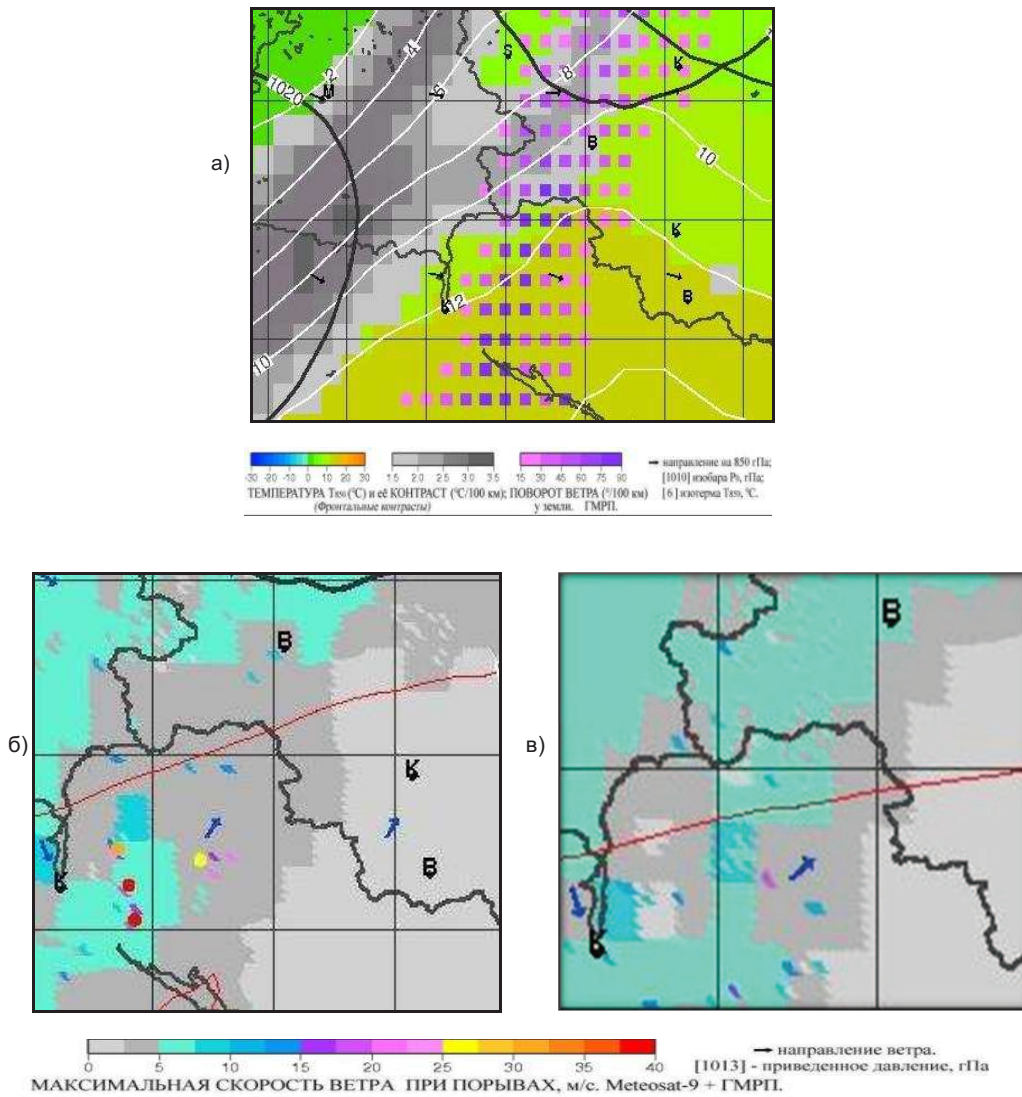


Рис. 5. Фрагменты карт фронтальных контрастов на поверхности 850 гПа (а) и максимальной скорости ветра при порывах у земли (б, в) 25.05.11 г. в 17 (а, б) и 18 ч мск (в)

Из данных, представленных в таблице 1, видно, что % правильных прогнозов неопасных шквалов  $V_{ш} \leq 22$  м/с на 90% территории наиболее высок (83%) с использованием соответствующего  $I_{ш} \leq 22$  м/с и повышается до 100% при прогнозе  $V_{ш} \leq 22$  м/с и методикой (Бухаров и др., 2008). До 83% повышается качество этих прогнозов при использовании (Бухаров и др., 2008) в добавление к моделям.

Наименьшие ошибки прогноза точечных шквалов  $V_{max}$  23–26 м/с возникают при использовании  $I_{ш}$  (3 м/с) и моделей (~ 5 м/с). Методика (Бухаров и др., 2008) помогает повышению качества альтернативного прогноза этих шквалов, если ожидать их при  $I_{ш} \geq 21$  или  $V_{ш}$  по моделям  $\geq 18$  м/с, а также если хотя бы  $V_{ш}$  по (Бухаров и др., 2008)  $\geq 27$  м/с. Все 5 показателей оправданности и предупрежденности при этом приближаются к 100%. Они выше по  $I_{ш}$  по сравнению с моделями, хотя заблаговременность на 5–7 часов меньше.

По последней строчке таблицы 1 видно, что средняя поправка к прогнозам точечного  $V_{ш}$  наименьшая для  $I_{ш}$  (всего 1.4 м/с), для моделей (2.3 м/с) и для методики (Бухаров и др., 2008) – 2.7 м/с. Это означает, что в среднем физические, географические, а также синоптические (ветер и влажность) условия учитываются этими средствами верно. Но в отдельные дни и в мелких, но существенно неоднородных географических ареалах ошибки существенны. Постоянно положительная в среднем поправка означает недоучет способствующих точечным шквалам условий, в основном, наветренных сторон возвышенностей, сухих мезомасштабных возвышений среди болот, крупных городских агломератов и др. Минимальная поправка (1,0 м/с) при совместном использовании (Бухаров и др., 2008) и моделей (последние столбец и строчка таблицы 1) говорит о наибольшей физичности такого сочетания в среднем.

## Заключение

Автоматизированная методика (Бухаров и др., 2008) с использованием спутниковой информации полезна по многим аспектам определения невозможности особо сильных шквалов и поддается дальнейшему уточнению на основе результатов, полученных в данной работе.

Заблаговременность прогноза шквалов повышается на 1–2 часа при использовании фактических текущих приземных данных, особенно температуры точки росы  $\geq 16$ – $18^\circ$ , в меньшей степени контрастов температуры воздуха и тенденции давления с учетом их перемещения.

Ветер на поверхности 500 гПа, спрогнозированный по любой модели, влияет более резко, чем учитывалось ранее.

Из географических условий наиболее просто учитывается соотношение высоты местности со средней высотой по Европейской территории России.

При слабом тропосферном ветре шквалы слабеют, ливни движутся медленно, сильнее понижая локально температуру, повышая ее горизонтальный контраст и усиливая точечно шквал.

Недостаток влаги для особо сильных шквалов наиболее просто и оптимально учитывается по фактической температуре точки росы у земли  $T_d < 16^\circ\text{C}$ , недостаток комплекса условий – по гигротермодинамическому индексу  $I_{ш}$  и сочетанию его и модельных прогнозов с автоматизированной методикой (Бухаров и др., 2008).

Шквалы с большим ущербом, т.е.  $V$  порывов  $> 27$ – $28$  м/с, кроме формулы (1), определяются по фактической  $T_{d_3} \geq 16^\circ$ , если одновременно  $V_{ш}^c \geq 28$  м/с по модели Cosmo 2.2 км (Вильфанд и др., 2010) и  $\Delta T_{850} > 2^\circ\text{C}/300$  км ( $T_{d_3} \geq 18^\circ$  в менее способствующих географических условиях, что выражается как  $V_{ш} = V_{ш}^c \sqrt[3]{T_{d_3} - 16} \sqrt[3]{T_{d_3} - 16}$ ). Вместо  $T_{d_3}$  с меньшей заблаговременностью используется  $H_B > 14$ – $14.5$  км при  $V_{500} > 15$ – $17$  м/с.



## Литература

1. Бухаров М.В., Лосев В.М., Песков Б.Е. Автоматизированная оценка максимальной скорости порывов ветра у земли с учетом информации геостационарного спутника // Метеорология и гидрология. 2008. № 12. С. 5–14.
2. Васильев Е.В., Алексеева А.А., Песков Б.Е. Условия возникновения и краткосрочный прогноз сильных шквалов // Метеорология и гидрология, 2008. № 1. С. 5–15.
3. Вельтищев Н.Ф., Жупанов В.Д., Павлюков Ю.Б. Краткосрочный прогноз сильных осадков и ветра с помощью разрешающих конвекцию моделей WRF // Метеорология и гидрология, 2011. № 1. С. 5–18.
4. 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. 5–20.
5. Дмитриева Т.Г., Бухаров М.В., Песков Б.Е. Анализ условий возникновения сильных шквалов по спутниковой и прогностической информации // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 3. С. 244–250.
6. Дмитриева Т.Г., Песков Б.Е. Численный прогноз с мезосиноптическим уточнением особо сильных шквалов на примерах 13.06.10 г. и 29.07.10 г. // Метеорология и гидрология. 2012. (В печати).
7. Песков Б.Е., Дмитриева Т.Г. Уточнение мезомасштабного численного прогноза сильных ливней // Метеорология и гидрология. 2010. № 9. С. 5–16.

## Development of methods of diagnosis and prediction of summer squalls and showers on the base of satellite and ground-based measurements

**B. E. Peskov<sup>1</sup>, T.G. Dmitrieva<sup>1</sup>, M.V. Bukharov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> State Research Center on Hydrometeorology  
123242 Moscow, 9/13, Bolshoy Predtechensky Per.  
E-mail: tdsin@rambler.ru;

<sup>2</sup> State Research Center on Space Hydrometeorology PLANETA,  
123242 Moscow, 7, Bolshoy Predtechensky Per.  
E-mail: bmv@planet.iitp.ru

Influence of middle troposphere wind, humidity and geographical conditions is studied more exactly with example satellite and synoptic information analyses of 5 severe squall and showers cases. Formula of diagnosis and one hour forecast of squall force and precipitation quantity in thunderstorm shower is elaborated. Temperature advection correction is introduced more exactly automated methodology for determining absent and possibility of particularly dangerous (catastrophic) squalls zones.

**Keywords:** squall, wind speed, cumulonimbus clouds, satellite information, recognizing of squall, thunderstorm, atmospheric front, frontal wave.