

УДК 551.509

## **Особенности условий возникновения активной конвекции с сильными шквалами**

*А.А. Алексеева*

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр  
Российской Федерации, г. Москва, Россия  
alekseeva@mecom.ru*

Представлены результаты количественной оценки влияния на величину скорости сильных шквалов максимальной конвективной скорости, лапласиана приземного давления и ветра средней и нижней тропосферы. Исследование показало, что наиболее информативными предикторами для прогноза шквалов являются максимальная конвективная скорость и лапласиан приземного давления. Лапласиан приземного давления позволяет выделять зону полного отсутствия шквалов. Найдены критерии рассматриваемых параметров атмосферы, благоприятные для возникновения сильных шквалов, дано их обоснование. Подтверждена заметная роль скорости горизонтального переноса в средней тропосфере в возникновении сильных шквалов. Показано ее влияние на увеличение (примерно на 4–4,5 м/с) максимальной скорости ветра при шквале, хотя ее вклад примерно в 4 раза меньше вклада от вертикальных конвективных скоростей и в 2–2,5 раза меньше вклада от лапласиана приземного давления.

*Ключевые слова:* шквал, влияние параметров атмосферы на скорость ветра, максимальная конвективная скорость, лапласиан приземного давления, скорость горизонтального переноса в средней тропосфере

## **Specific features of the conditions of occurrence of active convection accompanied by severe squalls**

*A.A. Alekseeva*

*Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia  
alekseeva@mecom.ru*

The results of quantification of the influence of the maximum convective velocity, surface air pressure Laplacian, and wind in the middle and lower troposphere on the velocity of severe squalls are presented. The study showed that the most informative predictors for the squall prediction are the maximum convective velocity and surface air pressure Laplacian. The surface air pressure Laplacian allows identifying a zone of the complete absence of squalls. The criteria of the considered atmospheric parameters favorable for the occurrence of severe squalls are found and substantiated. A significant role of the velocity of horizontal transport in the middle troposphere in the occurrence of severe squalls is corroborated. Its influence on the increase (by ~4-4.5 m/s) in the maximum wind speed during a squall is demonstrated, although its contribution is about four times smaller than that of vertical convective velocities and is 2-2.5 times smaller than that of the surface air pressure Laplacian.

*Keywords:* squall, influence of atmospheric parameters on wind speed, maximum convective velocity, Laplacian of surface air pressure, horizontal transport velocity in the middle troposphere

### Введение

Шквалы, достигая градации опасных явлений погоды (ОЯ), когда скорость ветра достигает 25 м/с и более, нередко наносят огромный ущерб, а иногда приводят к гибели людей. К аналогичным последствиям могут привести шквалы, наблюдающиеся в совокупности с другими опасными конвективными явлениями (град, ливень), при этом достигнув по интенсивности лишь 80 % от скорости ветра градации ОЯ (20 м/с и более).

До настоящего времени нет надежных методов прогноза, позволяющих с высоким качеством прогнозировать такие явления. Не решена данная проблема и за рубежом, несмотря на значительные успехи в развитии мезомасштабных моделей, разрешение которых по горизонтали достигает 3–0,5 км. Поэтому исследования, посвященные изучению особенностей возникновения сильных шквалов, их диагнозу и прогнозу, в том числе и представляемые в данной статье, актуальны до настоящего времени. Кроме того, они практически значимы, так как позволяют совершенствовать подходы к диагнозу и прогнозу шквалов, что позволит с достаточным запасом по времени принять превентивные меры защиты.

Цель данного исследования – количественная оценка влияния на величину скорости сильных шквалов таких параметров атмосферы, как максимальная конвективная скорость, лапласиан приземного давления и ветер средней и нижней тропосферы.

Анализируемая выборка состоит из 58 случаев, 29 случаев из которых со шквалами (3, 10, 12 и 4 случаев со скоростью, соответственно, в градациях 15–19; 20–24; 25–29 и  $\geq 30$  м/с), фактически зарегистрированных в летний сезон метеостанциями России. Сведения о них выбраны из журнала донесений об опасных явлениях погоды. Остальные 29 случаев – без шквалов. Причем такое количество случаев без явления взято для того, чтобы статистическая значимость ситуаций с явлением и без явления была одинаковой. В качестве случаев без шквала выбирались только такие дни и районы, которые существенно отличались от дней и районов с вероятными шквалами. Использованный в данном исследовании подход формирования выборки для столь редкого природного явления, как шквал, не исключает и другого соотношения числа случаев с наличием и отсутствием исследуемого явления. Данная выборка охватывает территорию возникновения шквалов по долготе 25–60° в. д. и широте 44–58° с. ш. Параметры атмосферы рассчитаны на основе выходных данных региональной гидродинамической модели прогноза ФГБУ «Гидрометцентр России» [8].

**Количественная оценка влияния максимальной конвективной скорости, лапласиана приземного давления и характеристик ветра на скорость ветра при сильных шквалах**

В мощных кучево-дождевых облаках (Cb), с которыми связано образование таких опасных явлений, как шквалы, существуют интенсивные вертикальные конвективные потоки, которые переносят большое количество влаги в верхние слои, где она накапливается. Зона аккумуляция обычно располагается чуть выше середины облака, на высоте 5–7 км.

Скопившаяся в зоне аккумуляции огромная масса влаги (тыс. тонн) в виде снега, переохлажденных капель и града поддерживается восходящими потоками до тех пор, пока скорость падения капель меньше или равна скорости восходящих потоков. Когда облако достигает своего максимального развития, скорость вертикальных потоков уменьшается и уже не может удерживать влагу на высотах – формируется мощный нисходящий поток. Поскольку в нисходящем потоке воздух насыщен, его температура при опускании повышается по влажноадиабатическому закону, т. е. медленнее, чем в окружающем воздухе, в котором температурный градиент обычно больше влажноадиабатического. Следовательно, опускаясь, он будет все более охлажденным относительно окружающего воздуха, и скорость устремления вниз будет возрастать.

Чем больше путь нисходящего потока в зоне осадков в конвективном облаке и под ним, и чем неустойчивее стратификация окружающего воздуха, тем больше скорость опускания потока у Земли. Достигнув поверхности земли, холодный воздух растекается в горизонтальном направлении, вызывая внезапное и резкое усиление ветра и изменение его направления, т. е. шквал.

Более сильные шквалы, образующиеся на холодных фронтах, возникают в результате опускания воздуха, складывающегося помимо опускания конвективного масштаба, с более интенсивным мезомасштабным опусканием вала холодного воздуха, обгоняющего линию фронта у Земли. Этот «обвал» вторгающегося холодного воздуха и формирует специфические формы облачности – «шкваловый ворот». Возникающие на фронтах линии шквалов значительно длиннее, чем при шквалах внутримассовых процессов, так как масштаб перетекающих через фронт холодных потоков существенно больше масштаба конвективной ячейки.

Известно, что энергия шквала создается за счет кинетической энергии не только нисходящего потока конвективного масштаба, но и энергии горизонтального переноса слоя тропосферы, расположенного ниже уровня зарождения нисходящего потока. Частицы воздуха в нисходящем потоке под действием ветра приобретают и горизонтальную скорость движения. Поэтому чем сильнее ветер в средних и нижних слоях тропосферы, тем скорость шквала будет больше «прирастать»

к скорости растекания у поверхности Земли, т. е. скорость ветра при шквале увеличивается. При малой мощности кучево-дождевых облаков (Cb) вклад энергии неустойчивости за счет конвекции в формирование шкала незначителен и сильный шквал возможен только в результате переноса нисходящим потоком достаточно большого количества горизонтального движения нижней половины тропосферы.

В рамках исследования проведена, как уже указывалось выше, количественная оценка влияния на величину скорости сильных шквалов таких параметров атмосферы, как максимальная конвективная скорость  $W_m$ , м/с, лапласиан приземного давления  $\Delta p$ , гПа/(600км)<sup>2</sup>, и ветер средней и нижней тропосферы.

Ветер в средней и нижней тропосфере учитывается во многих известных методах прогноза шквалов (например, [6, 7, 9, 10, 12, 13] и др.), ставших «классическими», но до сих пор не ясно, какой подход лучше.

В рамках данного исследования рассматриваются ветровые параметры атмосферы, увеличивающие энергетику шквалов. Учитывалось влияние на возникновение сильных шквалов таких ветровых характеристик атмосферы, как модуль средней векторной скорости ветра в слое 700–500 гПа ( $V_{V75}$ ), средняя скалярная скорость ветра в слое 700–500 гПа ( $V_{S75}$ ) и модуль скорости ветра на поверхности 850 гПа ( $V_{85}$ ).

Согласно исследованиям Б.Е. Пескова [9, 10], критерии аналогичных ветровых параметров, благоприятных для возникновения шквалов, получены с учетом деления летнего периода на подпериоды: **весна** до 20 мая, **основной период** с 20 мая по 10 августа, **конец лета – осень** с 10 августа; **поздняя осень** после 10 сентября. Критериальные значения параметров: для весны – ( $V_{V75} = 11$ ,  $V_{S75} = 17$ ,  $V_{85} = 11$ ); для основного периода – ( $V_{V75} = 7$ ,  $V_{S75} = 12,5$ ,  $V_{85} = 7$ ); для конца лета – ( $V_{V75} = 9$ ,  $V_{S75} = 15$ ,  $V_{85} = 9$ ); для поздней осени – ( $V_{V75} = 11$ ,  $V_{S75} = 17$ ,  $V_{85} = 11$ ).

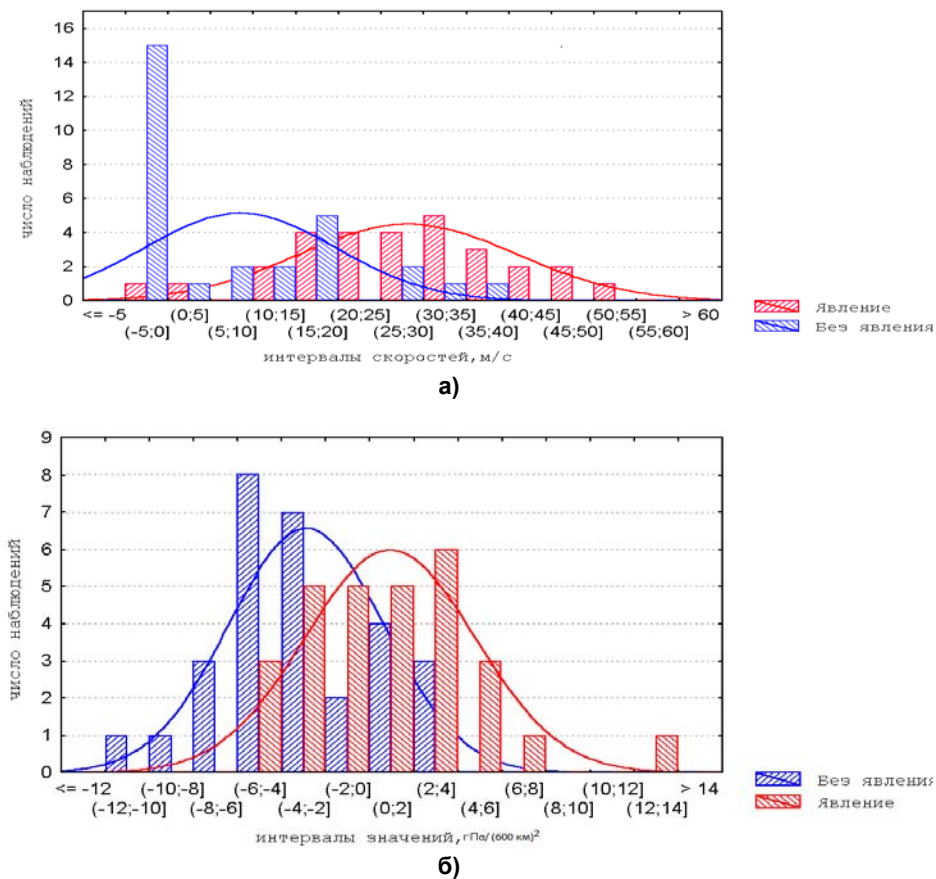
Рассчитывались следующие статистические характеристики параметров атмосферы: среднее; медиана; стандартное отклонение; минимальное значение; максимальное значение; 25 % и 75 % точки. Также было рассчитано расстояние Махаланобиса, позволяющее оценить информативность каждого предиктора. Построены гистограммы распределения.

На основе результатов анализа материалов статистической обработки получены выводы. Получено, что самым информативным предиктором для прогноза шквалов, из рассмотренных характеристик ветра, является модуль средней векторной скорости ветра в слое 700–500 гПа (расстояние Махаланобиса  $Ma = 0,39$ ). Учет этого параметра позволяет оценить степень перемешивания воздуха в облаке. Сильное перемешивание выравнивает не только скорость ветра, но и его направление. При слабых ветрах в случае отсутствия шквалов направление ветра сильно меняется по слоям, и модуль среднего вектора ветра меньше, чем в случаях со шквалами. Расстояние Махаланобиса средней скалярной скорости ветра в слое 700–500 гПа чуть меньше ( $Ma = 0,37$ ). Наименьшее же

значение  $Ma$  оказалось у скорости ветра на поверхности 850 гПа ( $Ma = 0,3$ ).

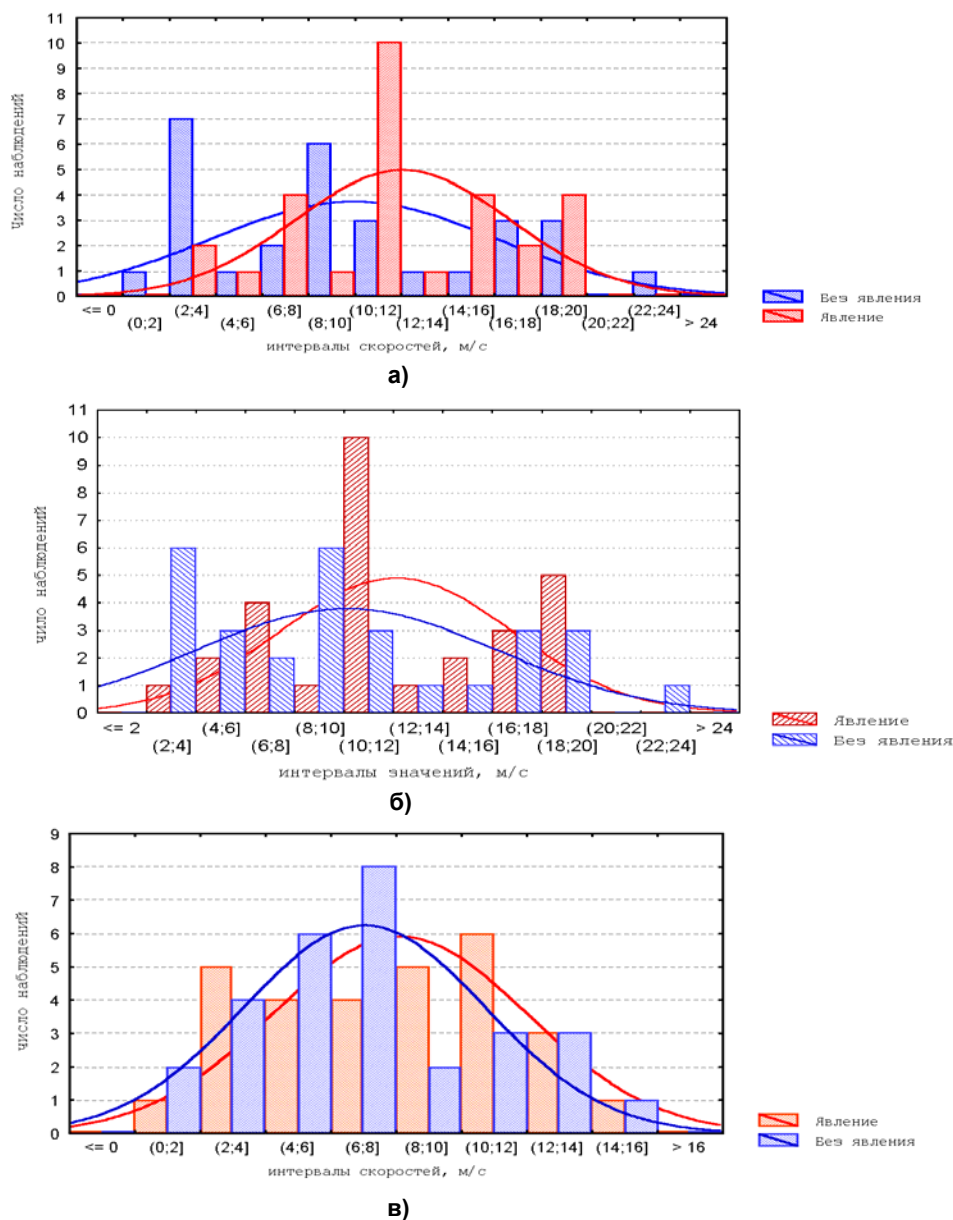
Относительно других рассмотренных параметров атмосферы, как и следовало ожидать, наибольшее расстояние Махаланобиса оказалось для максимальной конвективной скорости ( $Ma = 1,6$ ), затем – для лапласиана приземного давления ( $Ma = 1,0$ ). Полученные результаты оценки информативности предикторов подтверждают рассмотренную и представленную ниже их визуальную оценку на основе графического и табличного материала.

Гистограммы распределения параметров атмосферы для случаев со шквалами и без шквалов представлены на рис. 1 и 2.



**Рис. 1.** Гистограммы и их огибающие (в случаях со шквалами и без шквалов) для распределений вертикальной конвективной скорости (а) и лапласиана приземного давления (б).

**Fig. 1.** The histograms and their envelopes (for the cases with and without squalls) for the distributions of vertical convective velocity (a) and surface air pressure Laplacian (б).



**Рис. 2.** Гистограммы и их огибающие (в случаях со шквалами и без шквалов) для распределений модуля средней векторной скорости в слое 700–500 гПа (а), средней скалярной скорости в слое 700–500 гПа (б) и модуля скорости ветра на поверхности 850 гПа (в).

**Fig. 2.** The histograms and their envelopes (for the cases with and without squalls) for the distributions of the absolute value of mean vector velocity in the layer of 700–500 hPa (а), mean scalar velocity in the layer of 700–500 hPa (б), and the absolute value of wind speed at the level of 850 hPa (в).

Анализ гистограмм распределения показал следующее.

- Максимальная конвективная скорость  $W_m$  является наиболее информативным предиктором при прогнозе шквалов по сравнению с другими рассмотренными параметрами атмосферы (лапласианом приземного давления и ветровыми характеристиками средней и нижней тропосферы), поскольку для  $W_m$  имеет место наибольшее расхождение кривых распределения для случаев с явлением и без явления и, как указывалось выше, наибольшее значение расстояния Махаланобиса.

- Лапласиан приземного давления, отражающий циклоничность у Земли и, как следствие, конвергенцию горизонтальных приземных потоков воздуха, необходимых для обеспечения подъема массы достаточно влажного и теплого воздуха восходящими потоками (что следует из уравнения неразрывности), является вторым (после максимальной конвективной скорости) по важности предиктором при прогнозе шквалов. Этот параметр важен еще и потому, что позволяет выделять зону полного отсутствия шквалов. Наглядно отмечается сдвиг кривой распределения для случаев со шквалами от кривой их отсутствия.

Большее количество случаев без шквалов находится в диапазоне значений лапласиана приземного давления  $-6 - -4 \text{ гПа}/(600 \text{ км})^2$ , для случаев со шквалами – в диапазоне  $0 - 4 \text{ гПа}/(600 \text{ км})^2$ . Это вполне объяснимо, поскольку при лапласиане  $\gg 5 \text{ гПа}/(600 \text{ км})^2$  чаще всего образуется много слоистой облачности, что приводит к уменьшению максимальной температуры и, как следствие этого, уменьшению энергии неустойчивости и снижению конвективных скоростей. При лапласиане  $\ll -10 \text{ гПа}/(600 \text{ км})^2$  шквалы не развиваются и с большой вероятностью можно прогнозировать их отсутствие. Этот вывод подтвержден в исследованиях [4, 5], где лапласиан приземного давления рассчитывался на выборке более 120 тыс. случаев. Причем показано, что диапазон значений лапласиана приземного давления закономерно сужается по мере усиления шквалов от 15–19 до 20–24 м/с и более 25 м/с.

Появление шквалов при небольших отрицательных значениях лапласиана приземного давления объясняется тем, что при небольшой антициклоничности поля давления иногда образуются небольшие ложбины, которые можно заметить на приземных картах погоды при проведении изобар через 1 гПа. Наиболее благоприятная синоптическая ситуация создается при значениях лапласиана приземного давления в диапазоне  $1 - 3 \text{ гПа}/(600 \text{ км})^2$ , поскольку 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  $4 \text{ гПа}/(600 \text{ км})^2$  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 (максимальной конвективной скорости и лапласиана приземного

давления) для прогноза шквалов в большей степени уменьшает недостатки использования их по отдельности.

- При сравнении рассмотренных в исследовании ветровых характеристик очевидно, что скалярная и векторная скорости в слое 700–500 гПа, рассчитанные на основе региональной гидродинамической модели, более информативны при прогнозе шквалов, чем скорость ветра на поверхности 850 гПа (больше расхождение кривых распределения).

- В отличие от других исследуемых предикторов, таких как максимальная конвективная скорость и лапласиан приземного давления, по ветровым предикторам невозможно выделить зоны со 100%-ной вероятностью наличия или отсутствия шквалов, т. е. эти предикторы выступают не как основные, а скорее как дополнительные, уточняющие или выделяющие шквалы с большими скоростями ветра из общего числа шквалов.

- Четко выделяется максимум повторяемости шквалов в случае рассмотрения средней скалярной и векторной скоростей ветра в слое 700–500 гПа при значениях, равных 10–12 м/с, в то время как на графике, где предиктором является скорость ветра на поверхности 850 гПа, такого максимума не отмечается.

- Роль ветра заключается в переносе в кучево-дождевых облаках сверху вниз большого количества горизонтального движения и тем самым в увеличении «силы» шквала, а также в увеличении приземной конвергенции ветров у Земли, росте  $W_m$  и резонансного раскручивания циркуляции. Последнее утверждение имеет место даже при первоначально слабых ветрах ( $> 2\text{--}4$  м/с в прогнозе,  $> 7$  м/с в диагнозе [9, 10]), усиливающихся затем на появляющихся перед  $S_b$  псевдопотенциальных фронтах порывистости, или шкваловых воротах.

### Основные статистические характеристики

В табл. 1 видны различия в значениях средних, максимальных, минимальных и других статистических характеристик параметров атмосферы в случаях со шквалом и без них. Очевидна физичность каждого параметра. Например, для максимальной конвективной скорости ( $W_m$ ) среднее значение при шквалах равно 28,2 м/с.

В [4, 5] для шквалов на исследуемой выборке более чем в 120 тыс. случаев получено среднее значение  $W_m$ , равное 27,7 м/с. И в этих исследованиях максимальная конвективная скорость оказалась также наиболее информативным предиктором из рассмотренных 73 предикторов, критерий Фишера равен 347,7. Только при такой мощной восходящей струе ( $W_m = 28$  м/с) может накопиться достаточно влаги, которая затем, обрушиваясь вниз, создает мощные нисходящие движения. В то же время  $W_m = 8,5$  м/с недостаточна для этого, так как нисходящая струя гораздо слабее и не доходит до Земли.



**Таблица 1.** Результаты статистического анализа параметров атмосферы для случаев со шквалами и без шквалов**Table 1.** The results of the statistical analysis of atmospheric parameters for the cases with and without squalls

Параметры атмосферы	Значения параметров, соответствующие уровням распределений				
	мин.	25 %	средн.	75 %	макс.
<b>При наличии шквала</b>					
Максимальная конвективная скорость, м/с	0	19,60	28,18	38,00	54,80
Лапласиан приземного давления, гПа/(600 км) <sup>2</sup>	-5,20	-2,20	0,92	3,60	12,40
Модуль средней векторной скорости ветра в слое 700–500 гПа, м/с	3,80	9,60	12,06	15,80	19,90
Модуль средней скалярной скорости ветра в слое 700–500 гПа, м/с	3,90	9,60	12,11	16,20	19,90
Модуль скорости ветра на поверхности 850 гПа, м/с	1,80	4,80	8,11	10,60	16,00
<b>При отсутствии шквала</b>					
Максимальная конвективная скорость, м/с	0	0	8,48	15,60	37,40
Лапласиан приземного давления, гПа/(600 км) <sup>2</sup>	-10,40	-4,60	-2,88	-0,20	3,40
Модуль средней векторной скорости ветра в слое 700–500 гПа, м/с	1,20	3,90	9,96	14,80	22,20
Модуль средней скалярной скорости ветра в слое 700–500 гПа, м/с	2,20	4,40	10,10	14,90	22,20
Модуль скорости ветра на поверхности 850 гПа, м/с	1,20	4,40	7,03	9,20	14,70

Для лапласиана приземного давления среднее значение при шквале составляет  $0,9 \text{ гПа}/(600 \text{ км})^2$ , что оптимально для его возникновения. Без шквала среднее значение лапласиана равно  $-2,9 \text{ гПа}/(600 \text{ км})^2$ . Это еще раз подтверждает тот факт, что при дивергенции горизонтальных потоков нет достаточной «подпитки» для восходящих движений, а одной только вертикальной неустойчивости недостаточно для создания мощных запасов влаги в Св. Что же касается ветровых характеристик, то средние значения для них распределились следующим образом: для ветра в слое 700–500 гПа скорость 12 м/с обеспечивает шквалы, в то время как скорость 10 м/с является недостаточной; ветер на поверхности 850 гПа – 8 и 7 м/с соответственно. В [4, 5] подтверждена аналогичная значимость предикторов для прогноза шквалов. Так, для лапласиана приземного давления критерий Фишера равен 172,4, а для ветровых предикторов – от 22,1 до 33,4.

Скорее всего, малое различие в значениях ветровых параметров между классами явлений не столько показывает физику процесса, сколько отражает сглаживание региональной гидродинамической моделью прогностических значений ветра, уничтожающее важные мезоструи,

особенно в слое 925–850 гПа. Возможно, что к такому эффекту привел и известный факт незначительной разницы направлений ветра при предшквальной ситуации. Минимальное значение ветра в слое 700–500 гПа и на поверхности 850 гПа при шквалах составляет 3,8 и 1,8 м/с соответственно, что все же больше, чем при их отсутствии. Этот факт является очень важным, так как он еще раз подчеркивает, что какими бы ни были значения  $W_m$  и лапласиана приземного давления, шквал не будет развиваться при значениях скоростей ветра в тропосфере меньших, чем 3,8 м/с в слое 700–500 гПа и 1,8 м/с на поверхности 850 гПа, поскольку нет резонансного раскручивания мощных конвективных восходящих и нисходящих струй при недостаточной горизонтальной составляющей этой циркуляции.

• **25 % и 75 % точки.** Представляют интерес пределы предикторов, между которыми располагается половина случаев с явлением и без явления (25 % и 75 % точки). Видны существенные смещения основного количества случаев с явлением относительно случаев без явления. Для численных расчетов именно эти параметры являются оптимальными:  $W_m = 19,6–38$  м/с (т. е. при  $W_m \geq 19,6$  м/с прогноз шквала оправдан, а свыше 38 м/с (до 55 м/с) имеет оправдываемость 100 %); лапласиан приземного давления  $\Delta p$  от -2,2 до 3,6 гПа/(600 км)<sup>2</sup> (т. е. прогноз оптимален при  $\Delta p \geq -2,2$  и имеет оправдываемость 100 % при  $3,6 \leq \Delta p \leq 12,4$  для случаев с явлением);  $V_{v75}$  (модуль средней векторной скорости в слое 700–500 гПа) = 9,6–15,8 м/с (т. е. прогноз оптимален при  $V_{v75} \geq 9,6$  м/с; критерий для оправдываемости 100 % для случаев со шквалом выделить сложно, однако с оправдываемостью 100 % прогнозируется отсутствие шквалов при  $V_{v75} \leq 3,5$  м/с).

### Многомерная линейная дискриминантная функция

На основании анализа 29 случаев со шквалами (в основном со скоростью ветра более 20 м/с) и 29 случаев их отсутствия получена многомерная линейная дискриминантная функция, учитывающая следующие параметры:

$$B = f(W_m, \Delta p, V),$$

где  $W_m$  – максимальная конвективная скорость, м/с;  $\Delta p$  – лапласиан приземного давления, гПа/(600 км)<sup>2</sup>;  $V$  – характеристика ветра в тропосфере, в качестве которой может выступать или скорость ветра на поверхности 850 гПа, или средняя скалярная (векторная) скорость ветра в слое 700–500 гПа, как показано выше, нет особой разницы между ними.

При  $B \geq 20$  прогнозируется шквал со скоростью ветра  $\geq 20$  м/с, при  $B < 20$  прогнозируется отсутствие такого шквала.

В табл. 2 представлены коэффициенты множественной корреляции уравнений регрессии для прогноза скорости ветра при шквалах.

**Таблица 2.** Значения коэффициентов множественной корреляции между скоростью ветра при шквале и учитываемыми при прогнозе параметрами атмосферы

**Table 2.** The values of the coefficients of multiple correlation between wind speed during a squall and the atmospheric parameters considered to produce the forecast

Уравнение регрессии	R	RI
$Y = 0,34 W_m + 0,63 \Delta p + 5,16$	0,596	0,37
$Y = 0,21 V_{85} + 0,35 W_m + 0,56 \Delta p + 3,38$	0,60	0,35
$Y = 0,23 V_{S75} + 0,35 W_m + 0,51 \Delta p + 2,23$	0,61	0,37
$Y = 0,22 V_{V75} + 0,35 W_m + 0,51 \Delta p + 2,36$	0,61	0,36

*Примечание.*  $V_{V75}$  – модуль средней векторной скорости в слое 700–500 гПа;  $V_{S75}$  – средняя скалярная скорость в слое 700–500 гПа;  $W_m$  – максимальная конвективная скорость;  $\Delta p$  – лапласиан приземного давления; R – коэффициент множественной корреляции; RI – коэффициент детерминации, показывающий долю общего разброса (относительно выборочной переменной), которая объясняется построенной регрессией.

Из табл. 2 видно, что учет характеристик ветра в средней и нижней тропосфере практически не повышает коэффициент множественной корреляции, что, скорее всего, является следствием того, что данные предикторы, прогнозируемые используемой гидродинамической моделью, не столько позволяют улучшить качество метода прогноза явления, сколько являются важными при выделении сильных шквалов (ОЯ) со скоростями ветра  $\geq 25$  м/с из числа всех шквалов (градации неблагоприятных явлений НЯ).

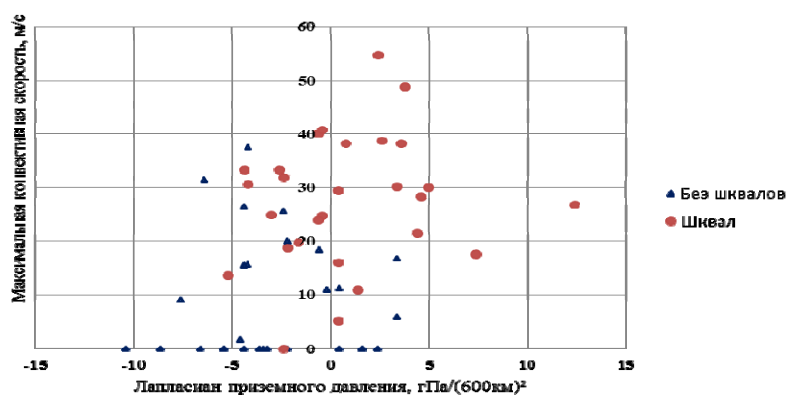
Зная коэффициенты регрессии для каждого члена уравнения регрессии и диапазон изменения значений выбранного предиктора ( $W_m$ : 0–50 м/с;  $\Delta p$ : -10 – +12;  $V$ : 0–20 м/с), легко оценить влияние предиктора на скорость ветра при шквале. При этом компоненты скорости ветра при шквале, обусловленные влиянием максимальных значений  $W_m$ ,  $\Delta p$  и  $V$ , составляют, соответственно, 17,5 м/с, 10–12 м/с и 4–4,5 м/с.

#### Анализ различных сочетаний предикторов для прогноза шквала

Представляет интерес изучение совместного влияния предикторов на факт наличия или отсутствия шквала. Для наглядности были построены категоризованные диаграммы рассеяния для различных пар параметров, пример которых представлен на рис. 3–5.

На рис. 3 приведен график зависимости шквалов (наличия или отсутствия) от максимальной конвективной скорости  $W_m$  и лапласиана приземного давления  $\Delta p$ . Как было показано выше, эти параметры имеют

наибольшее расстояние Махаланобиса и расхождение кривых распределения, в том числе и коэффициент множественной корреляции при совместном использовании предикторов. Это и понятно, поскольку они учитывают энергию вертикальной неустойчивости и синоптическую ситуацию (барическое поле). На графике довольно четко проводятся линии, выделяющие зоны со 100%-ной вероятностью шквалов (случаев без шквалов в этой зоне нет), с 40%-ной вероятностью шквалов (здесь наблюдаются, как случаи со шквалами, так и без них) и, наконец, зону отсутствия шквалов (случаев со шквалом не отмечается). Остановимся поподробнее на каждой зоне в отдельности.



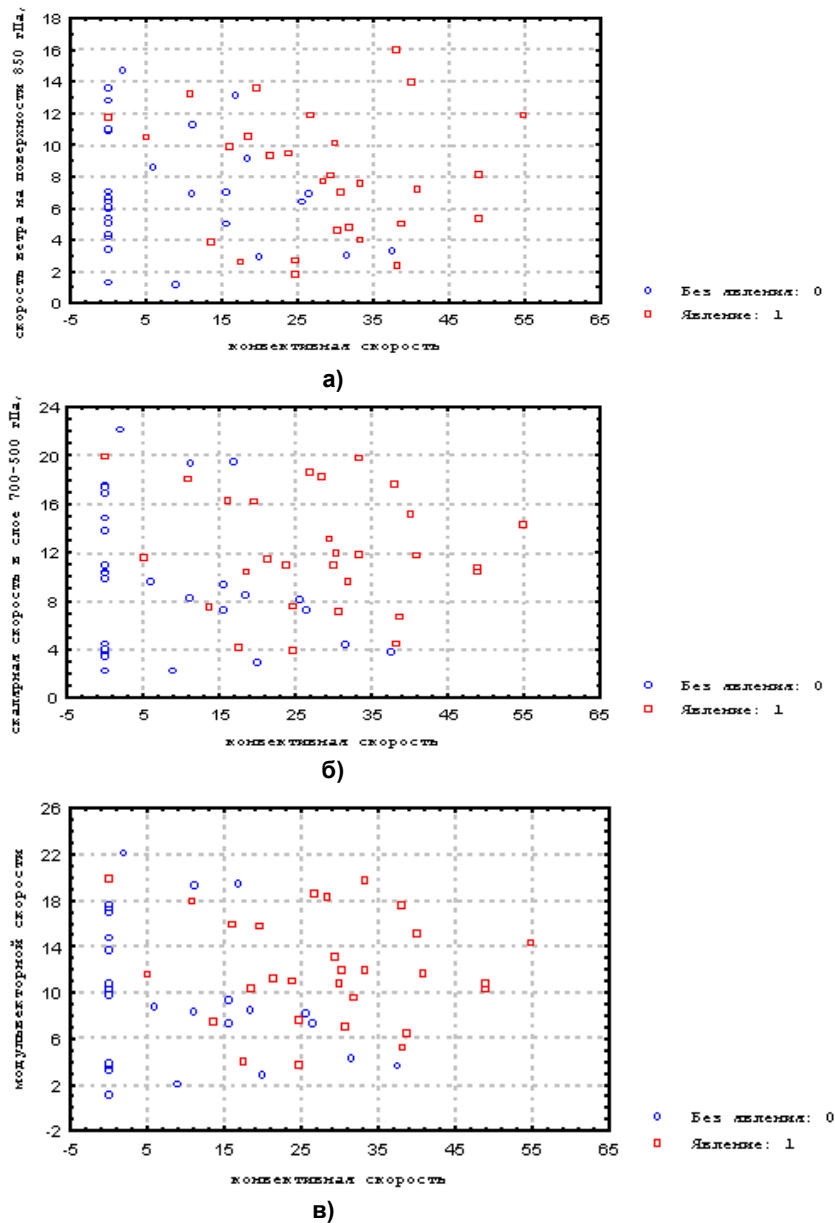
**Рис. 3.** Зависимость шквалов (наличия или отсутствия) от максимальной конвективной скорости  $W_m$  и лапласиана приземного давления  $\Delta p$ .

**Fig. 3.** The dependence of squalls (its occurrence or nonoccurrence) on the maximum convective velocity  $W_m$  and Laplacian of surface air pressure  $\Delta p$ .

В зоне со 100%-ной вероятностью наблюдается 62 % всех исследуемых шквалов, т. е. используя хотя бы эту зону для прогноза можно получить их предупреденность 62 % при 100%-ной оправдываемости (лишних прогнозов не будет). Эта зона ограничивается линией с характерными значениями  $W_m \geq 17$  м/с при положительном лапласиане,  $W_m \geq 20$  м/с при небольшом отрицательном лапласиане (от 0 до  $-2$  гПа/(600 км)<sup>2</sup>) и  $W_m \geq 30$  м/с при лапласиане  $\geq -3$  гПа/(600 км)<sup>2</sup>. В промежуточной зоне много случаев как отсутствия, так и наличия явления, увеличение же вероятности шквалов происходит с ростом  $W_m$  и/или  $\Delta p$ .

При  $W_m \leq 0-18$  м/с и  $\Delta p < -4$  гПа/(600 км)<sup>2</sup> выделяется небольшая зона полного отсутствия шквалов.

Так как на самом деле случаев отсутствия шквалов гораздо больше, чем было взято для данной выборки, то повышать предупреденность шквалов за счет «смягчения» порогов нельзя без повышения ложных тревог.



**Рис. 4.** Диаграммы соответствия максимальной конвективной скорости ветровым характеристикам: модулю скорости ветра на поверхности 850 гПа (а), средней скалярной скорости в слое 700–500 гПа (б) и модулю средней векторной скорости в слое 700–500 гПа (в) в случаях со шквалами и без шквалов.  
**Fig. 4.** The diagrams of consistency of maximum convective velocity to the wind characteristics: the absolute value of wind speed at the level of 850 hPa (а), average scalar velocity in the layer of 700–500 hPa (б), and the absolute value of average vector velocity in the layer of 700–500 hPa (в) for the cases with and without squalls.

Из анализа рис. 4 видно, что независимо от градации ветровых характеристик максимальная конвективная скорость существенно различается при явлении и без явления, в среднем на 10–20 м/с, а на краях распределений на 5–30 м/с. Поэтому довольно легко выделяются зоны, где вероятность шквалов составляет 100 %, а также зоны, где вероятность развития шквалов равна нулю.

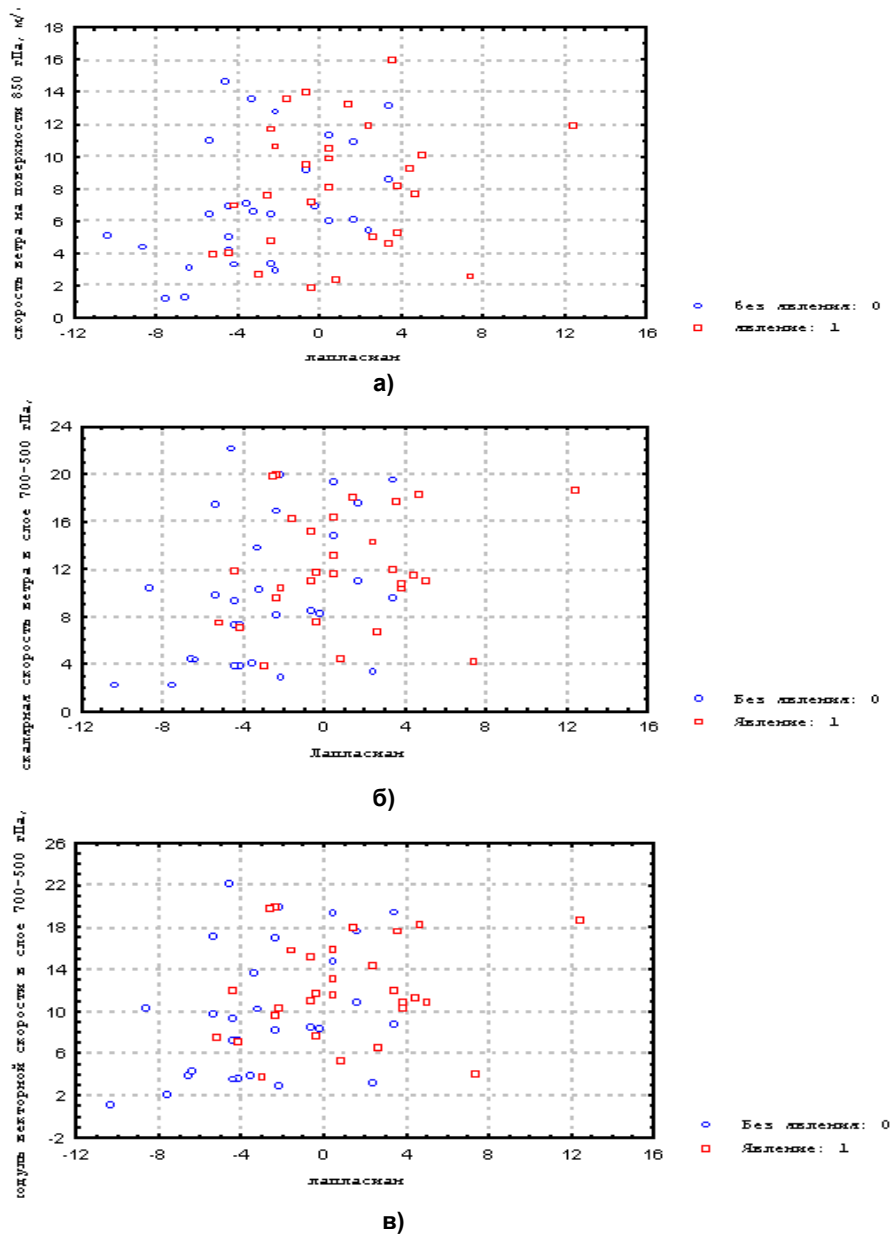
Из анализа этих графиков следует, что при  $W_m \leq 12$  м/с прежде всего с большой надежностью выделяются случаи отсутствия шквалов при ветре  $V \leq 11$  м/с. В то время как при  $V > 11$  м/с иногда (в 10–15 % случаев) шквалы (<25 м/с) могут образовываться и при  $W_m = 0$ . Последние образуются не столько за счет энергии вертикальной неустойчивости, сколько за счет энергии горизонтального ветра при слабой антициклоничности (лапласиан приземного давления от 0 до  $-3$  гПа/(600 км)<sup>2</sup>). В этих случаях значение  $W_m = 0$  является не реальной физической, а частично ошибочной из-за неидеальности прогностических моделей и неточности определения координат точек, где наблюдалось фактическое явление, так как параметры для вычисления  $W_m$  в этом случае берутся из соседних точек модельной сетки.

При существенных ветрах ( $V > 11$  м/с) большинство (75 %) сильных шквалов при  $W_m > 16$ –20 м/с выделяется со 100%-ной вероятностью. При  $V < 11$  м/с в зоне 100%-ной вероятности при  $W_m > 38$  м/с шквалов мало.

В зоне 100%-ного наличия шквалов находится 66 % от общего числа случаев со шквалами. В зоне же полного отсутствия шквалов видно, что наибольшее количество (48 % от общего числа случаев без шквалов) выделяется по модулю векторной скорости в слое 700–500 гПа ( $V_{V75}$ ). Если же рассматривать такую зону по скорости ветра на поверхности 850 гПа ( $V_{85}$ ), то в ней находится уже только 41 % случаев. Такой результат получен из-за случая со шквалом, который наблюдался при  $W_m = 0$ , но при  $V_{V75} = 20$  м/с. Это случай шквала, который образуется не столько за счет энергии вертикальной неустойчивости, сколько за счет энергии горизонтальных потоков, роль которых была доказана в ранних работах Б.Е. Пескова [9, 10].

Следует отметить, что вероятность шквалов увеличивается с ростом скорости ветра в средней тропосфере. Даже при  $W_m > 35$  м/с нет случаев со шквалами, если скорость высотных ветров меньше 4 м/с.

В зонах с различной вероятностью шквалов (рис. 5) хорошо видно влияние высотных ветров и циклоничности (хорошо известной небольшой конвергенции приземных потоков как триггера, запускающего мощную конвекцию). Средний векторный и скалярный ветры в слое 700–500 гПа, как и ветер на поверхности 850 гПа, определяют возникновение шквалов с вероятностью 100 % примерно одинаково (в 32 % случаев). Отсутствие же шквалов (в зоне с вероятностью 100 %) – в 41 % и 34 % случаев, соответственно.



**Рис. 5.** Диаграммы соответствия лапласиана приземного давления ветровым характеристикам: модулю скорости ветра на поверхности 850 гПа (а), средней скалярной скорости в слое 700–500 гПа (б) и модулю средней векторной скорости в слое 700–500 гПа (в) в случаях со шквалами и без шквалов.

**Fig. 5.** The diagrams of consistency of the Laplacian of surface air pressure to the wind characteristics: the absolute value of wind speed at the level of 850 hPa (a), average scalar velocity in the layer of 700–500 hPa (б), and the absolute value of average vector velocity in the layer of 700–500 hPa (в) for the cases with and without squalls.

Можно также отметить, что при скорости высотных ветров  $>20$  м/с случаи со шквалами встречаются крайне редко, что скорее всего объясняется тем, что слишком сильные ветры диссипируют кучево-дождевое облако (усиливают вовлечение и его разнос). Отсутствие шквала выделяется по лапласиану приземного давления  $\Delta p$  надежнее, чем по максимальной конвективной скорости  $W_m$ , так как в данной работе не рассматриваются случаи  $W_m \ll 0$  (условие большой отрицательной энергии неустойчивости, т. е. большой устойчивости). Появляется и зона 100%-ной вероятности такого шквала при  $\Delta p > 4$  гПа/(600 км)<sup>2</sup>. В этой зоне находится 33 % случаев опасных шквалов, они выделяются со 100%-ной оправдываемостью, т. е. без ложных тревог. Таким образом, в зонах с различной вероятностью шквалов хорошо видно влияние рассмотренных факторов, хотя, главное, лапласиан для случаев со шквалами должен изменяться от 0 до  $-4$  гПа/(600 км)<sup>2</sup>, а скорость высотных ветров должна превышать 2–4 м/с.

### Заключение

Результаты, полученные в рамках данного исследования, подтверждают заметную роль скорости горизонтального переноса средней тропосферы в возникновении сильных шквалов. Показано ее влияние на увеличение (примерно на 4–4,5 м/с) максимальной скорости ветра при шквале, хотя ее вклад примерно в 4 раза меньше вклада от вертикальных конвективных скоростей и в 2–2,5 раза меньше вклада от лапласиана приземного давления. Такая добавка к скорости ветра при шквале может привести к образованию шквала в градации опасного явления, а неучет ее может дать ошибочный прогноз.

Кроме того, в случаях слабой антициклоничности, когда энергии конвективной неустойчивости недостаточно для образования сильного шквала, скорость горизонтального переноса в средней тропосфере может являться одним из основных факторов его возникновения.

Использование данных региональной гидродинамической модели показало, что точность прогноза сильных шквалов не зависит от того, какой параметр ветра в слое 700–500 гПа учитывается (векторный или скалярный). Это может быть следствием «сглаживания» (как по вертикали, так и по горизонтали) региональной гидродинамической моделью скорости и направления ветра. Еще одной причиной этого может являться и то, что параметры ветра, рассчитываемые по региональной гидродинамической модели, могут относиться к сроку, предшествующему шквалу, т. е. когда наблюдается небольшая разница в изменении направлений ветра с высотой.

Результаты проведенных исследований использованы для дальнейшего совершенствования автоматизированных методов прогноза сильных шквалов, более подробно представленных в [1–3] и рекомендованных



Центральной методической комиссией по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам (ЦМКП) Росгидромета для внедрения в практику [11], с целью получения более точной оценки ожидаемых градаций ветра при шквале.

### Благодарности

Автор выражает признательность сотруднику ФГБУ «Гидрометцентр России» **Б.Е. Пескову** за участие в обсуждении результатов исследования, Н.В. Шубиной за помощь в подготовке графического материала.

### Список литературы

1. *Алексеева А.А.* Летние конвективные явления // Гидрометеорологические опасности. М.: КРУК, 2001. С. 127-164.
2. *Алексеева А.А.* Метод прогноза сильных шквалов // *Метеорология и гидрология*. 2014. № 9. С. 5-15.
3. *Алексеева А.А.* Прогноз ураганных ветров внетропических циклонов на территории России // *Метеорология и гидрология*. 2017. №1. С. 5-15.
4. *Васильев Е.В.* Условия возникновения и краткосрочный прогноз сильных шквалов на европейской территории России: автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М.: Гидрометцентр России, 2009. 25 с.
5. *Васильев Е.В., Алексеева А.А., Песков Б.Е.* Условия возникновения и краткосрочный прогноз сильных шквалов // *Метеорология и гидрология*. 2009. № 1. С. 5-15.
6. *Лапчева В.Ф.* Условия развития зон активной конвекции со смерчами и сильными шквалами // *Труды Гидрометцентра СССР*. 1989. Вып. 299. С. 39-50.
7. *Лапчева В.Ф.* Характерные особенности атмосферных процессов различного масштаба при развитии зон активной конвекции со шквалами // *Труды Гидрометцентра России*. 1996. Вып. 328. С. 124-132.
8. *Лосев В.М.* Региональная гидродинамическая модель прогноза Гидрометцентра России // 80 лет Гидрометцентру России. М.: Триада лтд, 2010. С. 36-58.
9. *Песков Б.Е., Снитковский А.И.* К вопросу сильных шквалов // *Метеорология и гидрология*. 1968. № 7. С. 52-57.
10. *Песков Б.Е., Шишкин Н.С.* К вопросу шквалов // *Труды ГГО*. 1971. Вып. 262. С. 103-122.
11. Решения Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам Росгидромета (<http://www.method.meteorf.ru>, дата обращения 25.03.2019 г.).
12. *Решетов Г.Д., Чернова Л.Ф.* Способ прогноза шквала на 12–24 ч // *Метеорология и гидрология*. 1976. № 3. С. 15-24.
13. РД 52.27.339-93. Руководство по диагнозу и прогнозу опасных и особо опасных осадков, града и шквалов по данным метеорологических радиолокаторов и искусственных спутников Земли. М.: Росгидромет, 1996. 181 с.

### References

1. *Alekseeva A. A.* *Gidrometeorologicheskie opasnosti*. Moscow, KRUK publ., 2001, pp. 127-164. [in Russ.].
2. *Alekseeva A. A.* A method of forecasting severe squalls. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2014, vol. 39, no. 9, pp. 569–576. DOI: 10.3103/S1068373914090015.
3. *Alekseeva A. A.* Forecasting hurricane winds in extratropical cyclones in Russia. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2017, vol. 42, no. 1, pp. 1–8. DOI: 10.3103/S1068373917010010.

4. Vasil'ev E. V. Usloviya voznikoveniya i kratkosrochnyj prognoz sil'nyh shkvalov na evropejskoj territorii Rossii: avtoref. dis. ... kand. geogr. nauk. Moscow, Gidromettsentr Rossii, 2009, 25 p. [in Russ.].
5. Vasil'ev E. V., Alekseeva A. A., Peskov B. E. Conditions for formation and short-range forecasting of severe squalls. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2009, vol. 34, no. 1, pp. 1–7. DOI: 10.3103/S1068373909010014.
6. Lapcheva V. F. Usloviya razvitiya zon aktivnoj konveksii so smerchami i sil'nymi shkvalami. *Trudy Gidromettsentra SSSR [Proceedings of the Hydrometcentre of the USSR]*, 1989, vol. 299, pp. 39-50. [in Russ.].
7. Lapcheva V. F. Harakternye osobennosti atmosferyh protsessov razlichnogo masshtaba pri razvitiu zon aktivnoj konveksii so shkvalami. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 1996, vol. 328, pp. 124-132 [in Russ.].
8. Losev V. M. Regional'naya gidrodinamicheskaya model' prognoza Gidromettsentra Rossii. *80 let Gidromettsentru Rossii*. Moscow, Triada LTD publ., 2010, pp. 36-58. [in Russ.].
9. Peskov B. E., Snitkovskij A. I. K voprosu sil'nyh shkvalov. *Meteorologiya i Gidrologiya [Russ. Meteorol. Hydrol.]*, 1968, no. 7, pp. 52-57 [in Russ.].
10. Peskov B. E., Shishkin N. S. K voprosu shkvalov. *Trudy GGO [Proceedings of Voeikov Main Geophysical Observatory]*, 1971, vol. 262, pp. 103-122 [in Russ.].
11. Resheniya TSentral'noj metodicheskoy komissii po gidrometeorologicheskim i geliogeofizicheskim prognozam Rosgidrometa. Available at: <http://www.method.meteorf.ru>. [in Russ.].
12. Reshetov G. D., Chernova L. F. Sposob prognoza shkvala na 12–24 chasov. // *Meteorologiya i Gidrologiya [Russ. Meteorol. Hydrol.]*, 1976, no. 3, pp. 15-24. [in Russ.].
13. RD 52.27.339-93. Rukovodstvo po diagnozu i prognozu opasnyh i osobo opasnyh osadkov, grada i shkvalov po dannym meteorologicheskikh radiolokatorov i iskusstvennyh sputnikov Zemli. Moscow, Rosgidromet, 1996, 181 p.

*Поступила в редакцию 16.04.2019 г.  
Received by the editor 16.04.2019.*