

УДК 551.509.5

## **Анализ условий возникновения сильных шквалов в Пермском крае по данным наблюдений и результатам численного моделирования**

***Н.А. Калинин, А.В. Быков, Е.В. Пищальникова, А.Н. Шихов***

*Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь, Россия  
meteo@psu.ru*

Изучение условий возникновения шквалов, особенно не предсказанных случаев и со значительным материальным ущербом, имеет высокую актуальность. Проанализированы условия возникновения четырех, не спрогнозированных синоптиками, случаев шквалов в градации опасного явления ( $\geq 25$  м/с), наблюдавшихся на территории Пермского края в 2014–2016 гг. Обсуждаются возможности применения различных индексов, рассчитывающих параметры неустойчивости атмосферы, а также возможности моделирования глубокой конвекции мезомасштабной моделью WRF-ARW с заблаговременностью до 27 ч и шагом сетки 7,2 и 3 км. Показано различие синоптических условий при возникновении шквалов, причем в половине случаев нехарактерных для их развития. Высказано предположение, что в трех случаях скорость ветра при шквале достигла критерия опасного явления за счет дополнительного влияния рельефа местности. Выявлены наиболее информативные параметры формирования шквалов – индексы SWEAT и LLS. Лишь в одном случае модель воспроизводит сильный шквал (29 м/с), причем в районе его фактического возникновения. В других случаях модельные прогнозы содержат существенные ошибки как в интенсивности, определении места, так и времени возникновения шквалов.

*Ключевые слова:* шквалы, синоптическая ситуация, моделирование глубокой конвекции, индексы неустойчивости, модель WRF

## **Analysis of conditions for the formation of strong squalls in the Perm region environments in using the ground-based data and numerical weather prediction data**

***N.A. Kalinin, A.V. Bykov, E.V. Pischalnikova, A.N. Shikhov***

*Perm State University, Perm, Russia  
meteo@psu.ru*

The studying of the conditions of the emergence of squalls, especially not predicted cases and with significant material damage, has high relevance. The conditions of emergence of the squalls in gradation of the dangerous phenomenon ( $\geq 25$  m/s) are analysed. These cases were observed in the Perm region in 2014-2016 and haven't been predicted by weather forecasters. Possibilities of application of various indexes counting parameters of instability of the atmosphere and also possibility of modeling of deep convection by WRF-ARW model with advance time to 27 h and steps of a grid of 7.2 and 3 km are discussed. The synoptic conditions of emergence of the squalls is considered and in two

cases their not typicalness is noted. It is suggested that in three cases squall wind speed has reached criterion of the dangerous phenomenon due to additional influence of a relief. The most informative parameters of formation of the squalls are revealed. These are the SWEAT and LLS indexes. The conclusion is drawn that only in one case the model reproduces a strong squall (29 m/s), and around his actual emergence. In other cases model forecasts contain essential mistakes, as in intensity, definition of the place, and time of emergence of squalls. Recommendations about use of the received results in practice are made.

*Keywords:* squalls, synoptic situation, modeling of deep convection, indexes of instability, WRF model

## Введение

Сильные шквалы со скоростью ветра 25 м/с и более являются одним из наиболее опасных метеорологических явлений, характерных для территории России. Они представляют угрозу безопасности людей и способны нанести значительный ущерб отраслям экономики. Повышение оправданности и заблаговременности штормовых предупреждений о возникновении сильных шквалов является одной из основных задач, возникающих при оперативном метеорологическом обеспечении. Сложность ее решения обусловлена недостаточной точностью модельных прогнозов метеорологических параметров атмосферы, характеризующих конвективные явления погоды по интенсивности, неточности определения времени и места их возникновения, а также редкой сетью наблюдений и отсутствием, в результате этого, базы данных опасных явлений, отвечающей требованиям по полноте и привязке к месту возникновения явления [5, 6, 15]. В последние годы для краткосрочного прогноза шквалов синоптиками используются выходные данные мезомасштабных моделей COSMO-Ru и WRF-ARW с шагами сетки от 7,0 до 2,2 км [6, 11], а также автоматизированные физико-статистические методы прогноза, внедренные по рекомендации ЦМКП Росгидромета, на основе выходных данных региональной модели Гидрометцентра России [1, 3, 10].

Сильные шквалы в летний период характерны и для территории Пермского края. В базе данных опасных явлений погоды Пермского края [14] приведены сведения о 39 случаях сильных шквалов, зафиксированных за период с 2001 по 2016 г. Многие из этих случаев не были предсказаны, в том числе не были составлены штормовые предупреждения. Изучение условий возникновения шквалов, особенно не предсказанных случаев и со значительным материальным ущербом, имеет наибольшую актуальность.

В настоящей статье рассматриваются условия возникновения четырех не предсказанных случаев сильных шквалов ( $\geq 25$  м/с), наблюдавшихся на территории Пермского края в 2014–2016 гг. Проанализированы также характеристики подстилающей поверхности, которые могли способствовать увеличению скорости ветра при шквалах. Рассмотрены возможности применения различных индексов, рассчитывающих параметры неустойчивости атмосферы, а также возможности моделирования глубокой конвекции

мезомасштабной моделью WRF (в конфигурации ARW) для краткосрочного прогноза шквалов. Все рассматриваемые случаи шквалов фиксировались локально. Они либо наблюдались на одной метеостанции, либо пропускались наблюдательной сетью. Шквалы формировались в разных синоптических ситуациях и имели как внутримассовый, так и фронтальный генезис.

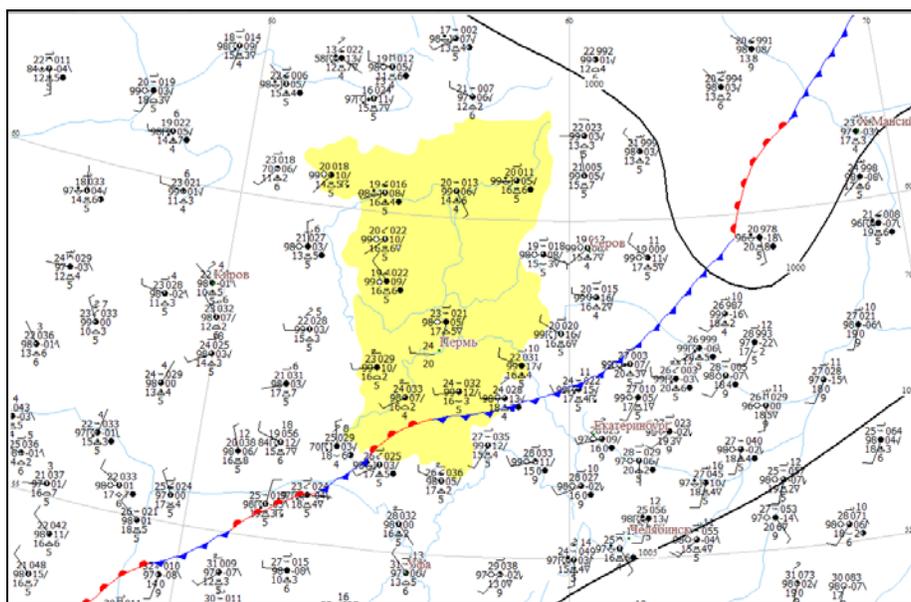
### **Синоптическая ситуация и роль местных условий в увеличении скорости ветра при шквалах**

*Первый случай.* 17 августа 2014 г. территория Пермского края находилась под влиянием холодного участка полярной фронтальной системы, ориентированной с юго-запада на северо-восток. Интенсивность высотной фронтальной зоны (ВФЗ) над регионом по карте ОТ<sub>1000</sub><sup>500</sup> составила 20 гп. дам/1000 км. Термобарическое поле было благоприятным для тропосферного фронтогенеза: на изобарических поверхностях 700 и 500 гПа наблюдалась сходимостью изогипс, а угол отклонения изотермы от изогипсы составил менее 45°. В средней и верхней тропосфере наблюдалось струйное течение, скорость ветра на изобарической поверхности 300 гПа достигала 45 м/с. Холодный фронт был хорошо выражен в изменениях приземных характеристик: понижение температуры воздуха от 26–32 °С до 20–25 °С, поворот ветра до 90°, падение давления в теплом секторе до 2,2 гПа/3 ч, переходящее в рост за фронтом до 1,7 гПа/3 ч (рис. 1). Контраст температуры в зоне фронта над Пермским краем составлял 6,5 °С/500 км по карте АТ<sub>850</sub> и 3 °С/100 км по приземной карте. Холодный фронт был малоподвижным ввиду его расположения вдоль ведущего потока.

Малоградиентное барическое поле у Земли способствовало процессу волнообразования на фронте. Волны были малой амплитуды, быстро смешались вдоль фронта и быстро затухали. На одном из таких волновых возмущений над территорией Татарстана около 8 ч ВСВ сформировалась мезомасштабная конвективная система (МКС), которая затем сместилась на южные районы Удмуртии и Пермского края. При прохождении МКС метеостанции Ижевск и Чайковский зафиксировали грозы, ливневые дожди (до 13 мм) и шквалистое усиление ветра до 17–19 м/с.

На южной периферии МКС по данным доплеровского метеорологического радиолокатора (ДМРЛ), установленного в Ижевске, наблюдалось суперячейковое кучево-дождевое (Cb) облако с высотой верхней границы (ВГО) более 14 км. Прохождение его через юго-восточную часть Чайковского района Пермского края сопровождалось разрушительным шквалом (по данным обследования, скорость ветра составила 25–28 м/с) и выпадением града диаметром около 20 мм. Шквал наблюдался в период с 12 ч 50 мин по 13 ч 30 мин ВСВ (рис. 2). В результате были повалены или повреждены 12 опор линий электропередач 110 кВт «Воткинская

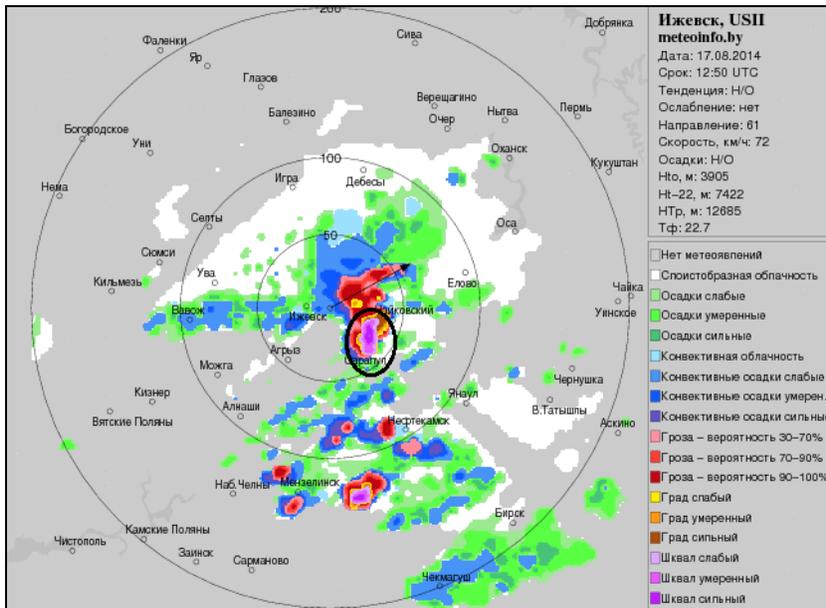
ГЭС – Светлая», сорваны крыши с 80 жилых домов и объектов социального назначения, ущерб по которым составил около 10 млн рублей. Кроме того, уничтожено несколько лесных массивов общей площадью более 550 га. Протяженность ветровала составила около 20 км, а его максимальная ширина достигала 2,5 км.



**Рис. 1.** Фрагмент карты приземного анализа за 17.08.2014 г., 12 ч ВСВ.

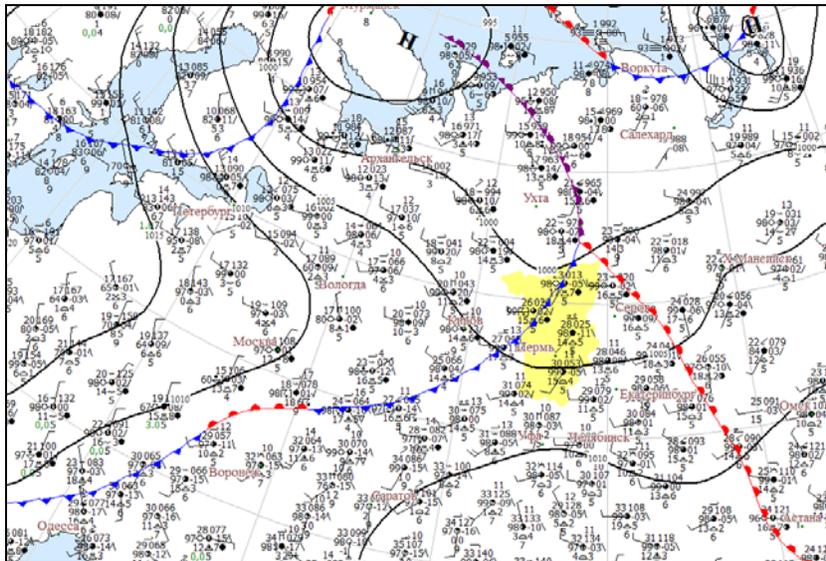
**Fig. 1.** The fragment of the map of the ground analysis 17.08.2014, 12 h UTC.

*Второй случай.* Днем 16 июня 2015 г. территория Пермского края находилась под влиянием ложбины малоподвижного высокого циклона с центром над Кольским полуостровом. С данным барическим образованием была связана полярная фронтальная система, находящаяся в процессе окклюдирования. В дневные часы воздух у Земли прогрелся до 27–32 °С, за исключением северных и северо-западных районов, где из-за натекания облачности, связанной с холодным фронтом, прогрев был незначительный (до 24 °С). Холодный участок фронтальной системы был ориентирован с северо-востока на юго-запад через Кудымкар – Н. Новгород – Курск. Скорость смещения фронта за последние полусутки составили 29 км/ч (рис. 3). Ведущий поток над Пермским краем был обусловлен передней частью высотной ложбины и имел западное направление. Ось струйного течения находилась значительно севернее Пермского края. Термобарическое поле не способствовало обострению фронта у Земли – на изобарической поверхности 700 гПа наблюдались расходимость изогипс и отрицательные углы адвекции.



**Рис. 2.** Карта метеоявлений по данным ДМРЛ Ижевск за 17.08.2014 г., 12.50 ч ВСВ. Суперячейковое Сb к югу от г. Чайковский выделено черной окружностью.

**Fig. 2.** The card of the meteorological phenomena according to DMRL Izhevsk 17.08.2014, 12.50 UTC Supercell Cb to the south from Tchaikovsky is allocated with a black circle.



**Рис. 3.** Фрагмент карты приземного анализа за 16.06.2015 г., 12 ч ВСВ.

**Fig. 3.** The fragment of the map of the ground analysis 16.06.2015, 12 h UTC.

Шквал был связан с линией неустойчивости, сформировавшейся на расстоянии около 100 км от приземной линии холодного фронта. По снимку Aqua MODIS (см. рис. 6 а), в 10.10 ВСВ в 50 км западнее г. Березники на линии неустойчивости наблюдалось скопление Сб в стадии роста. Температура ВГО у одной из ячеек достигала  $-63^{\circ}\text{C}$  при сравнительно небольшом диаметре (около 35 км), что указывает на пробой тропопаузы и вероятное наличие мезоциклона. Смещаясь по потоку на восток-северо-восток, данная ячейка около 12 ч ВСВ прошла южнее г. Березники, где наблюдался сильный шквал (27 м/с по шкале Бофорта). При этом на самой метеостанции Березники шквал зафиксирован не был. По сведениям очевидцев, шквал сопровождался крупным градом. Шквалистым ветром были повреждены кровли домов, пострадали три человека. Уничтожен лесной массив к югу от г. Березники на площади более 500 га. Протяженность ветровала составила 13 км, а ширина – от 1,5 до 2 км.

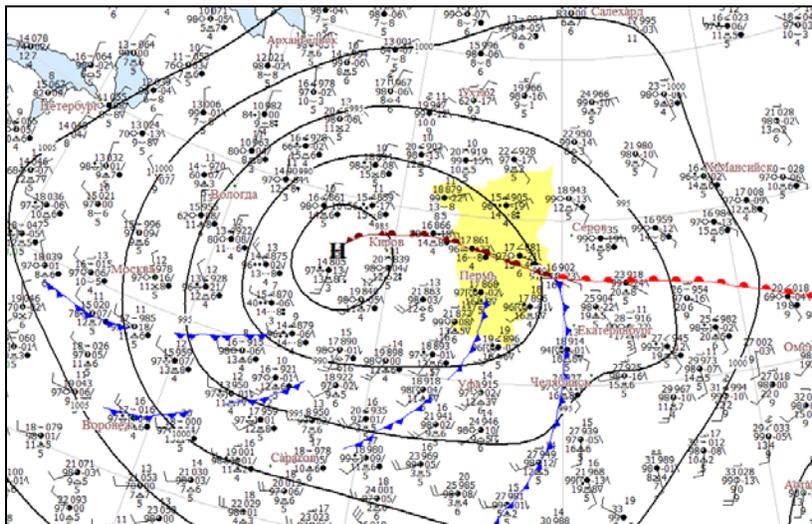
Усилению шквала способствовали местные условия – скорость ветра значительно увеличилась над водной поверхностью Камского водохранилища, ширина которого в данном районе превышает 6 км. Все ветровалы находятся на восточном (наветренном) берегу водохранилища, в то время как на западном берегу ветровалы не обнаружены. Шквал также пересек Яйвинский залив водохранилища, ширина которого составляет более 2 км, и повалил лес на его восточном берегу (на расстоянии до 5,5 км от берега).

*Третий случай.* 12 июля 2015 г. погоду в Пермском крае обуславливал глубокий высокий циклон с центром вблизи Кирова ( $P_0 = 980,5$  гПа), который находился на стадии максимального развития (рис. 4). Накануне днем приземное поле было представлено многоцентровой депрессией. В районе 18 ч ВСВ вблизи Ульяновска обозначился циклон с давлением в центре 994,2 гПа. В течение ночи и первой половины дня наблюдался интенсивный циклогенез (барическая тенденция достигала  $-4,1$  гПа/3 ч).

С данным барическим образованием была связана полярная фронтальная система, которая находилась в процессе окклюдирования. На приземной карте за 12.07.2015 г., 12 ч ВСВ линия фронта окклюзии была ориентирована широтно и делила территорию края пополам. В период между 8 ч и 10 ч ВСВ через южные районы края прошел полярный холодный фронт, на котором сформировалась линейная система Сб протяженностью более 300 км. Перед прохождением фронта температура воздуха достигла  $+23...+25^{\circ}\text{C}$ . При прохождении фронта отмечались сильные дожди, грозы, град и усиление ветра до 20 м/с.

Однако более сильный шквал был связан с развитием конвекции в тыловой части циклона на фоне увеличения барического градента. Около 11 ч ВСВ на метеостанции Чернушка на юге Пермского края была зафиксирована скорость ветра 28 м/с при прохождении вторичного холодного фронта. Ущерб от шквала был незначительным. Также важно

отметить, что метеостанция Чернушка расположена на открытой безлесной местности и характеризуется сравнительно высоким среднегодовым максимумом скорости ветра (22,5 м/с). Таким образом, местные условия могли способствовать усилению ветра до опасных значений.



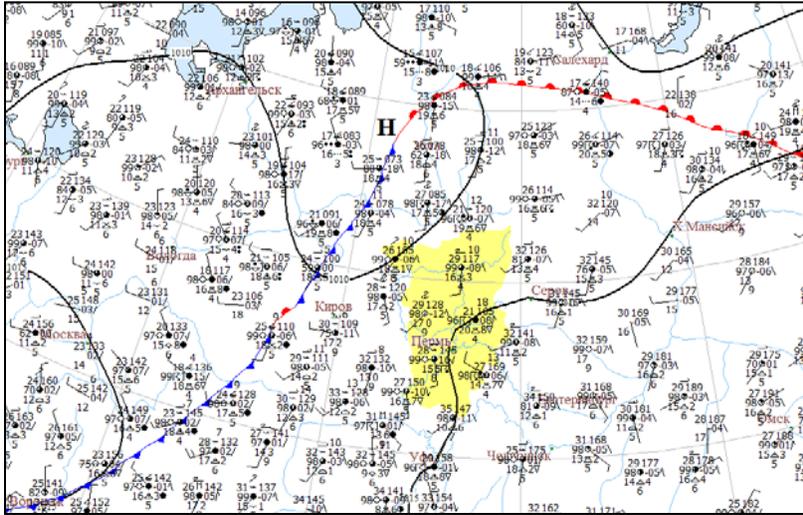
**Рис. 4.** Фрагмент карты приземного анализа за 12.07.2015 г., 12 ч ВСВ.

**Fig. 4.** The fragment of the map of the ground analysis 12.07.2015, 12 h UTC.

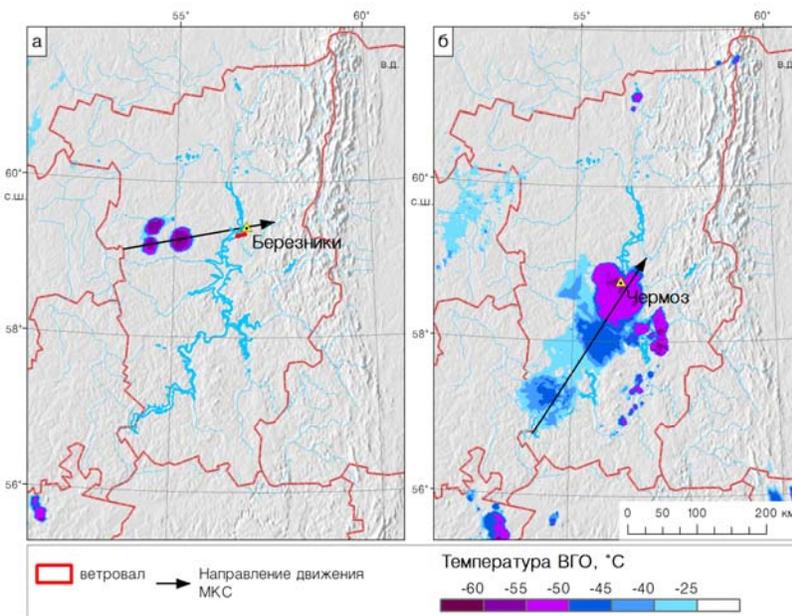
*Четвертый случай.* В течение дня 4 августа 2016 г. южная и восточная части Пермского края находились под влиянием западной периферии высокого антициклона с центром над югом Западной Сибири в тропической воздушной массе (максимальная температура днем составила 31...34 °С). Северные и западные районы находились в теплом секторе молодого циклона с центром над республикой Коми. Условий для активного циклогенеза не наблюдалось. Циклон, являясь низким барическим образованием, медленно углублялся и смещался согласно ведущему потоку с юго-запада на северо-восток со скоростью 40 км/ч. Связанный с ним полярный холодный фронт стационарировал в параллельных потоках и в 12 ч ВСВ был ориентирован от центра циклона через Ухту – Киров – Воронеж (рис. 5). Скорость ветра в средней тропосфере была невысокой – по данным радиозондирования, в 0 ч ВСВ на метеостанции Пермь она не превышала 11 м/с, но к 12 ч ВСВ увеличилась до 17 м/с.

В первой половине дня над территорией Удмуртии сформировалась МКС, которая по потоку сместилась на центральные районы Пермского края. К этому времени температура воздуха у Земли превысила 30 °С, а дефицит точки росы достиг 15 °С, что создало благоприятные условия для развития шквалов. Прохождение МКС сопровождалось слабыми и умеренными дождями (до 5 мм) и шквалистым усилением ветра до 17–19 м/с

(на метеостанциях Лысьва, Губаха, Пермь, Добрянка). Зона наиболее активной конвекции с температурой ВГО до  $-60^{\circ}\text{C}$  (по данным Aqua MODIS) в 9.30 ВСВ сместилась в район метеостанции Чермоз (см. рис. 6 б), где скорость ветра достигла 25 м/с, а количество осадков – 23 мм.



**Рис. 5.** Фрагмент карты приземного анализа за 04.08.2016 г., 12 ч ВСВ.  
**Fig. 5.** The fragment of the map of the ground analysis 4.08.2016, 12 h UTC.



**Рис. 6.** Температура верхней границы облаков по данным Aqua MODIS: 16.06.2015 г., 10.10 ВСВ (а); 04.08.2016 г., 9.30 ВСВ (б).  
**Fig. 6.** Temperature of the upper bound of clouds according to Aqua MODIS: 16.06.2015, 10.10 UTC (a); 4.08.2016, 9.30 UTC (б).

Ущерб от шквала был незначительным. Усиление ветра до 25 м/с, с одной стороны, объясняется смещением в район метеостанции Чермоз зоны наиболее активной конвекции, а с другой стороны – влиянием местных условий. Метеостанция расположена на открытой безлесной местности и отличается (как и метеостанция Чернушка) сравнительно высоким среднегодовым максимум скорости ветра (около 22 м/с).

### Прогноз шквалов физико-статистическими методами, применяемыми в оперативной практике Пермского ЦГМС

**Метод Пескова – Снитковского** [13] используется, когда ожидается развитие шквала в связи с прохождением холодного фронта. Причем сильный шквал возможен лишь при сильном ветре на высотах. Скорость ветра при шквале зависит от толщины облачного слоя, заключенного между уровнем конденсации и высотой изотермы  $-10^{\circ}\text{C}$ , где зарождается нисходящий поток.

**Метод Решетова** [13] и **метод из Руководства по КПП** [12] используются для прогноза шквала, когда в районе прогнозируется гроза. В этом случае сначала по номограммам определяется вероятность возникновения шквала, т. е. дается альтернативный прогноз, затем определяется скорость ветра при шквале.

По диагностическим, построенным по данным объективного анализа, аэрологическим диаграммам определены параметры конвекции и рассчитаны прогностические скорости ветра при шквале (табл. 1). Рассмотренные применяемые в оперативной практике синоптиков методы прогноза шквалов показали примерно одинаковую успешность.

**Таблица 1.** Прогноз скорости ветра при шквале (м/с) физико-статистическими методами, применяемыми в Пермском ЦГМС  
**Table 1.** The forecast of wind speed at a squall (m/s) by the physical statistical methods applied in the Perm center for hydrometeorology and monitoring of the environment

Дата	Название метода		
	Пескова – Снитковского	Решетова	Из руководства по КПП
17.08.2014	20	–*	–*
16.06.2015	25	23	35
12.07.2015	20	–*	–*
4.08.2016	–**	25	30

*Примечание.* \* шквал не ожидался по альтернативному прогнозу, поэтому скорость не рассчитывалась; \*\* метод не используется для прогноза шквалов внутримассового развития.

В первом случае (17.08.2014 г.), несмотря на благоприятную синоптическую ситуацию для высокой вероятности возникновения по югу Пермского края сильного шквала, скорость ветра, рассчитанная по методу

Пескова – Снитковского, составила 20 м/с. По двум другим методам (альтернативный прогноз) шквал не ожидается. Можно предположить, что причина ошибочного прогноза заключается в параметрах конвекции, рассчитанных по аэрологической диаграмме для г. Пермь, находящегося на расстоянии около 200 км от места возникновения шквала.

Во втором случае (16.06.2015 г.) точнее оказался прогноз по методу Пескова – Снитковского: по прогнозу 2 м/с, по факту – 27 м/с. Метод Решетова прогнозирует умеренный шквал. Прогноз по методу из Руководства по КПП оправдался, но скорость завышена. В данном случае синоптик, всего скорее, подстраховался от ложных тревог, составив консультацию о неблагоприятных явлениях погоды: грозах и шквалистом усилении ветра до 15–20 м/с.

В третьем случае (12.07.2015 г.), в условиях нетипичной для развития шквалов в Пермском крае синоптической ситуации, с помощью используемых расчетных методов шквал в градации опасных явлений спрогнозировать было невозможно ввиду того, что в их основе лежит в основном расчет термодинамических параметров атмосферы и не учитываются физико-географические условия территории, где вероятнее всего могут возникать шквалы. В этом случае именно физико-географические условия явились благоприятным усиливающим фактором скорости ветра при шквале.

В четвертом случае (4.08.2016 г.) метод Решетова, по которому скорость ветра при шквале прогнозировалась 25 м/с (по факту – 25 м/с), оказался наиболее точным. По методу из Руководства по КПП скорость прогнозировалась еще больше, 30 м/с. На территории Пермского края внутримассовые шквалы редко достигают большой интенсивности. Поэтому синоптик в прогнозе ожидал усиление ветра лишь до 20 м/с, не доверившись прогнозам по методам.

Итак, в двух из четырех рассмотренных случаев внедренные в оперативную практику методы достаточно точно позволяли спрогнозировать скорость ветра при шквале. То, что они не были спрогнозированы, виноват, скорее всего, «человеческий» фактор.

### **Расчет параметров неустойчивости атмосферы по данным объективного анализа глобальных моделей**

Для физико-статистического прогноза шквалов в рамках данного исследования использованы 11 параметров конвективной неустойчивости атмосферы, подробные сведения о которых приведены в [2]. Расчет индексов неустойчивости производился по данным объективного анализа CFS (Climatic Forecast System) и GFS (Global Forecast System), с шагом сетки  $0.5^\circ$  в программном комплексе OpenGrADS 2.0.2. Значения рассчитанных индексов представлены в табл. 2. Кроме того, по данным объективного анализа средствами OpenGrADS 2.0.2 построены аэрологические диаграммы (рис. 7, 8).

В первом случае (17.08.2014 г.) по значениям индексов можно отметить, что в зоне развития шквала наблюдалась сильная термическая неустойчивость, что подтверждается значительной энергией неустойчивости, низкими значениями Lifted Index и высокими значениями индекса Томпсона. Кроме того, в средней и верхней тропосфере наблюдалось струйное течение с максимальной скоростью ветра 45 м/с и более (рис. 7). Отмечался сильный неупорядоченный сдвиг ветра в слое 0–6 км над земной поверхностью, что в совокупности с высокими значениями SCP указывает на значительную вероятность развития суперячейковых Cb [16].

**Таблица 2.** Значения параметров неустойчивости атмосферы согласно индексам, рассчитанным по данным объективного анализа GFS и CFS  
**Table 2.** The values of parameters of instability of the atmosphere according to the indexes calculated according to the objective analysis of GFS and CFS

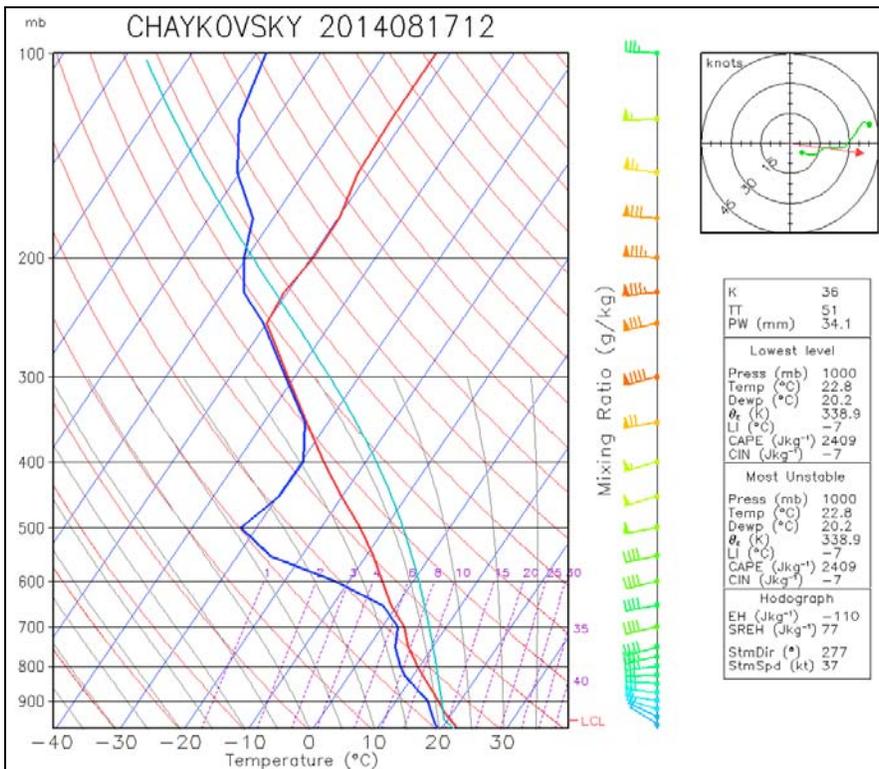
Индексы	17.08.2014, 12 ч ВСВ		16.06.2015, 12 ч ВСВ		12.07.2015, 12 ч ВСВ		4.08.2016, 9 ч ВСВ	
	CFS	GFS	CFS	GFS	CFS	GFS	CFS	GFS
SB CAPE (Дж/кг)	<u>2925</u>	1498	43	865	1118	870	71	1341
SB CIN (Дж/кг)	-9	-8	-16	-32	-3	0	-88	-3
ML CAPE (Дж/кг)	<u>2011</u>	1140	8	113	596	300	8	953
DLS (knot)	<u>48</u>	<u>47</u>	35	<u>40</u>	12	6	15	9
LI (°C)	<u>-9</u>	<u>-6</u>	1	-3	<u>-6</u>	<u>-6</u>	0	-4
ML LI (°C)	<u>-7</u>	<u>-5</u>	2	0	<u>-4</u>	-3	1	-3
LLS (м/с)	<u>18</u>	<u>15</u>	<u>18</u>	<u>15</u>	6	2	<u>12</u>	10
SCP	<u>9</u>	<u>7</u>	-	<u>1</u>	-	-	-	-
SRH в слое 0-3 км (м <sup>2</sup> /с <sup>2</sup> )	146	<u>209</u>	<u>167</u>	146	-	21	99	76
SWEAT	<u>251</u>	<u>388</u>	233	<u>251</u>	<u>303</u>	238	214	<u>258</u>
THOMPSON	<u>45</u>	<u>45</u>	34	37	36	35	32	39

*Примечание.* Подчеркиванием выделены значения параметров, при которых наблюдается высокая вероятность развития опасных конвективных явлений [2].

Во втором случае (16.06.2015 г.) наблюдалась слабая (по данным CFS) или умеренная (по данным GFS) термическая неустойчивость. По сравнительно высоким значениям индекса CIN выявляется наличие задерживающего слоя, который под действием динамических факторов мог разрушиться и привести к развитию более мощной конвекции, чем ожидалось. Кроме того, зафиксирован упорядоченный сдвиг ветра в слое 0–6 км над земной поверхностью, что указывает на вероятность развития суперячейковых Cb. В средней тропосфере (на изобарической поверхности 500 гПа) максимальная скорость ветра достигала 25 м/с.

В третьем случае (12.07.2015 г.) в тыловой части циклона наблюдалась умеренная термическая неустойчивость с уровнем развития

конвекции 6–7 км и неупорядоченный сдвиг ветра. Максимальная скорость ветра в средней тропосфере достигала 35 м/с, что весьма благоприятно для развития шквалов (рис. 8).



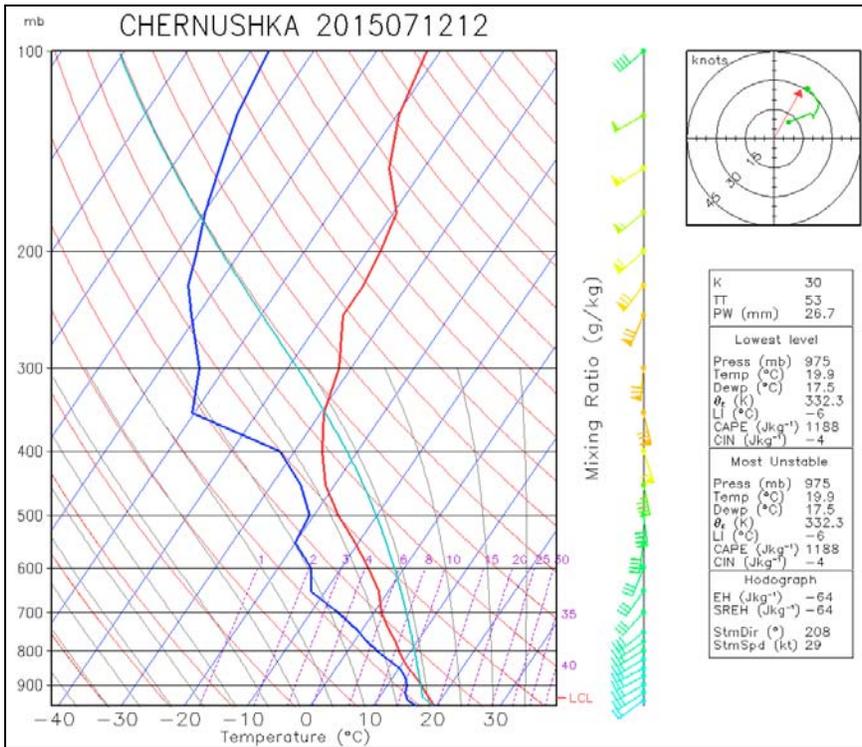
**Рис. 7.** Аэрологическая диаграмма по данным модели CFS для метеостанции Чайковский, 17.08.2014 г., 12.00 ВСВ.

**Fig. 7.** The aerological chart according to the CFS model for a meteorological station Tchaikovsky, 17.08.2014, 12.00 UTC.

В четвертом случае (04.08.2016 г.) зафиксирована слабая (по данным CFS) и умеренная (по данным GFS) термическая неустойчивость. Также по данным объективного анализа CFS воспроизводится достаточно мощный задерживающий слой, что могло привести к развитию глубокой конвекции при его разрушении. Кроме того, зафиксирован упорядоченный сдвиг ветра с высотой. Максимальная скорость ветра в средней тропосфере была менее 20 м/с.

Характерной особенностью всех рассмотренных случаев, выявленной по данным объективного анализа, является чередование в тропосфере влажных и сухих слоев. Выше пограничного слоя лежит влажный слой толщиной 1,5–2 км, далее следует относительно сухой слой толщиной 2–4 км. Еще одна общая черта всех случаев состоит в том, что значения индекса SWEAT превышают критическое (250) или близки к нему.

Данный индекс учитывает как скорость и сдвиг ветра, так и термическую неустойчивость в тропосфере. Кроме того, в первых двух случаях на высокий риск возникновения суперячейковых штормов указывают предельные или близкие к ним значения индекса относительной завихренности SRH. Также во всех случаях, кроме третьего (12.07.2015 г.), зафиксированы сдвиги ветра в слое 0–1 км над Землей (LLS) величиной 10–12 м/с и более, что указывает на вероятность развития организованных МКС со шквалами.



**Рис. 8.** Аэрологическая диаграмма по данным модели CFS для метеостанции Чернушка, 12.07.2015 г., 12.00 BCB.

**Fig. 8.** The aerological chart according to the CFS model a meteorological station Chernushka 12.07.2015, 12.00 BCB.

Большая разница в расчете первых трех параметров (SB CAPE, ML CAPE и SB CIN) связана с тем, что эти индексы зависят от температуры и влажности в пограничном и приземном слоях (SB CAPE и SB CIN описывают поведение частицы воздуха при адиабатическом подъеме от земной поверхности, ML CAPE описывает поведение частицы при подъеме от перемешанного слоя толщиной около 1 км над земной поверхностью). В двух рассматриваемых моделях пограничный и приземный слои описываются разными процедурами параметризации, что отражается

на значениях этих индексов. Кроме того, два рассмотренных объективных анализа зачастую по-разному воспроизводят синоптическую ситуацию, так как используют разные процедуры усвоения начальных данных (данных наземных наблюдений, данных зондирования, спутниковых данных и т. д.).

### Моделирование шквалов по модели WRF

Для расчетов использована модель WRF-ARW версии 3.8.1 – численная негидростатическая региональная система прогнозирования погоды [17]. Программный комплекс модели WRF установлен на многопроцессорном вычислительном комплексе «ПГНИУ-Кеплер», состоящем из 8 вычислительных узлов iDataPlex DX360 M4 на базе процессоров Intel Xeon E5 и видеокарт NVidia Tesla K20. Используемые настройки модели приведены в табл. 3.

**Таблица 3.** Настройки модели WRF, используемые в исследовании  
**Table 3.** The settings of the WRF model used in a research

Характеристика модели	Принятая настройка
Шаг сетки	7,2 км/3 км
Число узлов	268×268/534×534
Число вертикальных уровней	38/42
Модель рельефа	U.S. Geological Survey (USGS) DEM (30s)
Срок запуска модели	00 ВСВ, с предварительным усвоением данных объективного анализа
Заблаговременность прогноза	27 ч
Временной шаг вывода данных	1 ч
Динамическое ядро	Advanced Research WRF (ARW), non-hydrostatic
Шаг интегрирования по времени	48/18 с
Начальные и граничные условия	Объективный анализ CFS или прогноз GFS с шагом сетки 0,5°
Микрофизика облачности	Схема Томпсона
Планетарный пограничный слой	Схема университета Yonsei
Подстилающая поверхность	Модель Noah
Коротковолновая и длинноволновая радиация	Rapid Radiative Transfer Model (RRTM)
Приземный слой	Схема Монина-Обухова с вязким подслоем Карлсона-Боланда и стандартными функциями подобия
Конвекция	Прямое моделирование (без параметризации)

Прямое моделирование конвекции предполагает возможность непосредственного воспроизведения эволюции МКС, а также самих шквалов. Оценка достоверности результатов моделирования проведена на основе

фактических данных об интенсивности, месте и времени возникновения шквала. Также использованы имеющиеся данные ДМРЛ, установленного в Ижевске (для случая шквала 17.08.2014 г.) и спутниковые снимки Terra/Aqua MODIS (для случаев шквалов 16.06.2015 и 04.08.2016 гг.). Помимо рассчитанной скорости порывов ветра по модели WRF (переменной GUST), оценивалась также ошибка по положению и времени возникновения шквала. Аналогичные критерии оценки использовались в ранее выполненных работах, посвященных моделированию интенсивной конвекции [4, 7–9]. Основные результаты приведены в табл. 4.

**Таблица 4.** Результаты моделирования шквалов по модели WRF с заблаговременностью 27 ч (в числителе – с шагом 7,2 км, в знаменателе – с шагом 3 км) и оценки успешности

**Table 4.** Results of modeling of squalls by the WRF model with advance time of 27 h (in numerator – with a step of 7,2 km, in a denominator – with a step of 3 km) and success estimates

Дата	Фактическая скорость шквала, м/с	Максимальный порыв ветра по модели WRF в радиусе 100 км от места шквала, м/с	Ошибка по положению места возникновения шквала, км	Ошибка по времени возникновения шквала, ч	Оценка успешности прогноза
17.08.2014	25–28*	23/29	30/0	2/2	не оправдался / оправдался
16.06.2015	27*	16/20	100/100	2/2	не оправдался / не оправдался
12.07.2015	28	15/24	170/140	1/0	не оправдался / не оправдался
12.07.2015 (прогноз)**		20/23	50/140	0/0	не оправдался / не оправдался
04.08.2016	25	нет шквала	–	–	не оправдался
04.08.2016 (прогноз)**		нет шквала	–	–	не оправдался

*Примечание.* \* оценка получена по шкале Бофорта; \*\* в качестве начальных условий для запуска модели WRF использованы прогностические данные GFS.

Модель WRF непосредственно воспроизводит сильный шквал лишь в одном из четырех случаев (17.08.2014 г.) с шагом сетки 3 км. По результатам моделирования с шагом сетки 7,2 км в этом случае воспроизводится формирование мезоциклона, который прошел через юго-восток Удмуртии и юг Пермского края в период между 10 и 13 ч ВСВ (фактическое прохождение суперячейкового Сб наблюдалось на два часа позже). Мезоциклон хорошо выражен в поле атмосферного давления (его глубина достигает 6 гПа) и конвективных вертикальных движений. С ним связаны высокие модельные значения отражаемости (до 65 DBz), интенсивные осадки

(до 35 мм/ч), шквал до 23 м/с. При моделировании с шагом сетки 3 км глубина мезоциклона достигает 10 гПа, а прогнозируемая максимальная скорость порывов ветра – 29 м/с.

Важно отметить, что ранее случай шквала 17.08.2014 г. был смоделирован с использованием модели WRF версии 3.6.1 [9], и результат отличался от представленного в табл. 4 как по максимальной скорости ветра при шквале (35 м/с), так и по положению зоны самых сильных порывов ветра. Зона сильного шквала была смещена примерно на 40 км юго-восточнее относительно места фактического возникновения. Смещение по времени осталось неизменным (2 ч), так как эта ошибка, на наш взгляд, определяется начальными условиями, использованными для запуска модели WRF.

Как видно, используемая версия модели с шагом сетки 3 км по сравнению с версией модели 3.6.1 точнее смоделировала шквал в градации опасных явлений.

*Во втором случае* (16.06.2015 г.) при запуске модели WRF с шагом сетки 7,2 км около 13 ч ВСВ воспроизводится формирование МКС над центральной частью Камского водохранилища на 80–100 км южнее фактического положения, что по времени на два часа позже фактического прохождения шквала. Максимальная скорость порывов ветра по модели достигает 16 м/с. При запуске модели с шагом 3 км около 13 ч ВСВ также воспроизводится формирование МКС в 100 км южнее фактического положения, расчетная скорость шквала в районе г. Добрянки достигает 20 м/с.

*В третьем случае* (12.07.2015 г.) модель воспроизводит формирование линейной системы Сб на основном холодном фронте и прохождение ее через южную и восточную часть Пермского края в период с 10 до 12 ч ВСВ. При этом максимальная скорость шквала 24 м/с при моделировании с шагом 3 км воспроизводится к северу от г. Кунгура, что на 140 км (табл. 4) севернее фактического места возникновения шквала. Вторичный холодный фронт, при прохождении которого наблюдался шквал 28 м/с в Чернушке, по модели не воспроизводится.

При использовании в качестве начальных условий прогностических данных GFS модель WRF с шагом сетки 7,2 км воспроизводит шквал на вторичном холодном фронте с максимальной скоростью 20 м/с, однако скорость порывов ветра при таком шаге сетки обычно занижается. При тех же начальных условиях и шаге сетки 3 км этот шквал воспроизводится со скоростью 23 м/с (табл.4).

*В четвертом случае* (04.08.2016 г.) модель WRF не воспроизводит формирование МКС и шквала в любом из четырех использованных режимов запуска (с шагом сетки 7,2 и 3 км, при начальных данных объективного анализа CFS и прогноза GFS). Качество прогноза во всех случаях неудовлетворительное, что может быть связано с заниженными оценками неустойчивости воздушной массы в теплом секторе циклона.

Таким образом, только в одном из четырех случаев модель WRF ARW версии 3.8.1 точно воспроизводит шквал в градации опасных явлений, причем с шагом сетки 3 км. Остальные прогнозы нельзя признать успешными как по прогнозируемой скорости, так и из-за большего, чем принято (100 км), удаления прогнозируемого места возникновения шквала от места возникновения фактического шквала.

### Заключение

Проведенный анализ условий возникновения четырех случаев сильных шквалов, не спрогнозированных синоптиком в оперативной работе, позволяет сделать следующие выводы.

В первом случае (17.08.2014 г.) синоптическая ситуация, значения параметров неустойчивости и результаты мезомасштабного моделирования с помощью модели WRF позволяли сделать однозначный вывод о высокой вероятности возникновения сильного шквала.

Во втором случае (15.06.2015 г.) ситуация была несколько похожей, но термическая неустойчивость была значительно слабее. На высокую вероятность возникновения суперячейковых Сb и связанных с ними сильных шквалов указывало наличие упорядоченного сдвига ветра, высокие значения индекса SWEAT и SRH, что также позволяло выдать штормовое предупреждение.

В третьем случае (12.07.2015 г.) основным предиктором, по значениям которого мог быть спрогнозирован сильный шквал, была высокая скорость ветра в средней тропосфере (до 35 м/с). Однако шквал возник на вторичном холодном фронте, что не является характерным для территории Пермского края. За последние 10 лет – это единственный случай сильного шквала, который возник в подобной синоптической ситуации.

И наконец, в четвертом случае (04.08.2016 г.) основным фактором, способствовавшим возникновению сильного шквала, был значительный дефицит точки росы в приземном слое (15 °С и более). С другой стороны, сухость воздуха могла препятствовать реализации энергии неустойчивости, в связи с чем, вероятно, этот случай шквала и не был спрогнозирован.

Рассматривая общие особенности проанализированных случаев возникновения сильных шквалов можно отметить, что во всех случаях значения индекса SWEAT превышали критическое (250) или были близки к нему. Таким образом, высокие значения этого индекса, а также параметра LLS (сдвига ветра в слое 0–1 км) могут рассматриваться как наиболее информативные предикторы для прогноза шквалов в Пермском крае по данным глобальных гидродинамических моделей атмосферы.

При прогнозировании шквалов по данным мезомасштабной модели WRF необходимо учитывать особенности синоптического положения. Модель WRF часто не воспроизводит развитие глубокой конвекции (и связанных с ней шквалов) во внутримассовых ситуациях, при отсутствии

выраженной сходимости воздушных течений. В то же время, как показал проведенный анализ, физико-статистические методы, применяемые в Пермском ЦГМС, в подобном случае (04.08.2016 г.) позволили спрогнозировать шквал. Существенное влияние на успешность прогноза по модели WRF оказывает также выбор горизонтального шага сетки. С одной стороны, при моделировании с низким пространственным разрешением (7,2 км) модель систематически занижает скорость ветра при шквале, но, с другой стороны, время и место возникновения могут быть спрогнозированы точнее, чем при запуске модели с высоким разрешением (3 км). В связи с этим, существенное повышение успешности прогноза может быть связано с использованием вложенных сеток в модели WRF.

Также важно отметить, что значительную роль в усилении шквалов до опасных значений играли местные условия, а именно наличие водохранилища (второй случай) или открытая безлесная местность (третий и четвертый случаи).

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект №16-45-590823 p\_a).

#### Список литературы

1. *Алексеева А.А.* Методы прогноза максимального количества осадков в зонах активной конвекции и альтернативного прогноза сильных ливней и шквалов // Результаты испытаний новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. Информационный сборник № 34. 2007. С. 49-69.
2. *Быков А.В., Ветров А.Л., Калинин Н.А.* Прогноз опасных конвективных явлений в Пермском крае с использованием глобальных прогностических моделей // Труды Гидрометцентра России. 2017. Вып. 363. С. 101-119.
3. *Васильев Е.В., Алексеева А.А., Песков Б.Е.* Условия возникновения и краткосрочный прогноз сильных шквалов // Метеорология и гидрология. 2009. № 1. С. 5-15.
4. *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.
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 двух случаев особо сильных шквалов на Европейской части России летом 2010 г. // Метеорология и гидрология. – 2013. – № 2. – С. 18-30.
7. *Калинин Н.А.* Мониторинг, моделирование и прогноз состояния атмосферы в умеренных широтах. Пермь: Перм. гос. нац. исслед. ун-т, 2015. 308 с.
8. *Калинин Н.А., Ветров А.Л., Связов Е.М., Попова Е.В.* Изучение интенсивной конвекции в Пермском крае с помощью модели WRF // Метеорология и гидрология. 2013. № 9. С. 21-30.
9. *Калинин Н.А., Шихов А.Н., Быков А.В.* Прогноз мезомасштабных конвективных систем на Урале с помощью модели WRF и данных дистанционного зондирования // Метеорология и гидрология. 2017. № 1. С. 16-28.
10. *Переходцева Э.В.* Прогнозирование смерчей и сильных шквалов в Центральном районе России летом 2009 года на основе статистических моделей // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из Космоса. 2010. Т. 7, № 3. С. 33-40.
11. *Песков Б.Е., Голубев А.Д., Алексеева А.А., Дмитриева Т.Г.* Анализ условий возникновения сильного шквала в курской области 3 апреля 2017 года // Труды Гидрометцентра России. 2017. Вып. 364. С. 93-103.

12. Руководство по краткосрочным прогнозам погоды. Часть. 1. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 293 с.

13. Руководство по прогнозированию метеорологических условий для авиации. М.: Госкомгидромет, 1985. 308 с.

14. Шухов А.Н., Быков А.В. База данных об опасных и неблагоприятных явлениях погоды в Пермском крае как региональный аналог ESWD // Географический вестник. 2014. № 4. С. 102-109.

15. Юсупов Ю.И. Метод прогноза шквалов с использованием термодинамических параметров атмосферы и потенциального вихря Эртеля // Метеорология и гидрология. 2013. № 11. С. 55-63.

16. Doswel, C.A., Schultz D.M. On the use of indices and parameters in forecasting severe storms // Electron. J. Sev. Storms Meteorol. 2006. Vol. 1. P. 1-14.

17. Skamarock W.C. et al. A Description of the Advanced Research WRF Version 3. NCAR Techn. Note –475 + STR, June 2008. 125 p.

### References

1. Alekseeva A.A. Metody prognoza maksimal'nogo kolichestva osadkov v zonakh aktivnoi konveksii i al'ternativnogo prognoza sil'nykh livnei i shkvalov. *Rezultaty ispytaniy novykh i usovershenstvovannykh tekhnologii, modelei i metodov gidrometeorologicheskikh prognozov*. Informatsionnyi sbornik no. 34, 2007, pp. 49-69 [in Russ.].

2. Bykov A.V., Vetrov A.L., Kalinin N.A. Prognoz opasnykh konvektivnykh yavlenii v Permskom krae s ispol'zovaniem global'nykh prognosticheskikh modelei [The forecast of dangerous convective phenomena in the Perm Krai with use of global prognostic models]. *Trudy Gidromettsentra Rossii* [Proceedings of Hydrometcenter of Russia], 2016, vol. 363, pp. 101-119. [in Russ.].

3. 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.

4. Vel'tishchev N.F., Zhupanov V.D., Pavlyukov Y.B. Short-range forecast of heavy precipitation and strong wind using the convection-allowing WRF models. *Russ. Meteorol. Hydrol.* 2011, vol. 36, no. 1, pp. 1-10.

5. Dmitrieva T.G., Bukharov M.V., Peskov B.E. Analiz uslovii vozniknoveniya sil'nykh shkvalov po sputnikovoi i prognosticheskoi informatsii [Analysis of arising of strong squalls using satellite and forecast data]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya zemli iz kosmosa* [Current problems in remote sensing of the earth from space], 2011, vol. 8, no. 3, pp. 244-250 [in Russ.].

6. Dmitrieva T.G., Peskov B.E. Numerical forecast with the mesosynoptic specification of extremely severe squalls in the European part of Russia (Case study for June 13 and July 29, 2010). *Russ. Meteorol. Hydrol.* 2013. vol. 38, no. 2, pp. 71-79.

7. Kalinin N.A. Monitoring, modelirovanie i prognoz sostoyaniya atmosfery v umerennykh shirotah [Monitoring, simulation and atmospheric conditions forecasting in temperate latitudes]. Perm: Perm State Univ. Publ., 2015, 308 p. [in Russ.].

8. Kalinin N.A., Vetrov A.L., Sviyazov E.M., Popova E.V. Studying intensive convection in Perm krai using the WRF model. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2013, vol. 38, no. 9, pp. 598-604.

9. Kalinin N.A., Shikhov A.N., Bykov A.V. Forecasting mesoscale convective systems in the Urals using the WRF model and remote sensing data. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2017, vol. 42, no. 1, pp. 9-18.

10. Perekhodtseva E.V. Prognozirovanie smerchei i sil'nykh shkvalov v Tsentral'nom raione Rossii letom 2009 goda na osnove statisticheskikh modelei [The prediction of tornadoes and severe squalls over the Central region of Russia on the summer of the year of 2009 on the basis of the statistical models]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya zemli iz kosmosa* [Current problems in remote sensing of the earth from space], 2010, vol. 7, no. 3, pp. 33-40. [in Russ.].

11. Peskov B.E., Golubev A.D., Alekseeva A.A., Dmitrieva T.G. Analiz uslovii vozniknoveniya sil'nogo shkvala v kurskoi oblasti 3 aprelya 2017 goda [Analysis of conditions of the occur-

rence of a strong squall in the Kursk region on 3 April 2017]. *Trudy Gidromettsentra Rossii* [Proceedings of Hydrometcenter of Russia], 2017, vol. 364, pp. 93-103 [in Russ.].

12. *Rukovodstvo po kratkosrochnym prognozam pogody. Chast' 1.* Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1986, 293 p. [in Russ.].

13. *Rukovodstvo po prognozirovaniyu meteorologicheskikh uslovii dlya aviatsii.* Moscow: Goskomgidromet Publ., 1985, 308 p. [in Russ.].

14. *Shikhov A.N., Bykov A.V.* Baza dannykh ob opasnykh i neblagopriyatnykh yavleniyakh pogody v Permskom krae kak regional'nyi analog ESWD [The database on hazardous and severe weather events in the Perm region as a regional analogue ESWD]. *Geograficheskii vestnik* [Geographical bulletin], no. 4, pp. 102-109 [in Russ.].

15. *Yusupov Y.I.* The method of forecasting squalls using thermodynamic atmospheric parameters and the Ertel potential vorticity. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2013, vol. 38, no. 11, pp. 759-765.

16. *Doswell C.A., Schultz D.M.* On the use of indices and parameters in forecasting severe storms. *Electron. J. Sev. Storms Meteorol.*, 2006, vol. 1, pp. 1-14.

17. *Skamarock W.C. et al.* A Description of the Advanced Research WRF Version 3. NCAR Techn. Note –475 + STR, June 2008. 125 p.

*Поступила в редакцию 17.11.2017 г.*

*Received by the editor 17.11.2017.*