

*А.А. Алексеева, Ю.И. Юсупов, А.Н. Багров,
О.Ю. Демидова, И.М. Смирнова, Ю.Я. Черногубова*

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЯ МЕТОДА ПРОГНОЗА ШКВАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ АТМОСФЕРЫ И ПОТЕНЦИАЛЬНОГО ВИХРЯ ЭРТЕЛЯ

Введение

Прогноз шквалов является одной из самых сложных задач для прогнозистов погоды, также не меньшую трудность вызывает разработка методов их прогноза. При этом велика важность решения этих задач, т. к. шквалы относятся к явлениям погоды, представляющим угрозу безопасности людей и способным нанести значительный ущерб различным отраслям экономики. До сих пор на практике синоптиками используются методы прогноза шквалов Б.Е. Пескова [7], А.И. Снитковского [7, 10], Г.Д. Решетова [11] и Фобуша–Миллера [10], рекомендованные ЦМКП Росгидромета к применению на территории России. Успешность прогноза с помощью указанных методов в большой степени зависит от правильной оценки синоптической ситуации, а это является довольно трудной и субъективной задачей. Эти методы не автоматизированы. В некоторых УГМС Росгидромета автоматизированы отдельные этапы прогноза (расчетов) данными методами. В последнее десятилетие быстрыми темпами развивались мезомасштабные модели [4, 9], в рамках которых также прогнозируются порывы ветра, в т.ч. сильного. Продолжает активно развиваться направление разработки методов прогноза шквалов на основе использования модельных данных разного пространственного разрешения [1–3, 5, 6, 16, 17].

В настоящее время в ФГБУ «Гидрометцентр России» в оперативном режиме проводится мониторинг восьми подходов к автоматизированному прогнозу порывов сильного ветра, включая шквалы, результаты которого будут подведены в 2015 году: двух рекомендованных к внедрению решениями ЦМКП Росгидромета методов [1, 2, 5, 6] на основе региональной модели ФГБУ «Гидрометцентр России» с разрешением 75 км; модели COSMO-Ru с разрешением 7 и 2,2 км [4, 9]; методов прогноза сильных шквалов Е.В. Васильева [3] и скорости ветра при шквале [2], реализованных также на основе региональной модели ФГБУ «Гидрометцентр России»; метода на основе данных модели WRF–ARW с разрешением ~20 км (автор – М.М. Смирнова) и рассматриваемого в данной статье метода с использованием термодинамических параметров атмосферы и потенциального вихря Эртеля (автор – Ю.И. Юсупов, ГИС «Метео»).

Методика и алгоритм прогноза шквалов с использованием термодинамических параметров атмосферы и потенциального вихря Эртеля

В ряде работ [18–20, 25, 27] для диагноза и прогноза зон активной конвекции предлагается воспользоваться расчетом потенциального вихря в тропосфере. Согласно [23], наличие положительной аномалии потенциального вихря (PV) в верхних и средних слоях тропосферы приводит к уменьшению конвективной устойчивости в нижних слоях. Здесь и далее под аномалией потенциального вихря подразумевается [23] положительный в Северном полушарии локальный максимум энтропического потенциального вихря. В [26] отмечается, что аномалия PV в верхней и средней тропосфере связана с развитием конвективных процессов, способствующих подъему воздушных частиц с нижних уровней. Изменения в значении PV происходят в основном в результате нагрева воздуха, вызванного выделением скрытой теплоты конденсации [19], поэтому образование аномалии PV в средней тропосфере чаще всего связано с развитием глубокой влажной конвекции. Аномалия потенциального вихря в средней и верхней тропосфере [27] вызывает изменения в стратификации температуры таким образом, что уменьшается статическая устойчивость атмосферы, уменьшается энергия противодействия конвекции (CIN) и увеличивается доступная

потенциальная энергия конвекции (CAPE). В [18, 20, 26] предлагается использовать расчет потенциального вихря для диагноза формирования и развития линии шквалов. Согласно [17], основное преимущество в использовании для этой цели потенциального вихря состоит в том, что PV чувствителен к изменению как количества движения, так и притока тепла. В [16] описан способ прогноза зон наиболее вероятного возникновения шквалов, основанный на расчете области пересечения аномалии потенциального вихря и бароклинных зон в нижней тропосфере. В [17] подробно излагается дальнейшее развитие этого метода.

Напомним кратко методику и алгоритм расчета прогнозов, изложенных в [17]. По современным представлениям шквалы происходят в результате глубокой влажной конвекции [22]. Необходимы три условия, при которых происходит влажная конвекция [22, 25]: 1) достаточная влажность в приземном слое (не менее 60 %); 2) неустойчивость или слабая устойчивость в нижней тропосфере; 3) динамическое вынуждение, в результате которого происходит подъем воздушных частиц до уровня свободной конвекции. Известно, что большинство шквалов (более 80 %, в том числе самых сильных) происходят на холодных фронтах [7, 11]. Одним из условий существования активных фронтальных зон является достаточное количество влаги в приземном слое [14, 15, 24]. Согласно [14], в окрестностях фронтов систематически формируются конвективно-неустойчивые или слабоустойчивые слои. Таким образом, в активной фронтальной зоне выполняются первые два необходимых для развития глубокой влажной конвекции условия. В [23] взрывное понижение давления на поверхности земли объясняется мощными восходящими движениями, которые возникают при взаимодействии положительной (в Северном полушарии) аномалии потенциального вихря с бароклинными зонами в нижней тропосфере. В результате этого взаимодействия возникает система с положительной обратной связью, состоящая из аномалии потенциального вихря в верхних слоях тропосферы и положительной температурной аномалией в приземной бароклинной зоне. Таким образом, присутствие положительной аномалии PV в тропосфере, с одной стороны, является признаком существования зон активной конвекции [19, 27], с другой [23] – взаимодействие аномалии PV с приземными бароклинными зонами создает условия для динамического вынуждения (третьего

условия), способствующего образованию и усилению конвекции. Следовательно, определив аномалии потенциального вихря и приземные бароклинные зоны, при условии их пересечения, можно предположить с большой долей вероятности о существовании или формировании в этой области зоны активной конвекции.

Согласно [3], скорость ветра при шквале зависит от кинетической энергии нисходящего потока и от горизонтального ветра в нижних и средних слоях тропосферы. Поэтому далее в найденной области необходимо исследовать распределение ветра на высотах. Потенциальный вихрь Эртеля математически представляет собой произведение абсолютного вихря на изэнтропической поверхности на выражение, определяющее устойчивость атмосферы [22]. В [16] предлагалось рассчитывать значение потенциального вихря, приведенное к изобарической поверхности 500 гПа, в качестве одного из предикторов. Положение бароклинных зон рассчитывалось по модифицированной методике [24]. Активные фронты всегда сопровождаются мощными восходящими движениями и, следовательно, развитыми облачными системами и зонами осадков [15]. Поэтому, для устранения тех участков гребней, которые не соответствуют активным фронтальным зонам, используется индекс влажности [17]. Как уже отмечалось выше, наиболее опасные шквалы возникают на холодных фронтах [7], кроме того, только на холодном фронте [23] возможно образование положительной температурной аномалии в нижней тропосфере, возникающей вследствие циклонической циркуляции в бароклинной зоне. Поэтому был предусмотрен алгоритм определения холодных и теплых участков фронта [21].

Максимальную скорость ветра при шквале можно рассчитать, воспользовавшись методом [12].

Оценка эффективности прогноза шквалов с использованием термодинамических параметров атмосферы и потенциального вихря Эртеля

Мониторинг прогнозов испытываемым методом и их автоматизированная оценка в течение 2011–2013 гг., осуществляемые в ФГБУ «Гидрометцентр России» А.Н. Багровым, показали, что прогнозы порывов ветра ≥ 18 м/с, базирующиеся на модели NCEP с разрешением

0,5°×0,5°, имеют достаточно высокое качество. Поскольку поступали эти прогнозы для оценки в неоперативном режиме, результаты такого испытания могут рассматриваться только как результаты авторских испытаний. Для внедрения в практику данного метода прогноза на сетке с разрешением 0,5°×0,5° необходимо провести испытание таких прогнозов в оперативном режиме. Поскольку ГИС «Метео» не имеет данных НСЕР с таким разрешением в оперативном режиме, испытания метода были проведены на сетке с разрешением 1°×1°. Исходя из полученных высоких показателей точности прогнозов в рамках авторских испытаний, было решено испытать данные прогнозы в оперативном режиме непосредственно синоптиками. Такие испытания проводились в ФГБУ «Центрально-Черноземное УГМС», ФГБУ «Смоленский ЦГМС» – филиал ФГБУ «Центральное УГМС» и ФГБУ «Обь-Иртышское УГМС». Кроме того, результаты автоматизированной оценки прогнозов порывов ветра 20–24 м/с и 25 м/с и более, проведенной А.Н. Багровым с разрешением 1°×1°, проанализированы зав. научно-методическим сектором ФГБУ «Гидрометцентр России» А.А. Алексеевой.

Испытания метода прогноза шквалов (далее – Испытания) проводились в период с 1 мая по 30 сентября 2013 г. в ФГБУ «Центрально-Черноземное УГМС» и ФГБУ «Обь-Иртышское УГМС» и с 1 мая по 30 октября 2013 г. – в ФГБУ «Смоленский ЦГМС» – филиал ФГБУ «Центральное УГМС». Прогноз составлялся для Курской, Белгородской, Брянской, Орловской, Воронежской, Тамбовской, Липецкой областей (ЦЧО); а также для Смоленской и Омской областей дважды в сутки. Прогнозы сроком на 12 и 24 ч (на полусутки –6...+6 ч от середины дня и середины ночи), рассчитанные по данным от 00 ч ВСВ, поступали в виде карт со значениями скорости ветра в узлах сетки 1°×1° по электронной почте около 07 ч ВСВ, рассчитанные по данным от 12 ч ВСВ – около 19 ч ВСВ. Таким образом, в прогнозе на 12 ч отсутствовала достаточная заблаговременность для оперативного прогноза, поскольку прогнозы поступали через 50 минут после начала срока действия прогноза (06 и 18 ч ВСВ).

Испытания проводились в соответствии с Положением [8], РД 52.27.284-91 [12] и РД 52.27.724-2009 (далее – Наставление) [13]. Программа испытаний в принятом виде отсутствовала, но учитывались рекомендации и разъяснения, полученные от методистов ФГБУ «Гидрометцентр России».

Результаты испытаний по ЦЧО и Смоленской области

Рассмотрим результаты испытаний по ЦЧО и Смоленской области, т. к. испытания и оценка прогнозов проводились аналогично. В Омской области выбраны другие градации скорости ветра для оценки и прогнозы оценивались по 20 пунктам наблюдений, т. к. другие районы области плохо освещены фактическими данными.

Для проведения испытаний из прогностических данных в узлах сетки, расположенных в пределах территории каждой области или на ее границе, выбирался максимальный порыв ветра, начиная с 15 м/с для ЦЧО и с 12 м/с для Смоленской области, Смоленский ЦГМС при выборе минимального порыва ветра руководствовался тем, что необходимо обслуживать предприятия энергетики, для которых порыв 12 м/с является штормовым. При порывах ветра ≥ 18 м/с осуществлялась географическая привязка узла сетки к территории распространения внутри области.

По возможности дополнительно анализировалась причина возникновения порывов ветра: шквалистое усиление при развитии активной конвективной деятельности или в результате увеличения градиента приземного атмосферного давления. Для оценки прогнозов из журнала фактической погоды, штормового журнала, данных обследований (при возникновении явления за пределами метеостанций) выбирались данные об усилении ветра до ≥ 15 м/с для ЦЧО и ≥ 12 м/с Смоленской области. Оценить полученные для испытаний прогнозы ветра для градации с интервалом 5 м/с и с допуском 2 м/с по Наставлению, п. 7.3.3.3, аналогично оценке синоптических прогнозов, в данном случае было невозможно, следовательно, сопоставление успешности данных прогнозов и синоптических не производилось. Некоторые сложности в оценку прогнозов по востоку региона ЦЧО (Воронежская, Липецкая и Тамбовская области) внесло несоответствие периодов прогноза на день 06–18 ч ВСВ и на ночь 18–06 ч ВСВ с фактическими периодами полусуток в данной части региона – день 03–15 ч ВСВ, ночь – 15–03 ч ВСВ. Для более объективного анализа привлекалась штормовая информация. Оценку прогнозов шквалов по методу Ю.И. Юсупова стало возможным произвести лишь в соответствии с п. 8 (оценка успешности штормовых предупреждений) Наставления. Согласно п. 8.1.2, «Оценке успешности подлежат все

штормовые предупреждения с учетом «пропущенных» ОЯ, которые не спрогнозированы, но наблюдались». Поэтому при прогнозировании скорости ветра 20 м/с и более считалось, что вероятны условия для возникновения КМЯ – комплексов неблагоприятных метеорологических явлений с ветром ≥ 20 м/с, в сочетании с другими конвективными явлениями. Оправдывался прогноз в случае достижения фактической скорости ветра 18–24 м/с. При прогнозировании ветра ≥ 25 м/с считалось, что ожидаются условия для опасного явления (ОЯ) (шквалистое или при порывах усиление ветра до ≥ 25 м/с). Оправдывался прогноз в случае достижения ветром фактической скорости ≥ 23 м/с. В соответствии с Наставлением прогноз считался эффективным, если он оправдался (в том числе с допуском) и был выпущен не позднее, чем за 2 часа до возникновения явления.

Расчет показателей успешности штормовых предупреждений за период испытаний проводился в соответствии с п. 9.2 Наставления.

По итогам испытаний для ЦЧО были получены следующие результаты:

Средняя оправдываемость ($P_{ср}$) прогноза ветра в критериях КМЯ (от 20 до 24 м/с): от 00 ч ВСВ на 12 ч (день) – 9 %, на 24 ч (ночь) – 0 %; от 12 ч ВСВ на 12 ч (ночь) – 0 %, на 24 ч (день) – 0 %.

Средняя оправдываемость ($P_{ср}$) прогноза ветра в критериях ОЯ (≥ 25 м/с): от 00 ч ВСВ на 12 ч (день) – 0 %, на 24 ч (ночь) – не рассчитывалась (не было как фактических ОЯ, так и прогнозов ОЯ); от 12 ч ВСВ на 12 ч (ночь) – 0 %, на 24 ч (день) – 0 % (в этом случае оправдываемость также можно было не рассчитывать, поскольку прогноз на день 29.06.2013 г., когда в единственном случае фактически наблюдалось ОЯ – шквал 26 м/с по Тамбовской области, не поступил).

Предупрежденность (Π) прогнозов КМЯ (от 20 до 24 м/с) составила от 00 ч ВСВ на 12 ч (день) – 20 %, на 24 ч (ночь) – 0 %; от 12 ч ВСВ на 12 ч (ночь) и 24 ч (день) – 0 %.

Предупрежденность (Π) прогнозов шквалов ОЯ (≥ 25 м/с) во всех случаях была 0 %, в прогнозе от 00 ч ВСВ на 24 ч не рассчитывалась ввиду отсутствия явлений (и факта, и прогноза).

Эффективность (Θ) предупреждений составила 100 % только в двух случаях и была равна их оправдываемости $\Theta=P=100$ %, когда оправдавшиеся на дневное время 28 июня прогнозы КМЯ по

Курской и Орловской областям были получены по электронной почте за 5–7 часов до возникновения явления (шквалистое усиление ветра до 18–19 м/с).

Средняя абсолютная ошибка прогноза скорости ветра δV наибольшей оказалась в прогнозах от 12 ч ВСВ с заблаговременностью 12 ч и составила 7 м/с (по областям за период прогноза была в диапазоне от 6 до 8 м/с), такие же показатели оказались и у средней систематической ошибки прогноза скорости ветра $s\delta V$. Средняя абсолютная ошибка прогноза скорости ветра от 12 ч ВСВ с заблаговременностью 24 ч составила 4,4 м/с (от 4 до 5 м/с), от 00 ч ВСВ с заблаговременностью 12 ч – 4,1 м/с (4–5 м/с), 24 ч – 5,3 (4–7 м/с). Средняя систематическая ошибка прогноза скорости ветра с заблаговременностью 24 ч оказалась отрицательной – минус 0,3 м/с (от минус 1 м/с до 0), от 00 ч ВСВ с заблаговременностью 12 ч – 0,7 м/с (0–2 м/с), 24 ч – 3,4 (2–5 м/с).

Следует отметить, что теплый сезон 2013 г. на территории деятельности ФГБУ «Центрально-Черноземное УГМС» в целом не отличался активной конвективной деятельностью. Раннее наступление теплого сезона и, как следствие, активизация конвективных процессов требовало и начала испытаний в регионе в более ранние сроки. Поэтому случаев для анализа сильного и очень сильного ветра за весь период испытаний, часть из которых была упущена в конце апреля, представилось не много. В преобладающем числе случаев наблюдалось шквалистое усиление ветра, лишь в период 23–25 мая отмечался некоторый вклад градиентной составляющей в усиление ветра в передней части волнового южного циклона, но одновременно также формировались и грозы, поэтому к градиентному ветру в чистом виде отнести эти случаи нельзя. При этом было выявлено достаточно большое число ложных тревог в прогнозах ветра в градации КМЯ ($V_{пр}$ от 20 до 24 м/с), но лишь с заблаговременностью 12 ч. Наибольшее количество ложных тревог было обнаружено в прогнозах от 12 ч ВСВ с заблаговременностью 12 ч (на ближайшую ночь, период действия прогноза 18–06 ч ВСВ) – всего 34 случая, в прогнозах от 00 ч ВСВ с заблаговременностью 12 ч (на текущий день, период действия прогноза 06–18 ч ВСВ) – 13 случаев. От исходного срока 00 ч ВСВ с заблаговременностью 24 ч (следующая ночь) их не было, а от 12 ч ВСВ на 24 ч (следующий день) – всего 4 случая. Положительным моментом можно считать то, что ложных тревог

в прогнозах ОЯ ($V_{пр} \geq 25$ м/с) практически не было. Отмечены лишь 2 случая лишнего прогноза ОЯ ($V_{пр} \geq 25$ м/с). Первый – от 12 ч ВСВ с заблаговременностью 12 ч на ночь 9.07.2013 г. в узле сетки на стыке Тамбовской и Саратовской областей. Однако объективно оценить данную ситуацию не представляется возможным из-за редкой сети станций, большого расстояния между узлами сетки. Вероятно, что в западных районах Саратовской области мог отмечаться сильный локальный шквал, так как потенциально синоптическая ситуация способствовала возникновению данного явления: наличие мезовихря в средней тропосфере, влияние тропической воздушной массы. Отсутствует информация о влагосодержании воздуха. Второй ложный прогноз ОЯ ($V_{пр} \geq 25$ м/с), был дан по северу Брянской области (М-2 Жуковка) в узле сетки на стыке с Калужской областью от 00 ч ВСВ с заблаговременностью 12 ч на день 14.08.2013 г. Фактически днем 14 августа порывов ветра более 15 м/с не отмечалось, но предыдущей ночью 14 августа в 21.25–21.32 ч ВСВ М-2 Жуковка отметила шквал при грозе скоростью до 23 м/с. Таким образом, прогноз ОЯ (≥ 25 м/с) в том же районе Брянской области был дан после факта сильного ветра. В связи с этим в прогностической информации от исходного срока 12 ч ВСВ была выявлена достаточно необычная особенность: нередко после активной конвекции в дневные часы (с усилением ветра до 20 м/с и более) прогноз на 12 ч (на ближайшую ночь или, как в случае 14.08.2013 г. по Брянской области, на ближайший день) давал усиление ветра, как бы повторяя факт (ложная тревога), который по времени заканчивался в дневные часы и соответственно не оправдывался. При этом район прогноза практически во всех случаях совпадал с районом осуществившегося факта до начала действия прогноза. Примеры таких случаев приведены в табл. 1.

Анализируя полученные данные, можно сделать вывод, что в методе прогноза шквалов с применением термодинамических параметров атмосферы и потенциального вихря Эртеля от исходного срока 12 ч ВСВ (время максимальной конвекции) на ближайшую ночь (на 12 ч) – это 34 случая, о которых упоминалось ранее, очень велик вклад исходных параметров и присутствует значительная доля инерции. В то же время, как и в прогнозе от 00 ч ВСВ, тоже на ночь, но с заблаговременностью 24 ч, они не прогнозировались ни разу.

Таблица 1

**Примеры ложных тревог: прогнозы от 12 ч ВСВ с заблаговременностью 12 ч
(на предстоящую ночь, период прогноза 18–06 ч ВСВ) для ЦЧО**

№ п/п	Область	Дата, время Vфакт	Vфакт, м/с; пункт	Дата Vпр	Vпр, м/с	Vфакт, м/с
1	Курская	25.05.13 г. 11.25–11.30	18 м/с Рыльск	26.05.13 г.	20 м/с	–
2	Белгород- ская	24.05.13 г. 14.03–15.58	18 м/с Н. Оскол	25.05.13 г.	20 м/с	–
3		05.07.13 г. 13.11–13.23	20 м/с Готня	06.07.13 г.	22 м/с	–
4	Брянская	26.06.13 г. 15.01–15.20	18 м/с Унеча	27.06.13 г.	20 м/с	–
5	Орловская	23.05.13 г. 16.55–17.02	18 м/с Орел	24.05.13 г.	20 м/с	–
6		24.05.13 г. 15.30–15.55	21 м/с Мценск	25.05.13 г.	23 м/с	15 м/с
7	Воронеж- ская	20.05.13 г. 13.30–14.14	20 м/с Воронеж	20.05.13 г.	22 м/с	–
8		17.06.13 г. 12.37–12.55	21 м/с Павловск	18.06.13 г.	23 м/с	–
9	Тамбовская	27.05.13 г. 14.00–14.30	18 м/с Моршанск	28.05.13 г.	20 м/с	–
10		15.08.13 г. 11.38–12.21	18 м/с Мичуринск	16.08.13 г.	20 м/с	–
11	Липецкая	05.06.13 г. 15.06–15.12	18 м/с Липецк	06.06.13 г.	20 м/с	–
12		07.07.13 г. 10.30–11.20	18 м/с Л. Толстой	08.07.13 г.	20 м/с	–
13		20.07.13 г. 10.17–10.21	20 м/с Липецк	21.07.13 г.	22 м/с	–

В прогнозах на день (период с 06 до 18 ч ВСВ) наилучший результат был у прогноза от 00 ч ВСВ на 12 ч: было дано 15 прогнозов КМЯ (Vпр от 20 до 24 м/с), в том числе один прогноз ОЯ (Vпр \geq 25 м/с), при этом лишь 2 случая прогнозов КМЯ из них оправдались. Фактически на территории деятельности Центрально-Черноземного

УГМС наблюдалось 10 КМЯ ($V_{\text{факт}} \geq 20$ м/с) (в том числе одно ОЯ 26 м/с), из которых в 5 случаях они не были предусмотрены модельным прогнозом, в 3 случаях прогноз отсутствовал.

Детально оценить совпадение районов прогноза шквалов ОЯ и КМЯ ($V_{\text{пр}} \geq 20$ м/с) с районами, где фактически отмечалась такая скорость ветра ($V_{\text{факт}} \geq 20$ м/с) не представилось возможным из-за низкой оправдываемости прогнозов шквалистого усиления ветра по методу Ю.И. Юсупова. В тех двух случаях, когда по Курской и Орловской областям оправдалась прогностическая скорость шквалов в градации КМЯ от 00 ч ВСВ на 12 ч (на день 28.06.2013 г.), оправдался и район прогноза – восток Курской области (М-2 Тим) и юго-восток Орловской области (М-2 Ливны).

Выводы и рекомендации

1. Испытания показали необходимость корректировки исходных модельных параметров с применением метода термодинамических параметров атмосферы и потенциального вихря Эртеля, исключение инерционного фактора, особенно от исходного срока 12 ч ВСВ с заблаговременностью 12 ч (на ночь).

2. Низкая оправдываемость прогнозов шквалов может быть объяснима недостаточным учетом мезомасштабных процессов, с которыми часто связаны локальные конвективные ОЯ и КМЯ.

3. Повышение успешности испытываемого метода, особенно при угрозе ОЯ и КМЯ, возможно при уточнении исходных параметров, увеличении числа расчетов (например, с дискретностью до 3 ч), а также с увеличением пространственного разрешения по горизонтали для выявления мезо- и микромасштабных процессов в пределах конкретных территорий.

4. Решение Технического совета ФГБУ «Центрально-Черноземное УГМС» от 11 марта 2014 г.: учитывая неудовлетворительные результаты успешности метода в период испытания, его использование в практической деятельности считать нецелесообразным.

По итогам испытаний для Смоленской области были получены следующие результаты:

Средняя оправдываемость ($P_{\text{ср}}$) прогноза ветра от 12 до 14 м/с: от 00 ч ВСВ на 12 ч (день) – 33 %, на 24 ч (ночь) – 13 %; от 12 ч ВСВ на 12 ч (ночь) – 8 %, на 24 ч (день) – 26 %.

Средняя оправдываемость ($P_{\text{ср}}$) прогноза ветра от 15 до 19 м/с: от 00 ч ВСВ на 12 ч (день) – 33 %, на 24 ч (ночь) – 13 %; от 12 ч ВСВ на 12 ч (ночь) – 15 %, на 24 ч (день) – 36 %.

Средняя оправдываемость ($P_{\text{ср}}$) прогноза ветра в критериях КМЯ (от 20 до 24 м/с): от 00 ч ВСВ на 12 ч (день) – 0 %, на 24 ч (ночь) – 0 %; от 12 ч ВСВ на 12 ч (ночь) – 12 %, на 24 ч (день) – 25 %.

Средняя оправдываемость ($P_{\text{ср}}$) ветра в критериях ОЯ (≥ 25 м/с): от 00 ч ВСВ на 12 ч (день) и на 24 ч (ночь) – 0 % (ОЯ по прогнозу не давалось); от 12 ч ВСВ на 12 ч (ночь) и на 24 ч (день) – 0 % (ОЯ по прогнозу не давалось). Единственный случай, когда фактически наблюдалось ОЯ, прогнозом не предусмотрен – шквал 25 м/с на метеостанции Вязьма 26 июня в 21.15–21.30.

Предупрежденность прогнозов (П) КМЯ (от 20 до 24 м/с) составила: от 00 ч ВСВ на 12 ч (день) – 0 %, на 24 ч (ночь) – 0 %; от 12 ч ВСВ на 12 ч (ночь) – 100 %, на 24 ч (день) – 100 %.

Предупрежденность (П) шквалов ОЯ (≥ 25 м/с) составила: 0 % от 00 ч ВСВ на 12 и 24 ч; от 12 ч ВСВ на 12 ч и 24 ч – единственное фактическое явление прогнозом не было предусмотрено.

Эффективность предупреждений КМЯ составила 100 % только в 2 случаях и была равна их оправдываемости $\Theta=P=100$ %, когда 23 сентября оправдался прогноз от 12 ч ВСВ на ночь (на 12 ч) и от 06 ч ВСВ на 24 ч был дан прогноз ветра 16–19 м/с и наблюдалось шквалистое усиление ветра на метеостанции Починок до 20 м/с в 3.59–4.50 ч ВСВ, а также 29 октября, когда прогнозом от 12 ч ВСВ на день (на 24 ч) давался ветер 16–22 м/с, а на метеостанции Велиж наблюдалось шквалистое усиление ветра до 19 м/с.

Средняя абсолютная ошибка прогноза скорости ветра δV наибольшей оказалась от срока 12 ч ВСВ с заблаговременностью 12 ч и составила 5,5 м/с, средняя систематическая ошибка – 5,0 м/с. Второй по величине стала средняя абсолютная ошибка прогноза от 00 ч ВСВ с заблаговременностью 24 ч и составила 4,4 м/с (средняя систематическая ошибка 4,5 м/с).

Средняя абсолютная ошибка прогноза скорости ветра от 00 ч ВСВ заблаговременностью 12 ч и от 12 ч ВСВ с заблаговременностью 24 ч составила, соответственно, 2,1 и 2,0 м/с при систематической ошибке +11,2 и +1,0.

Было выявлено большое число ложных тревог во всех градациях в прогнозах ветра. Наибольшее количество ложных тревог было обнаружено в прогнозах от 12 ч ВСВ с заблаговременностью 12 ч (на ближайшую ночь, период действия прогноза 18–06 ч ВСВ) – всего 18 случаев; в прогнозах от 00 ч ВСВ с заблаговременностью 12 ч (на текущий день, период действия прогноза 06–18 ч ВСВ) – 13 случаев. От исходного срока 00 ч ВСВ с заблаговременностью 24 ч (следующая ночь) – 3 случая; от 12 ч ВСВ на 24 ч (следующий день) – 3 случая.

В связи с этим в прогностической информации от исходного срока 12 ч ВСВ нередко после активной конвекции в дневные часы прогноз на 12 ч (на ближайшую ночь) давал усиление ветра, как бы повторяя факт (ложная тревога), который по времени заканчивался в дневные часы и, соответственно, не оправдывался.

Анализируя полученные данные, можно прийти к аналогичному в сравнении с ФГБУ «Центрально-Черноземное УГМС» заключению, что в методе прогноза шквалов с применением термодинамических параметров атмосферы и потенциального вихря Эртеля очень велик вклад исходных параметров и присутствует значительная доля инерции.

Было дано 17 прогнозов КМЯ ($V_{пр}$ от 20 до 24 м/с), при этом лишь 2 случая из них оправдались, оба прогноза от 12 ч ВСВ, один с заблаговременностью 12 ч, другой – 24 ч. Один случай КМЯ не был предусмотрен. Единственный случай ОЯ (шквал 25 м/с на метеостанции Вязьма 26 июня в 21.15–21.30) тоже не был предусмотрен прогнозами ни за срок 00, ни за срок 12 ч ВСВ (прогнозировался ветер 7–9 м/с).

Выводы и рекомендации

Решение Технического совета ФГБУ «Смоленский ЦГМС» – филиал ФГБУ «Центральное УГМС» от 21 апреля 2014 г.: результаты испытаний указывают на необходимость доработки метода, его использование в практической деятельности на данный момент нецелесообразно.

Результаты испытаний по Омской области

Оценка прогнозов по Омской области проводилась только для 20 станций метеорологических наблюдений. При этом прогностические данные в узлах сетки интерполировались в пункт наблюдения (присваивалось промежуточное значение максимальной скорости

ветра вокруг узла в радиусе 1/2 размера шага сетки). Данные о фактических порывах ветра в пунктах наблюдений использовались без осреднения и интерполяции. Оценивались градации скорости ветра 15–24 м/с и ≥ 25 м/с.

Матрицы сопряженности прогнозов порывов ветра испытываемым методом представлены в табл. 2, а показатели успешности прогнозов – в табл. 3.

Таблица 2

Матрицы сопряженности прогнозов шквала испытываемым методом для Омской области

Для градации 15–24 м/с							
Прогноз на 1-е сутки (день)	Фактическое количество случаев			Прогноз на 1-е сутки (ночь)	Фактическое количество случаев		
	с явлен.	без явлен.	всего		с явлен.	без явлен.	всего
с явлением	129	236	365	с явлением	32	226	258
без явления	79	2274	2353	без явления	9	2453	2462
всего	208	2510	2718	всего	41	2679	2720
Прогноз на 2-е сутки (день)	Фактическое количество случаев			Прогноз на 2-е сутки (ночь)	Фактическое количество случаев		
	с явлен.	без явлен.	всего		с явлен.	без явлен.	всего
с явлением	46	178	224	с явлением	11	329	340
без явления	163	2291	2454	без явления	31	2409	1440
всего	209	2469	2678	всего	42	2738	2780
Для градации ≥ 25 м/с							
Прогноз на 1-е сутки (день)	Фактическое количество случаев			Прогноз на 1-е сутки (ночь)	Фактическое количество случаев		
	с явлен.	без явлен.	всего		с явлен.	без явлен.	всего
с явлением	0	7	7	с явлением	0	0	0
без явления	2	2710	2712	без явления	0	2720	2720
всего	2	2717	2719	всего	0	2720	2720
Прогноз на 2-е сутки (день)	Фактическое количество случаев			Прогноз на 2-е сутки (ночь)	Фактическое количество случаев		
	с явлен.	без явлен.	всего		с явлен.	без явлен.	всего
с явлением	0	0	0	с явлением	0	0	0
без явления	2	2678	2680	без явления	0	2780	2780
всего	2	2678	2680	всего	0	2780	2780

Таблица 3

Показатели успешности метода прогноза шквалов для Омской области

Показатели качества прогнозов	Порывы ветра 15–24 м/с				Порывы ветра ≥ 25 м/с			
	1-е сутки		2-е сутки		1-е сутки		2-е сутки	
	день	ночь	день	ночь	день	ночь	день	ночь
Оправдываемость явления, %	35,3	12,4	20,5	3,2	0	–	–	–
Предупрежденность явления, %	62,0	78,0	22,0	26,2	0	–	0	–
Предупрежденность случаев без явления, %	90,6	91,6	92,8	87,9	99,7	100	100	100
Ложные тревоги, %	64,7	87,6	79,5	96,8	100	0	0	0
Пропуск цели, %	38,0	22,0	78,0	73,8	100	0	100	0
Критерий качества Пирси–Обухова	0,53	0,70	0,15	0,14	0	0	0	0

Для определения практической значимости испытываемого метода прогноза были рассчитаны абсолютные и средние систематические ошибки скорости ветра при шквалах, представленные в табл. 4.

Таблица 4

Средние абсолютные и средние систематические ошибки прогнозов скорости порывов ветра при шквалах для Омской области

Прогноз	Средняя абсолютная ошибка, м/с		Средняя систематическая ошибка, м/с	
	прогноз на ночь	прогноз на день	прогноз на ночь	прогноз на день
Для градации 15–24 м/с				
на 1-е сутки	6,9	4,3	6,8	3,5
на 2-е сутки	7,9	5,3	7,8	4,8
Для градации ≥ 25 м/с				
на 1-е сутки	–	10,3	–	10,3
на 2-е сутки	–	–	–	–

Как видно из табл. 2–4, шквалы градации ОЯ (опасные явления) испытываемым методом прогнозируются неудовлетворительно: за

исследуемый период порывы ветра ≥ 25 м/с практически не прогнозировались (спрогнозировано всего 7 случаев, причем все они попали в «ложные тревоги», а фактически наблюдаемые 2 случая шквалов данной градации были не предсказаны).

Как видно из анализа табл. 4, с увеличением заблаговременности прогнозов ошибки прогнозов скорости ветра при порывах растут. В ночное время прогнозы точнее. Следует отметить, что велико количество как «ложных тревог», так и «пропусков цели» (табл. 3). В целом прогноз порывов скорости ветра при шквалах имеет низкое качество.

Поскольку прогноз порывов ветра является сложной задачей, а испытываемый метод автоматизирован и имеет на первые сутки довольно высокую предупрежденность при прогнозе скорости порывов ветра 15–24 м/с, особенно это относится к прогнозу градиентного ветра, Технический совет ФГБУ «Обь-Иртышское УГМС» принял решение: использовать прогнозы, рассчитанные по данному методу, для скоростей в градации 15–24 м/с в качестве вспомогательных к синоптическому по территории Омской области. Но необходимо выполнить условие, чтобы данные прогнозы в рамках ГИС «Метео» поступали перед выпуском оперативного прогноза на первые и вторые сутки. В период испытаний прогнозы передавались по электронной почте и опаздывали. Ветры в градации ОЯ прогнозируются методом плохо.

Если сравнить результаты испытаний метода в трех подразделениях Росгидромета, можно отметить их схожесть. По-видимому, больший процент в предупрежденность скорости порывов ветра в градации 15–24 м/с в Омской области вносят ветры 15–20 м/с. Поэтому, когда в ЦЧО оценили только скорости порывов ветра 20–24 м/с, резко упала точность их прогноза. Этот вывод подтверждают и результаты успешности прогнозов порывов ветра в градациях 12–14 и 15–19 м/с, полученные для Смоленской области.

Кроме того, результаты автоматизированной оценки прогнозов порывов ветра 20–24 м/с и 25 м/с и более, проведенной А.Н. Багровым с разрешением $1^\circ \times 1^\circ$, проанализированы зав. научно-методическим сектором ФГБУ «Гидрометцентр России» А.А. Алексеевой.

Результаты анализа автоматизированной оценки прогнозов

Зав. научно-методическим сектором ФГБУ «Гидрометцентр России» А.А. Алексеевой проанализированы результаты автоматизированной оценки прогнозов, проведенной в ФГБУ «Гидрометцентр России» А.Н. Багровым, с целью выявления полезности для синоптиков прогнозов испытываемым методом и их сравнения с другими автоматизированными прогнозами скорости порывов сильного ветра (включая шквалы). Для сравнения привлекались, как уже указывалось, аналогичные автоматизированные прогнозы порывов ветра, в оперативном режиме передаваемые для оценки: двумя внедренными методами (авторы – А.А. Алексеева и Э.В. Переходцева) на основе региональной модели Гидрометцентра России с разрешением по горизонтали 75 км; двумя методами на основе этой же модели (авторы – Е.В. Васильев и А.А. Алексеева – Б.Е. Песков), методом на основе модели WRF на сетке ~ 20 км (автор – М.М. Смирнова), а также прогнозы моделей NCEP и COSMO-Ru, последней – с разрешением 7 и 2,2 км. Анализировались прогнозы порывов ветра, включая шквалы, со скоростью 20–24 и 25 м/с и более за период с 1 июня по 15 сентября 2014 г. от 00 ч ВСВ с заблаговременностью 18 ч (за период 06–18 ч ВСВ). За этот период были рассчитаны прогнозы всеми вышеуказанными методами прогноза, что позволило проанализировать результаты в сравнении, применив для анализа один и тот же подход. Территория, на которой оценивались прогнозы для 7 методов – ЕТР (27–57° в. д. 43–65° с. ш.), для метода М.М. Смирновой территория оценки отличалась незначительно; для COSMO-Ru2 – Центральный федеральный округ (ЦФО). Итого оценены прогнозы за 107 дней летнего периода по 713 узлам 1°×1°сетки. Оценка велась одинаковым для всех подходом без допусков. Оценки прогнозов порывов ветра 25 м/с и более: предупреденность Р %, оправдываемость U %, «коэффициент ложных тревог» LTR, равный отношению количества «ложных тревог» при прогнозе к количеству фактически наблюдаемых явлений; представлены в табл. 5.

Как видим из табл. 5, показатели качества прогнозов, полученные в автоматизированном режиме, по всем методам не достаточны для применения методов в практике. Но следует отметить, что при автоматизированной оценке основными данными о фактических порывах ветра являются данные, передаваемые в сроки и между сроками

наблюдений по коду КН-01 SYNOP, и дополнительными – данные донесений, передаваемые в телеграммах.

Таблица 5

**Оценки прогнозов порывов ветра ≥ 25 м/с,
рассчитанные в автоматизированном режиме**

Метод прогноза	Строго по узлам сетки		С учетом соседних узлов сетки		LTR
	P, %	U, %	P, %	U, %	
COSMO-Ru7	2,6	4,2	7,5	11,5	0,58
COSMO-Ru2 (всего 5 случаев)	40,0	1,3	60,0	1,9	31,0
НСЕР	0	0	0	0	0
А.А. Алексеева [1, 2]	17,1	1,0	22,0	1,3	17,2
Э.В. Переходцева [6]	41,5	0,4	63,4	0,6	106,0
А.А. Алексеева – Б.Е. Песков [2]	26,8	0,6	43,9	1,0	43,0
Е.В. Васильев [3]	9,8	0,4	34,1	1,6	21,4
Ю.И. Юсупов [18]	2,8	3,1	5,6	6,1	0,9
М.М. Смирнова	2,4	20,0	4,8	33,3	0,1

В табл. 6 представлены матрицы прогнозов испытываемым методом Ю.И. Юсупова строго по узлам и с учетом соседних узлов в сравнении с прогнозами НСЕР («материнская» для испытываемых прогнозов модель).

Таблица 6

Матрицы прогнозов порывов ветра ≥ 25 м/с, полученные в результате их автоматизированной оценки, НСЕР и испытываемым методом для Омской области

Метод прогноза	Матрица прогнозов					
	строго по узлам сетки			с учетом соседних узлов сетки		
НСЕР	0	0	0	0	0	0
	41	40764	40805	41	40764	40805
	41	40764	40805	41	40764	40805
Ю.И. Юсупов	1	31	32	2	31	33
	35	31305	31340	34	31305	31339
	36	31336	31372	36	31336	31372

Данные донесений иногда трудно привязать географически, т. к. в них указываются нередко большие по площади районы с порывами такого ветра. Кроме того, прогнозы, рассчитанные разными методами, отличаются шагом прогностической сетки и подлежат в рамках автоматизированной оценки интерполяции для единого представления. Поэтому дополнительно был проведен анализ результатов прогноза с учетом прогнозов соседних узлов сетки, т. е. с учетом синоптического процесса. Такой анализ показывает, что учет прогнозов в соседних узлах сетки повышает показатели качества прогнозов по всем методам, кроме NCEP (табл. 5). Семь случаев из 34, не спрогнозированных Ю.И. Юсуповым (табл. 6) порывов ветра в градации ≥ 2 м/с с учетом прогнозов в соседних узлах сетки, прогнозировались в градации 20–24 м/с.

На основе полученных результатов анализа А.А. Алексеевой были сделаны следующие общие выводы по проблеме прогноза сильных шквалов.

1. Насущной является проблема наличия данных о фактических конвективных ОЯ. Тексты с донесениями расплывчаты, не пригодны для численного использования; радиолокационные данные существуют сами по себе, кто-то из синоптиков ими пользуется, кто-то нет, т. к. нет на данный момент результатов их верификации, особенно данных доплеровских локаторов (поэтому не используется информация и в цифровом виде); спутниковые данные используются, как правило, на качественном уровне (снимки облачности с ИСЗ).

2. Как следствие первой проблемы, не менее насущной является проблема оценки опасных конвективных явлений, принцип оценки.

3. Нельзя оценивать прогнозы конвективных ОЯ при существующих на сегодняшний день точечных фактических данных о них, в отрыве от анализа синоптического процесса. В противном случае будем иметь аналогичные представленным, полученным в результате автоматизированной оценки, показатели их качества. Подтверждением этого являются результаты оценки прогнозов с учетом соседних узлов сетки (показатели качества прогноза при этом повышаются).

4. Непосредственно в рамках рассмотренных численных моделей (NCEP, COSMO-Ru7) проблема прогноза сильных шквалов (ветров) со скоростью 25 м/с и выше на ЕТР не решена. Репрезентативных

выводов по модели COSMO-Ru2 пока сделать нельзя ввиду малого ряда прогнозов для оценки.

Кроме того, можно сделать выводы относительно рассмотренных методов прогноза.

1. **НСЕР** (прогнозируется скорость в м/с) – ни один случай из 41 случаев порывов ветра ≥ 25 м/с (данные А.Н. Багрова) и дополнительно рассмотренных 30 случаев (данные отдела А.Д. Голубева) не спрогнозировано. При этом занижение скорости составляло от 7 до 25 м/с, средняя ошибка 18,3 м/с. Аналогичные выводы можно сделать и для порывов ветра скоростью 20–24 м/с. Ветры 15–19 м/с прогнозируются значительно лучше.

2. **Метод М.М. Смирновой** (прогнозируется скорость в м/с) – плохо прогнозируются скорости ветра 15–19 м/с.

3. **Метод Ю.И. Юсупова** (прогнозируется скорость в м/с) – прогнозы намного точнее «материнской» модели НСЕР. В 12 случаях с допусками лучше прогнозируются ветры со скоростью 25 м/с и в 13 случаях – со скоростью 20–24 м/с.

4. **COSMO-Ru7** (прогнозируется скорость в м/с) – достаточно точные прогнозы ветра скоростью 20–24 м/с, уступают в прогнозе ветров скоростью ≥ 25 м/с ниже приведенным методам.

5. **Метод Е.В. Васильева** (альтернативный) – перспективный метод, нацелен на прогноз сильных шквалов (≥ 25 м/с). Заметно улучшается качество прогнозов при учете соседних узлов. Метод реализован для расчета прогнозов в оперативном режиме, которые доступны в рамках программного комплекса Прометей.

6. **Метод А.А. Алексеевой – Б.Е. Пескова** (прогнозируется скорость в м/с) – по результатам анализа наиболее точный метод прогноза скорости ветра при сильных шквалах среди методов, прогнозирующих скорость ветра непосредственно в м/с. Прогнозирует и порывы ветра в градации «ураган». При фактическом ветре 20–24 м/с прогностические скорости могут завышаться до 5 м/с. Можно рекомендовать синоптикам присмотреться к данному виду прогнозов, которые рассчитываются в оперативном режиме и доступны в рамках программного комплекса «Прометей».

7. **Метод Э.В. Переходцевой** (альтернативный, внедрен в практику) – имеет самую высокую предупрежденность, но очень много «ложных

тревог». Даже в дни, когда другими методами не прогнозируются сильные шквалы и их нет по имеющимся фактам, данный метод может прогнозировать большие по площади зоны со шквалами ≥ 25 м/с, т. е. метод хуже перестраивается при смене синоптических процессов. Но, следует заметить, что при значении вероятностей 80 % и более, ложных тревог становится меньше более чем на 3000 случаев за исследуемый период, хотя метод теряет в этом случае в предупредительности явления. Поэтому при использовании на практике рекомендуется особо обращать внимание на прогностическое значение вероятности 80 % и более, которое в большинстве случаев говорит о возникновении сильного шквала.

8. **Метод А.А. Алексеевой** (альтернативный, внедрен в практику) – предупредительность ниже, чем у метода Э.В. Переходцевой, но количество «ложных тревог» намного меньше (коэффициент LTR=17 против LTR=106 у метода Э.В. Переходцевой). Несколько занижается при прогнозе скорость сильного ветра, при ветрах 25 м/с большое количество прогнозов ветра со скоростью 20–24 м/с.

Выводы по сравнению прогнозов COSMO-Ru7 и COSMO-Ru2:

1. При анализе (в виду меньшей территории оценки) было в 3,8 раза меньше случаев прогноза порывов ветра по COSMO-Ru2, по сравнению с шагом 7 км, а количество «ложных тревог» при этом увеличилось в 6,7 раза.

2. Только в 5 случаях (на одной и той же территории) прогнозы сильных шквалов (≥ 25 м/с) можно сравнить между собой. В 4 случаях прогноз с шагом 2,2 км стал точнее: в 3 случаях предупредительность стала 100 %, в 1 случае ранее не предупрежденное прогнозом явление стало прогнозом порывов ветра в соседней градации (20–24 м/с). В одном случае из пяти явление осталось не предусмотренным. Причем, случаев для анализа было мало, т. к. большинство случаев фактических шквалов (≥ 25 м/с) находятся вне зоны прогноза версии COSMO-Ru2. Поэтому результаты оценки точности прогнозов порывов сильного ветра по COSMO-Ru2 являются предварительными.

3. В сравнении с другими подходами, в двух случаях прогноз сравнился по точности с прогнозами А.А. Алексеевой – Б.Е. Пескова, А.А. Алексеевой, Э.В. Переходцевой и Е.В. Васильева, по COSMO-Ru7 прогноз

в сравнении с ними был хуже. В одном случае прогноз по COSMO-Ru2 сравнивался по точности с прогнозами А.А. Алексеевой – Б.Е. Пескова и Э.В. Переходцевой и точнее прогнозов остальными методами. В одном случае прогноз по COSMO-Ru2 улучшился и стал таким же по точности, как прогнозы другими методами.

Выводы

Таким образом, на основе вышеприведенных результатов испытания метода прогноза шквалов с использованием термодинамических параметров атмосферы и потенциального вихря Эртеля (автор – Ю.И. Юсупов) можно сделать вывод, что автору метода необходимо обратить внимание на выявленные в результате испытаний недостатки и учесть их при усовершенствовании метода. Так как при неоперативных испытаниях оценки успешности метода прогноза были намного выше на сетке $0,5^\circ \times 0,5^\circ$, чем приведенные в статье результаты испытаний метода на сетке $1^\circ \times 1^\circ$, необходимо предложить автору приложить усилия для представления таких прогнозов для оперативных испытаний на сетке $0,5^\circ \times 0,5^\circ$. Мониторинг прогнозов и автоматизированная их оценка в Гидрометцентре России продолжится в рамках 2 части «Плана испытания и внедрения новых и усовершенствованных технологий (методов) гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов Росгидромета на 2015 г.».

Список литературы

1. *Алексеева А.А.* Методы прогноза максимального количества осадков в зонах активной конвекции и альтернативного прогноза сильных ливней и шквалов // Информационный сборник № 34 «Результаты испытаний новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов». – 2007. – С. 49–69.

2. *Алексеева А.А., Лосев В.М., Песков Б.Е., Багров А.Н.* Результаты испытания автоматизированного метода прогноза шквалов с детализацией интенсивности в трех градациях (от 20 до 24, от 25 до 32, 33 м/с и более) на основе выходных данных региональной модели с заблаговременностью 12 и 24 ч // Информационный сборник № 39 «Результаты испытаний новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов». – 2012. – С. 61–68.

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. *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. *Переходцева Э.В.* Прогноз сильных шквалов и смерчей в летний период 2009 года на основе статистических моделей // *Труды Гидрометцентра России*. – 2010. – Вып. 344. – С. 241–253.

6. *Переходцева Э.В.* Гидродинамико-статистический метод прогноза шквалов и очень сильного ветра в градации опасных явлений в летний период с заблаговременностью 12–36 ч по выходным данным региональной модели для Европейской территории России // *Информационный сборник № 40 «Результаты испытаний новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов»*. – 2013. – С. 170–181.

7. *Песков Б.Е., Снитковский А.И.* К прогнозу сильных шквалов // *Метеорология и гидрология*. – 1968. – № 7. – С. 52–57.

8. Положение об испытании и внедрении новых и усовершенствованных методов (способов) гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов и расчетов. – М.: Гидрометеиздат, 1989. – 10 с.

9. *Ривин Г.С., Розинкина И.А., Багров А.Н., Блинов Д.В.* Мезомасштабная модель COSMO-Ru7 и результаты ее испытания // *Информационный сборник № 40 «Результаты испытаний новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов»*. – 2012. – С. 15–48.

10. Руководство по прогнозированию метеорологических условий для авиации. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – С. 152–161.

11. Руководство по краткосрочным прогнозам погоды. Ч. 1. – Л.: Гидрометеиздат, 1986. – С. 527–536.

12. РД 52.27.284-91. Методические указания. Проведение производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов. – Л.: Гидрометеиздат, 1991. – С. 31–40.

13. РД 52.27.724-2009. Наставление по краткосрочным прогнозам погоды общего пользования. – М.; Обнинск: «ИГ–СОЦИН», 2009. – С. 39–42.

14. *Шакина Н.П.* Динамика атмосферных фронтов и циклонов. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 263 с.

15. *Шакина Н.П., Скриптунова Е.Н., Иванова А.Р.* Объективный анализ атмосферных фронтов и оценка его эффективности // *Метеорология и гидрология*. – 2000. – № 7. – С. 5–16.

16. *Юсуфов Ю.И.* К вопросу об оперативном прогнозе шквалов // *Труды Гидрометцентра России*. – 2008. – Вып. 342. – С. 55–78.

17. *Юсуфов Ю.И.* Метод прогноза шквалов с использованием термодинамических параметров атмосферы и потенциального вихря Эртеля // *Метеорология и гидрология*. – 2013. – № 11. – С. 55–63.

18. *Braun S. A., Houze R.A.Jr.* The heat and potential vorticity budgets of a midlatitude squall line // Sixth Conference on Mesoscale Processes, 1994, Portland, AMS. – P. 335 – 338.

19. *Doswell C.A., Bosart L.F.* Extratropical Synoptic–Scale Processes and Severe Convection. A Meteorological Monograph. – The American Meteorological Society, 2000. – 104 p.

20. *Hertenstein R.F.A., Schubert W.H.* Potential vorticity anomalies associated with squall lines // Month. Wea. Rev. – 1991. – Vol. 119. – P. 1663–1672.

21. *Hewson T.* Objective fronts // Meteorol. Appl. – 1998. – Vol. 5. – № 1. – P. 37–65.

22. *Holton J.R.* An introduction to dynamic meteorology. – Elsevier Academic Press, 2004. – P. 290–304.

23. *Hoskins B.J., McIntyre M.E., Robertson A.W.* On the use and significance of isentropic potential vorticity maps // Quart. J. R. Meteorol. Soc. – 1985. – No. 111. – P. 877–946.

24. *Huber-Pock F., Kress Ch.* An operational model of objective frontal analysis based on ECMWF products // Meteorol. Atmos. Phys. – 1989. – Vol. 40, No 2. – P. 170–180.

26. *Johns R.H., Doswell C.A.* Severe Local Storm Forecasting // Weather and Forecasting. – 1992. – Vol. 7. P. 588–612.

27. *Raymond D.J., Jiang H.A* theory for long-lived mesoscale convective systems // J. Atm. Scien. – 1990. – Vol. 47, No 24. – P. 3067–3077.

28. *Russell A., Vaughan G., Norton E.G.* Large-scale potential vorticity anomalies and deep convection // Quart. J. R. Meteorol. Soc. – 2012. – Vol. 138. – P. 1627–1639.