

УДК 551.515.6

А.А. Поморцева, Н.А. Калинин
АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ
ШКВАЛОВ: УСЛОВИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ, МЕТОДЫ ДИАГНОЗА И ПРОГНОЗА*

Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь

В обзоре приводятся сведения о современном уровне знаний, методиках исследования, способах регистрации и методах прогноза опасного конвективного явления – шквала.

Шквал – это опасное гидрометеорологическое явление, развивающееся под действием атмосферной конвекции мезомасштаба. Шквалы кратковременны по времени воздействия и локальны в пространстве, поэтому сложно поддаются оперативному регистрированию стандартными способами. Исключением являются данные метеорологических радаров (МРЛ), но МРЛ расположены редко и не образуют наблюдательную сеть. Зачастую факт явления фиксируется по его окончании с помощью данных дистанционного зондирования Земли из космоса. Точность прогноза шквала современными методами также остается недостаточно высокой, кроме того, практически отсутствуют методы прогнозирования катастрофических шквалов. Поэтому во всем мире продолжают исследования шквалов, ведутся разработка и усовершенствование методов их прогнозирования.

Ключевые слова: шквал, мезомасштабная конвективная система, физико-статистические методы прогноза, региональная гидродинамическая модель.

A.A. Pomortseva, N.A. Kalinin
ANALYTICAL REVIEW OF THE CURRENT STATUS OF STUDYING SQUALLS:
FORMATION CONDITIONS, METHODS OF DIAGNOSIS AND PROGNOSIS

Perm State University, Perm

The review provides information on the current state of knowledge, research techniques, registration and forecasting methods concerning such dangerous convective phenomena as squalls.

A squall is a dangerous hydrometeorological phenomenon developing under the influence of mesoscale atmospheric convection. Squalls are local and have a short-time influence, therefore they are difficult to register by standard methods. The only exception is data from meteorological radars. However, distances between radars are too long, so they do not form an observation network. The fact of the phenomenon is often recorded only after its termination, with the help of data from remote sensing of the Earth from space. The accuracy of forecasting squalls by modern methods is still insufficient. In addition, there are practically no methods for forecasting disastrous squalls. Therefore, researches on squalls are continuing around the world, forecasting methods are being developed and perfected.

Key words: squalls, mesoscale convective system, physical and statistical forecasting techniques, regional hydrodynamic model.

doi 10.17072/2079-7877-2016-3-90-104

Условия возникновения шквалов

Шквал, как опасное гидрометеорологическое явление (ОЯ), представляет собой резкое кратковременное усиление ветра в течение не менее 1 мин [40], сопровождающееся изменением его направления. Скорость ветра при шквале нередко превышает 25 м/с. Продолжительность прохождения шквала через станцию обычно не превышает нескольких минут, однако известны случаи, когда шквал продолжался 10–15 мин и более.

Шквалы обусловлены мощными кучево-дождевыми облаками (*Cb*), в результате перемещения которых на местности возникает узкая шкваловая полоса (линия шквалов) шириной от нескольких

© Поморцева А.А., Калинин Н.А., 2016

* Работа выполнена в рамках государственного задания на научные исследования (проект № 271), а также при финансовой поддержке РФФИ (проект 16-45-590823 p_a)

сотен метров до нескольких километров и протяженностью до сотни километров [20]. Такие облачные скопления называют мезомасштабными конвективными системами (МКС) или системами глубокой конвекции. Механизм формирования линий шквалов объясняется участием холодной воздушной массы и вертикального сдвига ветра на фоне статической стабильности [41; 43; 86; 87; 90; 105; 106; 113]. МКС, несущие опасность конвективных явлений в градации ОЯ, обычно состоят из множества конвективных ячеек, имеющих различную пространственную структуру, непрерывно изменяющуюся во времени, перемещающихся в разных направлениях с разной скоростью [49; 56; 99; 102].

Несмотря на кратковременность воздействия, шквал наносит существенный ущерб экономике. Однако шквал, не достигающий по силе критерия опасного явления погоды (скорость ветра менее 25 м/с), также может нанести значительный ущерб [72]. Каждый год в теплый период при мощном развитии конвекции на Урале отмечается прохождение *Cb* с ливнями, грозами и шквалистым усилением ветра. Зона воздействия такого явления невелика, поэтому зачастую метеорологическая станция не фиксирует шквал, хотя его прохождение подтверждается поваленными деревьями, пострадовавшими или разрушенными зданиями и сооружениями, показаниями очевидцев.

Системы глубокой конвекции вызывают большой интерес у специалистов, что подтверждается множеством опубликованных работ. Особенно много исследований проведено для тропических районов, где линии шквалов сопровождаются смерчами и торнадо [22; 27; 52; 54; 55; 60; 94; 104]. Так, в [107] проведено изучение перемещения линии шквалов и ее эволюции над севером и центральной частью Бразилии под действием крупномасштабного потока; в работе [103] рассматривается процесс развития шквалов вдоль линии холодного фронта над центральными районами США. Условия образования шквалов в умеренных [21; 24; 26; 29; 30; 37; 39; 48; 51; 70; 71; 73; 74; 83; 93; 94] и высоких [28; 31; 32] широтах имеют свои отличия. Их развитие происходит в меньшем вертикальном слое атмосферы и имеет менее значительные горизонтальные размеры. Шквалы в умеренных широтах обусловлены локальными штормами с конвективными сегментами МКС, которые имеют горизонтальные размеры до 30 км и существуют около часа, или с независимыми фронтами порывов [51–53].

Метеорологическое обеспечение и штормовое оповещение при формировании шкваловой ситуации требуют решения проблемы надежной локализации систем глубокой конвекции в облачной системе, а также оценки степени грозо-, градо- и шквалоопасности каждой конвективной ячейки [5; 53]. Существует большое количество работ, посвященных интерпретации данных метеорологических радаров и искусственных спутников Земли при оценке МКС и эволюции конвективного облака [17–19, 35]. Однако многие авторы [3; 109; 112] отмечают, что используемая в настоящее время типизация конвективных систем (КС) является неполной и не дает однозначного ответа на вопрос о дальнейшем развитии системы. До середины 90-х гг. XX в. при классификации КС и линий шквалов авторы описывали отдельные мезомасштабные свойства этих явлений, не проводя сравнения кинематики и эволюции КС с потоком в средней тропосфере и компонентами вектора развития линии шквала [100; 110; 111]. Анализ ряда работ [114] показывает, что 70% случаев опасных явлений погоды (грозы, града, шквалов и смерчей), связанных с конвекцией, наступает до достижения порога идентификации КС, поэтому необходимо производить реконструкции жизненного цикла КС, особенно представленных мезомасштабными системами. В работе [2] сделана попытка разделить трансляционный и эволюционный компоненты пространственно-временной изменчивости линии шквалов и на основе этого выделить типы этих систем. В продолжение исследований автор предлагает концепцию жизненного цикла мезомасштабных КС, которая позволяет производить мезоклиматические реконструкции, а также разрабатывать принципы и алгоритмы мезомасштабного прогнозирования КС [1].

Диагноз шквалов с помощью основных способов и систем регистрации

Смерчи и шквалы возникают, как правило, в центральной части мощного грозового облака, при очень большой влажности воздуха в процессе осадкообразования [57; 99; 108]. Диагноз таких явлений достаточно сложен, особенно при развитии явления вне заселенной территории: время их воздействия невелико, район прохождения ограничен масштабом в десятки километров. И, к сожалению, даже при возникновении явления на густонаселенной территории, зачастую судить о факте его прохождения и о его интенсивности можно по результатам обследований или по нанесенному ущербу [40; 72].

Поскольку существующая наблюдательная сеть в России является недостаточной для диагноза конвективных явлений и, в частности, шквала, то необходимо оборудовать сеть датчиками непрерывной регистрации метеорологической обстановки [14; 15; 33; 34; 47]. Наиболее оптимальным, на наш взгляд, прибором, который позволяет определять структуру и физические характеристики линии шквалов, является метеорологический радар [42; 45]. Во всем мире доплеровский метеорологический радар признан наиболее универсальным инструментом для анализа шквалов. На основе однозначных и комплексных критериев распознавания радары в автоматическом режиме позволяют не только выявлять и распознавать конвективные ОЯ [38; 81], но и извлекать информацию о горизонтальной и вертикальной структурах радиолокационной отражаемости штормов, горизонтальной и вертикальной скоростях облачных частиц и капель осадков внутри облака с разрешением до 1 км через 5–10 мин [16; 45]. Однако метеорологическая автоматизированная радиолокационная сеть на территории России находится в стадии формирования и лишь в Центральном федеральном округе отмечается сплошное покрытие территории данными наблюдений.

Существенную помощь в диагностике прохождения шквалов оказывают данные дистанционного зондирования Земли (ДДЗЗ) из космоса. Так, для диагноза прохождения шквала и смерча над лесными массивами используются разновременные снимки ДДЗЗ среднего и высокого разрешения, поскольку основным видом ущерба от них являются сплошные ветровалы [26; 36; 88; 89]. На основе ДДЗЗ можно создавать композитные карты пространственно-временного распределения шквалов. В [4] на основе актуальных космических снимков построены карты повторяемости и интенсивности шквалов. Авторы отмечают, что в условиях сложного рельефа и редкой наблюдательной сети картирование позволяет получить более реалистичные оценки пространственного распределения опасных явлений погоды. Для локальных конвективных явлений (шквалы, крупный град, смерчи) рассмотрен подход к картографированию на основе расчета плотности пространственного распределения зафиксированных случаев. В качестве исходной информации используются не только данные сети метеостанций, но и результаты обследований по факту нанесенного ущерба от опасных явлений.

С использованием ДДЗЗ и прогностической информации могут быть произведены уточнения к существующему автоматизированному методу обнаружения шквалов, разработанному сотрудниками Гидрометцентра России Т.Г. Дмитриевой, Б.Е. Песковым [35]. Наиболее важными предикторами оказываются днем резкое усиление адвекции холода на поверхности 850 гПа в 10–100 км за вершиной теплого сектора, вечером и ночью – крупные водные объекты при меньшей высоте верхней границы грозового облачного фронта [35; 36].

Безусловно, ясно, что наиболее оптимальным инструментом диагноза условий формирования и развития шквалов будет комплекс, сочетающий результаты наблюдений за ОЯ на метеорологических станциях, ДДЗЗ и радиолокационное зондирование [50; 52; 68].

Методы прогноза шквалов

Среди методов прогноза возникновения шквалов наибольшее применение получили методы, основанные на определении степени неустойчивости атмосферы. Так, прогноз сильных шквалов на основе анализа термодинамического состояния атмосферы был предложен сотрудниками Гидрометцентра СССР Б.Е. Песковым, А.И. Снитковским, Г.Д. Решетовым в 60-е гг. XX в. [67; 69; 70; 75]. В настоящее время все используемые в оперативной работе методы прогноза относятся к физико-статистическим методам [8; 28; 59; 78]. В Гидрометцентре России в качестве основного метода реализуется физико-статистический подход к прогнозу сильных шквалов на основе выходных данных региональной гидродинамической модели. Прогностическая продукция получается с помощью региональной 30-уровневой модели прогноза полей метеорологических элементов Гидрометцентра России с пространственным разрешением 75 км. В качестве предикторов используются фактические и прогностические поля приземного давления и геопотенциала основных изобарических поверхностей, значения температуры воздуха и влажности (точки росы) у поверхности Земли и на высотах изобарических поверхностей, а также диагностические данные упорядоченных вертикальных движений на поверхности 850 гПа [6; 8–11; 23]. Данный метод с региональными уточнениями используется для Центральной России, Северного Кавказа, Сибири [58–66; 82; 85].

Другая группа методов учитывает кинетическую энергию турбулентных пульсаций. При этом расчет порывов ветра основан на предположении о нормальном распределении скорости ветра, а турбулентная кинетическая энергия рассматривается как дисперсия скорости ветра [78; 79].

Альтернативным методом прогноза шквалов, предлагаемым рядом исследователей, является метод, основанный на предположении, что причиной образования шквала служит взаимодействие аномалий стратосферного потенциального вихря Эртеля с бароклинными зонами в нижней тропосфере [12; 91; 92; 95–98; 101]. Испытание метода [91; 92] показало, что он является более качественным и надежным по сравнению с традиционными методами и позволяет уменьшить число «ложных тревог».

Широко применяются методы прогноза шквалов на основе выходной продукции разрешающих конвекцию гидродинамических моделей из семейства WRF: ARW, ARW Glob и NMM [25; 26; 42; 44; 76]. Установлено, что все эти модели достаточно хорошо воспроизводят мезомасштабные конвективные системы и связанные с ними области сильных осадков и ветра, но имеют общие недостатки: переоценивают количество и площадь сильных осадков и недооценивают скорость сильного ветра. В меньшей степени эти недостатки свойственны модели ARW.

Оценка оправданности модельных прогнозов и верификация результатов счета модели производятся по данным метеорологических радаров и ДДЗЗ [7; 77]. На основе модели WRF-ARW разрабатываются системы раннего предупреждения о метеорологических угрозах (в частности, система предупреждения о степени опасности сильного ветра) [76; 80].

В рамках современных гидродинамических моделей, использующих различные подходы расчета мощной конвекции, с которой связаны шквалы, скорость ветра и его порывы прогнозируются с разрешением до 1–3 км в зависимости от качества начальных данных. Однако точность прогноза шквала остается недостаточной в силу невозможности учета всего комплекса процессов подсеточного масштаба. Многие существующие методы не автоматизированы и имеют невысокие показатели качества прогнозирования. Необходимо отметить, что в оперативной практике практически отсутствуют методы прогнозирования катастрофических шквалов, скорость ветра при которых превышает 33 м/с. Поэтому любое дополнительное исследование таких явлений и разработка методов их прогноза является важной и актуальной задачей мезометеорологии.

Библиографический список

1. *Абдуллаев С.М.* Жизненный цикл мезомасштабных конвективных систем: концепция, климатология и прогноз: дис. ... д-ра геогр. наук. М., 2010. 407 с.
2. *Абдуллаев С.М., Желнин А.А., Ленская О.Ю.* Жизненный цикл мезомасштабных конвективных систем // Метеорология и гидрология. 2009. № 5. С. 34–45.
3. *Абдуллаев С.М., Ленская О.Ю.* Эволюционная классификация мезомасштабных линий шквалов // Метеорология и гидрология. 1998. № 3. С. 24–32.
4. *Абдуллин Р.К., Шихов А.Н.* Картографирование пространственно-временного распределения опасных метеорологических явлений в Пермском крае // Вестник Удм. ун-та. Серия. Биология. Науки о Земле. 2015. Т. 25. № 4. С. 98–106.
5. *Абшаев М.Т., Абшаев А.М., Малкарова А.М., Жарашуев М.В.* Автоматизированная радиолокационная идентификация, измерение параметров и классификация конвективных ячеек для целей защиты от града и штормоповещения // Метеорология и гидрология. 2010. № 3. С. 36–45.
6. *Алексеева А.А.* Метод прогноза сильных шквалов // Метеорология и гидрология. 2014. № 9. С. 5–15.
7. *Алексеева А.А.* Распознавание конвективных стихийных явлений погоды на основе цифровой информации с ИСЗ с целью их сверхкраткосрочного прогноза // Тр. ГМНИЦ РФ. 2000. № 335. С. 59–73.
8. *Алексеева А.А.* Методы прогноза максимального количества осадков в зонах активной конвекции и альтернативного прогноза сильных ливней и шквалов // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. 2007. №34. С. 49–69.
9. *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 // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. 2012. № 39. С. 61–68.

10. *Алексеева А.А., Лосев В.М., Песков Б.Е., Васильев Е.В., Никифорова А.Е.* Прогноз развития зон активной конвекции с особо опасными явлениями на основе региональной модели Гидрометцентра России // 80 лет Гидрометцентру. М.: ТРИАДА ЛТД, 2010. С. 147–159.
11. *Алексеева А.А., Песков Б.Е.* Шквалово-смерчевые явления 20-21.06.1998 г. в Москве и Подмоскowie // Природные опасности России / под общей редакцией В.И. Осипова, С.К. Шойгу. М.: Крук, 2001. Т. 5. С. 159–165.
12. *Алексеева А.А., Юсупов Ю.И., Багров А.Н., Демидова О.Ю., Смирнова И.М., Черногубова Ю.Я.* Результаты испытания метода прогноза шквалов с использованием термодинамических параметров атмосферы и потенциального вихря Эртеля // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. 2015. №42. С. 15–38.
13. *Ананова Л.Г.* Сезонное распределение радиолокационных характеристик облачности при шквалах на юго-востоке Западной Сибири // Географический вестник. 2011. № 4. С. 44–49.
14. *Ананова Л.Г.* Влияние температуры, влажности и давления у поверхности земли на развитие шквалов на юго-востоке Западной Сибири // Вестник Том. гос. ун-та. 2007. № 302. С. 211–214.
15. *Ананова Л.Г.* Сдвиги ветра при шквалах на аэродроме Томск // МЕТЕОСПЕКТР. 2010. № 2. С. 100–104.
16. *Ананова Л.Г., Горбатенко В.П., Луковская И.А.* Особенности радиолокационных характеристик конвективной облачности при шквалах на юго-востоке Западной Сибири // Метеорология и гидрология. 2007. № 7. С. 51–56.
17. *Бочарников Н.В., Брылев Г.Б., Ватиашили М.Р.* Диагноз шквалов по данным МРЛ // Радиолокационная метеорология. Л.: Гидрометеиздат, 1989. С. 64–67.
18. *Бочарников Н.В., Брылев Г.Б., Песков Б.Е. и др.* Методические указания по определению шквалов с использованием данных МРЛ. Л.: ГГО, 1988. 23 с.
19. *Брылев Г.Б., Огуряев В.С.* Радиолокационные критерии шквалов, связанных с кучево-дождевой облачностью // Тр. ГГО. 1976. Вып. 383. С. 67–72.
20. *Будилина Е.М., Прох Л.З., Снитковский А.И.* Смерчи и шквалы умеренных широт. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 31 с.
21. *Буз А.И.* Условия образования шквалов на юге Прибалтики. Анализ и прогноз особо опасных явлений погоды // Тр. ГМЦ СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1973. Вып. 105. С. 36–53.
22. *Бухаров М.В., Головлев К.Н., Миронова Н.С., Сизенова Е.А.* Анализ причин усиления шквалистого ветра до ураганной силы в Керченском проливе 11 ноября 2007 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 3. С. 9–15.
23. *Васильев Е.В., Алексеева А.А., Песков Б.Е.* Условия возникновения и краткосрочный прогноз сильных шквалов // Метеорология и гидрология. 2009. № 1. С. 5–15.
24. *Васильев А. А., Песков Б.Е., Снитковский А.И.* Смерчи, шквалы и град 8-9 июня 1984 г. // Метеорология и гидрология. 1985. № 8. С. 5–15.
25. *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.
26. *Ветров А.Л., Шихов А.Н.* Исследование условий развития и оценка последствий сильных шквалов в Прикамье 18 июля 2012 года // Вестник Удм. ун-та. Серия. Биология. Науки о Земле. 2013. № 6–2. С. 89–99.
27. *Волчек А.А., Шпока И.Н.* Закономерности формирования опасных метеорологических явлений на территории Белоруссии // Учен. зап. Рос. гос. гидромет. ун-та. 2011. № 17. С. 64–88.
28. *Головлев К.Н., Лукин А.А., Переходцева Э.В.* О гидродинамико-статистическом прогнозе штормового ветра в Северном, Норвежском и Баренцевом морях // Тр. ГМНИЦ РФ. 2015. № 354. С. 63–78.
29. *Горбатенко В.П., Константинова Д.А., Золотухина О.И., Тунаев Е.Л.* Термодинамические условия формирования мезомасштабной конвекции в атмосфере Западной Сибири // Известия высших учебных заведений. Физика. 2011. Т. 54. № 11 (3). С. 148–155.
30. *Горбатенко В.П., Константинова Д.А., Шутова Е.В.* Особенности развития шквалов в атмосфере юго-востока Западной Сибири // Восьмое сибирское совещание по климато-экологическому мониторингу / под ред. М.В. Кабанова. Томск: Агаф-пресс, 2009. С. 156–157.
31. *Грищенко И.В.* Особенности оценки ущерба и рисков, связанных с опасными явлениями погоды, на территории Архангельской области и Ненецкого автономного округа // Тр. ГГО. 2011. №563. С. 137–148.

32. Грищенко И.В. Шквалы и смерчи на территории Архангельской области и Ненецкого автономного округа // Вестник Сев. (Арктического) фед. ун-та. Серия. Естественные науки. 2009. №4. С. 5–10.
33. Данилов А.Д., Пилеич А.В. Модели учета тепломассобменных процессов в атмосфере для автоматизированного проектирования технических средств современных метеостанций // Моделирование систем и процессов. 2012. Т. 4. С. 29–33.
34. Данилов А.Д., Пилеич А.В. Математические модели для автоматизированного проектирования метеопрогнозов // Вестник Воронеж. гос. техн. ун-та. 2010. Т. 6. № 10. С. 118–122.
35. Дмитриева Т.Г. Эволюция и движение очагов кучево-дождевой облачности по спутниковым данным в случаях сильных шквалов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 1. С. 83–91.
36. 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.
37. 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.
38. Дядюченко В., Павлюков Ю., Вылегжанин И. Доплеровские радиолокаторы в России // Наука в России. 2014. № 1. С. 23–27.
39. Евсеева Н.С., Ромашова Т.В. Опасные метеорологические явления как составная часть природного риска (на примере юга Томской области) // Вестник Том. гос. ун-та. 2011. № 353. С. 199–204.
40. Инструкция по подготовке и передаче штормовых сообщений наблюдательными подразделениями: руководящий документ. РД 52.04.563-2013. СПб., 2013. 52 с.
41. Калинин Н.А. Динамическая метеорология: учеб. пособие / Перм. гос. ун-т. Пермь, 2009. 256 с.
42. Калинин Н.А. Мониторинг, моделирование и прогноз состояния атмосферы в умеренных широтах / Перм. гос. ун-т. Пермь, 2015. 308 с.
43. Калинин Н.А., Ветров А.Л. Генерация доступной потенциальной энергии вследствие крупномасштабной конденсации в циклонах умеренных широт // Метеорология и гидрология. 2002. № 4. С. 17–27.
44. Калинин Н.А., Ветров А.Л., Связзов Е.М., Попова Е.В. Изучение интенсивной конвекции в Пермском крае с помощью модели WRF // Метеорология и гидрология. 2013. № 9. С. 21–30.
45. Калинин Н.А., Смирнова А.А. Исследование радиолокационных характеристик для распознавания опасных явлений погоды, связанных с кучево-дождевой облачностью // Метеорология и гидрология. 2005. № 1. С. 84–95.
46. Калинин Н.А., Смирнова А.А. Возможности метеорологических радиолокаторов в обнаружении облачности и опасных явлений погоды // Географический вестник. 2006. № 2. С. 76–83.
47. Кондратюк В.И., Швень П.И. Исследование дополнительных характеристик ветра с помощью анеморумбометра нового поколения марк-60 // Тр. ГГО. 2007. № 556. С. 167–178.
48. Константинова Д.А., Горбатенко В.П. Условия образования шквала над юго-восточной территорией Западной Сибири // Вестник Томск. гос. ун-та. 2010. № 337. С. 189–193.
49. Лапчева В.Ф. Условия развития зон активной конвекции со смерчами и сильными шквалами // Тр. Гидрометцентра СССР. 1989. Вып. 299. С. 32–50.
50. Лапчева В.Ф. Условия формирования и прогноз сильных шквалов с использованием данных наблюдений МРЛ и ИСЗ // Метеорология и гидрология. 1990. № 8. С. 70–75.
51. Ленская О.Ю. Методические вопросы использования спутниковой и радиолокационной информации в мезомасштабном прогнозе (на примере опасных явлений погоды в Москве 24 июля 2001 г.) // Вестник Челяб. гос. ун-та. 2007. № 6. С. 66–79.
52. Ленская О.Ю., Абдуллаев С.М. Использование доплеровского радара и данных наземных наблюдений для изучения и прогноза шквалов // Вестник Челяб. гос. ун-та. 2005. Т.12. №1. С.131–143.
53. Ленская О.Ю., Абдуллаев С.М. Метод реконструкции типа мезомасштабных систем осадков, генерирующих шквалы, по особенностям изменения приземного давления // Вестник Челяб. гос. ун-та. 2005. Т. 12. № 1. С. 143–151.
54. Логинов В.Ф., Волчек А.А., Шпока И.Н. Географические особенности распределения гроз и шквалов на территории Беларуси // Природопользование. 2009. Вып. 15. С. 42–49.

55. *Логинов В.Ф., Струк М.И.* Метеорологические риски на территории Беларуси: оценка, прогноз, пути минимизации // Изв. Российской академии наук. Серия географическая. 2010. № 5. С. 112–122.
56. *Локощенко М.А.* Динамика термической турбулентности в нижней атмосфере Москвы по данным содарного зондирования // Метеорология и гидрология. 2006. № 2. С. 35–46.
57. *Наливкин Д.В.* Смерчи. М.: Наука, 1984. 112 с.
58. *Переходцева Э.В.* Прогноз шквалов статистическими методами классификации на основании диагностических и прогностических синхронных связей // Тр. Гидрометцентра СССР. 1985. Вып. 271. С. 37–60.
59. *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 // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. 2013. № 40. С. 170–181.
60. *Переходцева Э.В.* О гидродинамико-статистическом прогнозе до двух суток явлений сильного ветра и сильных осадков для территории Северного Кавказа // Тр. ГМНИЦ РФ. 2012. № 347. С. 113–125.
61. *Переходцева Э.В.* Модель гидродинамико-статистического прогноза с заблаговременностью 12–48 ч сильных шквалов и смерчей по территории Сибири // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 1. С. 263–270.
62. *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.
63. *Переходцева Э.В.* Прогноз сильных шквалов и смерчей в летний период 2009 года на основе статистических моделей // Тр. ГМНИЦ РФ. 2010. № 344. С. 231–244.
64. *Переходцева Э.В.* Анализ устойчивости гидродинамико-статистической модели прогноза сильных шквалов и смерчей для территории России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2009. Т. 6. № 2. С. 155–162.
65. *Переходцева Э.В.* Объективный физико-статистический метод прогноза шквалов (20 м/с и более) на текущий день для европейской территории: методические указания. 1992. 10 с.
66. *Переходцева Э.В., Золин Л.В.* Гидродинамико-статистический прогноз и экспертная система прогноза смерчей на европейской территории России // Тр. ГМНИЦ РФ. 2008. № 342. С. 45–54.
67. *Песков Б.Е.* Исследование условий развития гроз и шквалов с помощью диагностических диаграмм вероятности и индексов неустойчивости // Тр. Гидрометцентра СССР. 1967. Вып. 13. С. 21–31.
68. *Песков Б.Е., Дмитриева Т.Г., Бухаров М.В.* Развитие методов диагноза и прогноза летних шквалов и ливней с учетом спутниковых и наземных измерений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 2. С. 234–242.
69. *Песков Б.Е., Снитковский А.И.* К прогнозу сильных шквалов // Метеорология и гидрология. 1968. № 7. С. 52–57.
70. *Песков Б.Е., Снитковский А.И.* Термодинамические условия образования шквалов различной силы в центральной части европейской территории СССР // Тр. Гидрометцентра СССР. 1968. Вып. 35. С. 69–79.
71. *Песков Б.Е., Хохлов Г.В.* Сильные шквалы в Верхнем Поволжье и некоторые рекомендации к их прогнозу // Тр. Гидрометцентра России. 1993. Вып. 326. С. 100–114.
72. *Положение о порядке действий учреждений и организаций при угрозе возникновения и возникновении опасных природных явлений: Руководящий документ.* РД 52.88.699-2008. М., 2008. 30 с.
73. *Поморцева А.А., Гордина В.А.* Исследование синоптических условий формирования шквалов на территории Пермского края // Географический вестник. 2013. № 2 (25). С. 55–58.
74. *Разумов В.В., Разумова Н.В.* Опасные гидрометеорологические явления на радиационно загрязненных территориях центрального региона Европейской части России // Геориск. 2015. № 3. С. 30–38.
75. *Решетов Г.Д., Чернова В.Ф.* Способ прогнозирования шквалов на 12–24 ч // Метеорология и гидрология. 1975. № 3. С. 15–24.

76. Рубинштейн К.Г., Ширяев М.В., Елисеев Г.В., Игнатов Р.Ю. Первые оценки качества работы систем раннего предупреждения о метеорологических угрозах для Мурманской области // Арктика: экология и экономика. 2014. № 4(16). С. 77–85.
77. *Руководство по диагнозу и прогнозу опасных и особо опасных осадков, града и шквалов по данным метеорологических радиолокаторов и искусственных спутников Земли. Руководящий документ.* РД 52.27.339-93. М.: Федеральная служба России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, 1996. 181 с.
78. *Руководство по краткосрочным прогнозам погоды.* Ч. 1. Л.: Гидрометеиздат, 1986. С. 527–536.
79. *Руководство по прогнозированию метеорологических условий для авиации.* Л.: Гидрометеиздат, 1985. 304 с.
80. Станкова Е.Н., Петров Д.А. Комплексная информационная система, предназначенная для формирования входных данных моделей конвективных облаков // Вестник Санкт-Петербургского ун-та. Серия 10. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. 2015. № 3. С. 83–95.
81. Чайковский В.М. Использование доплеровского радиолокатора в метеорологии // Вестник Пенз. гос. ун-та. 2015. № 3 (11). С. 143–147.
82. Черногубова Ю.Я. Возникновение опасных конвективных явлений погоды на территории Центрально-Черноземного УГМС и их прогнозирование // Тр. Гидрометцентра России. 2015. Вып. 357. С. 125–145.
83. Черногубова Ю.Я., Санникова Г.В. Результаты испытания автоматизированных методов прогноза осадков и шквалов на основе выходных данных региональной модели Гидрометцентра России с заблаговременностью 12 и 24 ч по территории ЦЧО // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. 2012. №9. С. 91–100.
84. Шакина Н.П. Динамика атмосферных фронтов. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 263 с.
85. Шаколько Е.Н., Переходцева Э.В. О результатах испытания метода прогноза шквалов на Европейской территории СССР с заблаговременностью 12 ч // Информационный сборник № 17. 1988. С. 50–53.
86. Шварц К.Г. Моделирование крупномасштабных и мезомасштабных процессов в бароклинной атмосфере и океане // Географический вестник. 2013. Вып.1(24). С.72–77.
87. Шварц К.Г., Шкляев В.А. Математическое моделирование мезомасштабных и крупномасштабных процессов переноса примеси в бароклинной атмосфере. М.;Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2015. 156 с.
88. Шихов А.Н. Оценка последствий стихийных природных явлений для лесных ресурсов Пермского края по многолетним рядам данных космической съемки // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 1. С. 21–29.
89. Шихов А.Н. Исследование последствий сильных шквалов и смерчей в Пермском крае с применением данных дистанционного зондирования Земли // Географический вестник. 2013. №1(24). С. 77–86.
90. Юсупалиев У., Анисимова Е.П., Маслов А.К., Шутеев С.А. К вопросу о формировании и геометрических характеристиках смерча. Ч. I // Прикладная физика. 2001. № 1. С. 56–61.
91. Юсупов Ю.И. Метод прогноза шквалов с использованием термодинамических параметров атмосферы и потенциального вихря Эртеля // Метеорология и гидрология. 2013. № 11. С. 55–63.
92. Юсупов Ю.И. К вопросу об оперативном прогнозе шквалов // Тр. ГМНИЦ РФ. 2008. № 342. С. 55–78.
93. Ягудин Р.А. Синоптико-метеорологические и термодинамические условия возникновения шквалов в районе Новосибирска // Тр. НР ГМЦ. Л.: Гидрометеиздат, 1971. Вып. 5. С. 128–142.
94. Abdoulaev S., Lenskaia O., Marques V.S., et al. Relative Motions in Squall Lines Accompanied by Stratiform Region // Brazilian Journal of Meteorology. 2000. Vol. 15. no. 2. P. 87–102.
95. 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 .
96. Corfidi S.F. Cold pools and MCS propagation: forecasting the motion of downwind-developing MCSs // Wea. Forecasting. Vol. 18. 2003. P. 997–1017.
97. Doswell C.A., Bosart L.F. Extratropical Synoptic-Scale Processes and Severe Convection. A Meteorological Monograph // The American Meteorological Society. 2000. 104 p .

98. Hertenstein R.F.A., Schubert W.H. Potential vorticity anomalies associated with squall lines // *Mon. Wea. Rev.* 1991. Vol. 119. P. 1663–1672.
99. Holton J.R. An introduction to dynamic meteorology // Elsevier Academic Press. 2004. P. 290–304.
100. Jirak I.L., Cotton W.R. Observational Analysis of the Predictability of Mesoscale Convective Systems // *American Meteorological Society*. Vol. 22. 2007. P. 813–838.
101. Johns R.H., Doswell C.A. Severe Local Storm Forecasting // *Weather and Forecasting*. 1992. Vol. 7. P. 588–612.
102. Johnson R.H., Hamilton P.J. The relationship of surface pressure features to the precipitation and airflow structure of an intense midlatitude squall line // *Mon. Wea. Rev.* 1988. Vol. 116. No 6. P. 1444–1472.
103. Johnson R.H., Miner B.D., Ciesielski P.E. Circulations between Mesoscale Convective Systems along a Cold Front // *Mon. Wea. Rev.* 1995. Vol. 123. no. 3. P. 585–599.
104. Laing, A.G., Fritch J.M. Mesoscale convective complexes over Indian Monsoon Region // *J. of Clim.* Vol. 6. 1993. P. 911–919.
105. Lilly D.K. The structure, energetic and propagation of rotating convective storms. Part I: Energy exchange with mean flow // *J. Atm. Sci.* 1986. Vol. 43. No 3. P. 113–125.
106. Lilly D.K. The structure, energetic and propagation of rotating convective storms. Part II: Helicity and storm stabilization // *J. Atm. Sci.* 1986. Vol. 43. No 3. P. 126–140.
107. Lin X., Johnson R.N. Heat and Moisture Budgets and Circulation Characteristics of a Frontal Squall Line // *J. Atm. Sci.* Vol. 51. 1994. no. 12. P. 1661–1681.
108. Markowski P.M., Richardson Y.P. Tornadogenesis: Our current understanding, forecasting considerations, and questions to guide future research // *Atmospheric Research*. Vol. 93. 2009. P. 3–10.
109. McAnnelly R.L., Cotton W.R. The precipitation life cycle of mesoscale Convective Complexes over Central United States // *Mon. Wea. Rev.* Vol.117. 1989. P. 784–808.
110. Parker M.D., Johnson R.H. Simulated convective lines with leading precipitation. Part I: Governing dynamics // *J. Atmos. Sci.* Vol. 61. 2004. P. 1637–1655.
111. Parker M.D., Johnson R.H. Simulated convective lines with leading precipitation. Part II: Evolution and maintenance // *J. Atmos. Sci.* Vol. 61. 2004. P. 1656–1673.
112. Shchiesser H.H., Houze R.A., Hutriesser H. The mesoscale structure of severe precipitation systems in Switzerland // *Mon. Wea. Rev.* 1995. V.123. P.20712097.
113. Tetsuya Takemi. Impacts of moisture profile on the evolution and organization of midlatitude squall lines under various shear conditions // *Atmospheric Research*. 2006. Vol. 82. P. 37–54.
114. Tollerud E.I., Collander R.S. Mesoscale convective systems and extreme rainfall in the central United States // *Extreme Hydrological Events: Precipitation, Floods and Droughts*. IANS. 1993. P. 11–19.
115. Weisman M.L., Davis C., Wang W., et al. Experiences with 0-36-h explicit convective forecasts with the WRF-ARW Model // *Wea. and Forecasting*. 2008. Vol. 23. no. 3. P. 407–437.

References

1. Abdullaev, S.M. (2010), “Life cycle of mesoscale convective systems: concept, climatology and forecast”, D. Sc. Thesis, Geography, Moscow, Russia.
2. Abdullaev, S.M., Zhelnin, A.A. and Lenskaya, O.Yu. (2009), “Life cycle of mesoscale convective systems”, *Meteorologiya i Gidrologiya*, no. 5, pp. 34–45.
3. Abdullaev, S.M. and Lenskaya, O.Yu. (1998), “Evolutionary classification of mesoscale squall lines”, *Meteorologiya i Gidrologiya*, no. 3, pp. 24–32.
4. Abdullin, R.K. and Shikhov, A.N. (2015), “Mapping of space-time distribution of dangerous meteorological phenomena in Perm region”, *Bulletin of Udmurt University. Series: Biology & Earth Sciences*, vol. 25, no. 4, pp. 98–106.
5. Abshaev, M.T., Abshaev, A.M., Malkarova, A.M. and Zharashuev, M.V. (2010), “Automated radar identification, measurement of parameters and classification of convective cells for hail protection and storm warning”, *Meteorologiya i Gidrologiya*, no. 3, pp. 36–45.
6. Alekseeva, A.A. (2014), “A method for severe squall forecasting”, *Meteorologiya i Gidrologiya*, no. 9, pp. 5–15.
7. Alekseeva, A.A. (2000), “Identification of convective spontaneous weather phenomena using digital information from artificial satellites for the purpose of their very short-range forecast”, *Proceedings of the Hydrometeorological Research Centre of the Russian Federation*, no. 335, pp. 59–73.

8. Alekseeva, A.A. (2007), "Methods of forecasting maximum amount of precipitation in active convection areas and alternative forecasting heavy showers and squalls", *Results of testing new and improved technologies, models and methods of hydrometeorological forecasting*, no. 34, pp. 49–69.
9. Alekseeva, A.A., Losev, V.M., Peskov, B.E., and Bagrov, A.N. (2012), "Results of testing an automated method of squalls forecasting with the intensity specification in three gradations (from 20 to 24, from 25 to 32, 33 m/s and more) on the basis of output data of the regional model with advance time of 12 and 24 hours", *Results of testing new and improved technologies, models and methods of hydrometeorological forecasting*, no. 39, pp. 61–68.
10. Alekseeva, A.A., Losev, V. M., Peskov, B.E., Vasil'ev, E.V. and Nikiforova, A.E. (2010), "Forecast for development of active convection zones with especially dangerous phenomena on the basis of the regional model of Hydrometeorological center of Russia", *80 years Hydrometeorological center of Russia, TRIADA LTD, Moscow, Russia*, pp. 147–159.
11. Alekseeva, A.A. and Peskov, B.E. (2001), "Squall and tornado phenomena of June 20-21, 1998 in Moscow and the Moscow region", *Natural dangers of Russia*, Kruk, Moscow, Russia, vol. 5, pp. 159–165.
12. Alekseeva, A.A., Yusupov, Yu.I., Bagrov, A.N., Demidova O.Yu., Smirnova I.M. and Chernogubova Yu.Ya. (2015), "Results of testing a method of squalls forecasting using thermodynamic parameters of the atmosphere and Ertel potential vorticity", *Results of testing new and improved technologies, models and methods of hydrometeorological forecasting*, no. 42, pp. 15–38.
13. Ananova, L.G. (2011), "The seasonal distribution of the radar characteristics of cloudiness in case of squalls in the southeast of Western Siberia" *Geographicheskii Vestnik*, no. 4, pp. 44–49.
14. Ananova, L.G. (2007), "Influence of the temperature, humidity and sea-level pressure on development of squalls in the southeast of Western Siberia", *Tomsk State University Journal*, no. 302, pp. 211–214.
15. Ananova L.G. (2010), "Wind shifts in case of squalls at the airfield Tomsk", *METEOSPEKTR*, no. 2, pp. 100–104.
16. Ananova, L.G., Gorbatenko, V.P. and Lukovskaya, I.A. (2007), "Radar characteristics of convective clouds at squalls in the southeast of Western Siberia", *Meteorologiya i Gidrologiya*, no. 7, pp. 51–56.
17. Bocharnikov, N.V., Brylev, G.B. and Vatiashvili, M.R. (1989), "Diagnosis of squalls based on a meteorological radar data", *Radar meteorology*, pp. 64–67.
18. Bocharnikov, N.V., Brylev, G.B., Peskov, B.E., et al. (1988), *Methodological instructions for squalls detection with the use of a meteorological radar data*. Main Geophysical Observatory Publ., Leningrad, USSR, 23 p.
19. Brylev, G.B. and Oguryaev, V.S. "Radar criteria of squalls connected with cumulonimbus clouds", *Proceedings of Voeikov Main Geophysical Observatory*, issue 383, pp. 67–72.
20. Budilina, E.M., Prokh, L.Z. and Snitkovsky, A.I. (1976), *Tornadoes and squalls of midlatitudes*. Gidrometeoizdat, Leningrad, USSR, 31 p.
21. Buz, A.I. (1973), "Conditions for squalls formation in the South Baltic region. Analysis and forecast of especially dangerous weather phenomena". *Proceedings of the Hydrometcentre of the USSR*, vol. 105, pp. 36–53.
22. Bukharov, M.V., Golovlev, K.N., Mironova, N.S. and Sizenova, E.A. (2010), "The analysis of the reasons for an amplification of a squally wind up to a storm force in the Kerch Strait of November 11, 2007", *Current problems in remote sensing of the Earth from space*, vol. 7, no. 3, pp. 9–15.
23. Vasil'ev, E.V., Alekseeva, A.A., Peskov, B.E. (2009), "Origin conditions and short-range forecast of strong squalls", *Meteorologiya i Gidrologiya*, no. 1, pp. 5–15.
24. Vasil'ev, A.A., Peskov, B.E., Snitkovsky, A.I. (1985), "Tornadoes, squalls and hail on June 8-9, 1984", *Meteorologiya i Gidrologiya*, no. 8, pp. 5–15.
25. Vel'tishhev, N.F., Zhupanov, V.D. and Pavlyukov, Yu.B. (2011). "Short-range forecast of strong precipitation using the convection-resolving WRF models", *Meteorologiya i Gidrologiya*, no. 1. pp. 5–18.
26. Vetrov, A.L. and Shikhov, A.N. (2013), "Study of evolution conditions for severe gusts in the Kama region on July 18, 2012, and estimation of their effect", *Bulletin of Udmurt University. Series: Biology & Earth Sciences*, no. 6-2, pp. 89–99.
27. Volchek, A.A. and Shpoka, I.N. (2011), "Laws of formation of the dangerous meteorological phenomena in territory of Belarus", *Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University*, no. 17, pp. 64–88.
28. Golovlev, K.N., Lukin, A.A. and Perekhodceva, E.V. (2015), "On the hydrodynamic-statistical forecast of the storm wind over the North, Norway and Barents Seas", *Proceedings of the Hydrometeorological Research Centre of the Russian Federation*, no. 354, pp. 63–78.

29. Gorbatenko, V.P., Konstantinova, D. A., Zolotukhina, O. I., Tunaev, E.L. (2011), "Thermodynamic conditions for formation of mesoscale convection in the atmosphere of Western Siberia", *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Fizika*, vol. 54, no. 11 (3), pp. 148–155.
30. Gorbatenko, V.P., Konstantinova, D.A., Shutova, E.V. (2009), "Specific features of squalls development in the atmosphere of the southeast of Western Siberia: Proceedings of Russian Conference", *The eighth Siberian meeting on climate-environmental monitoring*, Agaf-press, Tomsk, Russia, pp. 156–157.
31. Grishhenko, I.V. (2011), "Specifics of damage and risk assessment related to hazardous weather in the territory of Arkhangel'sk region and Nenets Autonomous District", *Proceedings of Voeikov Main Geophysical Observatory*, no. 563, pp. 137–148.
32. Grishhenko, I.V. (2009), "Squalls and tornadoes on the territory of the Archangel'sk region and the Nenets Autonomous Area", *Vestnik of Northern (Arctic) Federal University. Natural Sciences*, no. 4, pp. 5–10.
33. Danilov, A.D. and Pileich, A.V. (2012), "Models of registration of heat mass exchange processes in the atmosphere for computer-aided design of technical means for modern meteorological stations". *Modeling of systems and processes*, vol. 4, pp. 29–33.
34. Danilov, A.D. and Pileich, A.V. (2010), "Mathematical models for automated design of weather forecasting", *The Bulletin of Voronezh State Technical University*, vol. 6, no. 10, pp. 118–122.
35. Dmitrieva, T.G. (2010), "Evolution and movement of cumulonimbus clouds hearths according to satellite data in case of severe squalls", *Current problems in remote sensing of the Earth from space*, vol. 7, no. 1, pp. 83–91.
36. Dmitrieva, T.G., Bukharov, M. V. and Peskov B.E. (2011), "Analysis of arising of strong squalls using satellite and forecast data", *Current problems in remote sensing of the Earth from space*, vol. 8, no. 3, pp. 244–250.
37. Dmitrieva, T.G. and Peskov, B.E. (2013), "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)", *Meteorologiya i Gidrologiya*, no. 2, pp. 18–30.
38. Dyadyuchenko, V., Pavlyukov, Yu., Vylegzhanin, I. (2014), "Doppler radars in Russia". *Science in Russia*, no. 1, pp. 23–27.
39. Evseeva, N.S. and Romashova, T.V. (2011), "Dangerous meteorological phenomena as a constituent of natural risk (by example of the south of Tomsk region)", *Tomsk State University Journal*, no. 353, pp. 199–204.
40. Instruction for preparation and transmission of storm reports by observation subdivisions. (2013), Regulatory document. RD 52.04.563-2013,
41. Kalinin, N.A. (2009), *Dinamicheskaya meteorologiya* [Dynamic meteorology: textbook]. Perm State University, Perm, Russia.
42. Kalinin, N.A. (2015), *Monitoring, modeling and forecast of the state of atmosphere in midlatitudes*. Perm State University, Perm, Russia.
43. Kalinin, N.A. and Vetrov, A.L. (2002), "The generation of available potential energy by large-scale condensation in middle-latitude cyclones", *Meteorologiya i Gidrologiya*, no. 4, pp. 17–27.
44. Kalinin, N.A., Vetrov, A.L., Sviyazov, E.M., Popova, E.V. (2013), "Studying intensive convection in Perm Krai using the WRF model", *Meteorologiya i Gidrologiya*, no. 9, pp. 21–30.
45. Kalinin, N.A. and Smirnova, A.A. (2005), "Investigation of radar characteristics of recognition of dangerous weather phenomena caused by cumulonimbus clouds", *Meteorologiya i Gidrologiya*, no. 1, pp. 84–95.
46. Kalinin N.A. and Smirnova A.A. (2006), "Possibilities of meteorological radars in detection of cloudiness and dangerous phenomena of weather", *Geographicheskii Vestnik*, no. 2, pp. 76–83.
47. Kondratyuk, V.I. and Shven', P.I. (2007), "An investigation of the wind characteristics by means of the anemorumbometer of new generation MARK-60", *Proceedings of Voeikov Main Geophysical Observatory*, no. 556, pp. 167–178.
48. Konstantinova, D.A. and Gorbatenko, V.P. (2010), "Conditions of squall formation in the south-eastern territory of Western Siberia", *Tomsk State University Journal*, no. 337, pp. 189–193.
49. Lapcheva, V.F. (1989). "Conditions for development of active convection areas with tornadoes and severe squalls", *Proceedings of the Hydrometcentre of the USSR*, vol. 299, pp. 32–50.
50. Lapcheva, V.F. (1990), "Conditions of formation and forecast of severe squalls with the use of observation data from a meteorological radar and artificial satellite", *Meteorologiya i Gidrologiya*, no. 8, pp. 70–75.

51. Lenskaya, O.Yu. (2007), "Methodological questions of using satellite and radar data in mesoscale forecasting (a case study of dangerous weather phenomena in Moscow on July 24, 2001)", *Chelyabinsk State University Bulletin*, no. 6, pp. 66–79.
52. Lenskaya, O.Yu. and Abdullaev, S.M. (2005), "Application of the Doppler radar and ground-based observations data for study and forecast of squalls", *Chelyabinsk State University Bulletin*, vol. 12, no. 1, pp. 131–143.
53. Lenskaya, O.Yu. and Abdullaev, S.M. (2005), "Method for reconstruction of the mesoscale precipitation systems generating squalls based on characteristics of changing ground pressure", *Chelyabinsk State University Bulletin*, vol. 12, no. 1, pp. 143–151.
54. Loginov, V.F., Volchek, A.A. and Shpoka, I.N. (2009), "Geographical features of distribution of thunderstorms and squalls in the territory of Belarus", *Prirodopol'zovaniye (Nature Management)*, issue 15, pp. 42–49.
55. Loginov, V. F. and Struk, M. I. (2010), "Meteorological risks on the territory of Belarus: evaluation, forecast, ways of minimization", *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*, no. 5, pp. 112–122.
56. Lokoshchenko, M.A. "Dynamics of thermal turbulence in the lower atmosphere of Moscow according to sodar sounding", *Meteorologiya i Gidrologiya*, no. 2. pp. 35–46.
57. Nalivkin, D. V. (1984), *Smerchi [Tornadoes]*, Nauka, Moscow, USSR.
58. Perekhodtseva, E.V. (1985), "Forecasting squalls with the use of statistical techniques of classification based on diagnostic and prognostic synchronous communications", *Proceedings of the Hydrometeorological center of the USSR*, issue 271, pp. 37–60.
59. Perekhodtseva, E.V. (2013), "A hydrodynamic-statistical technique for forecasting squalls and fresh gale within gradation of dangerous phenomena during the summer period with advance time of 12-36 hours according to output data from the regional model for the European part of Russia", *Results of testing new and improved technologies, models and methods of hydrometeorological forecasting*, no. 40, pp. 170–181.
60. Perekhodtseva, E.V. (2012), "On hydrodynamic-statistical forecasting fresh gale and heavy precipitation for the territory of the North Caucasus up to two days ahead", *Proceedings of the Hydrometcenter of Russia*, no. 347, pp. 113–125.
61. Perekhodtseva, E.V. (2011), "A model of hydrodynamic-statistical forecasting severe squalls and tornadoes for the territory of Siberia with advance time of 12-48 hours", *Current problems in remote sensing of the Earth from space*, vol. 8, no. 1, pp. 263–270.
62. Perekhodtseva, E.V. (2010), Prediction of tornadoes and the strong squalls in the central region of Russia in the summer of 2009 on the basis of statistical models. *Current problems in remote sensing of the Earth from space*, vol. 7, no. 3, pp. 33–40.
63. Perekhodtseva, E.V. (2010), "Forecasting severe squalls and tornadoes during the summer period of 2009 on the basis of statistical models", *Proceedings of the Hydrometcenter of Russia*, no. 344, pp. 231–244.
64. Perekhodtseva, E.V. (2009), "A hydrodynamic-statistical model of forecasting severe squalls and tornadoes for the territory of Russia: analysis of stability", *Current problems in remote sensing of the Earth from space*, vol. 6, no. 2, pp. 155–162.
65. Perekhodtseva, E.V. (1992), *An objective physical-statistical technique for forecasting squalls (20 m/s and more) for the present day for the European territory: methodological instructions*.
66. Perekhodtseva, E.V. and Zolin, L.V. (2008), "Hydrodynamic-statistical forecasting and an expert system of forecasting tornadoes in the European part of Russia", *Proceedings of the Hydrometcenter of Russia*, no. 342, pp. 45-54.
67. Peskov, B.E. (1967), "Research on conditions for the development of thunder-storms and squalls by means of diagnostic probability diagrams and instability indices", *Proceedings of the Hydrometeorological center of the USSR*, vol. 13, pp. 21–31.
68. Peskov, B.E., Dmitriyeva, T.G., and Bukharov, M.V. (2012), "Development of methods for the diagnosing and forecasting summer squalls and showers taking into account satellite and surface-recorded measurements", *Current problems in remote sensing of the Earth from space*, vol. 9, no. 2, pp. 234–242.
69. Peskov, B.E., Snitkovsky, A.I. (1968), "On forecasting severe squalls", *Meteorologiya i Gidrologiya*, no. 7, pp. 52–57.
70. Peskov, B. E. and Snitkovsky, A.I. (1968), "Thermodynamic conditions for formation of squalls of different force in the central part of the European territory of the USSR", *Proceedings of the Hydrometeorological center of the USSR*, issue 35, pp. 69–79.

71. Peskov, B. E., Khokhlov, G.V. (1993), "Severe squalls in the Upper Volga region and some recommendations on their forecasting", *Proceedings of the Hydrometeorological research center of the Russian Federation*, issue 326, pp. 100–114.
72. Provision on operating procedures for establishments and organizations in case of threat and formation of hazardous natural phenomena. A regulatory document. RD 52.88.699-2008. 30 p.
73. Pomortseva, A.A. and Gordina, V.A. (2013), "Research on synoptic conditions for squalls formation in the territory of Perm Krai", *Geograficheskiy vestnik*, no. 2 (25), pp. 55–58.
74. Razumov, V.V. and Razumova N.V. (2015), "Dangerous hydrometeorological phenomena in radiation-tainted territories of the central region of the European part of Russia", *Georisk*, no. 3, pp. 30–38.
75. Reshetov, G. D. and Chernova, V. F. (1975), "A method for predicting squalls for 12-24 h", *Meteorologiya i Gidrologiya*, no. 3, pp. 15–24.
76. Rubinstein, K.G., Shiryayev, M. V., Yeliseyev, G.V., Ignatov, R.Yu. (2014), "Systems of early warning about meteorological threats for the Murmansk region: first estimates of the operation quality", *The Arctic: ecology and economics*, no. 4 (16), pp. 77–85.
77. Guideline for diagnosing and forecasting dangerous and especially dangerous precipitation, hail and squalls on the basis of data from meteorological radars and artificial Earth satellites. A regulatory document. RD 52.27.339-93, 1996, 181 p.
78. *Manual on short-term weather forecasts*. (1986), Pt.1. Gidrometeoizdat, Leningrad, USSR, pp. 527–536.
79. *Manual on predicting weather conditions for aviation*. (1985), Gidrometeoizdat, Leningrad, USSR.
80. Stankova, E.N. and Petrov, D.A. (2015), "The integrated information system intended for developing input data for models of convective clouds", *Vestnik of St. Petersburg State University. Series 10. Applied Mathematics. Computer Science. Control Processes*, no. 3, pp. 83–95.
81. Tchaikovsky, V.M. (2015), "Application of a Doppler radar in meteorology", *Vestnik of Penza state university*, no. 3 (11), pp. 143–147.
82. Chernogubova, Yu.Ya. (2015), "Dangerous convective weather phenomena in the territory of the Weather Control and Environmental Monitoring Service for the Central Black Earth Region: formation and forecasting", *Proceedings of the Hydrometeorological research center of the Russian Federation*, issue 357, pp. 125–145.
83. Chernogubova, Yu.Ya., Sannikova, G.V. (2012), "Results of testing automated methods for forecasting precipitation and squalls on the basis of output data of the regional model of the Hydrometeorological center of Russia with advance time of 12 and 24 h on the territory of the Central Black Earth Region", *Results of testing new and improved technologies, models and methods of hydrometeorological forecasting*, no. 39, pp. 91–100.
84. Shakina, N.P. (1985), *Dinamika atmosferykh frontov [Dynamics of atmospheric fronts]*, Gidrometeoizdat, Leningrad, USSR.
85. Shako'tko, E.N., Perekhodtseva, E.V. (1988), "On results of testing a method for forecasting squalls in the European territory of the USSR with advance time of 12 h", *Information bulletin*, no. 17, pp. 50–53.
86. Schwartz, K.G. (2013), "Simulation of large-scale and mesoscale processes in a baroclinic atmosphere and in the ocean", *Geograficheskiy vestnik*, issue 1(24), pp. 72–77.
87. Schwartz, K.G., Shklyayev, V.A. (2015), *Mathematical simulation of mesoscale and large-scale processes of impurity transfer in a baroclinic atmosphere*, Institute of computer science, M.-Izhevsk, 156 p.
88. Shikhov, A.N. (2014), "Assessment of consequences of spontaneous natural phenomena for forest resources of Perm Krai according to long-term rows of data from spaceborne measurements", *Current problems in remote sensing of the Earth from space*, vol. 11, no. 1, pp. 21–29.
89. Shikhov, A.N. (2013), "Research into consequences of severe squalls and tornadoes in Perm Krai using data of Earth remote sensing", *Geograficheskiy vestnik*, no. 1 (24), pp. 77–86.
90. Yusupliyev, Yu., Anisimova, E.P., Maslov, A.K., Shuteev, S.A. (2001), "Revisiting the question of formation and geometrical characteristics of tornadoes. Pt. I", *Applied Physics*, no. 1, pp. 56–61.
91. Yusupov Yu.I. (2013), "A method of forecasting squalls with the use of thermodynamic parameters of the atmosphere and Ertel potential vorticity", *Meteorologiya i Gidrologiya*, no. 11, pp. 55–63.
92. Yusupov Yu.I. (2008), "Revisiting the question of routine squall forecasting", *Proceedings of the Hydrometeorological research center of the Russian Federation*, no. 342, pp. 55–78.
93. Yagudin R.A. (1971), "Synoptic-meteorological and thermodynamic conditions for formation of squalls near Novosibirsk", *Tr. NR GMTs*, Gidrometeoizdat, Leningrad, USSR, issue 5, pp. 128–142.

94. Abdoulaev S., Lenskaia O., Marques V.S., et al. (2000) Relative Motions in Squall Lines Accompanied by Stratiform Region // Brazilian Journal of Meteorology.. Vol. 15. no. 2. P. 87–102.
95. Braun S.A., Houze R.A.Jr. (1994) The heat and potential vortices budgets of a midlatitude squall line / Sixth Conference on Mesoscale Processes. Portland, AMS. P. 335–338 .
96. Corfidi S.F. (2003), “Cold pools and MCS propagation: forecasting the motion of downwind-developing MCSs”, *Wea. Forecasting*, Vol. 18, pp. 997–1017.
97. Doswell C.A. and Bosart L.F. (2000), *Extratropical Synoptic-Scale Processes and Severe Convection. A Meteorological Monograph*, The American Meteorological Society.
98. Hertenstein R.F.A., and Schubert W.H. (1991), *Potential vorticity anomalies associated with squall lines*, *Mon. Wea. Rev.* Vol. 119. P. 1663–1672.
99. Holton J.R. (2004), *An introduction to dynamic meteorology*, Elsevier Academic Press. pp. 290–304.
100. Jirak I.L. and Cotton W.R. (2007), *Observational Analysis of the Predictability of Mesoscale Convective Systems* // American Meteorological Society, Vol. 22, pp. 813–838.
101. Johns R.H. and Doswell C.A. (1992), “Severe Local Storm Forecasting”, *Weather and Forecasting*, Vol. 7. pp. 588–612.
102. Johnson R.H., Hamilton P.J. (1988), *The relationship of surface pressure features to the precipitation and airflow structure of an intense midlatitude squall line*, *Mon. Wea. Rev.* Vol. 116. No 6. pp. 1444–1472.
103. Johnson R.H., Miner B.D. and Ciesielski P.E. (1995), *Circulations between Mesoscale Convective Systems along a Cold Front*, *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 123, no. 3, pp. 585–599.
104. Laing, A.G. and Fritch J.M. (1993), *Mesoscale convective complexes over Indian Monsoon Region*, *J. of Clim.* Vol. 6, pp. 911–919.
105. Lilly D.K. (1986), *The structure, energetic and propagation of rotating convective storms. Part I: Energy exchange with mean flow*, *J. Atm. Sci.* Vol. 43, No 3, pp. 113–125.
106. Lilly D.K. (1986), *The structure, energetic and propagation of rotating convective storms. Part II: Helicity and storm stabilization*, *J. Atm. Sci.*, Vol. 43, No 3, pp. 126–140.
107. Lin X. and Johnson R.N. (1994), *Heat and Moisture Budgets and Circulation Characteristics of a Frontal Squall Line* // *J. Atm. Sci.* Vol. 51.. no. 12. P. 1661–1681.
108. Markowski P.M. and Richardson Y.P. (2009), *Tornadogenesis: Our current understanding, forecasting considerations, and questions to guide future research*, *Atmospheric Research*, Vol.93, pp. 3–10.
109. McAnnelly R.L. and Cotton W.R. (1989), *The precipitation life cycle of mesoscale Convective Complexes over Central United States*, *Mon. Wea. Rev.* Vol.117, pp. 784–808.
110. Parker M.D., Johnson R.H. (2004), *Simulated convective lines with leading precipitation. Part I: Governing dynamics*, *J. Atmos. Sci.*, Vol. 61., pp. 1637–1655.
111. Parker M.D. and Johnson R.H. (2004), *Simulated convective lines with leading precipitation. Part II: Evolution and maintenance*, *J. Atmos. Sci.* Vol. 61, pp. 1656–1673.
112. Shchiesser H.H., Houze R.A. and Hutrieser H. (1995), *The mesoscale structure of severe precipitation systems in Switzerland*, *Mon. Wea. Rev.*, Vol.123., pp. 2071–2097.
113. Tetsuya Takemi. (2006), *Impacts of moisture profile on the evolution and organization of midlatitude squall lines under various shear conditions*, *Atmospheric Research*, Vol. 82., pp. 37–54.
114. Tollerud E.I. and Collander R.S. (1993), *Mesoscale convective systems and extreme rainfall in the central United States*, *Extreme Hydrological Events: Precipitation, Floods and Droughts. IANS.* pp. 11–19.
115. Weisman M.L., Davis C. and Wang W., et al. (2008), *Experiences with 0-36-h explicit convective forecasts with the WRF-ARW Model*, *Wea. and Forecasting*, Vol. 23. no. 3. pp. 407–437.

Поступила в редакцию: 11.04.2016

Сведения об авторах

Поморцева Анна Александровна

кандидат географических наук, доцент кафедры метеорологии и охраны атмосферы Пермского государственного национального исследовательского университета; Россия, 614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15; e-mail: meteo@psu.ru

About the author

Anna A. Pomortceva

Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, Department of Meteorology and Atmosphere Protection, Perm State University; 15, Bukireva Str., Perm, 614990, Russia; e-mail: meteo@psu.ru

Калинин Николай Александрович
доктор географических наук, профессор,
заведующий кафедрой метеорологии и охраны
атмосферы Пермского государственного
национального исследовательского
университета;
Россия, 614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15;
e-mail: kalinin@psu.ru

Nikolay A. Kalinin
Doctor of Geographical Sciences, Professor, Head
of the Department of Meteorology and Atmosphere
Protection, Perm State University;
15, Bukireva Str., Perm, 614990, Russia;
e-mail: kalinin@psu.ru

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Поморцева А.А., Калинин Н.А. Аналитический обзор современного состояния исследований шквалов: условия возникновения, методы диагноза и прогноза // Географический вестник = Geographical bulletin. 2016. № 3(38). С. 90–104. doi 10.17072/2079-7877-2016-3-90-104

Please cite this article in English as:

Pomortseva A.A., Kalinin N.A. Analytical review of the current status of studying squalls: formation conditions, methods of diagnosis and prognosis // Geographical bulletin. 2016. № 3(38). P. 90–104. doi 10.17072/2079-7877-2016-3-90-104