

АЛГОРИТМЫ КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ДАННЫХ: ОЦЕНКА ТРАНСЛЯЦИИ И КОМПОЗИЦИОННЫЙ ДИСПЛЕЙ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА

*С.М. Абдуллаев, О.Ю. Ленская, А.О. Гаязова, О.Н. Иванова, А.А. Носков,
Д.Н. Соболев, Г.И. Радченко*

В работе представлены алгоритмы обработки радиолокационных данных, необходимые для создания системы сверхкраткосрочного прогноза опасных явлений, включая процедуры определения скорости трансляции, экстраполяционного прогноза и верифицирующего прогноз дисплея жизненного цикла (LCD). Основные особенности этой системы заключаются в следующем. Простая полуавтоматическая процедура смещения консервативных фрагментов поля дает устойчивые оценки трансляции для всей мезомасштабной конвективной системы. В свою очередь, это позволяет экстраполировать текущее поле осадков на сроки до 1 часа и адекватно интерпретировать композиционные изображения LCD в терминах традиционных критериев успешности прогноза. Поскольку LCD отражает области развития и диссипации штормов, а также зоны запрета на возникновения новых очагов конвекции, то в перспективе с его помощью возможна корректировка прогноза и повышение его успешности.

Ключевые слова: мезомасштабные конвективные системы, радиолокационные осадки, алгоритмы движения, прогноз опасных явлений, верификация прогноза, дисплей жизненного цикла.

Введение

Сверхкраткосрочный прогноз погоды на сроки до 6 часов сочетает результаты дистанционных, наземных наблюдений и численных мезомасштабных моделей, и как быстро развивающаяся информационная технология становится повседневным элементом жизни в развитых странах [1]. Главной целью данной работы является разработка алгоритмов прогнозов, позволяющих при минимальном наборе доступных данных, таких как цифровые поля радиолокационных осадков, воспроизводить основные результаты наиболее технически оснащенных и алгоритмически совершенных систем прогноза опасных явлений погоды, описанных в [2, 3]. В частности, нами предложены алгоритмы решения следующих задач систем штормового оповещения: 1) задача адекватного определения движения мезомасштабной конвективной системы (МКС) и 2) задача автоматической верификации экстраполяционного прогноза и диагностики эволюции МКС.

Решение задач основано на том, что движение МКС можно представить как комбинацию двух векторов различной природы: трансляции и эволюции. Трансляция – это не зависящий от масштаба элемента процесс переноса, когда все конвективные ячейки и шторма движутся с одной и той же горизонтальной скоростью, часто называемой «ведущим потоком». В отличие от трансляции, эволюция сочетает процессы появления, развития и диссипации ячеек, штормов и их ансамблей различного масштаба, и потому имеет значительные временные и пространственные вариации. Сопоставление трансляции и эволюции систем различного масштаба и типа [4–11] позволили обосновать комплекс диагно-

стических и прогностических методов [12], многие из которых не потеряли своей актуальности [13–15]. В частности, сопоставление интерактивно определенной трансляции и морфологии поля осадков на стадии максимального развития систем [16], позволяет реконструировать климатологические ряды динамических характеристик, которые в свою очередь являются ядром универсального алгоритма прогноза [12], объединяющего результаты дистанционных наблюдений конвективных систем и результаты их численного прогноза на основе модели WRF [14].

Изложенное выше предполагает, что задачу определения движения МКС по радиолокационным данным следует проводить поэтапно. Статья состоит из введения, двух разделов и заключения.

В первом разделе статьи приводится описание способов определения трансляции МКС, проблемы автоматизации этих способов и возможности разработки интерактивного алгоритма (разделы 1.1–1.3). Второй раздел содержит описание последующих этапов, в течение которых, основываясь на трансляции, производится экстраполяция поля осадков к следующему моменту времени, когда будет доступно новое изображение (раздел 2.1). Далее, сравнивая элементы прогнозного и реального наблюдаемого полей, на третьем этапе можно оценить качество прогноза и, насколько это возможно, выделить эволюционную составляющую движения системы (раздел 2.2). Данные последнего этапа можно использовать для корректировки следующего цикла прогноза. В заключении обобщаются результаты работы.

1. Алгоритмы определения трансляции

В виду очевидной важности процедуры определения трансляции в этом разделе кратко изложены основные проблемы автоматических алгоритмов (п. 1.1), работы проведенные авторами по разработке интерактивных (п. 1.2) и автоматических алгоритмов трансляции (п. 1.3).

1.1. Проблемы автоматических алгоритмов

С алгоритмической точки зрения, скорость трансляции может рассматриваться как скорость адвекции горизонтального поля радарной отражаемости. Предложены различные автоматические алгоритмы оценки последней, которые могут быть классифицированы на структурные и объектные технологии [17, 18].

Расчет матрицы коэффициентов пространственных кросс-корреляций между двумя последовательными дискретными полями осадков – это пример методов, отслеживающих мезомасштабную структуру осадков. Скорость трансляции в этом случае – «наилучший» вектор смещения всего поля.

Алгоритмы идентификации радиолокационных ячеек и их сопровождения – примеры объектного подхода. Скорость трансляции получается осреднением найденных скоростей индивидуальных ячеек. Поскольку ячейки – это наименьшие по размеру (5–10 км) и наиболее короткоживущие элементы МКС (≈ 30 мин), то эти алгоритмы удовлетворительно работают, когда имеются данные с пространственно-временным разрешением не менее $2 \text{ км} \times 2 \text{ км}$ и 10 мин. Часто наблюдается ситуация, когда радар работает в режиме объемного сканирования ≈ 15 мин, и идентификация ячеек в последовательных объемах практически невозможна – в этом случае объектом сопровождения является уже не

ячейки, а штормы, которые в общем случае имеют различные направления эволюции. Поэтому для фильтрации медленно и быстро эволюционирующих элементов поля осадков в современных автоматических алгоритмах применяются различные технологии, сочетающие объектные и структурные подходы [17, 18].

Заметим, что в оперативной практике частота случаев, когда автоматические алгоритмы по той или иной причине не состоятельны, может быть достаточно высокой. Например, в мае-августе 2013 г. при анализе эволюции 132 грозových МКС, возникших на Европейской территории России и сопредельных территориях Украины и Белоруссии [19], обнаружилось, что предусмотренная автоматизация не смогла определить вектор движения поля в течение более половины времени развития 78 МКС. Анализ 2660 радарных изображений показал, что наибольший процент «отказов» наблюдался в случаях получасовой выдачи информации, при малых скоростях трансляции комплексов локальных штормов ≤ 25 км/ч, в крупных полях осадков слоистообразной облачности с включением конвективных очагов, а также при входе и выходе зон осадков за пределы радиуса обзора радара.

Как мы покажем ниже, интерактивная процедура способна выдать оценку в большинстве этих случаев, когда результаты автоматических методов несостоятельны или трудно интерпретируемы.

1.2. Интерактивный алгоритм определения трансляции

Для отработки алгоритмов в качестве основных данных использовались временные серии бинарных файлов, содержащие информацию о горизонтальном поле радиолокационной отражаемости Z размером $400 \text{ км} \times 400 \text{ км}$ и пространственным шагом 4 км . Архивы таких серий подробно описаны нами в работе [16], где они использовались для анализа эволюции 264 МКС. Эти же дополненные архивы использовались для интерактивного определения трансляции и разработки ряда динамических характеристик МКС [14, 15].

В качестве иллюстрации процедуры выбран один день 12 августа 1991 г., с характерными условиями, осложняющими определение движения: малыми скоростями движения, входом и выходом штормов в область обзора и др. Перед началом интерактивной процедуры, выбранные из архива поля Z визуализировались в цветовой гамме, удобной для восприятия интенсивности конвективных явлений, менявшейся от ярко-зеленого к желтому, от желтого к оранжевому и красному (рис. 1). Так, если ярко-зеленый цвет пикселя соответствует $Z=10 \text{ dBZ}$ или слоистообразным осадкам, то пиксели насыщенного желтого цвета с переходом на оранжевый соответствуют $Z = 40 \text{ dBZ}$ или конвективным осадкам грозových штормов, оранжевые тона сигнализируют об отражаемостях Z , переходных от грозových штормов к градовым $>50 \text{ dBZ}$, которые, в свою очередь, выделены оттенками красного. Опыт работы с изображениями показал [15], что наилучших результатов интерактивной процедуры можно добиться при «размножении истинных пикселей» с заменой одного пикселя $4 \text{ км} \times 4 \text{ км}$ на 4 пикселя $1 \text{ км} \times 1 \text{ км}$ той же отражаемости. В этом случае на программном окне 600×800 пикселей одновременно умещаются два последовательных во времени изображения поля осадков, и остается место командным строкам и вспомогательной информации. В дальнейшем предполагается, что интервал времени между изображениями, используемыми для определения трансляции, составляет около 30 мин., и оба изображения одновременно визуализированы на экране (рис. 1а). На рис. 1а отображен выбор сохраняющихся фрагментов поля относительно «мишени» – большого круга со штормами, сопровождающимися опасными явлениями.

Интерактивная структурная процедура, характеризующаяся как «идентификация и сопровождение сохраняющихся мезо-β-масштабных фрагментов поля» заключается в следующих шагах. На первом шаге оператор подводит курсор, в нашем случае это прямоугольник 15×15 км (рис. 1а, справа), к центру интересующей области на первом изображении. В случае определения трансляции эта область представляет собой фрагмент поля, содержащий группу штормов на первом и втором изображении, до определенной степени сохраняющих взаимную конфигурацию. Наведением курсора на область интереса проще управлять с клавиатуры дисплея. Заметим, что на этом этапе, занимающем около 5 с, от оператора не требуется особых навыков и точности. Впрочем, чтобы оператор быстро ориентировался в выборе области, автоматически возникают «мишени» – области развития доминирующего на данный момент шторма с $Z > 50$ dBZ (большой круг на рис. 1а).

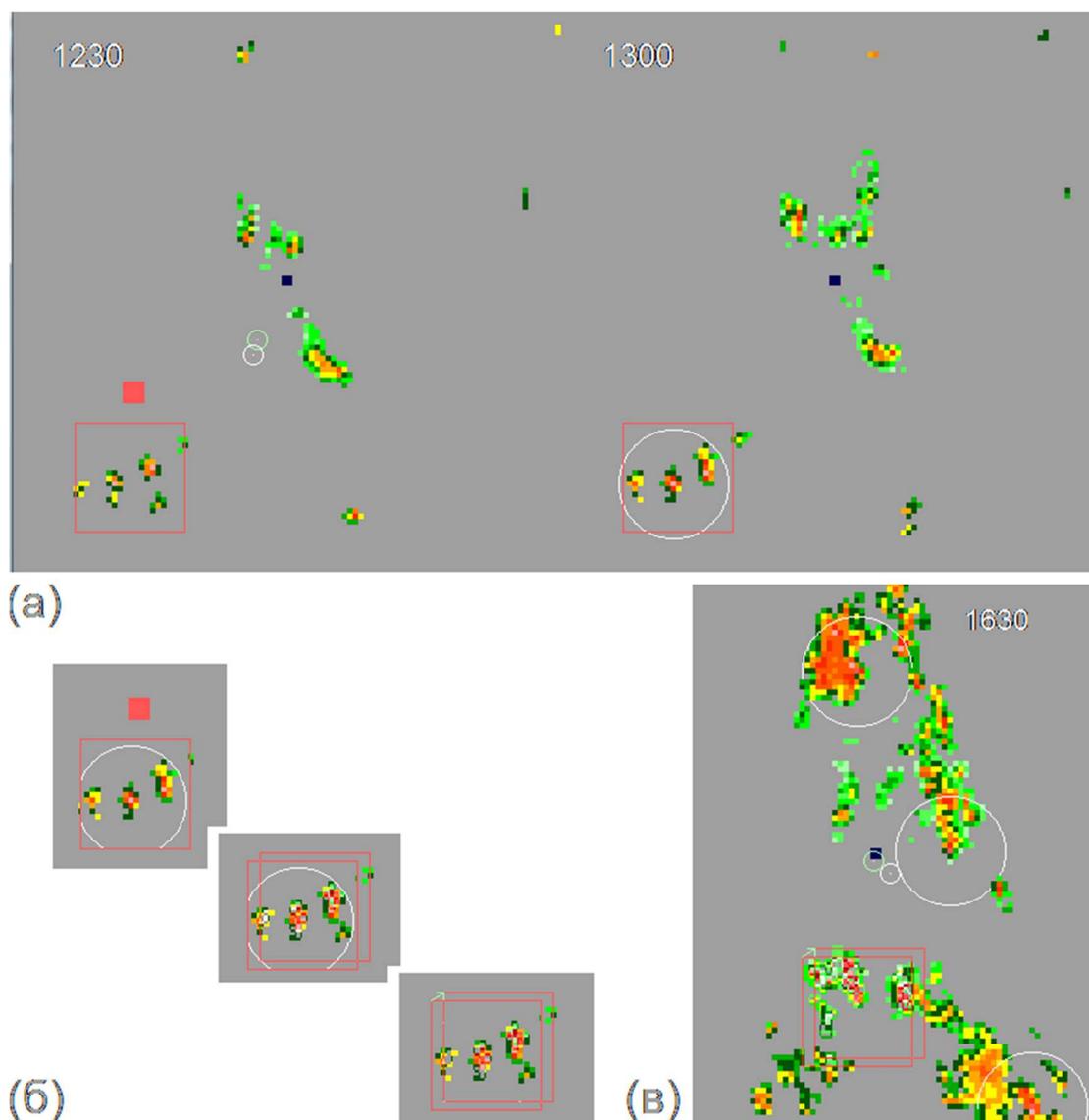


Рис. 1. Интерактивная процедура определения трансляции (ПОТ):
 а) Выбор сохраняющихся фрагментов поля относительно «мишени»;
 б) отдельные шаги ПОТ; в) ПОТ в 16:30-17:00

Как только центр области интереса выбран, начинается заключительный этап процедуры. При этом на обоих изображениях (рис. 1а) появляются окна достаточного размера, чтобы в них попали несколько штормов из области интереса. Размер окна определяется максимальными масштабами доминирующей группы штормов ≈ 80 км [5, 11, 12] и максимальной скоростью трансляции ≈ 100 км/ч. Так, при интервале между изображениями ≈ 30 минут практически в любых погодных ситуациях можно использовать квадратное окно 80 км \times 80 км. Информация о поле Z в окнах автоматически заносится в память как сегмент изображения, а затем сегмент более позднего по времени изображения поля Z появляется поверх более раннего слоя, как отдельный полупрозрачный слой (рис. 1б). На рис. 1б показаны отдельные шаги ПОТ: появление фрагментов, их совмещение и расчета вектора трансляции (внизу). Оператору остается «наилучшим» образом совместить последний (верхний) и прошлый (нижний) фрагменты поля, сдвигая верхний фрагмент относительно нижнего по горизонтали и вертикали. При вычислении трансляции задача наилучшего совмещения заключается в наложении фрагментов одного и того же эволюционирующего поля таким образом, чтобы совпали осадки штормов присутствующие на обоих снимках.

В зависимости от опытности оператора на попытки совмещения уходит от 5 до 30 с, по завершении которых автоматически выдается скорость и направление смещения фрагмента (обозначено стрелкой на рис. 1б). Это и есть первичная оценка вектора трансляции. При необходимости¹, оценку можно повторить, выбрав новые фрагменты поля и получив, в конце концов, некоторую среднюю оценку для данного момента времени. В общем случае рекомендуется повторять эту процедуру по мере поступления новой радарной информации, но не реже 1 раза в час, рекурсивно фильтруя «выбросы» оценок. Обычно достаточно трехточечной сглаживающей фильтрации.

Кажущаяся субъективность процесса совмещения сохраняющихся фрагментов компенсируется стабильной оценкой движения практически для любых систем осадков. Действительно, таким способом удается получить оценку движения системы во всех случаях, когда автоматические процедуры несостоятельны. Нетрудно показать, что природа «отказов процедур» обусловлена многомодальной эволюцией элементов поля осадков, своеобразным «цветным шумом». Это, в частности, иллюстрируется на рис. 1а и 1в, где приведены автоматические оценки положения центра масс поля МКС и рассчитано его движение. ПОТ в 16:30–17:00 демонстрируют ту же скорость трансляции, что и на рис. 1а и рис. 1б, но движение центра МКС совершенно другое. Так, в 1230–1300 со скоростью 23 км/ч центр поля сдвинулся из азимута 195° , а штормы транслировались со скоростью 22 км/ч на северо-восток из азимута 236° . Однако, в 1630–1700, из-за развития штормов на северо-западе и вхождения в обзор радара с юго-востока новых доминант, центр масс поля сдвигался на северо-запад из азимута 144° со скоростью 31 км/ч, при примерно том же направлении трансляции.

1.3. Объектно-ориентированные автоматические процедуры

Учитывая ограничения автоматических структурных процедур на сроках, превышающих 15 мин, нами исследованы возможности идентификации и определения движения на

¹ Выбор новых фрагментов на одной и той же паре снимков целесообразно проводить для МКС с явно выраженным центром вращения: ураганы и им подобные внетропические системы низкого давления.

основе стандартных алгоритмов кластеризации (сегментации), таких как k -means [20] и k -medoids [21]. Особенность этих алгоритмов – это выделение объектов, зависящее только от задаваемого числа кластеров k и выбранной для их разделения метрики (обычно это физическое расстояние). Поэтому число элементов k можно задать с учетом иерархии конвективных систем. Так, в α -кластере размером ≈ 300 км за период конвективной активности 6-9 часов [5, 11, 12] возникает $\approx 2-3$ доминантных ансамбля ≈ 100 км, или в три раза больше доминантных штормов ≈ 25 км. Таким образом, для сегментации изображения одной МКС, в зависимости от детальности необходимо задать от 4 до 10 сегментов меньшего размера.

Для ускорения в качестве начальных координат поиска можно задать k -мощных штормов, удаленных на расстояние более 20 км. После окончания итераций координаты центров кластеров сохраняются, а цикл кластеризации повторяется для нового изображения. Вопрос об идентификации одних и тех же кластеров на соседних изображениях решен минимизацией расстояний между старыми и новыми положениями центров кластеров. Разработанное программное обеспечение позволяло одновременно проводить расчеты скоростей кластеров, определенных двумя методами [19, 20] и по описанной выше интерактивной процедуре.

Общий результат этих экспериментов иллюстрируется следующим образом. При 2-3-кратном повторении интерактивной процедуры в исследуемый день по 30 получасовым интервалам получена средняя скорость трансляции $22,4 \pm 4,9$ км/ч. Предполагая, что оценка трансляции может быть получена как средняя скорость поля или кластеров, в тех же условиях получено, что средняя скорость центра масс поля была равна $32,2 \pm 24,6$ км/ч, средняя скорость четырех медоид составляла $19,6 \pm 7,4$ км/ч, а средняя скорость четырех кластеров k -means $19,4 \pm 12,9$ км/ч. В целом это означает большую устойчивость оценки скорости по интерактивной процедуре и перспективность кластеризации при условии, если будет найден способ, фильтрующий сильные скачки в положении отдельных кластеров.

2. Сверхкраткосрочный прогноз и его верификация

Консервативность трансляции – залог ее использования в прогнозе опасных явлений погоды на сроки до одного часа. В этом разделе описываются элементы экстраполяционного прогноза (nowcasting) и специально созданного для верификации прогноза композиционного изображения «жизненного цикла», построенного на основе прогнозируемого и реального поля осадков. Следует заметить, что идея такого рода композиционных изображений восходит к работе [4] и затем в различных вариантах широко использовалась во многих работах [5, 8, 11-13, 15]. Новизной представляемого варианта [15] является подчеркнутая его самодостаточность как метода оценки качества прогноза и как метода предварительной обработки поля для последующей экстраполяции.

2.1. Процедура «nowcasting»

Как первое приближение транслирование текущего поля осадков в новое положение, используется во всех современных системах штормового оповещения [1-3]. Так, последнее поле Z в 13:00 (рис. 1а), транслировано в прогнозируемое положение F за 14:00 (рис. 2а). Затем на основе статистики доминирующих штормов [12, 15] в поле F выделены две предполагаемые зоны опасных явлений протяженностью ≈ 30 км.

Изображение F на рис. 2а получено автоматически одночасовой трансляцией поля Z за 13 часов со скоростью 22 км/ч из азимута 236°. Перекрестие – это «новое» положение радара в 14:00, правильные восьмиугольники – области опасных явлений. R – реально наблюдаемое поле Z в 14:00, а LCD – композиционная обработка изображений F и R. Интерпретация зон осадков, отмеченных темно-красным, серым и цветовой палитрой на LCD дана в тексте. На рис. 2б то же, что и на рис. 2а, но в 18:00, на стадии зрелости МКС.

Обсуждение метода универсального прогноза этих явлений составляет предмет [12] и выходит за рамки данной работы. Здесь лишь отметим, что положение одного из октагонов, обусловлено типичным развитием штормов, а положение второго учитывает развитие ансамбля в целом. Предполагается, что эти правильные восьмиугольники будут информировать о вероятности восьми категорий опасных явлений, таких как град, крупный град, порывы, сильные шквалы, суммы осадков и т.п. Вероятностный прогноз этих явлений может быть получен по традиционной весовой методике применения функций нечеткой логики в прогнозах [2, 12, 22] или же, как предложено в работе [14], по степени принадлежности к климатологическим распределениям динамических характеристик систем.

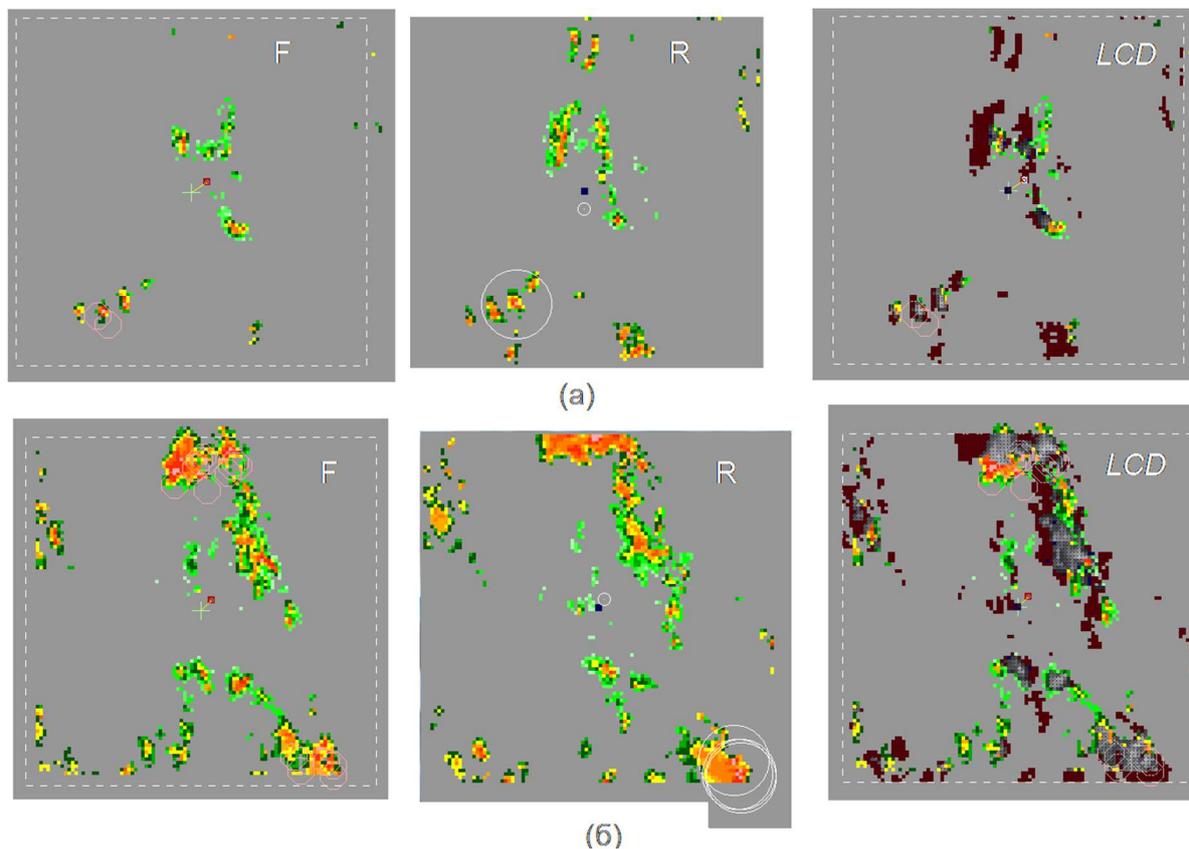


Рис. 2. Сверхкраткосрочный прогноз поля осадков и «дисплей жизненного цикла» (LCD), адаптированный для оценки прогноза с использованием реального изображения

Сопоставление прогнозной области опасных явлений F и реального R полей за 14:00, показывает, что на данный срок положение доминирующих штормов было предсказано относительно неплохо. Этот «удовлетворительный» результат получен вопреки тому, что жизненный цикл индивидуальных штормов составляет не более 1,5 часов. Дело в том, что ансамбли локальных штормов, имеющие масштабы ≈ 100 км, обычно доминируют 3–4 часа

[5, 8, 11, 12, 14], поэтому вполне оправданно предсказание того, что новый мощный шторм появится рядом с предыдущим. С другой стороны, анализируя реальное изображение R за 14:00, можно заметить новый ансамбль штормов в 150–200 км к северу от радара. Очевидно, что простой экстраполяцией появление этих штормов предсказать нельзя. Однако, именно этот северный ансамбль и второй, входящий в зону обзора радара с юга, будет доминировать на протяжении следующих 4 часов, сопровождаясь опасными явлениями (рис. 2б).

2.2. Дисплей жизненного цикла

Оценка качества прогноза мезомасштабных осадков – это одна из наиболее сложных методических проблем [14, 23] обусловленных тем, что осадки должны рассматриваться одновременно и как непрерывный процесс, и как локальное явление. Как показано в [15], оценку качества экстраполяционного прогноза удобнее проводить с помощью дисплея жизненного цикла (Life-Cycle Display, LCD) – особого композиционного изображения, имеющего три информативных слоя. Первый слой – это поле осадков прогностического изображения F . На слой F накладывается второй слой, который является производной от реально наблюдаемого поля R . Наложение происходит таким образом, что зоны осадков отсутствующие в прогнозируемом поле F , но присутствующие в поле R маркируются определенным цветом, например темно-красным как на рисунке 2. Третий слой – это области осадков, присутствующие в обоих слоях (выделены шкалой серости).

Детальное описание использования LCD в прогнозе выходит за рамки данной работы, поэтому мы отметим только главные моменты созданной композиции с точки зрения верификации прогноза, «цветные» пиксели LCD – это площади с переоценкой осадков, т.е. там, где дожди прогнозировались, но в срок прогноза осадков нет; темно-красные пиксели – это площади с недооценкой осадков, т.е. там, где дожди идут, но не прогнозировались, и, наконец, серые – это области удачного прогноза. Эти площади (число пикселей) получаются автоматически и соответствуют элементам матрицы верификации прогноза осадков, представленной в таблице.

Таблица

Матрица верификации прогноза осадков и ее соответствие дисплею жизненного цикла

	Осадки наблюдались	Осадки не наблюдались
Осадки прогнозировались (Hit+ False alarm)	Осуществившийся прогноз осадков равен числу серых пикселей (Hit)	Число неоправдавшихся прогнозов явления равно числу цветных пикселей (False alarm)
Осадки не прогнозировались (Miss+Null)	Число не оправдавшихся прогнозов отсутствия осадков равно числу темно-красных пикселей (Miss)	Число мест, где осадков не было и они не прогнозировались, равно числу черных пикселей (Null)

Применяя таблицу и вычисляя число пикселей того или иного цвета LCD, можно рассчитать три следующие традиционные меры качества прогноза.

- 1) *Отношение ложной тревоги (false of alarm ratio, FAR)* – это отношение числа не оправдавшихся прогнозов ко всей сумме прогнозов явлений. Сумма прогнозов – это

число пикселей, в которых прогнозировались осадки, т.е. осадки поля F ; на изображении LCD – это сумма серых и цветных пикселей. Неоправдавшиеся прогнозы явления – это случаи, когда осадки были спрогнозированы, однако в срок не наблюдались, т.е. цветные пиксели: $FAR = \frac{False\ alarm}{Hit + False\ alarm}$.

2) *Вероятность обнаружения (probability of detection, POD)* – это другая мера точности прогноза, учитывающая число успешно спрогнозированных (hit) пикселей ко всему числу пикселей с осадками, наблюдавшимися в срок, т.е. к полю R . На LCD мера POD будет выражаться как число серых пикселей (hit) по отношению к сумме серых (hit) и темно-красных (miss): $POD = \frac{Hit}{Hit + Miss}$.

3) *Критический индекс успешности (critical success index, CSI)* комбинирует FAR и POD в одну статистику: $CSI = \frac{Hit}{Hit + Miss + False\ alarm}$. CSI – это число «серых пикселей» к общему числу пикселей с наблюдаемыми и прогнозируемыми осадками на LCD.

Таким образом, LCD является простым и эффективным способом визуализации качества прогноза. Например, сравнивая LCD рис. 2, можно увидеть, что относительные площади успешного прогноза заметно выше в более позднюю стадию МКС.

Интерпретацию рис. 2, можно провести в прогностическом аспекте, представляя цвет пикселя на LCD как стадию жизни конвективных штормов. Поскольку на LCD, темно-красным цветом отмечены конвективные осадки, появившиеся в течение последнего времени, а серым – дождь переходный с ливневого на умеренный морозящий, то ориентируясь на взаимное положение этих областей, можно оценить направление развития новых зон глубокой конвекции, а также их диссипации. Например, развитие новых кучево-дождевых облаков невозможно в транслируемых областях, где недавно прошли осадки [24]. Отсюда следует, что экстраполяционная процедура может быть существенно скорректирована, и вместо трансляции всего поля можно переносить только зоны потенциального развития элементов МКС.

Заключение

В работе представлены элементы альтернативной системы оповещения об опасных явлениях погоды, основанной на обработке радиолокационных данных и состоящей из трех программных процедур: определения скорости трансляции, экстраполяционного прогноза и верифицирующего его качество дисплея жизненного цикла. Основные преимущества этой системы заключается в том, что:

- (i) простая полуавтоматическая процедура, использующая смещение консервативных фрагментов поля, дает устойчивые оценки трансляции для всей мезомасштабной системы;
- (ii) в свою очередь консервативность оценок трансляции позволяет экстраполировать текущее поле осадков на сроки до 1 часа и адекватно интерпретировать композиционные изображения дисплея жизненного цикла LCD;
- (iii) как в терминах оценок качества прогноза;
- (iv) так и отразить области развития и диссипации штормов, а так же зоны запрета на развитие новых очагов конвекции.

Заметим, что разрабатываемая система оповещения об опасных явлениях конструктивно совместима с разработанными ранее методами анализа МКС [26-32]. В том числе система может быть дополнена методом анализа данных доплеровского радара Meap

Wind Relative, когда компонента трансляции вычитается из поля радиальных скоростей [25-29], методом выделения стадий МКС по данным геостационарных спутников [30] и комбинирована анализом данных систем регистрации гроз [31] и другими способами.

Следует надеяться, что продолжение данных работ позволит найти: а) более надежные автоматические алгоритмы определения трансляции; б) на основе информации LCD построить новые функции принадлежности прогноза и в) создать простейшую систему ассимиляции радиолокационных данных в численную модель прогноза WRF-ARW, недавно освоенную в Лаборатории суперкомпьютерного моделирования ЮУрГУ [14, 32].

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках соглашения № 14.В37.21.0613.

Литература

1. Clifford, M. Nowcasting: The Promise of New Technologies of Communication, Modeling, and Observation / M. Clifford // Bulletin of the American Meteorological Society. — 2012. — Vol. 93, No. 6. — P. 797–809.
2. Mueller, C. NCAR Autonowcast System / C. Mueller, T. Saxen, R. Roberts, et al. // Weather and Forecasting. — 2003. — Vol. 18, No. 4. — P. 545–561.
3. Lakshmanan, V. The Warning Decision Support System-Integrated Information / V. Lakshmanan, T. Smith, G. Stumpf, et al. // Weather and Forecasting. — 2007. — Vol. 22. — P. 596–612.
4. Старостин, А.Н. Мезомасштабная структура полей радиоэха конвективных облаков в Молдавии / А.Н. Старостин, Е.М. Лившиц, В.С. Швецов // Метеорология и гидрология. — 1983. — № 10. — С. 55–59.
5. Abdoulaev, S. Evolution and Hierarchy of Cumulonimbus Ensembles / S. Abdoulaev // Brazilian Journal of Meteorology. — 1995. — Vol. 10. — P. 1–9.
6. Corfidi, S.F. Predicting of Movement of Mesoscale Convective Complexes / S.F. Corfidi, J.H. Merrit, J.M. Fritsch // Weather and Forecasting. — 1996. — Vol. 11. — P. 42–46.
7. Абдуллаев, С.М. Эволюционная классификация мезомасштабных линий шквала / С.М. Абдуллаев, О.Ю. Ленская // Метеорология и гидрология. — 1998. — № 3. — С. 24–32.
8. Abdoulaev, S. Mesoscale Precipitation Systems in Rio Grande do Sul. Part 3: Structure and Evolution of Non-Line Mesoconvective Systems / S. Abdoulaev, A. Starostin, O. Lenskaia // Brazilian Journal of Meteorology. — 2001. — Vol. 16, No. 2. — P. 87–102.
9. Corfidi, S.F. Cold Pools and MCS Propagation: Forecasting of Motion of Downwind – Developing MCSs / S.F. Cordifi // Weather and Forecasting. — 2003. — Vol. 18. — P. 992–1016.
10. Ленская, О.Ю. Методические вопросы использования спутниковой и радиолокационной информации в мезомасштабном прогнозе (на примере опасных явлений погоды в Москве 24 июля 2001 г.) / О.Ю. Ленская // Вестник Челябинского государственного университета. — 2007. — №6(84). Вып. 2. — С. 66–80.
11. Абдуллаев, С.М. Жизненный цикл мезомасштабных конвективных систем / С.М. Абдуллаев, А.А. Желнин, О.Ю. Ленская // Метеорология и гидрология. — 2009. — № 5. — С. 34–45.

12. Абдуллаев, С.М. Жизненный цикл мезомасштабных конвективных систем: концепция, климатология и прогноз: дис. ... докт. геогр. наук : 25.00.30 / С.М. Абдуллаев. — М.: Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации, 2010. — 407 с.
13. Плюснин, С.Д. Прогноз эволюции конвективных штормов на основе анализа их радиозахв и годографа ветра в тропосфере в подвижной системе координат / С.Д. Плюснин, Е.И. Потапов, И.А. Гараба и др. // Метеорология и гидрология. — 2013. — № 7. — С. 43–52.
14. Lenskaya, O.Yu. Organization and Evolution of Mesoscale Convective Systems Using Radar Data: Objective Description. The «Dominating Thunderstorm» Conception and its Application to MCS Climatology / O.Yu. Lenskaya, S.M. Abdullaev, A.A. Zhelnin // Prepr. of 15th Conf. on Mesoscale Proc. (Portland, Oregon, 2013). URL: <https://ams.confex.com/ams/15MESO/webprogram/Paper227607.html> (дата обращения: 15.10.2013).
15. Abdullaev, S.M. A Diagnostic and Forecasting Techniques Based on Radar Derived Translation and Propagation of Convective Systems / S.M. Abdullaev, O.Yu. Lenskaia // Prepr. of 36th Conf. on Radar Meteorology: Amer. Meteor. Soc. (Breckenridge, CO, 2013). URL: <https://ams.confex.com/ams/36Radar/webprogram/Paper228139.html>.
16. Abdullaev, S.M. The Structure of Mesoscale Convective Systems in Central Russia / S.M. Abdullaev, O.Y. Lenskaya, A.A. Zhelnin // Russian Meteorology and Hydrology. — 2012. — Vol. 37. No. 1. — P. 12–20.
17. Han, L. 3D Convective Storm Identification, Tracking and Forecasting – An Enhanced TITAN Algorithm / L. Han, S. Fu, L. et al. // Oceanic Technol. — 2009. — Vol. 26. — P. 719–732.
18. Lakshmanan, V. An Objective Method of Evaluating and Sevising Storm-Tracking Algorithms / V. Lakshmanan, T. Smith // Weather and Forecasting. — 2010. — Vol. 25. — P. 701–709.
19. Республиканский гидрометеоцентр. URL: http://pogoda.by/thumbnails/?map=radar_map (дата обращения: 15.10.2013).
20. MacQueen, J. Some Methods for Classification and Analysis of Multivariate Observations. / J. MacQueen // Proc. Fifth Berkeley Sympos. Math. Statist. and Probability (Berkeley, Calif., 1965/66). — Univ. California Press, Berkeley, Calif., 1967. — Vol. I: Statistics. — P. 281–297.
21. Kaufman, L. Clustering by Means of Medoids. In Statistical Data Analysis Based on the L1-Norm and Related Methods. / L. Kaufman, P.J. Rousseeuw, edited by Y. Dodge. — 1987. — P. 405–416.
22. Гаязова, А.О. Прогнозирование численности *Microcystis Aeruginosa* на основе правил нечеткой логики и нечетких нейронных сетей / А.О. Гаязова, С.М. Абдуллаев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. — 2012. — Т. 47. — С. 5–11.
23. Lakshmanan, V. A Gaussian Mixture Model Approach to Forecast Verification / V. Lakshmanan, J.S. Kain // Weather and Forecasting. — 2010. — Vol. 25, No. 3. — P. 908–920.

24. Starostin, A. Forecast of Storm Dissipation / A. Starostin, S. Abdoulaev // Prepr. of 7th Conf. on Mesoscale Proc. (United Kingdom, 9–13 September). — UK: Reading UK, 1996. — P. 399–400.
25. Abdoulaev, S. Mean Wind Relative Motions and Typical Evolution of Mesoscale Convective Systems Having Complex Organization / S. Abdoulaev, O. Lenskaia, A. Zhelnin, // Prepr. of 8th Conf. on Mesoscale Proc. (Boulder, Colorado, 1999). — P. 115–116.
26. Abdoulaev, S. Structure of Motions in Linear Mesoscale Convective Systems Accompanied by Stratiform Region / S. Abdoulaev, O. Lenskaia // Prepr. 8th Conf. on Mesoscale Proc. (Boulder, Colorado, 1999). — P. 113–114.
27. Abdoulaev, S. Relative Motions in Squall Lines Accompanied by Stratiform Region / S. Abdoulaev, O. Lenskaia, V.S. Marques, et al. // Brazilian Journal of Meteorology. — 2000. — Vol. 15, No. 2. — P. 87–102.
28. Abdoulaev, S. Doppler Radar Study of Quasi-Stationary Mesoscale Frontal Systems. Part 1: Periodical structures / S. Abdoulaev, O. Lenskaia, V.S. Marques, et al. // Brazilian Journal of Meteorology. — 2002. — Vol. 17, No. 1. — P. 53–68.
29. Abdoulaev, S. Doppler Radar Study of Quasi-Stationary Mesoscale Frontal Systems. Part 2: Transversal movements / S. Abdoulaev, O. Lenskaia, V.S. Marques, et al. // Brazilian Journal of Meteorology. — 2002. — Vol. 17, No. 1. — P. 69–82.
30. Lenskaia, O. Mesoscale Precipitation Systems in Rio Grande do Sul. Part 2: Synoptic and Satellite Overview / O. Lenskaia, J. Marques, S. Abdoulaev // Prepr. of 28th Conference on Radar Meteorology (Austin, USA, 7–12 September 1997). — P. 489–490, 592–593.
31. Abdoulaev, S. Analysis of Mesoscale System Using Cloud-to-ground Flash Data / S. Abdoulaev, V.S. Marques, M.A. Pinheiro, et al. // Brazilian Journal of Geophysics. — 2001. — Vol. 19, No. 1. — P. 75–95.
32. Ленская, О.Ю. Численное моделирование характеристик пограничного слоя атмосферы крупного промышленного города (на примере г. Челябинска) / О.Ю. Ленская, С.М. Абдуллаев, А.И. Приказчиков и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Вычислительная математика и информатика». — 2013. — Том 2. — № 2. — С. 65–82.

Абдуллаев Санжар Муталович, доктор географических наук, профессор кафедры вычислительной математики, Южно-Уральский государственный университет (Челябинск, Российская Федерация), sanjar@mail.ru

Ленская Ольга Юрьевна, кандидат географических наук, доцент, доцент кафедры вычислительной математики, Южно-Уральский государственный университет (Челябинск, Российская Федерация), lenskaia_olga@mail.ru

Гаязова Анна Олеговна, магистр экологии, аспирант кафедры вычислительной математики, Южно-Уральский государственный университет (Челябинск, Российская Федерация), why.ann@mail.ru

Соболев Дмитрий Николаевич, магистр вычислительной математики и информатики, кафедра вычислительной математики, Южно-Уральский государственный университет (Челябинск, Российская Федерация), propp.ds@gmail.com

Носков Артем Анатольевич, бакалавр информационных технологий, кафедра вычислительной математики, Южно-Уральский государственный университет (Челябинск, Российская Федерация), artem.noskov@gmail.com

Иванова Ольга Николаевна, кандидат педагогических наук, доцент кафедры системного программирования, Южно-Уральский государственный университет (Челябинск, Российская Федерация), ivanovaon@list.ru

Радченко Глеб Игоревич, кандидат физико-математических наук, и.о. декана факультета вычислительной математики и информатики, Южно-Уральский государственный университет (Челябинск, Российская Федерация), gleb.radchenko@gmail.com

Поступила в редакцию 15 октября 2013 г.

*Bulletin of the South Ural State University
Series "Computational Mathematics and Software Engineering"
2014, vol. 3, no. 1, pp. 17–32*

SHORT-RANGE FORECASTING ALGORITHMS USING RADAR DATA: TRANSLATION ESTIMATE AND LIFE-CYCLE COMPOSITE DISPLAY

S.M. Abdoulaev, South Ural State University (Chelyabinsk, Russian Federation)

O.U. Lenskaia, South Ural State University (Chelyabinsk, Russian Federation)

A.O. Gayazova, South Ural State University (Chelyabinsk, Russian Federation)

O.N. Ivanova, South Ural State University (Chelyabinsk, Russian Federation)

A.A. Noskov, South Ural State University (Chelyabinsk, Russian Federation)

D.N. Sobolev, South Ural State University (Chelyabinsk, Russian Federation)

G.I. Radchenko, South Ural State University (Chelyabinsk, Russian Federation)

The mesoscale convective system (MCS) cinematic and evolution routinely derived from real-time radar reflectivity Z data are used to develop 3 step short-range forecasting technique. The first forecasting step is estimation of MCS translation velocity. It is proposed that translation can be estimated by robust interactive procedure, identifying and tracking of “conservative meso- β fragments”, or by automatic clustering algorithms. The second step is nowcasting when entire Z field is extrapolated by translation to forecast time $\sim 0,5-1$ hours. The third step is forecast verification and MCS diagnostic when prognostic and real-time images of Z are coupled to one composite image, denominated as life-cycle display (LCD). The construction of LCD is adapted to use both in forecast verification in terms of FAR, POD and CSI and to display 3 type conventionally outlined MCS areas where: 1) ongoing convection occur; 2) dissipating convection/stratiform transformation and 3) precipitation was recently ceased. As poor extrapolation forecasts associated, mainly, with growth and decay of storms in the forecast period, life-cycle composite images provide valuable information about of developing, dissipating areas and areas prohibited to new convective development.

Keywords: mesoscale convective system, radar precipitation, motion algorithm, severe weather nowcasting, forecast verification, life-cycle display

References

1. Clifford M. Nowcasting: The Promise of New Technologies of Communication, Modeling, and Observation // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2012. Vol. 93, No. 6. P. 797–809.
2. Mueller C., Saxen T., Roberts R., Wilson J., Betancourt T., Dettling S., Quin N., Yee J. NCAR Autowcast System // *Weather and Forecasting*. 2003. Vol. 18, No. 4. P. 545–561.
3. Lakshmanan V., Smith T., Stumpf G., Hondl K. The Warning Decision Support System-Integrated Information // *Weather and Forecasting*. 2007. Vol. 22. P. 596–612.
4. Starostin A.N., Livshic E.M., Shvecov V.S. Mezomasshtabnaja struktura polej radiojeha konvektivnyh oblakov v Moldavii [Mesoscale Structure of the Fields of Radioecho of Convective Clouds in Moldova]. *Meteorologija i gidrologija [Meteorology and Hydrology]*. 1983. No. 10. P. 55–59.
5. Abdoulaev S. Evolution and Hierarchy of Cumulonimbus Ensembles // *Brazilian Journal of Meteorology*. 1995. Vol. 10. P. 1–9.
6. Corfidi S.F., Merrit J.H., Fritsch J.M. Predicting of Movement of Mesoscale Convective Complexes // *Weather and Forecasting*. 1996. Vol. 11. P. 42–46.
7. Abdullaev S.M., Lenskaja O.Yu. Jevoljucionnaja klassifikacija mezomasshtabnyh linij shkvala [Evolutionary Classification of Mesoscale Squall Lines]. *Meteorologija i gidrologija [Meteorology and Hydrology]*. 1998. No. 3. P. 24–32.
8. Abdoulaev S., Starostin A., Lenskaia O. Mesoscale Precipitation Systems in Rio Grande do Sul. Part 3: Structure and evolution of non-line mesoconvective systems // *Brazilian Journal of Meteorology*. 2001. Vol. 16, No. 2. P. 87–102.
9. Corfidi S.F. Cold Pools and MCS Propagation: Forecasting of Motion of Downwind – Developing MCSs // *Weather and Forecasting*. 2003. Vol. 18. P. 992–1016.
10. Lenskaja O.Yu. Ispol'zovanie doplerovskogo radara i dannyh nazemnyh nabljudenij dlja izuchenija i prognoza shkvalov [The Use of Doppler Radar and Surface Observations for Studying and Forecasting the Squalls]. *Vestnik Chelyabinskogo gosudarstvennogo universiteta [Bulletin of Chelyabinsk State University]*. 2005. No. 1(1). Vol. 1. P. 131–143.
11. Lenskaja O.Yu. Metodicheskie voprosy ispol'zovanija sputnikovoj i radiolokacionnoj informacii v mezomasshtabnom prognoze (na primere opasnyh javlenij pogody v Moskve 24 ijulja 2001 g.) [Methodological Issues of the Use of Satellite and Radar Data in Mesoscale Forecast (by the Example of Severe Weather Events in Moscow on July 24, 2001)]. *Vestnik Chelyabinskogo gosudarstvennogo universiteta [Bulletin of Chelyabinsk State University]*. 2007. No. 6(84). Vol. 2. P. 66–80.
12. Abdullaev S.M., Zhelnin A.A., Lenskaja O.Yu. Zhiznennyj cikl mezomasshtabnyh konvektivnyh system [The Life Cycle of Mesoscale Convective Systems]. *Meteorologija i gidrologija [Meteorology and Hydrology]*. 2009. No. 5. P. 34–45.
13. Abdullaev S.M. Zhiznennyj cikl mezomasshtabnyh konvektivnyh sistem: koncepcija, klimatologija i prognoz [The Life Cycle of Mesoscale Convective Systems: Concept, Climatology and Forecast]. Moscow, 2010. 407 P.
14. Pljusnin S.D., Potapov E.I., Garaba I.A., Popova V.P. Prognoz jevoljucii konvektivnyh shtormov na osnove analiza ih radiojeha i godografa vetra v troposfere v podvizhnoj sisteme koordinat [Forecast Evolution of Convective Storms on the Basis of their Radio Echo

- and Hodograph of the Wind in the Troposphere in the Moving Coordinate System]. *Meteorologija i gidrologija* [Meteorology and Hydrology]. 2013. No. 7. P. 43–52.
15. Lenskaya O.Yu., Abdullaev S.M., Zhelnin A.A. Organization and Evolution of Mesoscale Convective Systems Using Radar Data: Objective Description. The «Dominating Thunderstorm» Conception and its Application to MCS Climatology // Prepr. of 15th Conf. on Mesoscale Proc. (Portland, Oregon, 2013). URL: <https://ams.confex.com/ams/15MESO/webprogram/Paper227607.html> (accessed: 15.10.2013).
 16. Abdullaev S.M., Lenskaia O.Yu. A Diagnostic and Forecasting Techniques Based on Radar Derived Translation and Propagation of Convective Systems // Prepr. of 36th Conf. on Radar Meteorology: Amer. Meteor. Soc. (Breckenridge, CO, 2013). URL: <https://ams.confex.com/ams/36Radar/webprogram/Paper228139.html> (accessed: 15.10.2013).
 17. Abdullaev S.M., Lenskaya O.Y., Zhelnin A.A. Struktura mezomasshtabnyh konvektivnyh sistem v central'noj Rossii [Structure of Mesoscale Convective Systems in Central Russia]. *Meteorologija i gidrologija* [Meteorology and Hydrology]. 2012. No. 1. P. 20–32.
 18. Han L., Fu S., Zhao L., Zheng Y., Wang H., Lin Y. 3D Convective Storm Identification, Tracking and Forecasting – An Enhanced TITAN Algorithm // *Oceanic Technol.* 2009. Vol. 26. P. 719–732.
 19. Lakshmanan V., Smith T. An Objective Method of Evaluating and Devising Storm-tracking Algorithms // *Weather and Forecasting.* 2010. Vol. 25. P. 701–709.
 20. Respublikanskij gidrometeocentr [Republican Hydrometeorological Center]. URL: http://pogoda.by/thumbnails/?map=radar_map (accessed: 15.10.2013).
 21. MacQueen J. Some methods for classification and analysis of multivariate observations. In: Proc. / Fifth Berkeley Sympos. Math. Statist. and Probability (Berkeley, Calif., 1965/66). Univ. California Press, Berkeley, Calif., 1967. Vol. I: Statistics. P. 281–297.
 22. Kaufman L., Rousseeuw P.J. Clustering by Means of Medoids. In *Statistical Data Analysis Based on the L1-Norm and Related Methods.* 1987. P. 405–416.
 23. Gajazova A.O., Abdullaev S.M. Prognozirovanie chislennosti *Microcystis Aeruginosa* na osnove pravil nechetkoj logiki i nechetkih nejronnyh setej [Forecasting of *Microcystis Species Aeruginosa* Rule-Based Fuzzy Logic and Fuzzy Neural Networks]. *Vestnik Yuzho-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya "Matematicheskoe modelirovanie i programmirovanie"* [Bulletin of South Ural State University. Series: Mathematical Modeling, Programming & Computer Software]. 2012. T. 47. P. 5–11.
 24. Lakshmanan V., Kain J.S. A Gaussian Mixture Model Approach to Forecast Verification // *Weather and Forecasting.* 2010. Vol. 25, No. 3. P. 908–920.
 25. Starostin A., Abdoulaev S. Forecast of Storm Dissipation // Prepr. of 7th Conf. on Mesoscale Proc. (United Kingdom, 9-13 September). UK: Reading UK, 1996. P. 399–400.
 26. Abdoulaev S., Lenskaia O., Zhelnin A. Mean Wind Relative Motions and Typical Evolution of Mesoscale Convective Systems Having Complex Organization // Prepr. of 8th Conf. on Mesoscale Proc. (Boulder, Colorado, 1999). P. 115–116.
 27. Abdoulaev S., Lenskaia O. Structure of Motions in Linear Mesoscale Convective Systems Accompanied by Stratiform Region // Prepr. 8th Conf. on Mesoscale Proc. (Boulder, Colorado, 1999). P. 113–114.

28. Abdoulaev S., Lenskaia O., Marques V.S., Pinheiro F.M.A. Relative Motions in Squall Lines Accompanied by Stratiform Region // Brazilian Journal of Meteorology. 2000. Vol. 15, No. 2. P. 87–102.
29. Abdoulaev S., Lenskaia O., Marques V.S., Pinheiro F.M.A. Doppler Radar Study of Quasi-Stationary Mesoscale Frontal Systems. Part 1: Periodical Structures // Brazilian Journal of Meteorology. 2002. Vol. 17, No. 1. P. 53–68.
30. Abdoulaev S., Lenskaia O., Marques V.S., Pinheiro F.M.A. Doppler Radar Study of Quasi-Stationary Mesoscale Frontal Systems. Part 2: Transversal Movements // Brazilian Journal of Meteorology. 2002. Vol. 17, No. 1. P. 69–82.
31. Lenskaia O., Marques J., Abdoulaev S. Mesoscale Precipitation Systems in Rio Grande do Sul. Part 2: Synoptic and Satellite Overview // Prepr. of 28th Conference on Radar Meteorology (Austin, USA, 7-12 September 1997). P. 489-490, 592–593.
32. Abdoulaev S., Marques V.S., Pinheiro M.A., Martinez E.F., Lenskaia O. Analysis of Mesoscale System Using Cloud-to-Ground Flash Data // Brazilian Journal of Geophysics. 2001. Vol. 19, No. 1. P. 75–95.
33. Lenskaja O.Yu. Chislennoe modelirovanie harakteristik pogranichnogo sloja atmosfery krupnogo promyshlennogo goroda (na primere g. Cheljabinska) [Numerical Modeling of the Characteristics of the Atmospheric Boundary Layer of a Large Industrial City (on the Example of Chelyabinsk)]. Vestnik Yuzho-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Matematicheskoe modelirovanie i programmirovaniye» [Bulletin of South Ural State University. Series: Mathematical Modeling, Programming & Computer Software]. 2013. T. 2. No. 2. P. 65–82.

Received 15 October 2013