



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра метеорологических прогнозов

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(магистерская диссертация)

На тему: «Наукастинг опасных явлений погоды на основе
радиолокационного зондирования»

Исполнитель Тюриков Иван Алексеевич
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат физико-математических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

Анискина Ольга Георгиевна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой

кандидат физико-математических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

Анискина Ольга Георгиевна
(фамилия, имя, отчество)

« 27 » мая 2025 г.

Санкт-Петербург
2025

Содержание

Введение	3
1. Конвективные процессы в атмосфере и связанные с ними опасные явления погоды	7
2. Методы измерений для анализа конвективных процессов	11
2.1 Метеорологические радиолокационные станции	11
2.2 Спутниковая информация	13
2.3 Грозопеленгационные наблюдения	14
2.4 Наземные автоматические станции	15
3. Методы наукастинга	18
3.1 Адвективный метод	19
3.2 Объектные методы	22
3.3 Введение понятия состояния атмосферы	24
3.4 Системы предупреждения об опасных явлениях погоды	27
3.5 Наукастинг в России	29
4. Реализация наукастинга опасных явлений погоды	33
4.1 Реализация объектного метода наукастинга	33
4.2 Реализация адвективного метода наукастинга	45
4.3 Введение концептуальной модели	47
4.4 Объединение разработанных методик	56
5 Тестирование расчетной системы сверхкраткосрочного прогнозирования	59
5.1 Источники данных	59
5.2 Тестирование разработанной системы наукастинга	61
5.2.1 Случай прохождения холодного фронта	61
5.2.2 Ситуация с внутримассовой конвекцией	64
5.3 Верификация	66
Заключение	75
Список использованных источников	77

Введение

В последние годы наблюдается рост частоты и интенсивности метеорологических опасных явлений погоды (ОЯП). Среди таких явлений сильные ливни, грозы, сильный шквалистый ветер, выпадение града и внезапные и быстроразвивающиеся наводнения. Каждое из этих явлений может стать причиной экономических потерь, нарушение функционирования транспорта, разрушения инфраструктуры и, конечно, представляют угрозу для жизни и здоровья людей. Отдельной сложностью прогнозирования ОЯП становится то, насколько быстроразвивающимися являются данные явления. Данные явления по большей части сопровождают протекание конвективных процессов

В связи с этим большую роль в задачах предупреждения об опасных явлениях погоды играет сверхкраткосрочный прогноз (наукастинг). Такой прогноз охватывает временные интервалы от 0 до 2 часов. В этом временном интервале численные методы прогнозирования не могут давать достаточно достоверную информацию из-за большой чувствительности к начальным данным и эффекта spin-up. Техники наукастинга в свою очередь зачастую полагаются не на решение уравнений гидротермодинамики атмосферы, а на экстраполяции текущих данных наблюдения в соответствии с их последними трендами.

Современные дистанционные методы наблюдения за состоянием атмосферы позволяют извлекать информацию в высоком пространственном и временном разрешении. В частности, наиболее применимыми для целей наукастинга принято называть радиолокационные наблюдения, где период обзора может лежать в пределах 4-15 минут, а пространственное разрешение может достигать до сотен метров.

Таким образом, радиолокационные наблюдения могут предоставлять возможность практически в реальном времени и очень высоком разрешении отслеживать протекание конвективных процессов в атмосфере.

Методы сверхкраткосрочного прогноза на основе радиолокационных наблюдений к настоящему моменту прошли длинный путь от экстраполяции поля радиозахвата по единственному вектору, который мог вводиться оператором, до схем, комбинирующих данные о фактическом передвижении облачных структур с данными численных прогнозов погоды и моделирующих эволюцию облаков. Однако актуальными остаются исследования методов повышения точности прогнозов конвективных процессов и сопутствующих им опасных явлений погоды. Такие методы могут включать комбинацию уже существующих подходов, а также использовать дополнительные компоненты.

Целью данной работы является разработка и последующая оценка сверхкраткосрочного прогноза на основе радиолокационных данных. Для достижения этой цели сформулированы следующие задачи:

- проанализировать существующие методы радиолокационного наукастинга,
- составить архив композитных (стыкованных) радиолокационных карт для исследуемой территории,
- создать архив результатов численного моделирования атмосферы,
- создать расчетный комплекс радиолокационного наукастинга на языке программирования Fortran,
- провести верификацию созданного алгоритма прогноза для оценки эффективности проделанной работы на выбранных тестовых данных.

В качестве исследуемой области выбрана территория Республики Беларусь (РБ). Сезон гроз в республике начинается с конца апреля или

начала мая и продолжается до октября. В течении этого времени в регионе наблюдается большая конвективная активность.

Отдельно стоит упомянуть развернутую на территории РБ национальную наблюдательную радиолокационную сеть, стабильно предоставляющую пользователям информацию. Данная сеть непрерывно покрывает практически всю территорию страны.

Выпускная квалификационная работа (магистерская диссертация) состоит из введения, пяти глав и заключения.

В данной работе рассматриваются реализация наукастинга на основе данных радиолокационного зондирования. Важной особенностью разработанной системы является попытка учета эволюционной составляющей конвективных облаков.

В первой части будут рассмотрены основные конвективные процессы в атмосфере, причины их возникновения и основные характеристики протекания. Помимо этого, будут рассмотрены наиболее часто встречающиеся конвективные опасные явления, сопровождающие конвекцию. Во второй части рассматриваются методы и средства наблюдения, которые могут использоваться при анализе конвективной облачности и опасных явлениях погоды. В третьей части рассматриваются методы сверхкраткосрочного прогноза погоды, основанные на радиолокационных данных. Акцент сделан на двух принципиально отличающихся методах наукастинга: адвективном и объектном. Далее, в четвертой части рассматривается создание расчетной системы радиолокационного наукастинга, основанного на совмещении подхода переноса по полю адвекции и выделению объектов в поле радиолокационной отражаемости. Введена концептуальная модель жизненного цикла конвективной ячейки и учтен фон неустойчивости атмосферы для корректировки значений радиолокационной отражаемости. В пятой части описаны тестовые случаи, отобранные для первичного

рассмотрения результатов разработанной системы, а также верификация полученных прогнозов.

Список использованных источников содержит 47 наименований.

1. Конвективные процессы в атмосфере и связанные с ними опасные явления погоды

Атмосферная конвекция — это вертикальное движение воздуха, играющее ключевую роль в формировании состояния атмосферы в тёплое время года. Конвекция обеспечивает перенос тепла, влаги и кинетической энергии, а также может приводить к формированию конвективных облаков, включая кучевые, мощные кучевые и кучево-дождевые. Последние особенно опасны, так как сопровождаются экстремальными погодными явлениями: сильными ливнями, градом, грозами, шквалами и смерчами. Эти явления способны причинять серьезный ущерб хозяйству и представляют угрозу для жизни.

Конвективные движения в атмосфере делятся на два типа: термические (свободные) и вынужденные.

Термическая конвекция возникает при локальном нагреве поверхности и неустойчивости атмосферы, когда тёплый воздух поднимается и его температура опускается медленнее, чем в окружающем пространстве.

Вынужденная конвекция связана с динамическими процессами, такими как фронты или орографические препятствия. Воздух в этих случаях поднимается вверх за счет упорядоченных вертикальных движений или за счет натекания на возвышенность. На фронтах конвекция иногда маскируется слоистыми облаками, но обнаруживается с помощью спутниковых данных [1].

Большая часть опасных явлений погоды, связанных с конвективными процессами, протекает в системах глубокой конвекции. Системы глубокой конвекции, как правило, развиваются в слоях большой вертикальной протяженности и могут занимать всю тропосферу.

Кучево-дождевые облака подразделяются на 3 типа: одноячейковые, мультячейковые и суперячейковые.

Одноячейковые облака могут формироваться в малоградиентном барическом поле и при слабом приземном ветре. Одноячейковое облако состоит из одной конвективной ячейки. Ее размер обычно не превышает 20 км в диаметре. Время жизни такого облака составляет приблизительно 40 минут.

Мультячейковые облака состоят из нескольких ячеек, находящихся на разных стадиях развития (рисунок 1.1). Причиной их образования является крупномасштабная конвергенция в зоне ложбин и атмосферных фронтов (преимущественно на основных и вторичных холодных фронтах).

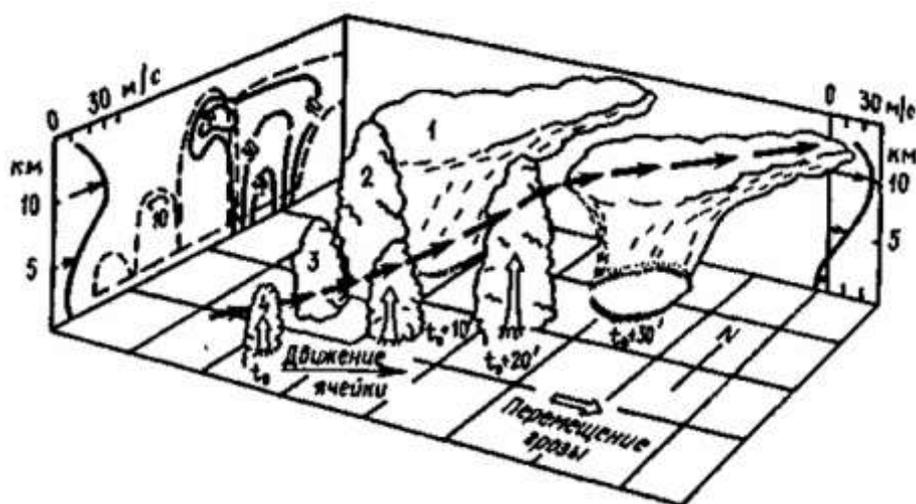


Рисунок 1.1 – Схематическое изображение многоячейкового кучево-дождевого облака [2]

Суперячейковые облака являются наиболее мощными и долгоживущими. Они развиваются при сильной неустойчивости атмосферы и больших сдвигах ветра. Они состоят из одной квазистационарной ячейки, диаметр которой может превышать 40 км.

В реализации прогноза конвективных облаков и связанных с ними явлений активно применяются предикторы, получаемые из данных

аэрологического зондирования и численного моделирования атмосферы/численного прогноза погоды (ЧПП).

В качестве примеров таких предикторов можно привести:

- Лапласиан приземного давления. Характеризует направление и интенсивность упорядоченных вертикальных движений в пограничном слое атмосферы. Может быть получен по данным численного моделирования или сети наземных метеорологических станций.

- Максимальная конвективная скорость. Может быть получена по данным ЧПП или радиолокационного зондирования [4].

- Стратификация атмосферы. Как предиктор рассматривают наклон кривой стратификации (вертикальный градиент температуры), сумму отклонений кривой состояния от кривой стратификации на нескольких уровнях или среднее значение этих отклонений, значения отклонения кривой состояния от кривой стратификации на различных уровнях [5].

- Вертикальная протяженность конвективного облака. Этот параметр характеризует мощность конвективного облака и особенно продуктивен в сочетании с водностью облака [6].

- Сходимость приземных потоков. Конвергенция ветра в приземном слое является хорошим предиктором вынужденной конвекции. Очень часто по протяженным линиям сходимости образуются гряды конвективных облаков.

Конвективные процессы зачастую сопровождаются большим количеством явлений, классифицируемых, как опасные для деятельности человека и отдельных сфер хозяйства. Кратковременные, но интенсивные ливневые осадки, возникающие в кучеводождевых облаках, могут стать причиной быстроразвивающихся наводнений или размывов почвы.

Возникновение шквалов также связано с конвективными процессами в облаках. Когда конвективное облако достигает стадии зрелости, восходящие потоки внутри него ослабевают. Тогда масса осадков, ранее

поддерживаемая этими потоками, устремляется вниз, создавая сильный нисходящий поток. Разбиваясь об землю, данный поток растекается по поверхности. При сложении скорости растекания со скоростью ветра в приземном слое образуется краткосрочный порыв ветра. Его скорость может достигать 20-25 м/с. При этом отмечается одновременно скорость возникновения и время протекания данного явления.

Среди мер защиты, которые могут быть предприняты человеком, в первую очередь является метеорологический мониторинг. Он позволяет своевременно предупреждать население при вероятности формирования того или иного (ОЯП), а также отслеживать его перемещение для корректировки предупреждений. Искусственные воздействия на градовые облака осуществляются с целью снижения потерь, например, в сельском хозяйстве при угрозе потери урожая от серьезных градобитий. В области активных воздействия на конвективные облака задача сверхкраткосрочного прогноза также стоит очень актуально. Такой прогноз может помогать службам градобития в принятии решения о необходимости воздействия.

Задача предупреждения об опасных явлениях погоды крайне актуальна для человека. Несмотря на локальный характер конвективных явлений, они представляют большую угрозу для жизни и хозяйственной деятельности. Далее будут рассмотрены основные методы наблюдения за конвективными явлениями.

2. Методы измерений для анализа конвективных процессов

С учетом современного развития измерительной техники, наибольшее внимание для получения гидрометеорологической информации о мезомасштабных конвективных процессах уделяется тем средствам измерений, которые способны получать данные о распределении параметров в большой области с наилучшим разрешением за наименьшее время.

В числе таких средств в первую очередь рассматриваются радиолокационные станции и искусственные спутники Земли.

2.1 Метеорологические радиолокационные станции

Современные метеорологические радары способны получать информацию об отражаемости облаков, радиальной скорости, а также поляризационных характеристиках сигнала с большой территории и высокой периодичностью.

В России радиолокатором, принятым на оснащение национальной метеорологической сетью, является ДМРЛ-С (рисунок 2.1) производства «Алмаз-Антей». Помимо России он активно экспортируется и применяется в странах ближнего зарубежья: Беларуси, Казахстана и др.

Данный радиолокатор имеет параболическую антенну, длину волны S диапазона с рабочими частотами около 5600 МГц. В стандартном режиме работы он способен каждые 10 минут получать информацию о радиолокационной отражаемости, радиальной скорости и ширине спектра и о данных, доступных в режиме двойной поляризации, таких как дифференциальная отражаемость, дифференциальная фаза, коэффициент кросскорреляции, удельный дифференциальный фазовый сдвиг.



Рисунок 2.1 – Метеорологический радиолокатор ДМРЛ-С, город Гродна, 2020 год.

Наиболее продуктивно в задачах анализа структуры и диагностики облачных систем применяется параметр радиолокационной отражаемости. Такие опасные явления погоды как грозы и град сопровождаются локализованными очагами радиолокационной отражаемости, что упрощает их идентификацию.

Основное преимущество радиолокационного метода заключается в возможности получения информации о внутренней структуре облаков. В отличие от других средств измерений радар способен получать достаточно детализированную информацию на всей протяженности тропосферы. После получения первичного отраженного сигнала с разрешением порядка 250 м. производится его обработка, во время которой происходит фильтрация постоянных отражателей (местников). Помимо этого, осуществляется трансформация данных измерений из угловых координат (азимут, угол места) в декартовы или географические.

2.2 Спутниковая информация

Информация радиометрического сканирования Земли – результат дистанционного зондирования, широко применяемый для получения метеорологической информации на больших территориях и с хорошим временным разрешением.

Низкоорбитальные спутники обладают преимуществом высокого пространственного разрешения, но их недостаток заключается в том, что временное покрытие данных представлено в виде полос, расположение которых не всегда приходится на место с быстроразвивающимися конвективными системами. Такие спутники менее полезны для задач сверхкраткосрочного прогнозирования, чем геостационарные спутники.

Геостационарные спутники обеспечивают непрерывное наблюдение с гораздо большей высоты над поверхностью Земли. Несмотря на то, что их разрешение ниже, они имеют ключевое преимущество: изображения всего полушария Земли, над которым спутник расположен, доступны каждые 10–15 минут, а для выбранных регионов возможна съёмка в режиме быстрого сканирования с интервалом менее двух минут.

Наиболее часто используются данные инфракрасного канала (IR) для оценки температуры верхней границы облачности, данные видимого диапазона (VIS) для анализа структуры облаков, а также канала водяного пара (WV) для оценки влагозапаса.

Для выделения на спутниковом изображении конвективной облачности используются отдельные предикторы, например:

- Превышение тропопаузы. На развитых конвективных облаках высота верхней границы может превышать уровень тропопаузы. Такой параметр может косвенно извлекаться из сравнения температуры канала IR10.8 с температурой тропопаузы, полученной с помощью численной модели погоды [10].

- Сигнатура Cold- (U/V образная или кольцеобразная). Суть сигнатуры состоит в определенном распределении температуры верхней границы штормов. Более холодные области характерны для периферии шторма, а более теплые области для его внутренней области (рисунок 2.2).

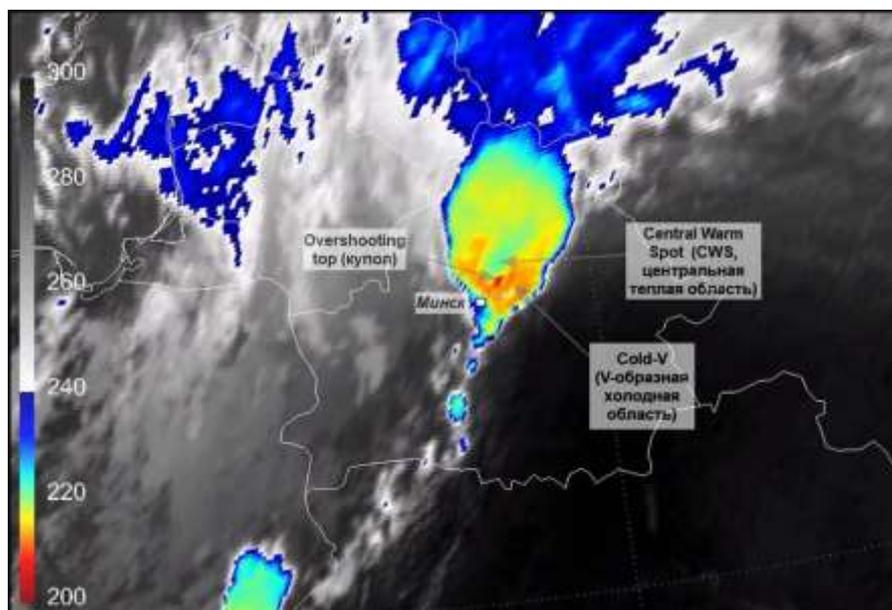


Рисунок 2.2 – Cold-V сигнатура мощного конвективного шторма над Беларусью, Meteosat-9 (MSG-2), RGB IR10.8-BT (цветовая шкала радиояростной температуры в канале 10.8 μm), 12.00 ч ВСВ 13.07.2016 г.

[11]

2.3 Грозопеленгационные наблюдение

Наземные системы обнаружения молний в реальном времени доказали свою ценность в качестве индикаторов местоположения и интенсивности развивающейся конвекции, а также для отслеживания перемещения гроз. Информация о каждой вспышке, включая информацию о полярности, амплитуде и типе, может быть накоплена в привязке к пространству и времени для предоставления пользователям данных о частоте вспышек или тенденциях их изменения с целью отображения или

совмещения с другими данными, такими как радиолокационные и спутниковые.

Отдельные молниевые разряды помимо местоположения характеризуются также высотой над поверхностью среднего уровня моря, полярностью (положительная или отрицательная), типом разряда (между облаком и землёй – CG – и внутриоблачные – IC). Исследования показали важность данных о полной молниевой активности для раннего обнаружения и оценки эволюции интенсивности конвективных явлений. Полярность и тип разряда характерны для различных стадий жизни грозовых облаков [10].

Данные грозопеленгации отлично подходят для дополнения радиолокационных данных. В связи с тем, что метеорологические радиолокаторы напрямую не способны определять наличие молниевых разрядов в атмосфере и явление грозы диагностируют только косвенно, комбинирование с точными данными о молниевых вспышках может существенно уточнить определение грозовых очагов.

Важность информации о молниевой активности обеспечивается почти реальным временем наблюдения за атмосферой и добавляет ценности радарным и спутниковым данным. Триада «спутник–радар–молния» становится основой для превосходной системы наблюдений в режиме наукастинга для конвективной погоды [9].

2.4 Наземные автоматические станции

Практически в каждой стране мира существует национальная сеть наземных автоматизированных метеорологических станций (АМС).

АМС в стандартной комплектации состоят из датчиков, измеряющих следующие метеорологические параметры:

- атмосферное давление;
- скорость и направление ветра;
- температура и относительная влажность воздуха;

- температура подстилающей поверхности;
- количество жидких атмосферных осадков (челночные осадкомеры).

Некоторые АМС оборудованы дополнительными датчиками:

- видимости;
- высоты снежного покрова;
- всесезонными датчиками жидких и твердых осадков (весовые осадкомеры);
- веб-камерами.

Несмотря на то, что данные точечных приземных наблюдений имеют большое число измеряемых параметров, их полезность для анализа и прогноза конвективных процессов невысока. Однако можно отметить, что они представляют большую ценность для анализа мезомасштабных процессов, например, прохождение атмосферных фронтов. Используя информацию сети автоматических станций, можно успешно оценивать границы воздушных масс при условии достаточной плотности расположения станций. Также возможность точного инструментального измерения количества осадков и скорости порывов ветра выгодно выделяет автоматические станции среди других дистанционных методов.

Информация с сети наземных метеорологических станций используется, как одна из наиболее достоверных в задачах верификации прогнозов.

Среди представленных средств измерений наблюдения, проводимые на автоматических станциях единственные не дистанционные.

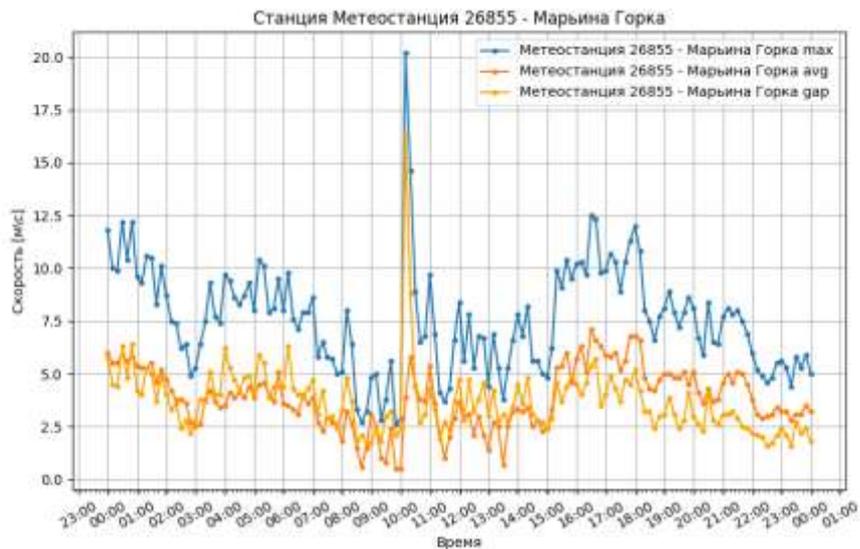


Рисунок 2.3 – данные наземных наблюдений станции Марьина Горка (РБ) с дискретностью 10 минут за 2023.08.07.

На рисунке 2.3 приводится временной ряд скорости и максимального порыва ветра за последние 10 минут на станции Марьина Горка (РБ) 7 августа 2023 года. В 10:10 UTC на станции был зафиксирован порыв ветра свыше 20 м/с. Причиной данного порыва стала конвективная ячейка, достигшая стадии зрелости и сформировавшая сильный нисходящий поток. Скорость растекания данного потока сложилась со скоростью приземного ветра, что сформировало сильный порыв ветра, зафиксированный метеостанцией.

3. Методы наукастинга

Наукастинг (сверхкраткосрочный прогноз) позволяет работать с последними полученными данными об атмосфере и на их основе составлять прогноз. Традиционно методы наукастинга реализуются методами статистической экстраполяции, а не численным решением уравнений гидротермодинамики. Это оправдано при разработке прогноза меньшей заблаговременности (до двух часов), поскольку численные прогнозы погоды на таких сроках сильно подвержены влиянию начальных условий и эффекту spin-up, которого, конечно, можно избежать при непрерывной работе модели в условиях «горячего старта», но такой подход сильно ресурсозатратен.. Несмотря на то, что в последние годы численные модели позволяют пользователям использовать инструменты ассимиляции данных для уточнения начальных условий, их пространственное разрешение повышается, а эффективность вычислительной техники растет, методы экстраполяции данных текущих наблюдений все еще крайне выгодны. Такой расчет занимает гораздо меньше времени, а использование в его основе реальных данных наблюдений значительно сказывается на точности.

Наибольшее распространение имеют методы наукастинга, основанные на данных метеорологической радиолокации. На данный момент практически каждый промышленный центр и мегаполис находится в зоне радиолокационного покрытия. Радиолокационные системы предоставляют специалисту наиболее детальную информацию о пространственно-временных характеристиках конвективной облачности в атмосфере.

В последнее время всё чаще разрабатываются методы наукастинга, в которых комбинируют радиолокационные и модельные данные.

Поскольку данное исследование посвящено радиолокационному наукастингу, то рассмотрим некоторые основные методы

сверхкраткосрочных прогнозов на основе данных метеорологической радиолокации.

Современные методы наукастинга можно обобщенно поделить на две подгруппы:

- методы адвективного переноса,
- объектные методы.

Рассмотрим основные характеристики и наиболее известные системы радиолокационного наукастинга обоих типов.

3.1 Адвективный метод

Основой адвективного метода является определение векторного поля, по которому будет происходить перенос. Для определения такого поля есть несколько методов.

Использование данных гидродинамического моделирования. Данные о скорости и направлении ветра, полученные из глобальных или региональных численных моделей, могут быть использованы в качестве поля скорости адвекции. Основным преимуществом такого метода является то, что значения скорости для описания переноса определены в каждой точке сетки. Недостаток – на результат наукастинга будет влиять ошибка численной модели. Наиболее критично этот недочет будет себя проявлять в тех случаях, когда в поле ветра будут наблюдаться локальные особенности. Наложив данные численного моделирования на реально наблюдаемые облака, например, при прохождении линии фронта, есть вероятность того, что характерных поворот ветра вправо не будет связан с облачной системой.

Использование восстановленных на основе измерений самого радиолокатора скорости и направления ветра. Когерентные радиолокационные комплексы способны измерять радиальную скорость гидрометеоров, основываясь на эффекте Доплера. В системах вторичной

обработки радиолокационной информации на основе измеренной радиальной скорости восстанавливаются поля скорости и направления ветра на всех исследуемых уровнях. Примером системы наукастинга, основанного на восстановленных скоростях ветра, может служить система MAPLE, описанная в [18].

В качестве иллюстрации приводится поле восстановленных скоростей в система АМРК «МетеоЯчейка» [4].

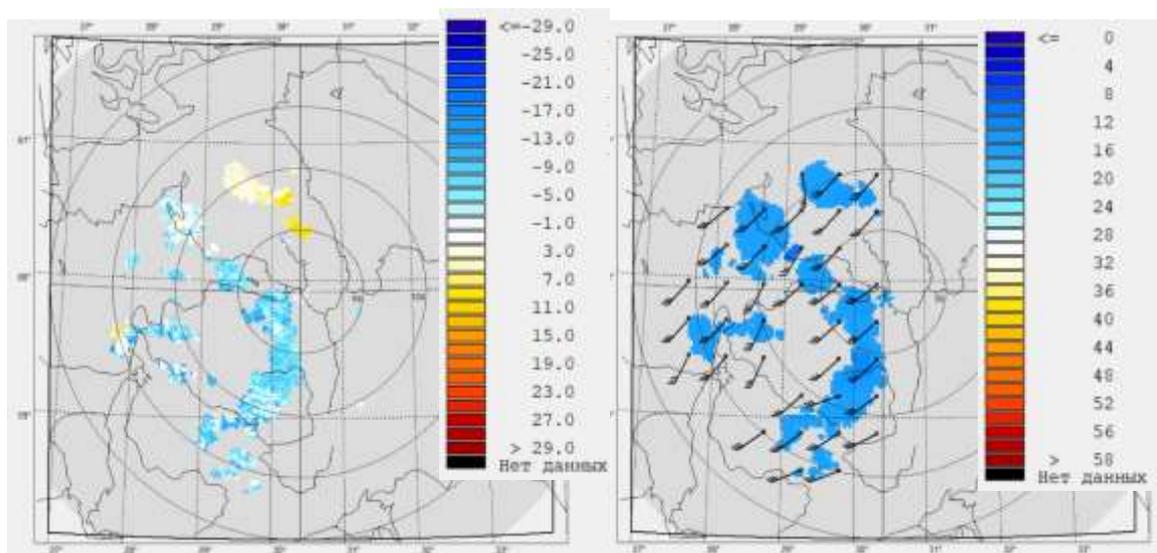


Рисунок 3.1 – Карта радиальных скоростей (слева) и восстановленных скоростей (справа) в слое 2-3 км по данным радиолокатора Meteor-50DX, РГГМУ, 2021.07.30 14:40 UTC.

Восстановленные скорости позволяют избежать пространственной ошибки, связанной с неточностью моделирования. Однако так привносится неточность, связанная с инструментальным измерением и издержками обработки первичной информации. Существенным ограничением для переноса, основанного на таком поле, становится тот факт, что скорости определены только для тех областей, где наблюдались гидрометеоры.

Также достаточно распространены *методы статистической оценки поля смещения радиоэха*, для получения векторов скорости. Например, технология TREC (Tracking Radar Echoes by Correlation) [21], определяет

векторы движения поля радиоэха или поля осадков путем анализа корреляции между двумя последовательными сканами радара. Данные области зондирования делятся на области меньшего размера (например, 10 * 10 км.). Для каждой подобласти вычисляется корреляция со всеми возможными областями соседнего временного отсчета. Положение области с максимальной корреляцией будет определять вектор смещения.

Отдельной вехой в сфере сверхкраткосрочного радиолокационного прогноза стало применение *метода оптического потока*. Оптическим потоком описывается относительное смещение пикселя, яркости I . При этом вводится предположение, что между двумя временными отсчетами яркость пикселя не изменяется. Метод оптического потока пришел в метеорологию из сферы обработки видеоизображений, где он используется для отслеживания объектов (object-tracking). Рассматривая серию радиолокационных снимков как последовательность кадров, можно получить смещения для каждой точки радиолокационного обзора [14].

Системы наукастинга, основывающиеся на оценке поля адвекции по радиолокационным данным зачастую используют смешивание с данными численного моделирования. Таким образом удастся сделать поле скоростей непрерывным для всей рассматриваемой области.

Сами методы переноса в литературе разделяются на методы Эйлеровой и Лагранжевой инерции [37]. Метод Эйлеровой инерции полностью инертен и в нем текущее поле отражаемости Z или интенсивности осадков R предполагается неизменным во времени.

$$R(t + \Delta t, x, y) = R(t, x, y) \quad (3.1)$$

Метод Лагранжевой инерции также игнорирует изменение интенсивности наблюдаемой величины, но поле величины перемещается вместе с потоком.

$$\frac{dR}{dt} = 0 \quad (3.2)$$

На такой концептуальной схеме строится подавляющее большинство схем экстраполяции полей.

Вектор переноса может определяться как прямым, так и обратным способом. Прямой способ подразумевает перенос наблюдаемой радиолокационной ячейки в соответствии с вектором, который из нее исходит. Обратный способ определяет значение в узле сетки с помощью того вектора, который приходит в нее.

3.2 Объектные методы

Объектные методы в отличие от адвективных не рассматривают движение всего поля облачности. Прогноз в них концентрируется вокруг конкретной зоны конвективного явления. В радиолокационном обзоре выделяются очаги повышенной радиолокационной отражаемости, которая превышает установленное пороговое значение. В качестве порогового значения нередко используется значение 45 дБZ [25].

Каждый такой выделенный очаг рассматривается как единица данных – объект. Для полученного объекта – конвективной ячейки – высчитываются характеристики, такие как площадь и объем, тенденция роста, максимальная радиолокационная отражаемость, высота максимальной радиолокационной отражаемости и другие.

Некоторые алгоритмы используют методы понижения размерности данных для более удобной манипуляции объектом [22,25]. В них от исходного объема остаются вертикальная и горизонтальные протяженности, а значения внутри объекта сводятся к средним. В других алгоритмах от очага повышенной отражаемости оставляется контур неправильной формы, который описывает объект [27].

Перемещение полученных объектов может осуществляться по-разному. В некоторых системах расчет прогностического положения объекта осуществляется за счет переноса ячейки или контура ячейки по предварительно полученному полю скорости [35]. Другие формируют историю конкретных объектов на основании нескольких последовательных временных отсчетов. Будущее местоположение объекта может быть получено при использовании линейной экстраполяции на основе анализа предыдущей эволюции объекта.

Отслеживание объектов в автоматическом режиме с целью формирования истории его развития – отдельная важная задача. Она может быть решена, например, методами комбинаторной оптимизации [24]. Приняв простые правила сопоставления объектов между двумя временными отсчетами, можно для каждого объекта в момент времени $t-1$ найти соответствующий ему объект в момент времени t . На основании полученной истории жизни объекта получают временной ход рассчитанных ранее характеристик. По такому временному ходу можно судить о стадии жизни конвективной ячейки.

Объектный метод позволяет рассматривать взаимодействие ячеек между собой. За время жизни характеристики ячейки могут изменяться. Например, могут возникать события разделения большого объекта на два или более объектов меньшего размера, и объединение двух или большего количества объектов в один большой.

Слияние конвективных ячеек может приводить к интенсификации характеристик результирующего объекта – увеличению размеров и значений радиолокационной отражаемости. Разделение крупной ячейки ожидаемо ведет к дальнейшей её полной диссипации.

Благодаря возможности отследить такое взаимодействие в объектном методе удастся спрогнозировать и отклик конвективной ячейки на разделение или слияние [22,23].

Сценарии поведения конвективных ячеек в моменты взаимодействия друг с другом занимают отдельную область исследований грозоградовых процессов. Учет эмпирического опыта приводит к корректному воспроизведению отклика конвективных ячеек на процессы взаимодействия [27,29].

3.3 Введение понятия состояния атмосферы

Методы, основанные на выделении и отслеживании объектов, и методы, основанные на применении поля скорости к полю радиолокационной отражаемости (или интенсивности осадков), составляют два важных идеологических подхода к сверхкраткосрочному прогнозированию. Тем не менее для полноты картины следует рассмотреть схемы получения прогноза, которые основываются на анализе большого количества предикторов. Их существенное отличие от упомянутых ранее заключается в том, что в дополнение к будущему местоположению радиолокационной ячейки такие системы оценивают состояние атмосферы в том месте, из которого она была перенесена, и в том месте, куда она была перенесена.

Существуют такие системы прогноза, которые базируются на получении оценки состояния атмосферы. Используя большое количество автоматически определяемых предикторов, можно оценить предрасположенность атмосферы к усилению существующих конвективных ячеек или образованию новых. Такой подход выгоден тем, что позволяет помимо прогноза будущего местоположения конвективной облачности и связанных с ним явлений спрогнозировать также возникновение новых объектов и полную диссипацию существующих.

В качестве примера такой системы рассмотрим систему AutoNowcaster [29], блок-схема которой представлена на рисунке 3.2.

Система AutoNowcaster разрабатывает сверхкраткосрочные прогнозы конвективных облаков, основываясь на данных радиолокации, геостационарных спутников, аэрологического зондирования, а также пользовательского ввода [32].

Прогноз получается благодаря комбинации большого числа предикторов:

- экстраполированное поле радиолокационной отражаемости;
- площадь штормов;
- тенденции роста штормов, полученные из системы объектного отслеживания;
- суммы осадков
- местоположение и скорость зоны сходимости потоков в пограничном слое;
- вертикальная скорость;
- зоны с обнаруженными радаром конвективными облаками;
- тип облачности, определяемой по спутнику;
- тенденция яркостной температуры ВГО;
- учет рельефа, как триггера конвекции.

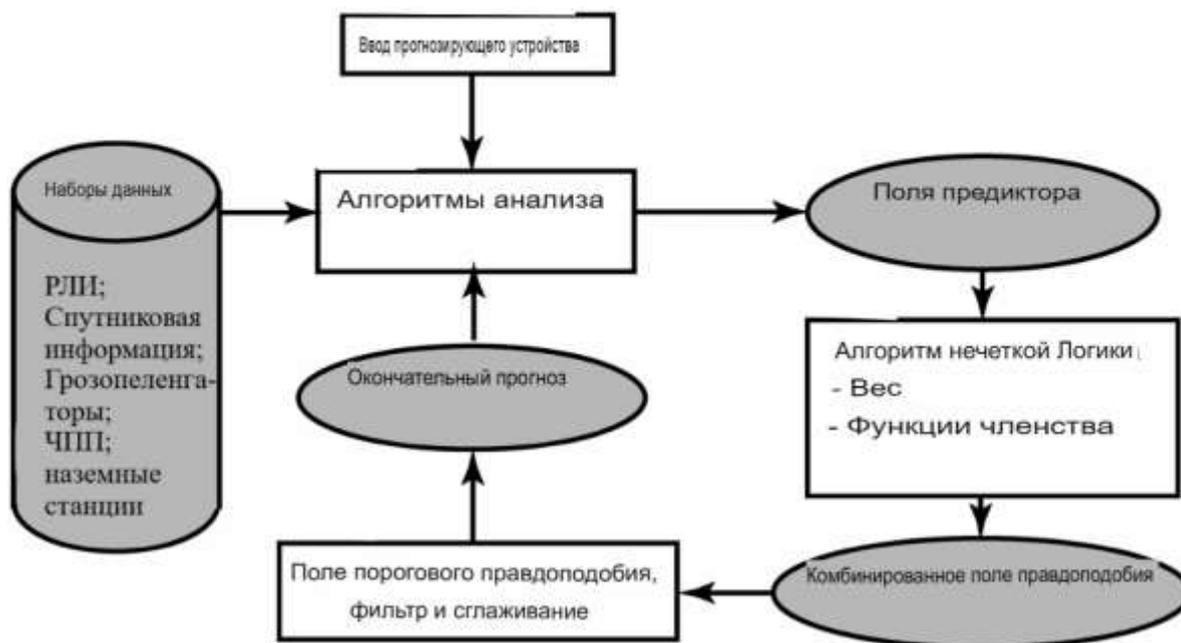


Рисунок 3.2 – Блок-схема системы AutoNowcaster [29]

В данной методологии наукастинга также вводится учёт эволюции облаков на основе концептуальной модели поведения грозовых ячеек [31]. Согласно данной концептуальной модели, поведение грозовых систем может развиваться по трем сценариям:

1. Отсутствие изменений. Если наблюдается устойчивая грозовая ячейка, будущее положение такой ячейки может быть получено экстраполяцией без модификаций.

2. Затухание. Конвективная ячейка малого диаметра может диссипировать. Особенно вероятно это при наблюдаемой расходимости поверхностных потоков.

3. Рост. Молодая ячейка в условиях атмосферы, благосклонной к интенсификации конвективных процессов, будет увеличиваться.

Таким образом, искусственно создается отличающееся поведения конвективных ячеек в разных условиях атмосферы.

3.4 Системы предупреждения об опасных явлениях погоды

На описанных выше методологиях построены некоторые системы предупреждения об опасных явлениях погоды и системы поддержки принятия решений. Такие системы работают как в целях оповещения гражданского населения, так и в специализированных отраслях экономики, таких как авиационная метеорология или метеорологические системы обеспечения народного хозяйства.

К системам предупреждения об ОЯП, основанных на описанных методологиях, принадлежит, например, NowCastMIX [33], работающая в составе немецкой службы погоды. Система NowCastMIX собирает информацию с сети метеорологических радаров, данные гидродинамического моделирования атмосферы, данные о грозовых разрядах системы LINET и данные с сети наземных метеостанций и на их основе разрабатывает прогноз опасных явлений погоды.

На рисунке 3.3 представлена блок-схема получения категориальных предупреждений об опасности четырех градаций. В целях комбинации большого количества предикторов разного рода применена нечёткая логика. Обработывая данные, система NowCastMIX получает информацию о трёх опасных явлениях погоды: сильные ливневые осадки, град и шквал. В зависимости от оценки интенсивности каждого из этих явлений, формируется финальное штормовое предупреждение для администрации района.

Радиолокационные данные обрабатываются системой объектно-ориентированного подхода KONRAD [27]. По данным радиолокационной отражаемости, периодичность обновления которых составляет 5 минут, идентифицируются конвективные ячейки. Данные о размере ячеек, скорости их передвижения, комбинируются с данными численного прогноза погоды, значениями вертикальной интегрированной водности, а также плотностью грозовых разрядов при формировании так называемых «нечетких

множеств». Из анализа каждого нечеткого множества делается вывод о интенсивности протекающего явления для данного района, после чего между собой объединяется информация уже об явлениях.

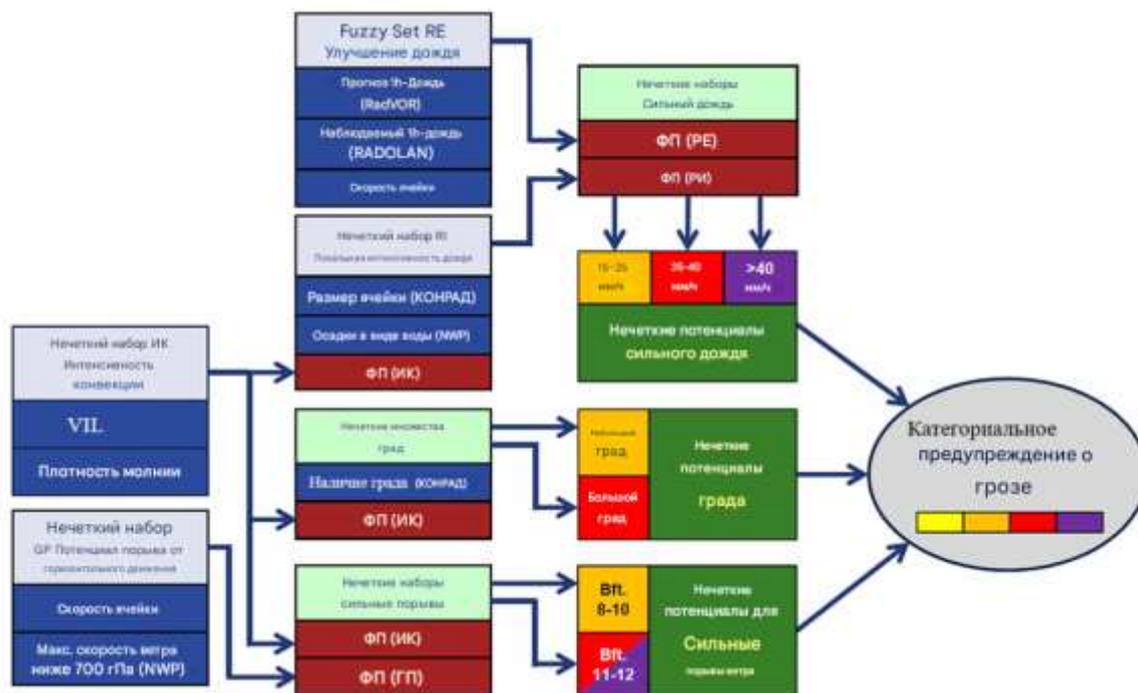


Рисунок 3.3 – Блок-схема системы автоматической системы предупреждения о опасных явлениях погоды NowCastMIX [33]

Нечеткая логика нередко используется в автоматических системах для принятия решения на основании нескольких переменных. Эта математическая теория, которая обобщает классическую булеву логику на случай, когда истинность утверждений может принимать не только значения «истина» или «ложь», но и любые промежуточные значения на интервале $[0; 1]$. Эта теория была предложена Лотфи Заде в 1965 году как инструмент для работы с неточными расплывчатыми или неопределенными значениями.

В отличие от классического множества, где элемент либо принадлежит множеству, либо нет, в нечетком множестве каждый элемент имеет степень принадлежности к множеству, заданному, опять же, в

интервале $[0; 1]$. Степень такой принадлежности определяется функцией нечеткой логики – «функцией принадлежности».

Также с помощью нечеткой логики могут определяться значения лингвистических переменных, например, на основании численных значений температуры, могут быть определены переменные [«холодно», «тепло», «горячо»].

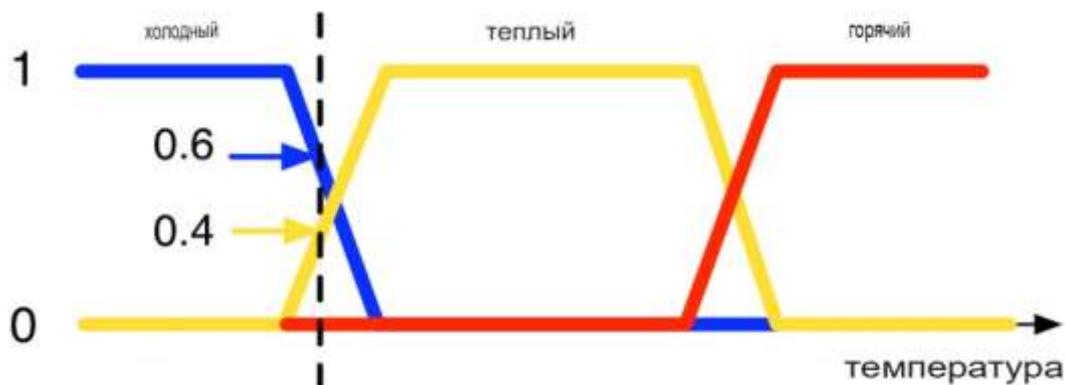


Рисунок 3.4 – Значения функции принадлежности, определяющие возможности назначения переменных «холодно», «тепло», «горячо»

Нечеткая логика расширяет классическую логику, позволяя моделировать рассуждения в условиях неопределенности. Такая логика находит применение в инженерии, экономике и когнитивных науках, обеспечивая эффективные методы обработки качественных данных. В рассматриваемой системе NowCastMIX нечеткая логика хороший инструмент для принятия решения о классификации опасности явления по трем категориям.

3.5 Наукастинг в России

В Гидрометцентре России с 2017 года реализована работа методологии STEPS [13,14]. Расчет наукастинга для Европейской территории России по данной методологии в оперативном режиме

осуществляется круглый год по данным с национальной радиолокационной сети, стоящей приблизительно из 30 радиолокаторов ДМРЛ-С. Примерная расчетная область и входящие в нее радиолокаторы изображены на рисунке 3.4.

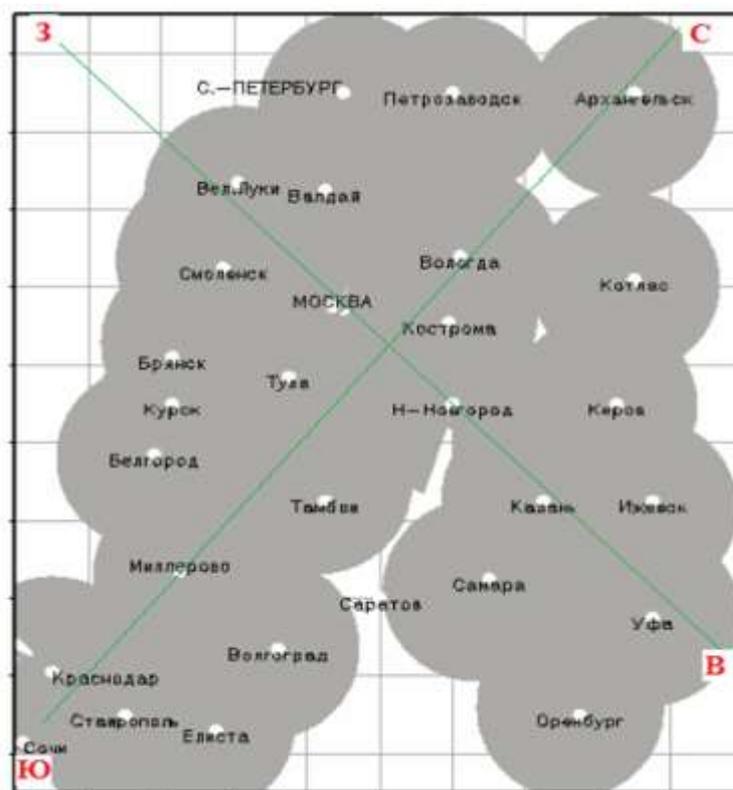


Рисунок 3.4 – Расположение ДМРЛ в условных координатах при первом испытании схемы STEPS [15]. Дополнительно обозначена ориентация на стороны света.

Схема STEPS (Short-Term Ensemble Prediction System) представляет собой вероятностную систему свехкраткосрочного прогнозирования осадков, которая совмещает экстраполяцию радиолокационных полей с численным прогнозом погоды. В гидрометцентре для комбинирования используются результаты региональной численной модели COSMO-Ru [16].

Методология STEPS использует концепцию разложения поля осадков на компоненты различных пространственных масштабов. Крупномасштабные фрагменты могут сохраняться в течении всего прогноза,

поскольку они обладают большей предсказуемостью, мелкомасштабные фрагменты могут заменяться стохастическим шумом с аналогичными статистическими характеристиками.

Методология STEPS также учитывает эволюционную компоненту поля осадков. Это осуществляется с помощью авторегрессионной модели второго порядка. За счет учета эволюционной компоненты удается увеличить максимальную заблаговременность прогноза. Именно благодаря отсутствию эволюции полей осадков большинство схем наукастинга теряют достоверность переходя предел двух часов экстраполяции.

Для оценки поля адвекции используется метод оптического потока. В основе этого метода лежит предположение, что точка на поле между двумя временными отсчетами не меняет свою интенсивность. Тогда смещение точки с яркостью I может быть найдена как:

$$I(x, y, t) = I(x + dx, y + dy, t + dt), \quad (3.3)$$

где:

I - – яркость пикселя или интенсивность осадков,

В расчетно-вычислительном комплексе ruSTEPS реализуются как методы нахождения поля адвекции с помощью плотного (dense), так и с помощью прореженного (sparse) оптического потока. Использование прореженных методов подразумевает нахождение смещения отдельных точек, определенных специальным алгоритмом по характерным признакам. Тогда после нахождения этих отдельных векторов они интерполируются в полноценное векторное поле смещения и могут дополнительно смешиваться с данными гидродинамического моделирования. Плотный оптический поток подразумевает нахождение векторов смещения яркости для каждой точки, даже если этот вектор будет равен нулю.

Схема STEPS производит ансамбль прогнозов, каждый член в котором имеет индивидуальную реализацию шумового каскада и возмущений поля

ветра. Прогнозируемое поле осадков формируется комбинации членов ансамбля и последующего преобразования каскадов обратно в поле интенсивности осадков.

На сайте Гидрометцентра РФ (<https://meteoinfo.ru/nowcasting>) потребителю постоянно предоставляются результаты наукастинга интенсивности осадков (рисунок 3.5).



Рисунок 3.5 – Пример наукастинга осадков по схеме STEPS
Гидрометцентра РФ (<https://meteoinfo.ru/nowcasting>)

4. Реализация наукастинга опасных явлений погоды

В данном разделе будет рассмотрена практическая реализация некоторых описанных в главе 3 методов радиолокационного наукастинга.

Работа по определению опасных явлений погоды является задачей классификации. Определение ОЯП строится на данных, измеряемых радиолокатором, в сочетании со вспомогательными данными об атмосфере, которые могут быть получены из численного прогноза погоды или аэрологического зондирования атмосферы. В качестве наиболее классического примера можно представить Y -критерий для определения грозоопасности облаков [38].

$$Y = H * \lg(Z_3), \quad (4.1)$$

где:

- Y – критерий грозоопасности,
- H – высота верхней границы облачности,
- $\lg(Z_3)$ – значение радиолокационной отражаемости на высоте, на 2-2.5 км. превышающей высоту H_0 град С.

Продукты такой классификации более понятны пользователю, однако на их основе невозможно составить систему прогноза, которая бы учитывала развитие облаков.

4.1 Реализация объектного метода наукастинга

В качестве основы для создания объектного метода наукастинга была выбрана методология TITAN [22]. Описанная в начале 1990-х годов, данная схема руководствуется созданием аппроксимирующих объектов для очагов

отражаемости в радиолокационном обзоре и экстраполяцией их местоположения и основных характеристик. Данная схема за долгие годы в оперативной практике получила хорошую репутацию и является одной из наиболее известных схем объектного наукастинга.

Изначально ТИТАН был разработан как алгоритм для объективной идентификации и отслеживания грозовых явлений на основе метеорологических радаров с целью мониторинга их очагов во времени и прогнозирования их основных характеристик с небольшой заблаговременностью. В данной работе эта методология будет применена к полю отражаемости для выявления очагов конвективных ячеек и прослеживания их во времени.

Первым шагом является идентификация облачных ячеек по некоторому порогу радиолокационной отражаемости. Хорошим решением задачи получения объема, содержащего все смежные точки, можно считать алгоритм DFS (Depth-First-Search), который вернет неупорядоченное множество точек, удовлетворяющих всем условиям. Для получившегося объёма, значение отражаемости в каждой ячейке которого превышает установленный порог, составляется ковариационная матрица.

$$cov_{xy} = \begin{bmatrix} a & b \\ b & c \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

$$a = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (4.3)$$

$$b = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \quad (4.4)$$

$$c = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (4.5)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (4.6)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (4.7)$$

где:

- cov* – ковариационная матрица для полученного объекта,
- a* – дисперсия x-координат выделенной области,
- b* – ковариация x- и y-координат,
- c* – дисперсия y-координат выделенной области,
- \bar{x} – среднее значение x,
- \bar{y} – среднее значение y,
- n* – количество точек (ячеек) в объекте.

Собственные значения данной ковариационной матрицы будут обозначать большую и малую полуоси эллипса, аппроксимирующего облачную ячейку. Собственные вектора данной ковариационной матрицы могут задать расположения эллипса в пространстве.

$$r_{\text{м.п.}} = \sigma_{\text{м.п.}} \sqrt{\frac{S}{\pi \sigma_{\text{м.п.}} \sigma_{\text{б.п.}}}} \quad (4.8)$$

$$r_{\text{б.п.}} = \sigma_{\text{б.п.}} \sqrt{\frac{S}{\pi \sigma_{\text{м.п.}} \sigma_{\text{б.п.}}}} \quad (4.9)$$

где:

- $r_{м.п.}$ – радиус малой полуоси аппроксимирующего эллипса,
- $r_{б.п.}$ – радиус большой полуоси аппроксимирующего эллипса,
- $\sigma_{м.п.}$ – среднеквадратическое отклонение (СКО) в направлении большой полуоси,
- $\sigma_{б.п.}$ – СКО в направлении малой полуоси
- S – спроецированная площадь аппроксимирующего эллипса.

Важным является выбор значения пороговой отражаемости, по которой будет производиться отбор ячеек и дальнейшая аппроксимация. В зависимости от выбранного порога отражаемости итоговые эллипсы могут неудачно аппроксимировать выделенную область (при условии слишком низкого порога отражаемости) или быть малоустойчивыми во времени (при условии слишком высокого порога отражаемости).

На рисунке 4.1 представлены три варианта построения истории эллипсов, аппроксимирующих облачную ячейку с разными порогами отражаемости. Красным обозначен эллипс текущего срока. Наблюдаемые ранее эллипсы обозначены градиентом розового. Можно наблюдать, что при значении пороговой отражаемости 30 дБZ на рисунке 4.1а формируется устойчивая серия из объектов. Более крупные объекты легче прослеживаются во времени, так как меньше меняются. Однако аппроксимирующий эллипс хуже описывает сложную форму выделяемой области. Чем выше порог, тем сложнее найти в пространстве достаточное количество ячеек для адекватной аппроксимации. На рисунке 4.1в полученная история объектов много меньше, и они более хаотично расположены от одного наблюдения к другому. Тем не менее при более высоком пороге отсечения аппроксимация проходит удачнее, так как форма меньшего объекта проще.

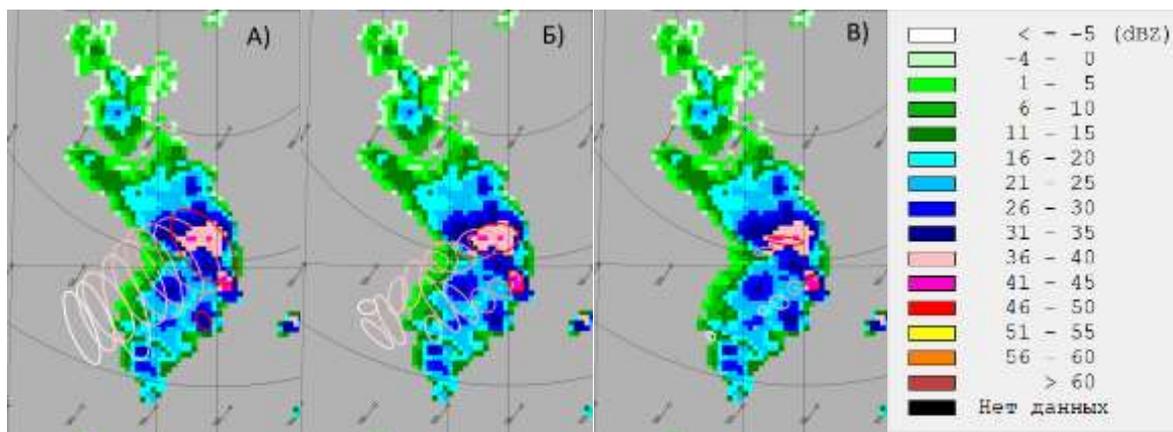


Рисунок 4.1 – Пример аппроксимации, отслеживания и прогнозирования с разными значениями пороговой отражаемости. Данные радиолокатора РГГМУ за срок 06.06.2020 14:45 UTC. а) 30 дБZ; б) 35 дБZ; в) 40 дБZ. На крайнем правом изображении представлена легенда карты максимальной отражаемости профиля ячейки

Для связывания эллипсов в соседних временных отсчетах используется Венгерский метод [24]. Задача нахождения оптимальных пар объектов в двух соседних временных отсчетах – классическая задача о назначениях, цель которой минимизировать затраты. В данной ситуации «затраты» оцениваются как перемещение центра масс и изменение объема объекта. Данный метод можно назвать более выигрышным в сравнении, например, с методом, реализованным в схеме SCIT [25], где решение о назначениях является функцией только расстояния между объектами. Так, матрица стоимости (cost matrix) в TITAN определяется как:

$$C_{ij} = w_1 d_p + w_2 d_v \quad (4.10)$$

$$d_p = \sqrt{(x_{1i} - x_{2j})^2 + (y_{1i} - y_{2j})^2} \quad (4.11)$$

$$d_v = \left| \sqrt[3]{V_{1i}} - \sqrt[3]{V_{2j}} \right| \quad (4.12)$$

где:

- w_1 – весовой коэффициент расстояния,
- w_2 – весовой коэффициент объема,
- d_p – евклидово расстояние между двумя объектами,
- d_v – разница объемов, приведенная к размерности расстояния,
- x – х-координата центра массы объекта,
- y – у-координата центра массы объекта,
- V – объем объекта,
- i – номер объекта текущего временного отсчета,
- j – номер объекта предыдущего временного отсчета.

Очевидно, что наилучшим образом данный метод будет работать при условии наименьшего расстояния между эллипсом текущего и предыдущего временных отсчетов и наименьшим изменением их объемов. Наименьшее расстояние может достигаться не только низкими скоростями наблюдаемого ветра, но и уменьшенным временным интервалом между двумя соседними отсчетами, то есть таким временем, за которое облако физически не смогло бы переместиться достаточно далеко от своей текущей позиции. На текущий момент стандартизированное временное разрешение для работы радиолокаторов составляет 10 минут как в России, так и в Беларуси.

Следствием такого временного разрешения становится введение порога максимально возможной скорости переноса облака, заданного в данной работе как 25 м/с (перемещение на 15 км за 10 минут). При превышении данного порога алгоритм сопоставления будет считать, что облако не могло переместиться на такое расстояние, а значит пара эллипсов из текущего и предыдущего временных отсчетов не может являться одним объектом.

На рисунке 4.2 продемонстрировано два набора эллипсов из отсчета t и отсчета $t-1$. Как видно, при превышении порога скорости перемещения два объекта не могут быть сопоставлены друг другу.

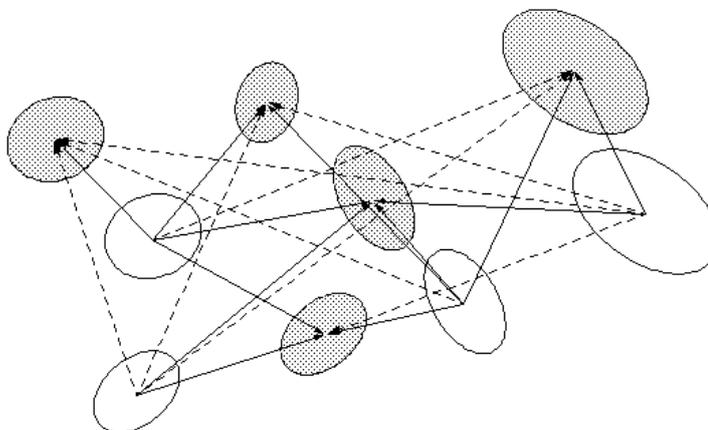


Рисунок 4.2 – Набор недопустимых (пунктирные стрелки) и допустимых (обычные стрелки) путей перемещения между эллипсами предыдущего срока (незаштрихованные эллипсы) и эллипсами следующего срока (заштрихованные эллипсы) [22]

Недостатком какого подхода является то, что алгоритм будет находить пару для каждого эллипса, так как он нацелен на получение оптимальных сочетаний пар объектов. Следовательно, первичный результат работы будет требовать пусть и минимального, но обязательного контроля.

Одной из важных особенностей методологии ТИТАН является возможность отслеживать во времени не только обособленно развивающиеся или разрушающиеся облачные структуры, жизнь которых проходит без взаимодействия с другими, но и ячейки, проходящие через слияния с другой ячейкой или же наоборот, разделяющиеся на одну или несколько других ячеек поменьше. Критерием для принятия решения в случае эллипса, пара которому не находится очевидным путем, служит ближайшее расположение прогностического эллипса предыдущего срока с наименьшей заблаговременностью. Тогда «пропажу» или внезапное

«возникновение» эллипса можно отнести к ближайшему соседу, который его поглотил или от которого он отделился (рисунок 4.3).

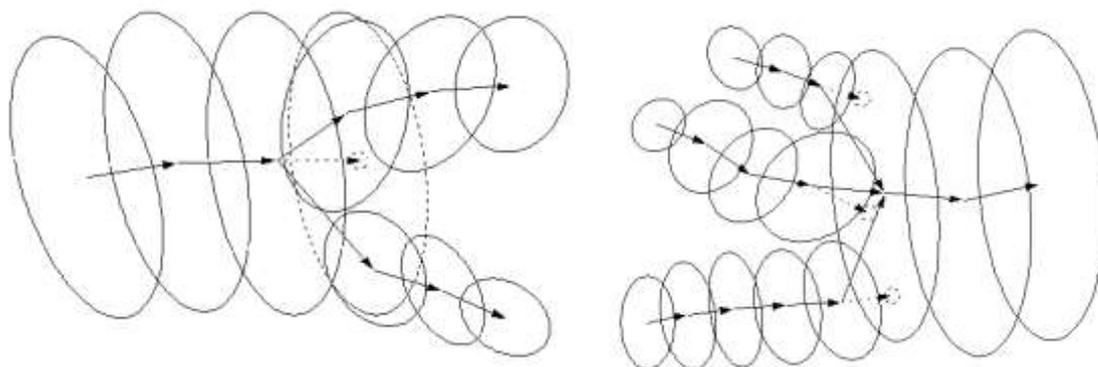


Рисунок 4.3 – Разделение и слияние объектов.

Эта важная особенность этапа сопоставления и создания истории ячейки обеспечивает более гладкий временной ход параметров эллипсов, позволяя корректировать историю его развития с учетом внезапных разделений или слияний. Для корректировки временного хода характеристик объекта предлагается компенсировать сдвиг между объектами. Это приводит к тому, что при взаимодействии ячеек между собой прогностическая тенденция не испытывает скачка (рисунок 4.4).

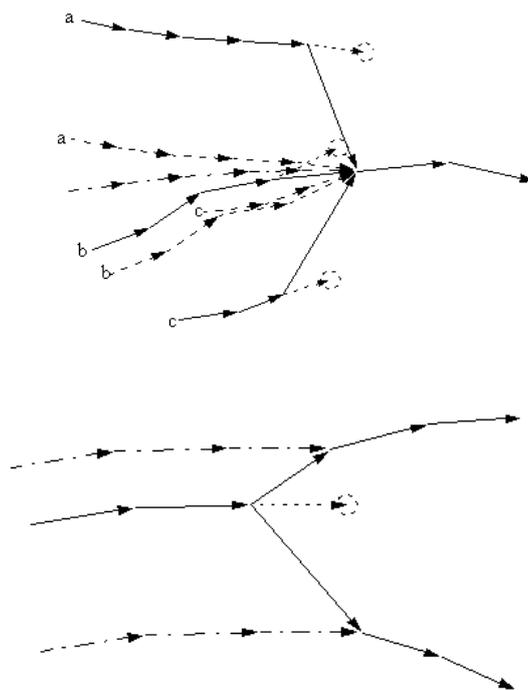


Рисунок 4.4 – Пример корректировки хода величины при слиянии (левый рисунок) или разделении (правый рисунок) облачных структур

По сформированной истории отслеживаемого во времени эллипса могут быть построены прогностические тренды для его характеристик. Непосредственно прогноз осуществляется по произведению скорости изменения функции временного линейного тренда на заблаговременность прогноза. Некоторым усовершенствованием, использованным в данной работе, стал учёт в текущей тенденции её предыдущего значения.

$$p_i = p_0 + \left(\frac{dp}{dt}\right) \Delta t \quad (4.13)$$

где:

p_i – прогностический параметр,

p_0 – его начальная позиция (последнее наблюдение или наименьшая заблаговременность прогноза),

$\left(\frac{dp}{dt}\right)$ – скорость изменения параметра,

Δt – шаг по времени.

Для объектов, для которых нет возможности построить линию тренда, прогностическое местоположение рассчитывается с помощью вектора скорости движения всего поля радиоэха. Данный вектор извлекается с помощью алгоритма поиска максимального подобия полей в двух соседних отсчетах по времени. При этом для прогностического эллипса сохраняются все характеристики текущего эллипса.

По описанной выше методологии ТИТАН получил первичную реализацию на базе системы РС МАРС (Рабочая Станция Метеорологической Автоматизированной Радиолокационной Сети) разработанный Институтом Радарной Метеорологии. В данной системе имеется возможность проводить расчеты по методологии ТИТАН как для архивных данных, так и в режиме реального времени.

На рисунке 4.5 продемонстрирована возможность расчета и построения аппроксимирующего эллипса (красный цвет – текущий срок), вывод истории данного эллипса (чем больше удаление от текущего момента времени, тем светлее оттенок розового цвета), а также прогностических эллипсов на три срока от текущего времени (белый, пунктирный).

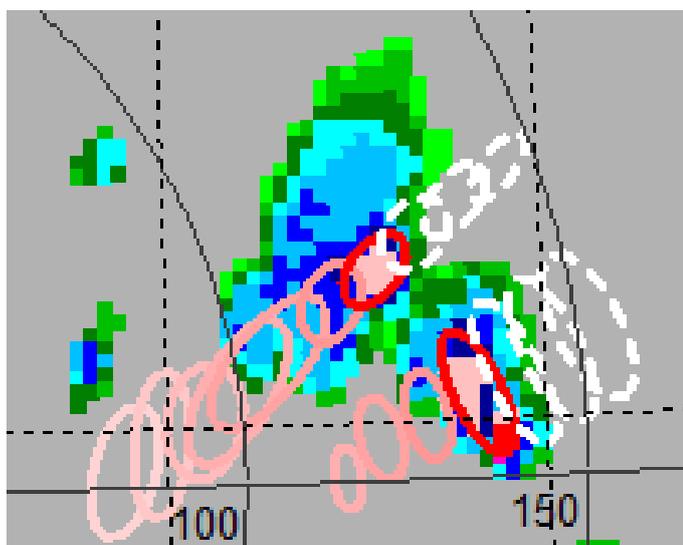


Рисунок 4.5 – Пример работы системы ТИТАН по данным радиолокатора РГГМУ за 2021.07.30 11:10 UTC

Практический смысл отображения полной истории перемещения эллипса выражается в выделении зоны повышенной конвекции. Зона повышенной конвекции в начальный момент времени послужила причиной образования данной конвективной ячейки, а значит в окрестностях этого места сценарии возникновения ячеек могут повторяться.

Система ТИТАН представляет собой хороший «каркас» методов для работы с данными, который может быть адаптирован для анализа информации, полученной, например, со спутниковых систем, грозопеленгационных систем или численных моделей атмосферы.

В данной работе в разработанной прогностической системе наукастинга на основе методологии ТИТАН для каждого очага опасного явления рассчитывались следующие характеристики:

- Местоположение аппроксимирующего эллипса
- Размеры аппроксимирующего эллипса,
- Координаты центра массы эллипса (взвешенные по значениям отражаемости в каждой точке, составляющей эллипс),
- Объем,
- Спроецированная площадь,
- Интенсивность осадков (на основе соотношения Маршала-Пальмера [38])
- Значение максимальной отражаемости,
- Среднее значение отражаемости.

Список прогнозируемых параметров состоит из:

- Местоположение аппроксимирующего эллипса и центра его массы,
- Объем,

- Спроецированная площадь,
- Интенсивность осадков.

При формировании прогнозируемых эллипсов введено предположение о том, что соотношение сторон эллипса и угол его наклона не меняются во времени. Это обуславливается тем, что данные величины имеют куда менее гладкий ход во времени по сравнению с остальными, что делает попытку их аппроксимации во времени неоправданной. Расчет длины полуосей эллипса, таким образом, происходит от спрогнозированной площади конвективной ячейки. По аналогичной причине прогнозирование площади конвективной ячейки происходит через скорость изменения функции тренда объема.

$$S_t = S_0 + \frac{S_0}{V_0} \left(\frac{dV}{dt} \right) \Delta t \quad (4.14)$$

где:

- S_t – прогнозируемая площадь эллипса,
- S_0 – текущая область эллипса,
- $\frac{S_0}{V_0}$ – масштабирующее соотношение,
- $\left(\frac{dV}{dt} \right)$ – скорость изменения функции тренда.

Угол наклона прогностического эллипса равен углу наклона эллипса текущего срока.

На основе рассмотренной методологии была реализована вычислительно-расчетная программа по прогнозированию с максимальной заблаговременностью 30 минут и дискретностью прогноза 10 минут. В прогнозируемые значения вошли следующие параметры:

- местоположение аппроксимирующего эллипса,
- центра массы,

- размеры при предположении сохранения соотношения сторон,
- объем,
- спроецированная площадь,
- интенсивность осадков.

Реализованная методология стала первой компонентой в выполнении практической части данной работы. Она стала очень важной компонентой формирующейся расчетной программы не столько с точки зрения прогноза, сколько с точки зрения анализа облаков и их представления в программе. Полученный набор методов и алгоритмов по работе с данными является хорошим каркасом, который может быть применен к различным типам данных при дальнейшем расширении программы.

4.2 Реализация адвективного метода наукастинга

У объектного метода существует два существенных недостатка. Во-первых, прогнозирование объекта не учитывает нелинейность переноса облачной системы. В созданном экземпляре объектного наукастинга не рассматривается измерение во времени ни угла поворота объекта, ни самих главных компонент, которые объект составляют. Другими словами, прогноз осуществляется очень инертно. Особенно плохо такой прогноз будет работать на крупных вытянутых облаках. Во-вторых, объектный наукастинг не занимается переносом тех областей поля облаков, которые не составляют объекты. Даже если некоторые облачные структуры не представляются достаточно опасными для их рассмотрения в качестве конвективных опасных явлений погоды, их учет в прогнозе все равно важен для повышения его общей оправдываемости. Такие зоны могут представлять из себя, например, области обложных осадков или осадков умеренной силы и их учет должен входить в задачи хорошего прогноза. Адвективный подход лишен указанных недостатков, так что рационально использовать именно

его для переноса радиолокационных продуктов. Далее будет рассмотрена реализация адвективного прогноза.

Для адвективного перемещения воспользуемся результатами численного моделирования атмосферы моделью GFS с пространственным разрешением 0.25 географических градусов и временным разрешением 1 час. Конкретное значение вектора переноса в узле примем за среднее значение потока между поверхностями 500 гПа и 700 гПа. В зоне конвергенций облачность обычно смещаются вдоль среднего вектора ветра между данными слоями [36].

$$c = k|V|_7^5 \quad (4.15)$$

$$|V|_7^5 = \frac{\sqrt{V_7^2 + V_5^2 - 2V_7V_5 \cos(180 - \alpha)}}{2} \quad (4.16)$$

k – определяется по эмпирической формуле:

$$k = \frac{9.2 + 0.29|V|_7^5}{|V|_7^5 + 3.5} \quad (4.17)$$

\bar{d} направление ветра в слое:

$$\bar{d}|_7^5 = d_7 \pm \arccos \frac{V_7 - V_5 \cos(180 - \alpha)}{2|V|_7^5} \quad (4.18)$$

где:

- c - результирующая скорость переноса,
- k - эмпирический коэффициент,
- $|V|_7^5$ - скорость ветра в слое 700-500 гПа,
- V_7 - скорость ветра на поверхности 700 гПа,
- V_5 - скорость ветра на поверхности 500 гПа,
- $\bar{d}|_7^5$ - направление ветра в слое 700-500 гПа,
- d_7 - направление ветра на поверхности 700 гПа.

При левом повороте ветра в формуле (4.18) с высотой знак «-», при правом «+».

Для непосредственно переноса радиолокационной отражаемости в новую позицию согласно вектору адвекции используется схема обратной Лагранжевой инерции (lagrangian persistence) [37].

В такой схеме прогностическое местоположение радиолокационной ячейки получается благодаря решению обратной задачи переноса. Вместо переноса наблюдаемой радиолокационной ячейки по соответствующему ей вектору адвекции, рассматривается узел регулярной сетки в прогностическом поле, значение радиолокационной отражаемости в котором определяется тем вектором, который в нее указывает. Это позволяет обойти проблему неопределенного значения, когда несколько векторов приходят в одну точку.

На основе такого подхода был реализован адвективный наукастинг в программно-расчетном комплексе Института Радарной Метеорологии (ИРАМ) [40].

Существующая реализация адвективного метода будет использована в создаваемом наукастинге всех радиолокационных продуктов. Однако она никак не учитывает эволюционной составляющей, которая серьезно влияет оправдываемость прогноза. Далее будет рассмотрена попытка учета эволюции конвективных систем. Эволюция облаков, которые составляют слабые и умеренные осадки, рассматриваться не будет.

4.3 Введение концептуальной модели

До сих пор проблема учета эволюционной составляющей конвективной облачности в системах наукастинга осадков остается достаточно серьезным ограничением. Для областей, связанных с глубокой конвекцией, трудность заключается в прогнозировании места и момента

инициализации конвективной ячейки, а также момента, когда она начнет «состариваться» и угасать после достижения стадии зрелости. Не спрогнозировав новую ячейку, возникает ошибка – событие произошло, но не было спрогнозировано. Спрогнозировав наличие ячейки после её угасания – ошибка «ложная тревога». Некоторые схемы сверхкраткосрочных прогнозов [13] предлагают свои решения проблемы, связанной с учётом эволюционной составляющей, однако единого удовлетворительного решения этой проблемы до сих пор не существует.

В данном исследовании предполагается, что с введением концептуальной модели жизненного цикла конвективной ячейки появится возможность руководствоваться при прогнозе информацией, соответствующей основным знаниям о жизненном цикле конвективных ячеек. Введем предположение о времени жизни конвективных ячеек. Время жизни одиночных ячеек примем равным 1 часу (рисунок 4.6), при условии протекания их жизни без взаимодействия с другими ячейками (влияние взаимодействия ячеек между собой на ход их жизни будут рассмотрены позже). Время жизни ячеек, находящихся в мезомасштабной конвективной системе, может быть бóльшим.

Конвективная ячейка в упрощенном представлении проходит через три стадии:

1. Стадия зарождения. На стадии зарождения конвективная ячейка будет иметь возраст не более 10 минут. В ближайшее время она будет достаточно интенсивно расти. Для такой ячейки ожидается как увеличение ее диаметра, так и увеличение радиолокационной отражаемости.

2. Стадия жизни до достижения зрелости. На этой стадии ячейка не будет сильно меняться в своих размерах, а также не будет испытывать сильных изменений в значениях отражаемости.

3. Стадия распада. При достижении стадии распада после созревания в конвективной ячейке значения радиолокационной отражаемости будут достаточно быстро снижаться, будет наблюдаться ее

деградация. При этом не происходит увеличения площади ячейки – как правило, она просто диссипирует.

Все стадии в концептуальном виде представлены на рисунке 4.6:

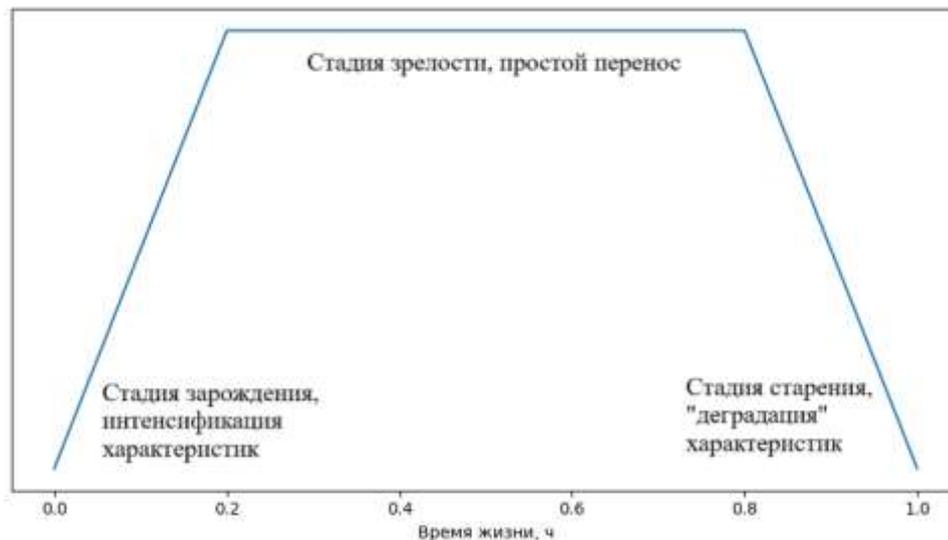


Рисунок 4.6 – Стадии жизни конвективной ячейки в концептуальном виде.

Основная идея практического применения такого представления о стадиях жизни конвективной ячейки заключается в том, что благодаря нему появляется возможность корректировать значения радиолокационной отражаемости, заключенные в ячейку между двумя заблаговременностями прогноза.

Выделив в радиолокационном обзоре конвективные ячейки методами объектного наукастинга и отслеживая их во времени, появляется информация о времени жизни КЯ.

Кроме стадий жизни конвективной ячейки с помощью методов объектного анализа можно рассматривать ее внутреннюю структуру. Последовательно применив несколько значений пороговой отражаемости, в материнском объекте выделяются вложенные объекты. Значения пороговой отражаемости могут принимать значения от 30 дБZ до 60 дБZ с шагом 5 дБZ. Пример такого выделения схематично изображен на рисунке 4.7.

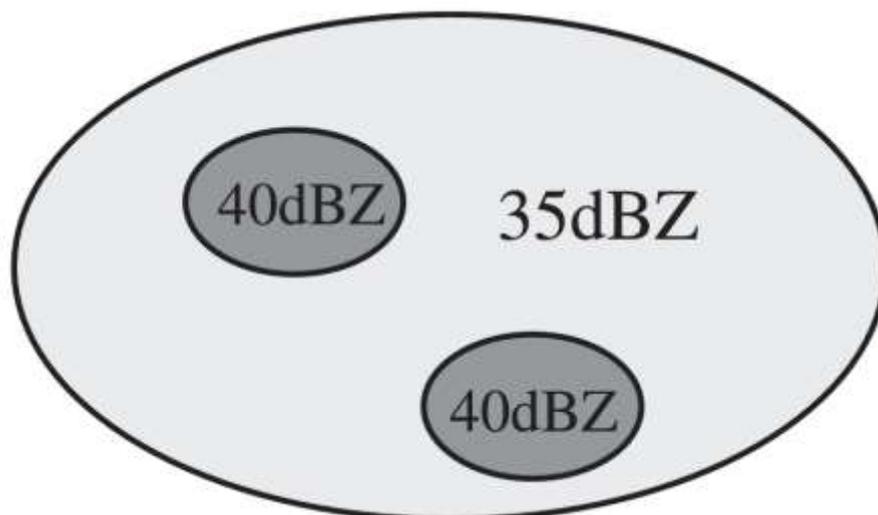


Рисунок 4.7 – применение нескольких порогов отражаемости для нахождения вложенных объектов в материнском [23].

Для различных типов облаков получаемое на программном уровне представление будет отличаться.

Если рассмотреть одноячейковые конвективные облака (рисунок 4.8 а), то в материнском объекте не может находиться двух дочерних. В одноячейковом облаке максимальное значение радиолокационной отражаемости может достигать до 50 дБZ, однако площади каждого дочернего объекта не будут сильно отличаться от материнского (или, по крайней мере, иметь соотношения, близкие к линейным). С предлагаемым шагом такой подход даст 4 уровня вложенности объектов (30 дБZ для материнского с шагом в 5 дБZ). Такое представление будет напоминать пирамидку.

Если же обратиться к мультячейковым облакам (рисунок 4.8 б), то в одном материнском объекте может одновременно содержаться множество дочерних подобъектов. Площадь каждого дочернего объекта будет существенно меньше площади материнского.

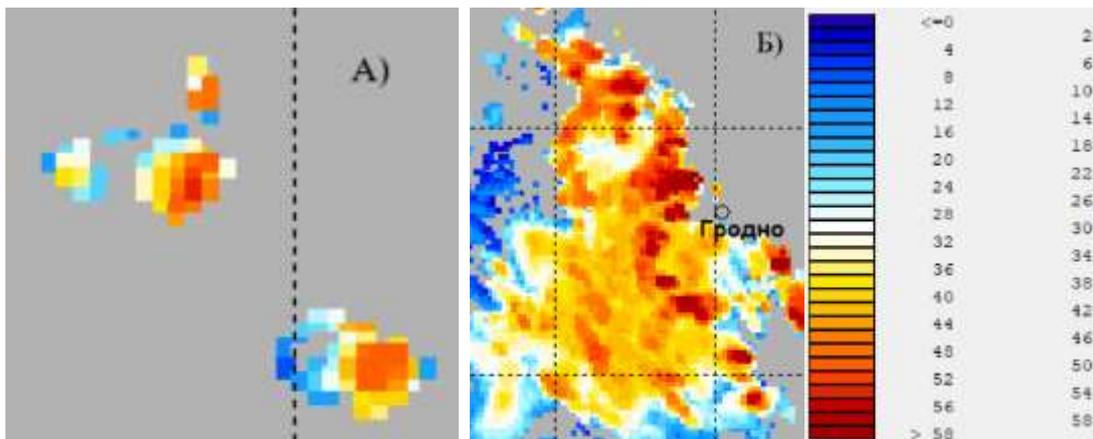


Рисунок 4.8 – Пример значений радиолокационной отражаемости в слое 2-3 км одноячейковых конвективных облаков (а), масштаба мезо- γ (характерного горизонтального размера ~ 20 км), мультячейкового облака (б), масштаба мезо- α или мезо- β (характерного горизонтального размера сотен км) [4]

Выделенные объекты с течением времени могут взаимодействовать друг с другом. Данное взаимодействие отслеживается с помощью этапа сопоставления из реализованного объектного наукастинга. Как это было описано части 3.1, два набора объектов в соседних временных отсчетах (или в соседних заблаговременностях прогноза) распределяются по парам. Объекты, для которых пары найдены не было, могут считаться либо только что инициализированными, либо состарившимися и пропавшими, либо прошедшими через слияние или разделение. В предлагаемой концептуальной модели рассматриваются два типа взаимодействия ячеек друг с другом, которые влияют на время их жизни:

1. Слияние нескольких конвективных ячеек в одну. Ожидаемым результатом является увеличение радиолокационных характеристик, увеличение ячейки в размерах и времени жизни.

2. Разделение конвективной ячейки на одну или несколько меньшие ячейки. Ожидаемым результатом является «угасание» ячеек за меньшие сроки и уменьшение размеров.

Отталкиваясь от накопленной информации о времени жизни конкретной ячейки, можно принять решение о воздействии на значения отражаемости, находящиеся в выделенном объекте.

Для увеличения и уменьшения горизонтальных размеров конвективного облака объект может быть масштабирован. Его положение и значения предлагается масштабировать с использованием обобщенного коэффициента неустойчивости атмосферы. Значение такого коэффициента неустойчивости определяется временем жизни ячейки, ее взаимодействием с соседними ячейками, а также может быть функций от различных атмосферных параметров, таких как: сходимоссть приземных потоков, конвективная неустойчивость, лапласиан приземного давления.

Дивергенция:

$$\operatorname{div}(\vec{V}_{10}) = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}, \quad (4.19)$$

где:

\vec{V}_{10} – вектор ветра на высоте 10 м, [м/с],

u – зональная компонента скорости ветра, [м/с],

v – меридиональная компонента скорости ветра, [м/с],

x – зональное приращение расстояния, [м],

y – меридиональное приращение расстояния, [м],

В качестве предиктора конвективных процессов будут выступать значения $\operatorname{div}(\vec{V}_{10}) < 0$ (рисунок 4.8). Значения дивергенции были вычислены центральными разностями второго порядка.

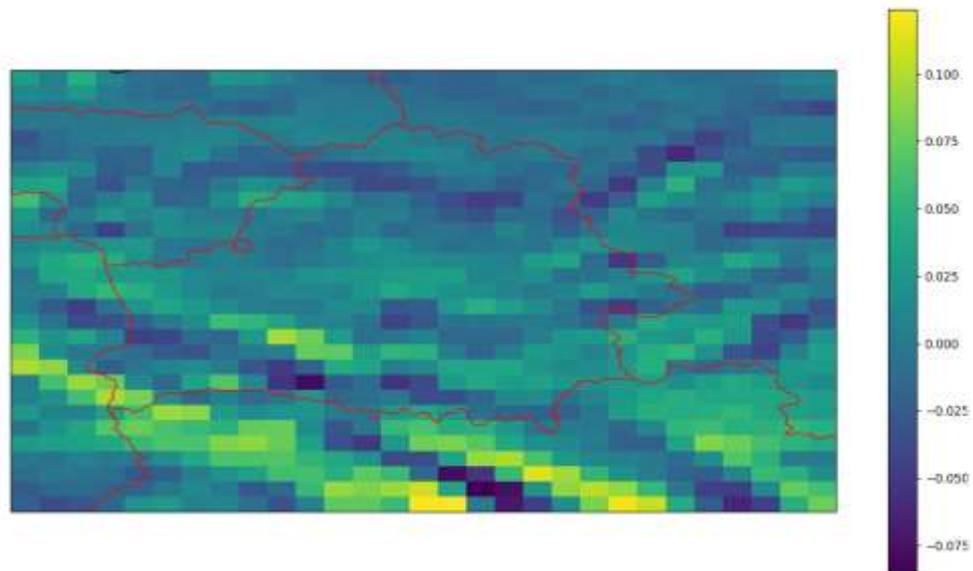


Рисунок 4.8 – Дивергенция приземных потоков над территорией Беларуси по данным модели GFS 0.25 град. 2023.08.07 09:00 UTC.

Лапласиан приземного давления $\left[\frac{\text{гПа}}{\text{м}^2} \right]$

$$\nabla^2 P = \text{div}(\text{grad } P), \quad (4.20)$$

где:

P – давление на уровне поверхности [гПа]

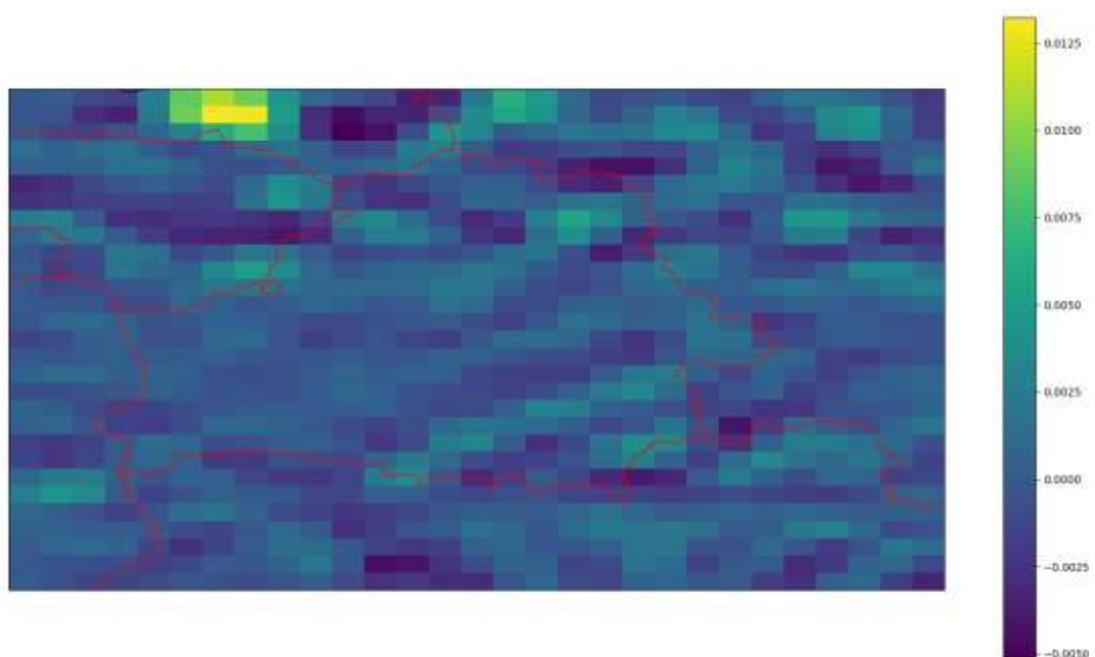


Рисунок 4.9 – Лапласиан приземного давления над территорией Белоруси по данным модели GFS 0.25 град. 2023.08.07 09:00 UTC

В качестве индекса, способного оценить потенциал к развитию конвекции и грозовой активности выбран К-index (KI).

$$KI = (T_{850} - T_{500}) + Td_{850} - (T_{700} - Td_{700}), \quad (4.21)$$

где:

- T_{850} – Температура воздуха на изобарической поверхности 850 гПа, [°C],
- T_{700} – Температура воздуха на изобарической поверхности 700 гПа, [°C],
- T_{500} – Температура воздуха на изобарической поверхности 500 гПа, [°C],
- Td_{850} – Температура точки росы на изобарической поверхности 850 гПа, [°C],
- Td_{700} – Температура точки росы на изобарической поверхности 500 гПа, [°C],

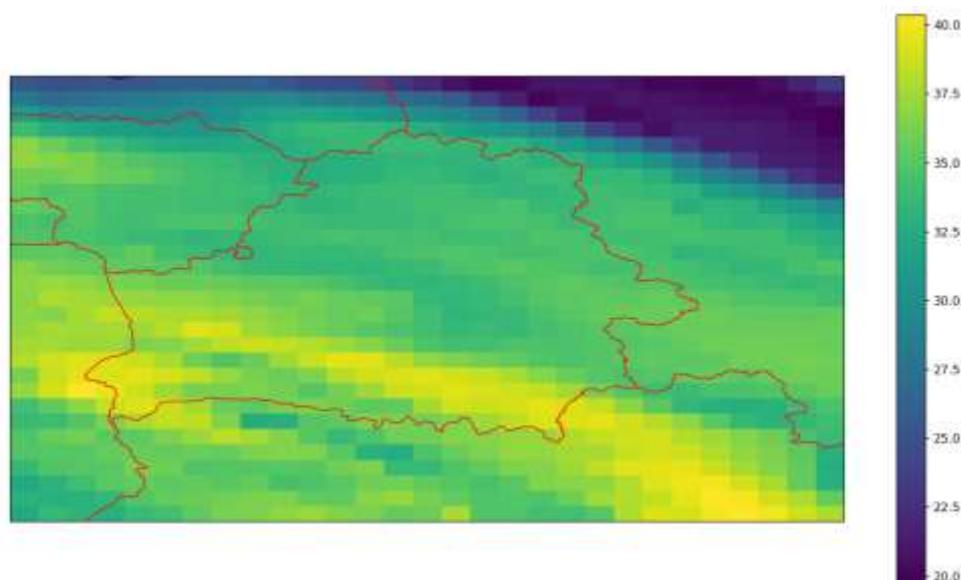


Рисунок 4.10 – Индекс KI над территорией Белоруси по данным модели GFS 0.25 град. 2023.08.07 09:00 UTC

При значениях KI менее 20 вероятность развития грозовой активности крайне мала. При значениях 20-30 единиц может ожидаться умеренная грозовая активность, возникновение отдельных грозовых очагов и конвективных ячеек. При значениях выше 35 ожидается высокая грозовая и конвективная активность.

В предлагаемой методике после расчета параметры нормируются к интервалу $[0.75;1.5]$ и осредняются. Данный интервал подобран эмпирически. Полученный коэффициент будет использоваться для масштабирования спроецированной площади конвективных ячеек, и усиления или ослабления значение радиолокационной отражаемости в поле радиоэха. В связи с этим, его значения очевидно не должны приводить к чрезмерному усилению или ослаблению за 10 минутный срок заблаговременности.

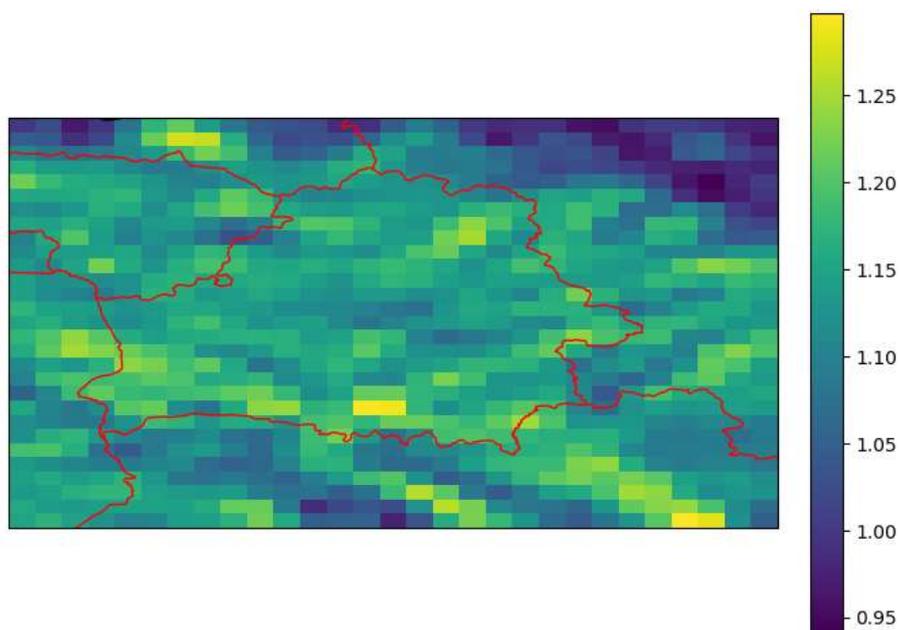


Рисунок 4.12 – Результирующее поле коэффициента неустойчивости атмосферы

Все приведенные выше величины рассчитывались по данным модели GFS (Global Forecasting System) в разрешении 0.25 географических градусов с временным разрешением один час.

Результирующее поле коэффициента неустойчивости атмосферы, представленное на рисунке 4.12 явно выделяет область линии шквалов, расположенных по линии фронта, а также область по ходу его движения (рисунок 4.13).

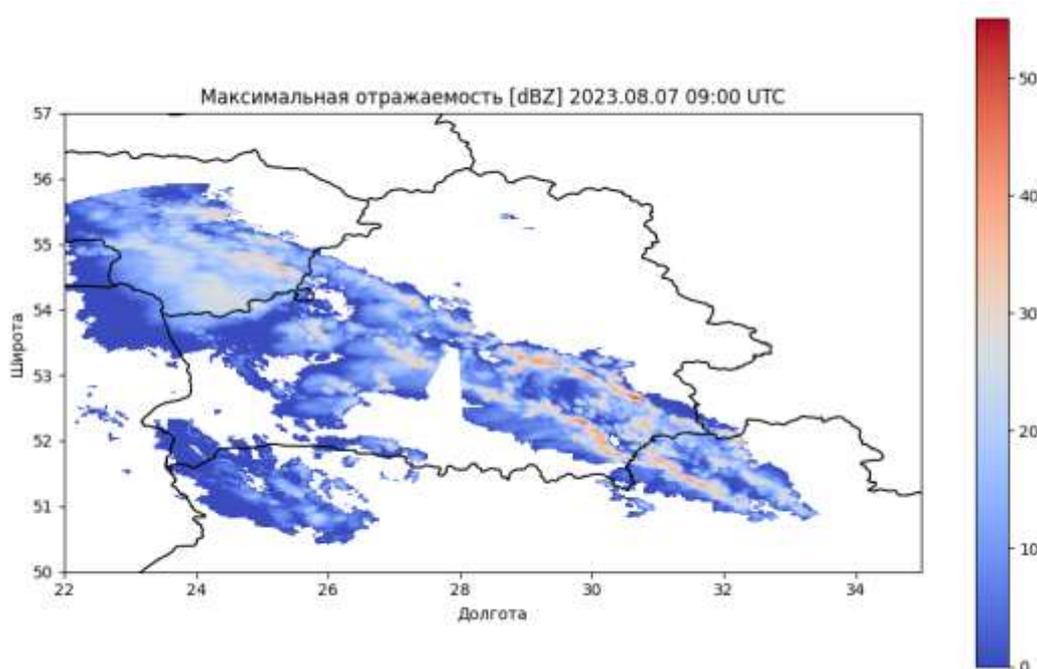


Рисунок 4.13 – Данные максимальной радиолокационной отражаемости по данным белорусской радиолокационной сети. Время наблюдений 2023.08.07 09:00 UTC.

4.4 Объединение разработанных методик

По описанным ранее методам в ходе выполнения данной работы был реализован сверхкраткосрочный прогноз на основе программно-расчетного комплекса МетеоМонитор Института Радарной Метеорологии (ООО «ИРАМ»). Система объединила в себе два концептуально противоположных подхода к прогнозированию на основе радиолокационной информации, а

также концепцию жизненного цикла конвективной ячейки и учета неустойчивости атмосферы.

В результате для непосредственно перемещения поля радиоза в системе используется адвективный перенос по данным гидродинамического моделирования GFS с разрешением 0,25 географических градусов. Данный подход также занимается переносом неконвективных облаков, что делает картину прогноза более полной. Он учитывает нелинейности поля ветра, которые принципиально отсутствуют в объектном методе, а также лишен неточности прогнозирования местоположения по временному тренду, как в объектном методе. Метод объектного наукастинга используется не в целях прогноза, а в целях анализа конвективных ячеек. Внутри каждого объекта дополнительно рассматриваются вложенные в него подобъекты с помощью увеличенного порога радиолокационной отражаемости. Используя информацию из данных сопоставления объектов во времени, удастся отслеживать возраст конвективных ячеек. Помимо этого, именно благодаря объектному методу имеется возможность получить представление о конвективной ячейке внутри программы. Тогда появляется возможность воздействовать на значения радиолокационной отражаемости, которые ее составляют. Такое воздействие осуществляется как по принципам, заложенным в концептуальную модель жизненного цикла, так и при помощи учета состояния атмосферы, в котором данная ячейка находится.

Оценка состояния неустойчивости атмосферы получается при помощи трёх предикторов:

- конвергенции приземных потоков,
- лапласиана приземного давления
- К индекса неустойчивости атмосферы.

Конвергенция приземных потоков и лапласиан приземного давления являются предикторами вынужденной конвекции. При этом стоит отметить, что данные $\nabla^2 P$ наименее выразительны среди представленных предикторов и наиболее влиятельны только при протекании крупных

синоптических процессов. На значения данного предиктора очень сильно влияют топографические особенности рассматриваемой области. Конвергенция же наоборот может быть выявлена даже в очень высоком разрешении (порядка 1 км) [41]. Индекс КІ неустойчивости атмосферы является параметром, который одинаково качественно отображает как синоптические процессы, так и явления внутримассовой конвекции, так как рассматривает температурные данные на большом количестве слоев одновременно.

Таким образом, удастся получить прогностическое поле радиоэха, в котором выделяются области с повышенной радиолокационной отражаемостью и предположительно связанные с опасными явлениями погоды. Далее, рассматривая каждый объект по отдельности, можно внести корректировки в адвективный прогноз в соответствии с полученным коэффициентом неустойчивости и возрастом конкретной конвективной ячейки.

После получения прогностического поля радиоэха к нему может быть применена процедура выявления опасных явлений погоды для удобства интерпретации пользователем.

5 Тестирование расчетной системы сверхкраткосрочного прогнозирования

В данном разделе будут описаны источники данных, используемые для работы, некоторые особенности формирования композитной радиолокационной карты, рассматриваются тестовые случаи и обосновывается их выбор для апробации. Приводятся результаты верификации.

5.1 Источники данных

В качестве исходных данных использована информация наблюдений национальной радиолокационной сети Республики Беларусь. На данный момент в Белоруси установлено пять метеорологических радиолокаторов. Метеорологические радиолокаторы, установленные в Гродно (ДМРЛ-С, Россия), Бресте (ДМРЛ-С, Россия), Минске (ДМРЛ-С, Россия), Витебске (ДМРЛ-С, Россия) и Гомеле (Meteor-600DC, Германия). Все радиолокаторы являются доплеровскими, работают на длине волны 5 см и обладают двойной поляризацией. Зоны покрытия охватывает практически всю территорию страны.

Зондирование осуществляется синхронно с периодом 10 минут. После проведения зондирования и обработки данных каждым радиолокатором, их данные могут быть объединены в композитную (стыкованную) карту явлений погоды (рисунок 5.1), радиолокационной отражаемости или других продуктов. Попутно данные приводятся к единому горизонтальному разрешению 30 географических секунд.

При использовании композитной карты протяженность общего радиолокационного поля превышает 700 км (по широте). Это позволяет в

деталях наблюдать за протеканием конвективных процессов в быстро движущихся мезомасштабных структурах.

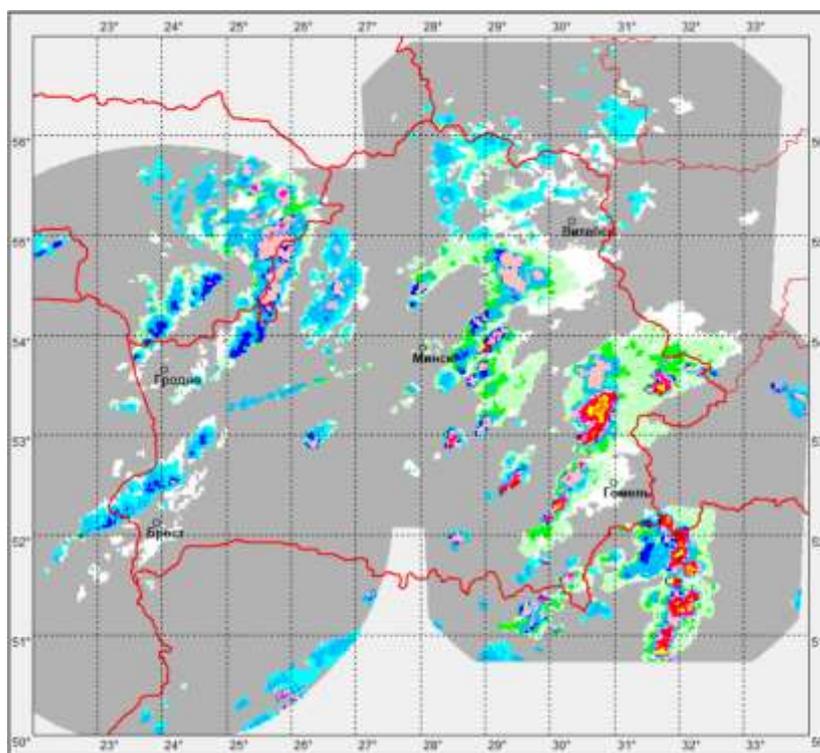


Рисунок 533.1 – Композитная карта метеоявлений национальной радиолокационной сети РБ по данным 02.07.2023 14:20:00 UTC.

Помимо радиолокационных данных национальной сети Республики Беларусь, для анализа доступны данные приграничных радиолокаторов России. Для включения в композитную карту доступны данные радиолокаторов следующих городов: Калининград (ДМРЛ-С, Россия), Смоленск (ДМРЛ-С, Россия), Псков (ДМРЛ-С, Россия) и Великие Луки (ДМРЛ-С, Россия). Благодаря этому, доступная для анализа территория значительно расширяется.

В результате в исследовании используются данные с 5 радаров.

При составлении композитной карты все данные преобразуются к горизонтальному разрешению 30 географических секунд из стандартного формата хранения данных одного радиолокатора. Если при стыковке на зонах пересечения областей покрытия появляются данные, отличающиеся

по градации явления погоды или по значению радиолокационной отражаемости, то выбираются более опасные значения (для явлений) и большие значения (для радиолокационной отражаемости). Следует руководствоваться таким правилом, повышая осведомленность пользователя о вероятном опасном явлении погоды.

Анализируются данные за период с 1 мая по 31 сентября 2023 и 2024 года.

5.2 Тестирование разработанной системы наукастинга.

Из полученного ранее архива композитных радиолокационных карт были отобраны два характерных случая, на примере которых и будет рассматриваться первичная реализация, а также верификация системы.

5.2.1 Случай прохождения холодного фронта

В качестве первого тестового случая выбрана ситуация прохождения холодного фронта по территории Республики Беларусь 7 августа 2023 года. Пример синоптической карты за 12 UTC 7 августа 2023 года приведён на рисунке 5.2.

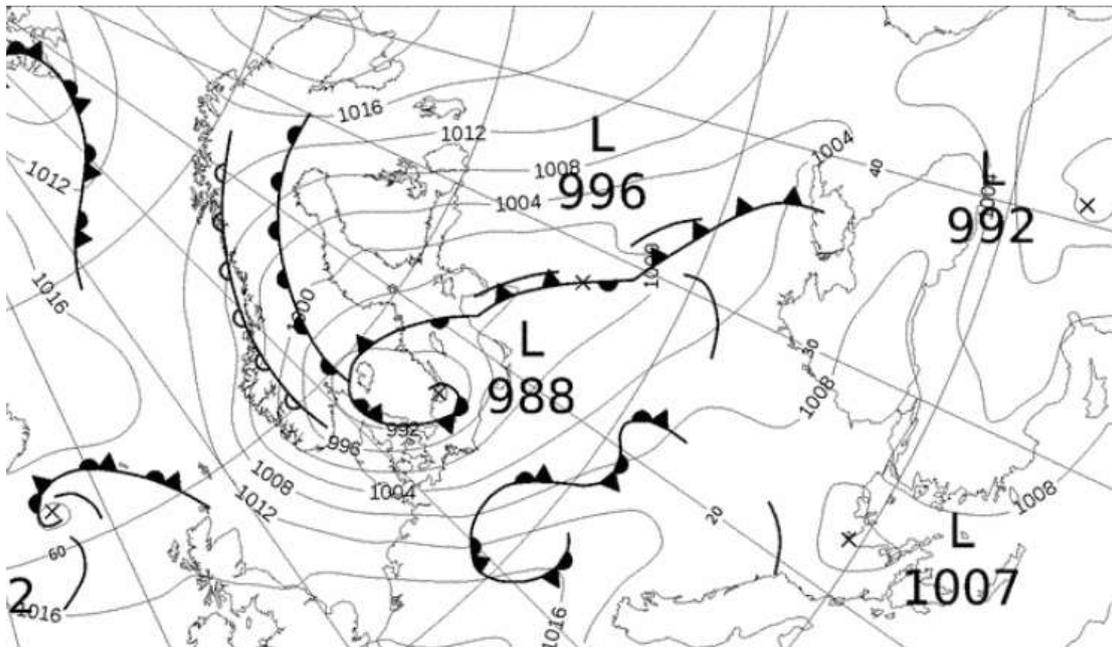


Рисунок 5.2 – Синоптическая карта за 12UTC 07.08.2023 для региона исследований (https://www.wetter3.de/archiv_ukmet_dt.html)

Синоптическая обстановка обуславливались циклоном, центр которого находился над южной частью Швеции и Балтийским морем. Прохождение данного фронта сопровождалось сильной грозовой активностью, а также ливнями, шквалистым ветром и градом. В Минске итогом непогоды стали поваленные деревья и затрудненное движение транспорта из-за большого количества выпавших осадков. Некоторые наземные метеорологические автоматические станции, расположенные в разных регионах страны, фиксировали скорость ветра, превышающую 20 м/с. В барической ложбине холодного фронта по данным радиолокаторов явно просматриваются две линии шквалов, каждая из которых формирует линейную мезомасштабную конвективную систему. Вдоль этих линий сконцентрировано наибольшее количество грозowych очагов (рисунок 5.3).

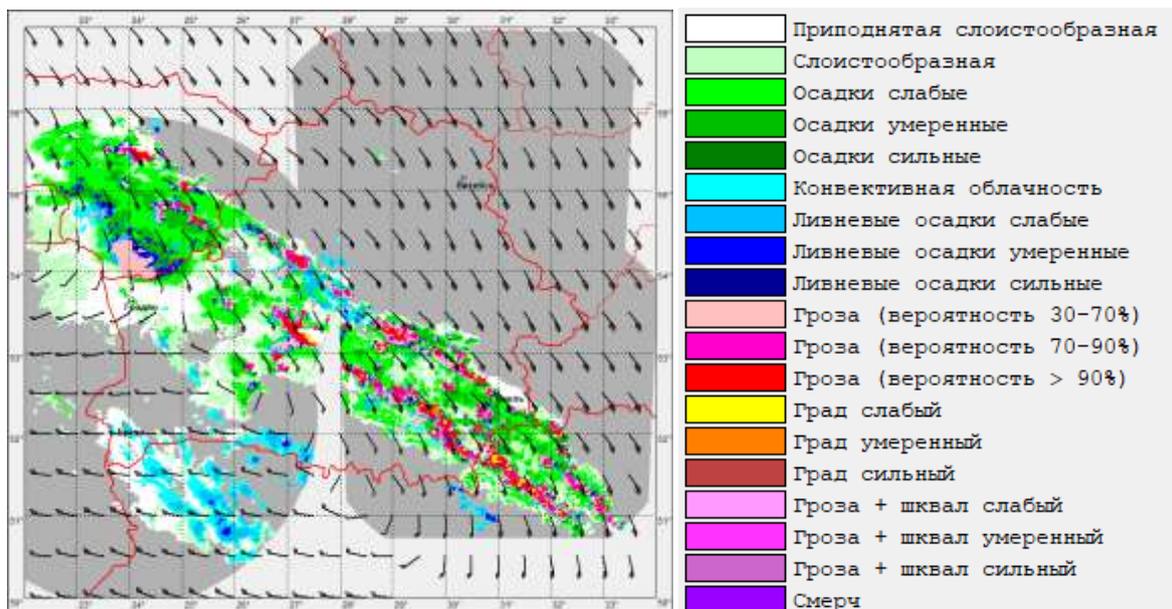
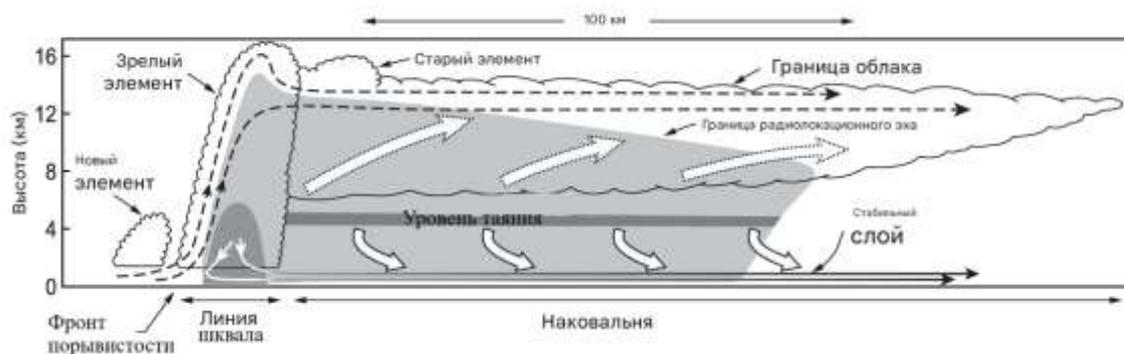


Рисунок 5.3 – Холодный фронт по наблюдениям белорусской радиолокационной сети. 2023.08.07 09:00 UTC. Данные ветра модели GFS

Фронт проходил по исследуемой территории с начала суток. К 04 UTC в поле видимости радаров появились отчетливые линейные структуры. Приблизительно в 09:00UTC грозовая активность на линиях шквалов была наиболее выраженной и практически не теряла своей интенсивности до 14:00 UTC. В это время линия фронта начала изгибаться к северу, и интенсивность протекающих конвективных процессов снизилась, а за линией фронта сформировалась обширная область умеренных осадков.



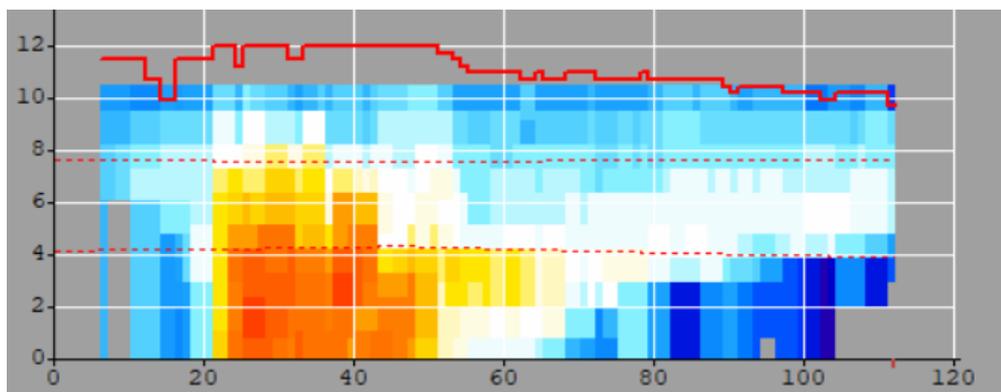


Рисунок 5.4 – Разрез мезомасштабной конвективной системы на линии холодного фронта 2023.08.07.

При этом сформированные на линии фронта мезомасштабные конвективные системы в некоторые моменты времени представляют из себя практически эталонные по своему строению экземпляры.

5.2.2 Ситуация с внутримассовой конвекцией

В качестве некоторого противопоставления второй случай, использованный для тестирования, выбран, как явление внутримассовой конвекции зарегистрированный 6 июня 2024 года в восточной части страны. Синоптическая карта представлена на рисунке 5.4.

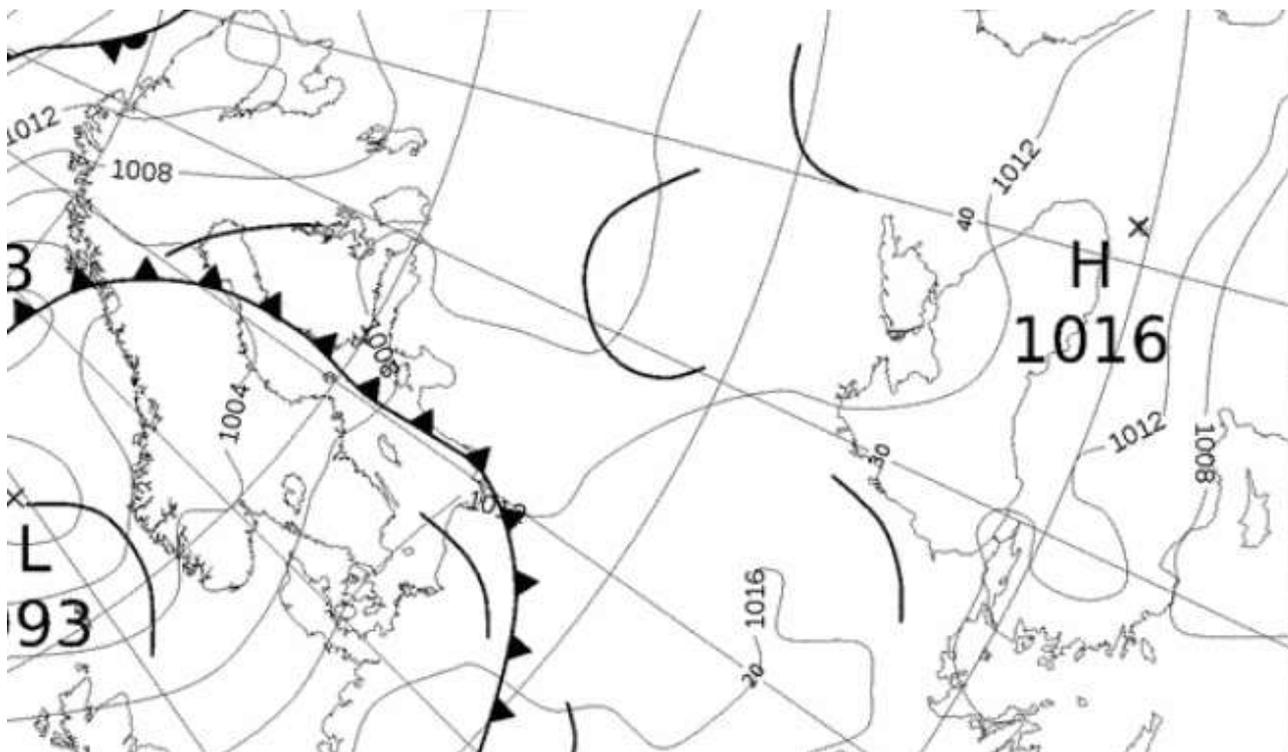


Рисунок 5.4 – Синоптическая карта за 06UTC 06.06.2024 для региона исследований (https://www.wetter3.de/archiv_ukmet_dt.html)

Явление произошло на периферии мезомасштабного вихря располагающегося над территорией Смоленской области в первой половине суток. Начиная с 8 часов UTC, наблюдался взрывной рост количества одноячейковых конвективных облаков. Некоторые из них в процессе роста сливались друг с другом, образуя квазилинейные конвективные системы. Согласно данным классификации явлений погоды, в некоторых из ячеек мог наблюдаться слабый град. По критериям грозоопасности фиксировались явления «Гроза (вероятность >90%)». В очагах конвективных ячеек радиолокационная отражаемость превышала значения 50 дБZ.

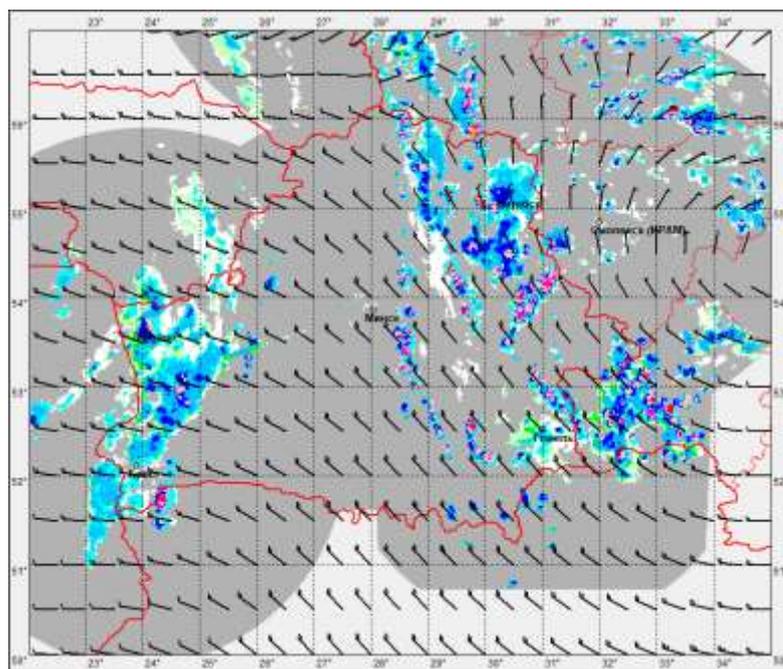


Рисунок 5.5 Явление внутримассовой конвекции, инициализированное на востоке РБ, 2024.06.06 срок 09:00 UTC. Данные ветра модели GFS 0.25 град.

5.3 Верификация

Важнейшим этапом подготовки расчетного комплекса сверхкраткосрочного прогнозирования является оценка результатов его работы. Для оценки полученных данных следует прежде всего выявить основные атрибуты успешности прогноза. Отталкиваясь от этого, можно будет прийти к методу оценки, который будет лучше отражать качество прогноза.

Выходной величиной прогноза является радиолокационная отражаемость. Использование точечных методов верификации детерминированных прогнозов в данной ситуации неуместно, поскольку это может приводить к ситуациям «двойного штрафа». Когда спрогнозированное явление незначительно сдвинуто относительно наблюдаемого при сравнении точки прогностического поля против точки верифицирующего, ситуации в некоторых точках будут считаться

случившимся событием, которое не было спрогнозировано, а в других спрогнозированными, но не случившимися. В данном исследовании при верификации радиолокационного наукастинга требуется такой верификационный метод, который будет учитывать как пространственные ошибки (относительное смещение, площадь), так и ошибки в прогнозе интенсивности.

Ошибки временного характера рассматриваться не будут. Пускай для конкретной конвективной ячейки прогноз времени наступления стадии максимального развития и является достаточно важным, он не будет более важным в сравнении с корректно отображенным радиолокационным полем. В композитном радиолокационном поле могут одновременно содержаться десятки конвективных ячеек, каждая из которых представляет определённую опасность, а значит отображение среднего состояния поля в верифицируемый момент времени имеет больший вес против отображения состояния элемента данного поля на временном отрезке.

Оптимальным методом для оценки полученных прогнозов можно считать объектно-ориентированную верификацию. Рассмотрим подробнее объектно-ориентированный подход на примере MODE (Method for Object-Based Diagnostic Evaluation). Данный метод был разработан для удовлетворения запроса на объективную верификацию прогностических полей осадков в гидродинамических моделях высокого разрешения. Однако он может быть применен для сравнения практически любых двух полей, в которых могут быть однозначно выделены два набора объектов. В данной ситуации метод будет применяться к прогностическому и контрольному полям максимальной отражаемости.

Процесс получения объектов из исходного поля состоит из применения сглаживающего фильтра (необязательно) и применения предварительно установленного порогового значения схематически представлен на рисунке 5.6.

На рисунке 5.6а представлено исходное поле метеорологической величины. В данной ситуации, рассматривается поле осадков, полученное по данным гидродинамического моделирования. Для исключения из него маленьких значений, которые создают «шум», а также снижения влияния зон с небольшой площадью и большой величиной требуется предварительная обработка.

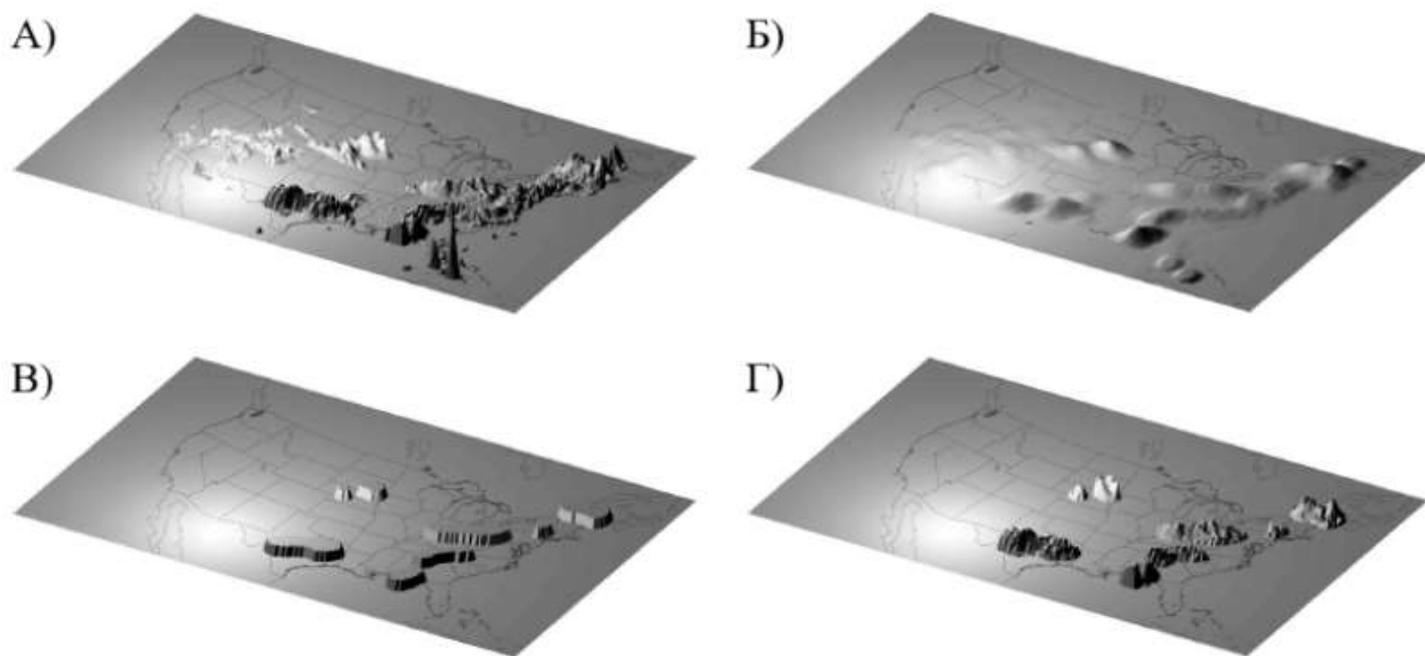


Рисунок 5.6 – Этапы выделения объектов методом MODE: а) исходное поле осадков, б) применение сглаживающего фильтра, в) маскирование объектов пороговым значением, г) итоговые объекты.

Предобработка заключается в применении сглаживающего фильтра (рисунок 5.6 Б). Сглаживающий фильтр помогает избавиться от локальных максимумов и всплесков. Большую роль играет выбор значения радиуса (R) для сглаживающего фильтра и значения порогового отсечения верифицируемой величины. От них зависит, насколько геометрически сложные объекты будут получены, а также количество этих объектов. Если сглаживающий фильтр задан слишком большим радиусом, то объекты, которые будут получены в результате порогового отсечения, будут иметь

гладкие очертания и сливаться друг с другом. Если радиус сглаживающего фильтра задан слишком маленькой величиной, объекты будут иметь резкие границы, а их количество будет выше за счет «шумов», которые не были сглажены. С помощью заданного порога происходит создание масок (рисунок 5.6 В) будущих объектов в сглаженном поле. Используя маски искомые объекты, подлежащие верификации, выделяются в исходном поле метеорологической величины (рисунок 5.6 Д). Таким образом в сформированную область объекта попадают те величины, которые изначально находились в узлах сетки.

Ниже приводится пример выделения объектов в поле максимальной радиолокационной отражаемости (рисунок 5.7) с заданным радиусом сглаживающего фильтра $R = 15$ узлов сетки (приблизительно 15 км) выполняется фильтрация.

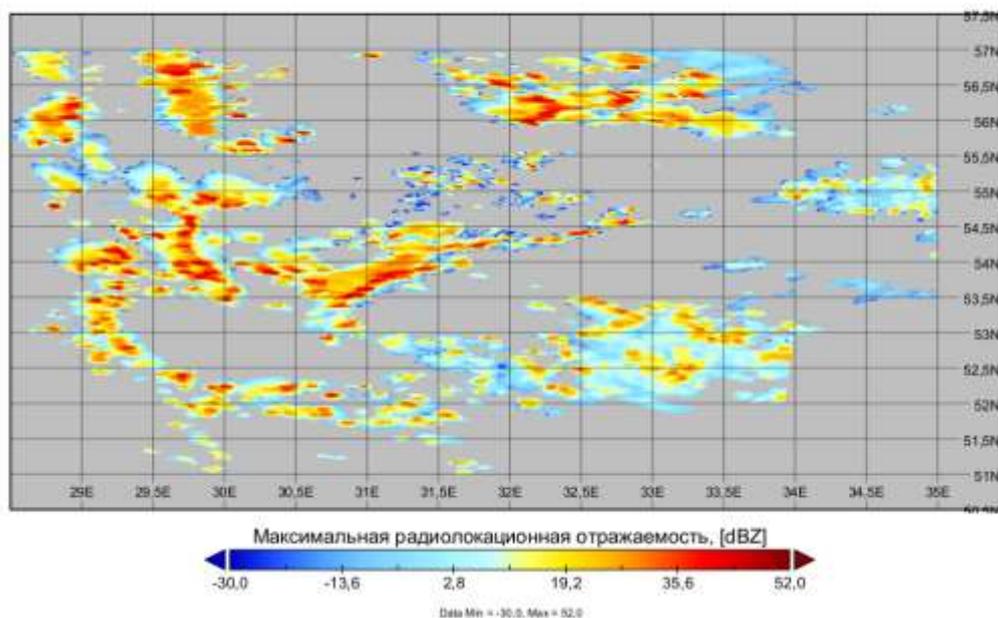


Рисунок 5.7 – Исходное поле максимальной радиолокационной отражаемости по данным наблюдений 2024.06.06 в срок 09:10 UTC.

Затем, при установленном пороге 15 дБЗ в сглаженном поле выделяются объекты. Результат показан на рисунке 5.8.

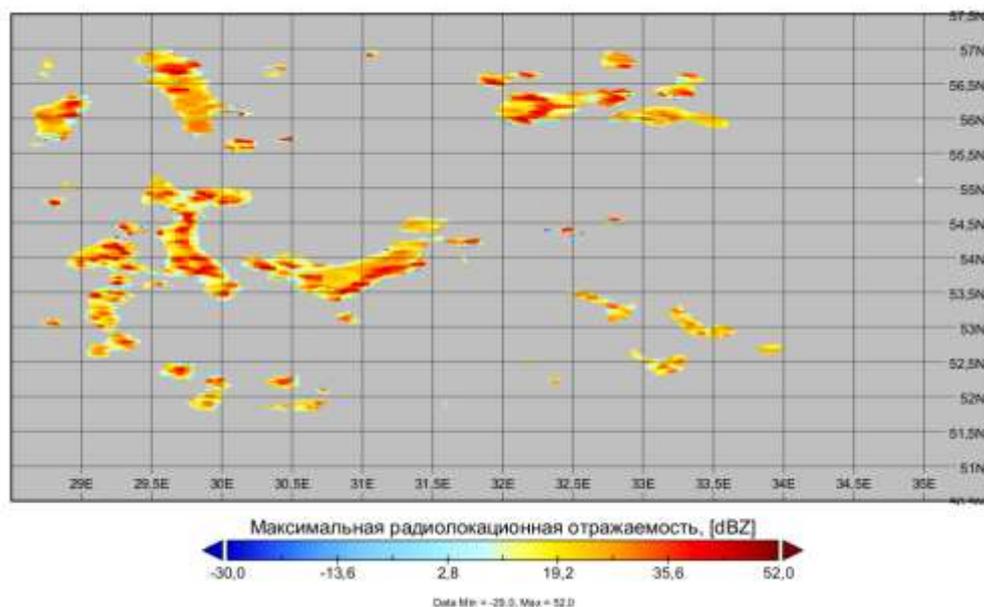


Рисунок 5.8 – Сформированные объекты в поле максимальной радиолокационной отражаемости по данным наблюдений 2024.06.06 в срок 09:10 UTC.

Таким образом, получается выделить более «аккуратные» объекты, а также отсеять слишком «шумные» места.

После выделения объектов производится расчет характерных признаков объектов, таких как:

- площади,
- среднее значение величины,
- дисперсия величины,
- положение центра массы,
- угол наклона и прочие.

Когда будут установлены пары объектов в верифицируемом и верифицирующем наборе, для них рассчитываются попарные признаки подобия, например: взаимоудаление, перекрытие площади и др.

Таким образом получается оценивать схожесть полей прогноза и наблюдения сразу по нескольким критериям. Комбинирование всех

критериев происходит с помощью функции Total Interest (суммарная важность):

$$TI_j = \frac{\sum_i I_{ij}}{\sum_i w_i c_i} \quad (5.1)$$

$$I_{ij} = F_{ij} w_i c_i \quad (5.2)$$

где:

- TI_j – Total Interest, суммарная важность для всех объектов в поле прогноза,
- I_{ij} – Interest. Значение конкретного атрибута,
- F_{ij} – функция нечеткой логики данного атрибута для пары объектов прогноз-наблюдение,
- w_i – вес данного атрибута,
- c_i – коэффициент надежности данного атрибута,
- i – номер атрибута,
- j – номер пары прогноз-наблюдение.

Для оценки успешности прогнозирования конкретного атрибута (Interest) применяются функции нечеткой логики (функции принадлежности) и заданный пользователем вес данного атрибута w_i . С их помощью реализуется возможность задать уровни, при которых прогноз будет считаться полностью оправданным или полностью неоправданным. Пример таких функций представлен на рисунке 5.9, где реальные значения атрибутов трансформируются в значения на отрезке $[0;1]$. Приведя их в указанный диапазон, появится возможность комбинировать их для расчета итогового показателя качества Total Interest.

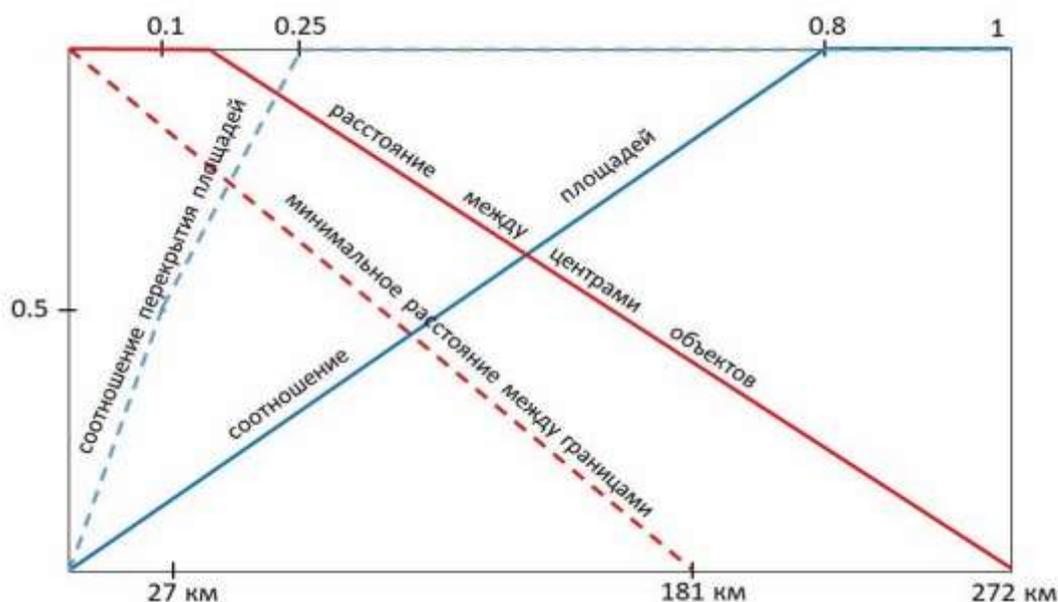


Рисунок 5.9 - Пример функций нечеткой логики для перевода разностей атрибутов в значения от 0 до 1. [45]

Для проведения непосредственно верификации будет использован программный пакет MET (Model Evaluation Tool), разработанный в DTC (Developmental Testbed Center), Боулдер, США. Данный программный пакет содержит широкий набор верификационных метрик как для верификации в точке, так и для сравнения полей метеорологических величин.

Описанным выше способом метрика MODE реализована в программном пакете MET. Для работы с этим программным пакетом данные полученных сверхкраткосрочных прогнозов и данные радиолокационных наблюдений были перекодированы в формат netCDF конвенции Climate and Forecast (CF) версии 1.12 [48].

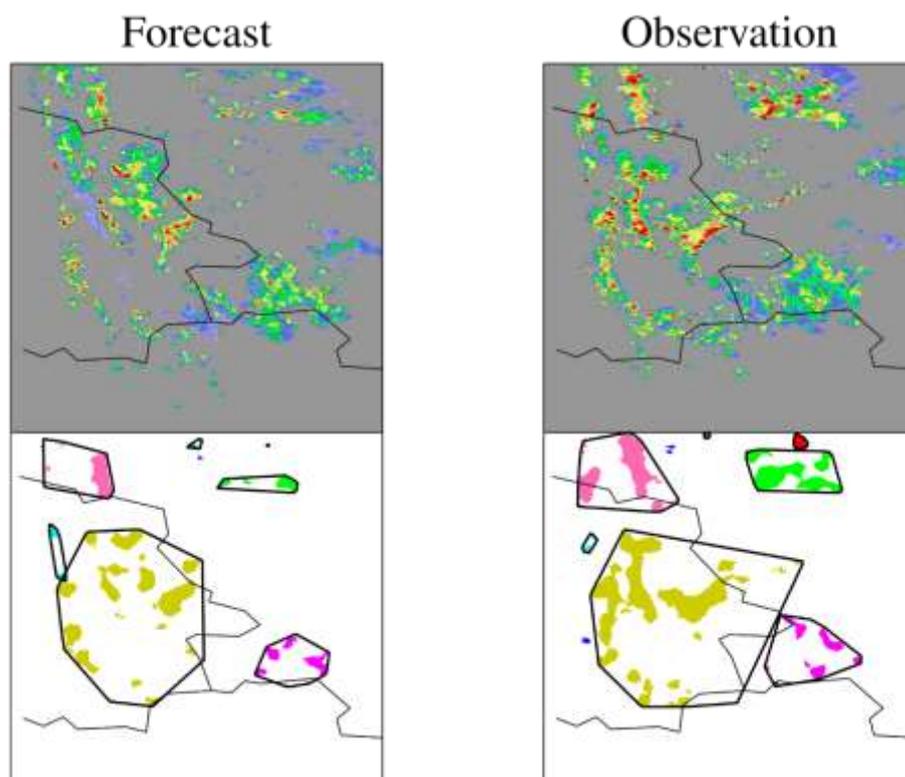


Рисунок 5.10 – Результаты выделения и сопоставления объектов в поле прогноза (слева) и наблюдений (справа) метрикой MODE верификационного пакета MET.

На рисунке 5.10 представлен результат выделения и сопоставления объектов в поле максимальной радиолокационной отражаемости. Рассматривается прогноз от 2024.06.06 срок 09:10 UTC с заблаговременностью 1 час. Ему противопоставляется поле максимальной радиолокационной отражаемости по данным измерений за 2024.06.06 срок 10:10 UTC.

Черным контуром в нижней части рисунка выделены группы объектов, объединенные алгоритмом ConvexHull (выпуклая оболочка). Применение данного алгоритма нацелено на то, чтобы сравнить общую площадь заключенную в контур с площадью объектов, которые в него попали. Таким образом вычисляется параметр пространственной сложности объектов (COMPLEXITY).

При сравнении исходного поля максимальной радиолокационной отражаемости (сверху) и масок полученных объектов (снизу) видна действенность описанных ранее алгоритмов по сглаживанию и фильтрации ненужных для верификации значений.

За прошедший час (09:10 – 10:10) наблюдаемые конвективные ячейки испытали довольно сильное развитие. Часть ячеек после интенсификации сформировала квазилинейную мезомасштабную структуру.

Заключение

В данной работе была проведена большая работа, по разработке и оценке системы сверхкраткосрочного прогнозирования на основе радиолокационных данных. Были рассмотрены теоретические аспекты формирования и протекания конвективных процессов в атмосфере, а также опасные явления погоды, которыми они сопровождаются. Поставленная в начале работы цель – разработка системы сверхкраткосрочного прогноза погоды на основе радиолокационных данных – была выполнена. Также реализованы заявленные задачи по анализу существующих методов радиолокационного наукастинга, составлению архива композитных карт для исследуемой территории и архива данных численного прогноза погоды.

Созданная система сверхкраткосрочного прогнозирования была реализована как комбинация нескольких принципиально отличающихся подходов к радиолокационному наукастингу. Применяв такой гибридный подход получилось извлечь выигрышные стороны из каждого подхода и сложить их вместе.

Работа созданной расчетной программы была протестирована на двух характерных случаях, когда наблюдались конвективные явления. Такими случаями были выбраны явление прохождения холодного фронта и явление внутримассовой конвекции.

В текущем состоянии в разработанной системе есть большое место для потенциального развития и улучшений, которые могут быть рассмотрены в последующих работах. В качестве потенциальных улучшений рассматривается возможность учета данных из новых источников, таких как разряды грозопеленгаторов, данные автоматических станций и спутниковые данные. Новые типы данные смогут значительно расширить возможности системы к восприятию процессов. При добавлении учета новых предикторов улучшится точность определения зон, которые

стоит особенно внимательно рассматривать при работе с конвективными процессами.

Помимо этого, довольно серьезной точкой роста является задача прогнозирования инициализации облачности в «чистом воздухе». В случаях, когда большое количество предикторов конвекции будет выделять некоторую область, в которой есть высокая вероятность формирования конвективной облачности либо при отсутствии каких-либо зафиксированных гидрометеоров, либо из облачности мелкой конвекции.

Список использованных источников

1. Опасные природные явления Часть III. Опасные явления погоды конвективного происхождения. Учебно-методическое пособие для вузов. Издательско-полиграфический центр Воронежского государственного университета, 2008 г.
2. Разработка сверхкраткосрочных прогнозов с использованием современных систем наблюдения за атмосферой и продукции численных моделей. Методическое пособие. 2018 г.
3. *Толмачева Н.И.* Дистанционные методы исследования мезометеорологических процессов: учебное пособие / Н.И. Толмачева; Перм. Ун--т. - Пермь, 2010. – 200 с.
4. *Алексеева А.А.* Метод прогноза сильных шквалов. Метеорология и гидрология, 2014 №9, -с. 5-15, 2014.
5. *Алексеева А.А.* Оценка максимальной скорости конвективного потока, характеристик ливневых осадков и града по радиолокационной информации. / Алексеева А.А., Песков Б.Е. // Метеорология и гидрология - с. 135-148, 2016.
6. *Алексеева А.А.* Способы оценки максимальной конвективной скорости в диагнозе и прогнозе опасных конвективных явлений погоды, Гидрометеорологические исследования и прогнозы, 2020 № 2, -с. 6-22, 2020.
7. *Бочарников Н.В., Брылев Г.Б., Кузнецова Л.И., Линев А.Г., Лялюшкин А.С., Оленев В.А., Паркинен Т.В., Солонин А.С., Устинов В.К., Фролов В.И., Четверикова Е.С., Якимайнен Н.А.* Автоматизированные метеорологические радиолокационные комплексы «Метеоячейка». СПб.: Гидрометиздат, 2007 г. – 236 с.
8. Методические указания по использованию информации доплеровского метеорологического радиолокатора ДМРЛ-С в синоптической практике. Третья редакция. ФГБУ «Центральная аэрологическая обсерватория», ФГБУ «Гидрометцентр России», ФГБУ

«Главный авиационный метеорологический центр Росгидромета», Москва, 2019 г.

9. Guidelines for Nowcasting Techniques, 2017 edition, WMO-No. 1198.

10. Прохареня М.И. Применение метода комплексного диагноза и прогноза мощных конвективных структур над территорией Республики Беларусь для летнего периода 2018 года / Прохареня М.И., Спрыгин А.А. // Природные ресурсы, 1/2019 -с 97-108, 2019.

11. Спрыгин А.А. Диагноз и прогноз конвективных структур с опасными явлениями по данным моделирования и дистанционного зондирования над территорией Беларуси и Центральной России. / Спрыгин А.А., Прохареня М.И. // Гидрометеорологические исследования и прогнозы, 3/2018, -с 6-22, 2018.

12. Guili Feng, Xianfeng Hu Analysis of lightning characteristics un a thunderstorm with gust, The second international conference on mining engineering and metallurgical technology, 2011.

13. STEPS Seed A. W. A Dynamic and Spatial Scaling Approach to Advection Forecasting. Journal of Applied Meteorology, Vol. 42, 2003. – С. 381-388.

14. STEPS Neill E. Bowler. Seed STEPS: A Probabilistic precipitation scheme which merges an extrapolation nowcast with downscaled NWP. / Neill E. Bowler, Clive E. Pierce, Alan W. // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, vol. 132, pp. 2127-2155, 2006.

15. Муравьев А.В. Верификация детерминистского и вероятностного радиолокационного наукастинга осадков в теплый и холодный периоды года на Европейской территории России. / Муравьев А.В., Д.Б. Киктев, Смирнов А.В., Павлюк Ю.Б., Серебрянник Н.И. // Гидрометеорологические исследования и прогнозы №1, 2023. – с. 21-66.

16. Ривин Г.С. Система COSMO-Ru негидростатического краткосрочного прогноза погоды Гидрометцентра России: второй этап

реализации. / Ривин Г.С., Розинкина И.А., Вильфанд Р.М. // Метеорология и гидрология. 2015. № 6. – с. 58-71.

17. *Laroche S.* A variational analysis method for retrieval of three-dimensional wind field from single-Doppler radar data. / Laroche S., Zawadski I. // *Journal of Atmospheric Science*, vol. 51, 1994, 2664-2682.

18. *Urs Germann* Scale-Dependence of the predictability of precipitation from continental radar images. Part I: Description of the methodology. / Urs Germann, Isztar Zawadski // *Monthly weather review*, vol. 130, 2002, -с. 2859-2873.

19. *Urs Germann* Scale-Dependence of the predictability of precipitation from continental radar images. Part II: Probability Forecasts. / Urs Germann, Isztar Zawadski // *Journal of Applied Meteorology* vol. 43. 2004. -с 74-89

20. *Turner B.J.* Predictability of precipitation from continental radar images. Part III: Operational Nowcasting Implementation (MAPLE). / *Turner B.J., Zawadski I.* // *Journal of Applied Meteorology*, vol. 43. 2004. - с. 231-248.

21. *L. Li* Nowcasting of Motion and growth of precipitation with radar over a complex orography. // L. Li, W. Schmid, J. Joss // *Journal of applied meteorology*, vol. 34, 1994, - с 1286-1300.

22. *Dixon M.* TITAN: Thunderstorm Identification, Tracking, Analysis and Nowcasting – A Radar-based Methodology. / Dixon M., Weiner G. // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol. 10 -с. 785-797, 1993.

23. *Lei Han* 3D Convective Storm Identification, Tracking, and Forecasting – An Enhanced TITAN Algorithm. / Lei Han, Shengxue Fu, Lifeng Zhao, Yongguang Zheng, Hongqiong Wang, Yinjing Lin // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol. 26, 2009. – C. 719-732.

24. *Bernhard Korte, Jens Vygen* Combinatorial Optimization Theory and Algorithms, Fifth edition, Algorithms and Combinatorics, Vol. 21, Springer, 2011. – C. 659.

25. *J.T. Johnson.* The storm cell identification and tracking algorithm: an enhanced WSR-88D Algorithm / J.T. Johnson, Pamela L. MacKeen, Arthur

Witt, E. DeWayne Mitchell, Gregory J. Stumph, Michael D. Eltis, Kevin W. Thomas // *Weather and forecasting*, vol. 13, -с 263-276, 1998.

26. *Alessandro M. Hearing, Urs Germann, Marco Boscacci, Stephane Senesi* Operational nowcasting of thunderstorms in the Alps during the MAP D-PHASE, ERAD 2008 – The Fifth European conference on radar in meteorology and hydrology, 2008.

27. *Zhe Feng* Deep Convection Initiation, Growth, and Environments in the Complex Terrain of Central Argentina during CACTI. / Zhe Feng, Adam Varble, Joseph Hardin, James Marquis, Alexis Hunzinger, Zhixiao Zhang, Mandana Thieman // *Monthly weather review*, vol. 150, -с 1135-1155, 2022.

28. *Лившиц Е.М.* Разделение конвективных штормов. Часть I: Динамика и кинематика. // Лившиц Е.М., Петров В.И // *Гидрометеорология и экология* № 65, 2021. – с. 648-670.

29. *Лившиц Е.М.* Разделение конвективных штормов. Часть II: Организация мезомасштабной структуры грозоградового процесса. / Лившиц Е.М., Петров В.И. // *Гидрометеорология и экология* № 66, 2022. – с. 20-41.

30. *C. Mueller* NCAR Auto-Nowcast system. / C. Mueller, T. Saxen, R. Roberts, J. Wilson, T. Betancourt, S. Dettling, N. Oien, J. Yee // *Weather and forecasting*, vol. 18, -с 545-561, 2003.

31. *James W. Wilson* Nowcasts of thunderstorm initiation and evolution. / James W. Wilson, Cynthia K. Mueller // *American Meteorological Society*, -с 113-131, 1993.

32. *Cynthia K. Mueller* The utility of sounding and mesonet data to nowcast thunderstorm initiation. / Cynthia K. Mueller, James W. Wilson, N. Andrew Crook // *Weather and forecasting*, vol. 8. -с 132-146, 1993.

33. *Paul M. James* NowCastMIX: Automatic Integrated Warnings for Severe Convection on Nowcasting Time Scales at the German Weather Service. / Paul M. James, Bernhard K. Reichert, Dirk Heizenreder // *Weather and Forecasting*, Vol. 33, – С. 1413-1433, 2018.

34. *Lang P.* Cell tracking and warning indicators derived from operational radar products. Proceeding of the 30th International Conference on Radar Meteorology (Munich). Boston, MA: American Meteorological Society, - с. 245-247.

35. *Nuria Devanthery Arasa* Development of an object oriented thunderstorm nowcasting system for Barcelona airport. Diploma thesis for degree Master in Aerospace Science and Technology, Universitat Politecnica de Catalunya, 2010.

36. *Русин И.Н. Тараканов Г.Г.* Сверхкраткосрочные прогнозы погоды, СПб, 1996

37. Quantitative precipitation forecasts based on radar observations: principles, algorithms and operational systems. Koninklijk Meteorologisch Instituut van Belgie Institut Royal Meteorologique de Belgique, 2008.

38. *J.S. Marshall* The distribution of raindrops with size. / J.S. Marshall, W. McK. Palmer // Journal of Meteorology, vol. 5, 1948, -с 165-166.

39. Руководство по производству наблюдений и применению информации с неавтоматизированных радиолокаторов МРЛ-1, МРЛ-2, МРЛ-5. РД 52.04.320-91. Санкт-Петербург, Гидрометеиздат, 1993. - с 356.

40. *T. Bazlova, N. Bocharnikov, A. Solonin* Aviation operational nowcasting systems, Third European Nowcasting Conference, 2019.

41. *Тюриков И.А.* Моделирование мезомасштабной конвективной системы в высоком разрешении. / Тюриков И.А., Анискина О.Г. //

42. *Christopher Davis.* Object-Based Verification of Precipitation Forecasts. Part I: Methodology and Application to mesoscale Rain Areas. / Christopher Davis, Barbara Brown, Randy Bullock // Monthly weather review, vol. 134, -с. 1772-1784, 2006.

43. *Christopher Davis Bullock* Object-Based Verification of Precipitation Forecasts. Part II: Application to Convective Rain System. / Christopher Davis, Barbara Brown, Randy Bullock // Monthly weather review, vol. 134, -с. 1785-1795, 2006.

44. *Киктев Д.Б., Муравьев А.В., Бундель А.Ю.* Методические рекомендации по верификации метеорологических прогнозов. – М. Ж Типография АМА ПРЕСС, 2021. -94 с.

45. *Бундель А.Ю.* Обзор методов пространственной верификации и их применение для ансамблевых прогнозов. / Бундель А.Ю., Муравьев А.В., Ольховая Е.Д. // Гидрометеорологические исследования и прогнозы, 2021, №4 (382), С. 30-49.

46. *Кисельникова В.З.* Объектно-ориентированная оценка качества прогноза осадков. Метеорология и гидрология, 2013, №4, -с 5-11.

47. Model Evaluation Tool - сайт
[<https://metplus.readthedocs.io/projects/met/en/latest/index.html>]

48. Eaton, B., Gregory, J., Drach, B., Taylor, K., Hankin, S., et al. (2024). NetCDF Climate and Forecast (CF) Metadata Conventions (1.12). CF Community. [<https://doi.org/10.5281/zenodo.14275599>].