

**Перспективы создания сети многофункциональных мобильных комплексов нового поколения с целью мониторинга опасных метеорологических явлений**

Я.А. Сурков

*Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный технический университет», 644050, г. Омск, пр. Мира, д. 11*

*E-mail: yarkowchase@yandex.ru*

*В работе рассматриваются основные перспективные технологии, которые могут быть полезны при создании многофункциональных метеорологических мобильных комплексов, работающих в режиме реального времени. Подчеркивается, что такие явления погоды, как торнадо, градобития, шквалы и т.п., потенциально представляют серьезную опасность, в том числе и для России. В ходе проведенного обзора публикаций было установлено, что существующие на текущий момент разработки в данной области не в полной мере могут решать задачи детального всестороннего метеорологического мониторинга из-за своей достаточно узкой направленности. Перспективным на наш взгляд является создание многофункциональной системы, состоящей из подвижных комплексов, которая бы, потенциально, включала в себя различные каналы получения метеорологической информации, главным из которых является сеть радарных установок на базе фазированных антенных решеток. В работе предлагается обобщенная концепция создания подобного метеорологического комплекса.*

*Ключевые слова: метеорология, фазированная антенная решетка, погодный радар, опасная погода, суперячейка, конвективный шторм, мобильный комплекс*

**Prospects of creating a network of multifunctional mobile complexes of a new generation for monitoring severe weather phenomena**

Ya.A. Surkov

*Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Omsk State Technical University», 11 Mira av., Omsk, 644050, Russia.*

*E-mail: yarkowchase@yandex.ru*

*The paper discusses the main perspective technologies that can be useful for the purpose of constructing of multifunctional meteorological mobile complexes operating in real time. It is emphasized that such weather phenomena as tornadoes, hailstorms, squalls, etc., potentially are a serious danger, including for Russia. In the course of the review of publications, it was established that the current developments in this area could not fully solve the problems of detailed comprehensive meteorological monitoring due to their rather narrow focus. In our opinion, it is promising to create a multifunctional system consisting of mobile complexes, which would potentially include various channels for obtaining meteorological information, the main of which is a network of radar installations based on phased antenna arrays. The paper proposes a generalized concept of creating such a meteorological complex.*

*Keywords: meteorology, phased array antenna, weather radar, severe weather, supercell, convective storm, mobile complex*

**Введение**

Необходимость точного и оперативного прогнозирования опасных явлений погоды, в том числе конвективного характера, в последние десятилетия приобрела особую

актуальность. С каждым годом неуклонно растет количество барических образований с низким давлением в центре – циклонов, что, в свою очередь, влечет за собой более частый генезис опасных явлений: сильные осадки, ветры штормовых и ураганских значений, мощные грозы, градобития, конвективные шквалы, торнадо, пыльные бури, бураны и т.д. Данные явления наносят значительный урон сельскому хозяйству и городской инфраструктуре, влекут за собой человеческие жертвы [1-3].

Если резкие усиления ветра, происходящие вследствие увеличения барического градиента и образования штормовых зон на стыках циклонов и антициклонов можно спрогнозировать достаточно точно, то такие явления, как торнадо, градобития и конвективные шквалы прогнозировать намного сложнее. В особенности это касается гроз, происходящих в зимнее время года, а также торнадо, образующихся в условиях слабой конвективной неустойчивости (CAPE). С помощью стационарных радаров и спутников зафиксировать грозы, генерирующие такие вихри, достаточно трудно [4-6].

Торнадо – мелкомасштабный атмосферный вихрь, возникающий, как правило, в мощных кучево-дождевых облаках, называемых суперячейками. Данный тип гроз содержит мощный вращающийся (циклонически и антициклонически) восходящий поток, называемый мезоциклоном (mesocyclone). Кроме того, существуют так называемые немезоциклонные – мизоциклонные (misocyclonic) торнадо, которые возникают во время сильных гроз над сушей и водной поверхностью (landspouts & waterspouts) [7-9]. Например, такие торнадо наблюдались в следующих городах: Москва, Благовещенск, Нефтеюганск, Колпино (Санкт-Петербург). Природа данных явлений до сих пор до конца не изучена, существуют лишь некоторые экспериментальные индексы, которые способны с недостаточной точностью предсказать вероятность возникновения таких явлений [10].

Торнадо встречаются на всех континентах мира, за исключением Антарктиды, и представляют особую опасность [11-19]. В обществе бытует мнение, что на евразийском континенте угроза торнадо несущественна. Это отнюдь не так. Известно множество случаев («вспышек») торнадо, в особенности значительных (EF-2+) на данной территории, например: 09.06.1984 – вспышка торнадо в ЦФО (особенно сильным оказался торнадо, прошедший по окраине Иваново – EF-5 по улучшенной шкале Фуджиты – англ. Enhanced Fujita Scale) [20]; 03.06.2017 – вспышка торнадо в УФО; наиболее сильным оказался торнадо, прошедший через населенный пункт Висим, Свердловская область, EF-3); 18.06.2017 – очередная вспышка торнадо в УФО; наиболее сильным оказался торнадо, прошедший в Курганской области, н.п. Малое Песьяново (EF-4) и другие [21-23].

Град – вид атмосферных осадков, возникающий в мощных кучево-дождевых облаках, механизм образования которых основан на сильных восходящих потоках в облаке, сдвиге ветра на высоте 0-6 км над уровнем земли (DLS – Deep Layer Shear) и относительной спиральности конвективного шторма (SRH – Storm Relative Helicity) [24-28]. Капли дождя выносятся восходящими потоками в наковальню конвективной ячейки и проходят цикл замерзания/таяние, и наоборот, до того момента, пока сформировавшаяся градина может поддерживаться восходящими потоками [29-30]. Наиболее подвержены градобитиям горные зоны (Северо-Кавказский ФО), где уровень нулевой изотермы находится ниже, чем на равнинах и плоскогорьях [31], а также большая часть Восточно-Европейской и Западно-Сибирской равнин, где барические образования обычно достигают стадии максимального развития (Беларусь, Северо-Западный ФО, ЦФО, центральные и северные районы ПФО, УФО, Западная Сибирь, континентальная часть ДФО).

Конвективные шквалы – мощные усиления ветра, вызываемые нисходящими потоками сильных гроз, быстро распространяющиеся во все стороны после удара о

землю. Чаще всего такие явления называют микропрорывами (downburst), которые могут быть как влажными, так и сухими [32-35]. Они формируются при прохождении осадков (дождя или града) через сухой воздух. Таким образом, капли дождя начинают испаряться, а градины таять и испаряться. Этот процесс происходит со значительным поглощением тепла, поэтому окружающий воздух интенсивно охлаждается. Плотность холодного воздуха выше плотности тёплого, поэтому охладившийся воздух в грозовой ячейке резко падает на землю. Интенсивность этого падения, следовательно, и скорость ветра, напрямую зависят от скорости охлаждения воздуха. Микропрорывы представляют особую опасность для авиации, наносят значительный ущерб городской инфраструктуре, который может быть схож с ущербом, наносимым торнадо. Подразделяются конвективные шквалы на микробарсты (microbursts) и макробарсты (macrobursts). Микробарсты длятся в среднем 3-5 минут на наблюдаемой площади в 4 км; макробарсты длятся значительно дольше и занимают более обширную площадь. Сухие микропрорывы могут вызывать хабубы (haboob) – пыльные бури конвективного характера, имеющие вид рулона. Отдельно стоит выделить деречо, что представляет собой систему конвективных шквалов (микропрорывов), наблюдающихся на значительных территориях (не менее 400 км) и обладающих значительной разрушительной силой (скорость ветра может достигать 50-60 м/с и более) [36-39].

По итогам проведенного анализа научно-технических публикаций в указанной сфере, было установлено, что мобильные метеорологические комплексы являются эффективным подходом для своевременного обнаружения перечисленных опасных явлений. Поэтому мы видим решение рассматриваемой проблемы в создании сети мобильных метеорологических комплексов, элементы которых будут выполнять комбинированные задачи по выявлению возможных и реальных очагов опасных конвективных явлений.

### **История создания радиолокационных станций и их применение в метеорологических исследованиях**

В феврале 1935 года шотландский физик Роберт Уотсон-Уатт успешно продемонстрировал свое новое изобретение, позволяющее обнаружить самолет на расстоянии. Новинка получила название радар (англ. Radio Detection and Ranging), что означает радиообнаружение и измерение дальности. Данная поистине революционная технология независимо развивалась в ряде стран в середине 1930-х годов. К началу 2-й Мировой войны Великобритания, США, Германия и СССР имели на вооружении функционирующие радиолокационные системы, применявшиеся в ВВС, ВМС и сухопутных силах данных стран [40]. Отдельно стоит отметить британскую радиолокационную систему ChainHome, сыгравшую решающую роль в битве за Британию [41].

Первые радиолокационные станции для наблюдения за погодой начали появляться незадолго до начала Второй Мировой войны, но более массово такие станции стали внедрять в 1944 году, когда на бомбардировщики B-25 Mitchell 2-й эскадрильи метеорологической разведки ВВС США были установлены радиостанции AN/APQ13 [42]. Изначально предполагалось, что данная станция станет прекрасным помощником в обнаружении военных целей, но по ходу дела выяснилось, что ее можно применять и для метеорологических исследований.

Первоначально стоимость и сложность этих систем ограничивали их оперативное использование государственными учреждениями, в том числе военными и гражданскими метеослужбами. Однако возросшая в 1960-х годах доступность твердотельной электроники сделала практичным производство радиолокаторов с целью метеорологических наблюдений. К 1969 году несколько станций телевизионного

вещания на Среднем Западе США установили радары вдоль юго-восточного побережья для оповещения местного населения. Тенденция расширилась в 1970-х годах, когда радары стали более функциональными и доступными [43]. В конце 1980-х и начале 1990-х министерства торговли, обороны и транспорта США совместно развернули два высокотехнологичных доплеровских радиолокатора нового поколения (NEXRAD) WSR-88D (Weather Surveillance Radar-1988). На сегодняшний день радары объединены в сеть и обеспечивают покрытие почти всей прилегающей территории Соединенных Штатов, в том числе Аляски и Гавайских островов, предоставляют информацию о структурах конвективных штормов и других атмосферных явлениях [44-46].

### **Основные принципы построения метеорологических комплексов и сетей**

Для комплексного исследования метеорологических явлений целесообразно использовать длины волн различных диапазонов. Электромагнитные волны диапазона S (8-15 см) лучше всего подходят для мониторинга суровых погодных условий (торнадо, градобития, конвективные шквалы). Радиолокаторы с диапазонами C (4-8 см) и X (2,5-4 см) имеют более высокую степень чувствительности, нежели диапазон S [47-49]. Однако более крупные частицы осадков (дождь, снег, град, снежные зерна) соизмеримы или даже могут превышать значения длин волн данных диапазонов, следовательно, эффекты резонансного рассеяния усложняют физическую интерпретацию сигналов, отраженных от гидрометеоров. Диапазоны Ka (0,75-1,2 см) и W (0,1-0,75 см) соответственно часто применяются для наблюдений за метелями, лесными пожарами, пыльными бурями (в том числе конвективного характера), переохлажденным дождем, крупой, изморосью, туманом, а также частицами облаков [50].

В идеале метеорологические радары должны предоставлять информацию об облачности и осадках на максимально возможной дальности с наилучшим пространственным разрешением и максимальной частотой дискретизации. Однако каждая полоса частот характеризуется своими физическими и техническими преимуществами и ограничениями, которые требуют принятия компромиссного решения. Особо важными, взаимосвязанными характеристиками являются транспортабельность, угловое разрешение и затухание. Затухание зависит от формы и количества гидрометеоров, их концентрации, состава и размера по отношению к длине волны – в одних и тех же условиях повышенное затухание наблюдается у более коротких волн, что ограничивает эффективную дальность наблюдений [51-52]. Угловое разрешение увеличивается с повышением частоты и размера апертуры антенны радара. Это напрямую влияет на транспортабельность и пространственное разрешение. Например, радарам S-диапазона требуется большая апертура по сравнению с радаром C- и X-диапазонов для создания максимально узкого луча, что затрудняет транспортировку. Радары, работающие в диапазонах C и X и на более коротких волнах, могут иметь меньшую апертуру из-за меньшей длины волны, что позволяет им работать на мобильных платформах для повышения пространственного разрешения и ограничения влияния, оказываемого затуханием [53]. При этом короткие волны обеспечивают высокое угловое разрешение, подходящее для изучения атмосферных явлений, происходящих в мелких пространственных масштабах.

Радиолокационные сети применяются для наблюдения за погодой почти 80 лет. Радары X-, C- и S-диапазона в той или иной степени использовались в действующих метеорологических радиолокационных сетях того времени и продолжают использоваться по сей день [54-56]. В некоторых случаях для обслуживания многоцелевых задач развертывались смешанные сети радаров или несколько сетей, состоящих из радаров одного диапазона [57-58]. Первая сеть метеорологических

радаров была развернута в Панаме в апреле 1944 года во время второй Мировой войны. Она состояла из двух маломощных радаров с эффективной дальностью около 48 км. Вторая сеть метеорологических радаров X-диапазона AN/APQ-13 была расположена в Индии для покрытия долины Ассам. Эти радары, в конечном итоге, стали первыми широко распространенными наземными радарными, используемыми для наблюдения за погодой.

Серьезная модернизация радиолокационных сетей произошла с разработкой радара S-диапазона WSR-57 в 1957 году, который эксплуатировался в течение следующих четырех десятилетий [59]. Им на замену пришли радары WSR-74S и WSR-74C диапазонов S и C соответственно. Эти три типа радаров оставались основными радарными для NWS (National Weather Service) до появления метеорологического радара нового поколения (NEXRAD) [60].

В последние пару десятков лет мобильные метеорологические радиолокационные сети стали обычным явлением в научно-исследовательских программах [61-63]. Так как сеть стационарных метеорологических локаторов S-диапазона (NEXRAD) зачастую не фиксирует опасные конвективные явления из-за проблем, связанных с рельефом, промежутками в радарной сетке и кривизной земли, соответственно, не может обеспечить оперативное отслеживание быстро меняющихся свойств конвективных штормов и предоставить прогнозистам данные в высоком разрешении. Чтобы разрешить данные проблемы, в Соединенных Штатах началась активная разработка мобильных радиолокаторов. Одним из первых метеорологических комплексов стал DOW (Doppler on Wheels) – Доплер на колесах. На сегодняшний день он составляет сеть из четырех мобильных радиолокаторов, включающих в себя, в том числе, радар с фазированной антенной решеткой (DOW 8). Данный метеорологический комплекс был участником более 30 исследовательских компаний, включая известные проекты VORTEX1 и VORTEX2 [64].

### **Основные особенности ФАР**

ФАР (фазированная антенная решетка) – это матрица излучателей, в которых относительные фазы сигналов изменяются таким образом, что эффективное излучение данной решетки усиливается в необходимом направлении и подавляется во всех остальных. Луч формируется путем сдвига фазы сигнала, излучаемого каждым элементом решетки, так, чтобы возникла их интерференция в фазе, либо в противофазе, для поворота луча в необходимом направлении.

В пассивной ФАР передаваемая мощность вырабатывается единственным усилителем и распределяется по элементам решетки. Она содержит один основной луч и один источник мощности передатчика. Все элементы решетки данного типа объединены в приемник, соответственно каждый элемент проводит луч через фазовозвращатель. Такие системы больше подвержены влиянию внешних помех, но имеют более простую конструкцию. В активной ФАР приемная функция реализуется множеством элементарных усилителей, соответственно они могут быть просто объединены в один приемник. Используются индивидуальные усилители мощности в передатчике, фазовозвращатели и приемники для каждого элемента. Радиолокатор с АФАР более устойчив к внешним помехам и может генерировать несколько лучей в определенных направлениях.

Задача обнаружения опасных конвективных явлений (торнадо, градобития, шквалы) требует как можно меньше времени для сканирования, что достижимо только с применением электронного управления лучом [64]. Радиолокатор с активной фазированной антенной решеткой позволяет получать качественные данные в более высоком разрешении, нежели радиолокаторы с параболическими антеннами [65].

Однако существует немалая вероятность возникновения эффекта размытия получаемых данных, что в последующем может затруднить возможность изучения быстро меняющиеся свойств конвективных штормов, поэтому процесс получения данных обязательно должен сочетаться с требуемым пространственным разрешением и высокой чувствительностью локатора [66]. Такой радар может быть помещен на мобильную платформу и развернут вблизи опасных явлений, давая возможность метеорологам наблюдать весь жизненный цикл конвективных штормов в зонах, недоступных для стационарных радаров [67].

Использование двойной поляризации значительно расширило возможности радаров по сравнению с радаром с одинарной поляризацией в плане получения достоверной измерительной информации [68-73]. Это позволило качественно решать задачи обнаружения осадков в жидкой и твердой фазе, определения диаметра и формы градин, отделения метеорологических сигналов от неметеорологических, оценки степени обледенения в случае переохлажденных осадков, определения скорости воздушных течений на различных уровнях атмосферы и т.д [74-84]. Однако сочетание двойной поляризации с электронным управлением лучом ФАР является достаточно сложной задачей, так как для каждого положения управления лучом необходима поляриметрическая калибровка [85].

Наиболее совершенная архитектура радара на основе ФАР представляет собой полностью цифровую конструкцию, которая, скорее всего, позволит решить проблему объединения поляриметрических технологий и преимуществ фазированных антенных решеток [86]. Управление на уровне элементов позволит производить надежную поляриметрическую калибровку, что, в свою очередь, обеспечит наибольшую вероятность получения точных поляриметрических наблюдений в течение длительных периодов времени [87-88]. Полностью цифровая технология ФАР позволит избежать дорогостоящих и трудоемких процедур технического обслуживания, реализовав режимы управления лучом с помощью необходимого программного обеспечения, значительно увеличив при этом предполагаемый срок службы системы.

К уникальной возможности ФАР следует отнести подвижность луча – способность практически мгновенно направлять луч радара под разными углами в пределах выбранного сектора сканирования без механического вращения системы, приводящей к значительному износу механических частей конструкции, что является ключевым преимуществом ФАР над параболическими антеннами. Сканирование выбранного сектора радаром с параболической антенной занимает заметно больше времени (3-5 мин), нежели радаром с ФАР (10-30 сек). Цифровое формирование луча происходит посредством цифрового объединения сигналов, полученных от элементов ФАР. Основным принципом заключается в том, что энергия обратного рассеяния принимается из широкого сектора, освещенного падающим лучом, а сигналы оцифровываются в различных положениях в плоскости ФАР.

Адаптивное сканирование относится к способности радара использовать гибкое формирование луча и его управление для сосредоточения возможностей радара на постоянно меняющихся свойствах конвективных штормов и принимаемых от них метеорологических сигналах. Алгоритмы адаптивного сканирования способны управлять возможностями радара для выборочного улучшения временного разрешения, пространственной выборки и качества данных метеорологических наблюдений [89].

Аналоговые ФАР могут управляться электронным способом, но не способны осуществлять цифровое формирование луча. Благодаря электронному управлению эти системы способны к простейшему адаптивному сканированию. В аналого-цифровых ФАР выходные сигналы от групп антенных элементов суммируются для создания луча подрешетки. Сигналы соответствующим образом преобразуются и дискретизируются с

помощью аналого-цифровых преобразователей. Группы цифровых сигналов могут одновременно объединяться несколькими способами для получения различных лучей. Однако цифровые лучи могут формироваться только в пределах диаграммы направленности антенны подрешетки. Полностью цифровая архитектура позволяет применять любые возможности ФАР, такие как маневренность луча, цифровое формирование луча и адаптивное сканирование, реализует максимальный уровень оцифровки и предоставляет широкие возможности для проведения различных экспериментов. Такие ФАР могут сканировать узкими или широкими лучами в любом направлении по азимуту и углу места, без ограничений архитектуры подрешетки, среди которых имеется возникновение боковых лепестков.

Основное преимущество формирования полностью цифрового луча заключается в возможности использовать широкий спектр синтезированных диаграмм направленности и стратегий сканирования, осуществлять пространственно-временную обработку сигналов для лучшего подавления помех, для значительного уменьшения искажений диаграммы направленности и для получения высокоточных измерений без боковых лепестков. Недостатки включают высокую сложность программного обеспечения для обработки данных и управления лучом в реальном времени. Однако эта проблема решаема, так как информационные технологии активно развиваются [90-98].

### **Концепция предлагаемого комплекса**

Основные выдвигаемые предложения по созданию метеорологического комплекса заключаются в следующем.

1. Модель предлагаемого комплекса состоит из радарных установок на основе полностью цифровых ФАР, монтируемых на специальном пьедестале, который, в свою очередь, размещен в грузовике, либо в фургоне, обеспечивая высокую мобильность, портативной метеостанции, детектора молний, инфразвуковой установки, системы запуска и обслуживания метеозондов, а так же системы централизованного сбора и обработки данных (диспетчерский пульт).

2. Для наилучшего решения метеорологических задач (исследование и прогнозирование опасных явлений погоды) комплекс целесообразно оснастить антенными решетками нескольких диапазонов (от S до W), которые будут образовывать плотную мобильную радиолокационную сеть. Три основные решаемые задачи подразумевают собой: определение скорости воздушных течений на определенных высотах, более точное изучение и прогнозирование конвективных штормов, а так же обнаружение очагов природных пожаров. Первая задача предполагает использование плоской ФАР, вторая и третья – цилиндрической.

3. Портативная метеостанция должна обладать высоким уровнем автоматизации, минимальным энергопотреблением и простотой обслуживания персоналом. К основным функциям устройства следует отнести реализацию краткосрочных метеорологических наблюдений в сочетании с мобильным сбором данных в режиме реального времени. Анализ существующих датчиков метеорологических параметров показал перспективность применения «интеллектуальных» датчиков, содержащих в своей внутренней структуре узлы восприятия информации, нормирование и линеаризацию номинальной статической характеристики, а так же узлы одного или нескольких стандартных цифровых интерфейсов. Портативная метеостанция может располагаться как на борту автомобиля, несущего радарную установку, так и, в ряде случаев, в других местах, исходя из рельефа местности и специфики решаемой задачи. Метеостанция собирает информацию о скорости ветра, атмосферном давлении,

температуре и других климатических параметрах, а также содержит датчики ледяного дождя, барической тенденции и электрического поля.

4. Детектор молний необходим для пеленгации грозовых разрядов с целью более качественного исследования суперячеек, в том числе в условиях низкой видимости (торнадо может быть скрыт в стене осадков). Главной особенностью электрических полей суперячеек является высокая частота возникновения положительных разрядов, что может быть использовано для их обнаружения. Детектор молний целесообразно размещать на отдельной передвижной платформе (автомобиле) с целью защиты от излучения передающей части радара.

5. Инфразвуковая установка представляет собой перспективный, но пока малоизученный метод обнаружения опасных конвективных явлений (торнадо и др.) по генерируемым ими звуковым колебаниям. Инфразвуковые волны относительно слабо затухают в атмосфере, что дает возможность их регистрации на достаточно большом расстоянии (20-100 км). Конвективные штормы, как правило, излучают продолжительный инфразвуковой сигнал высокой интенсивности в диапазоне частот 0,5-5 Гц [99]. Процессы с участием таяния града сопровождаются генерацией инфразвука в полосе частот 0,1-10 Гц, как и в случае торнадо [100-102]. Грозы, сопровождающиеся градом, обычно генерируют акустические колебания 0,2-2,5 Гц [103]. Кроме того, прохождение атмосферных фронтов также сопровождается инфразвуковым излучением [104]. По предварительной оценке, для реализации подобной установки потребуется не менее четырех инфразвуковых датчиков, размещенных на одной подвижной платформе.

6. Метеозонды необходимы для измерения вертикальных профилей температуры и относительной влажности воздуха, а также направления и скорости воздушных течений на высотах вплоть до 40 км. Конструкция метеозонда включает в себя контейнер, в которой находится передатчик с антенной, GPS-модуль, датчики для измерения необходимых метеорологических параметров.

7. Разнородные данные, фиксируемые отдельными элементами мобильного метеорологического комплекса, должны своевременно передаваться по помехоустойчивым защищенным (криптографическими алгоритмами) радиоканалам в передвижной или стационарный диспетчерский пульт накопления и централизованной обработки информации с целью принятия оперативных решений и передачи необходимых сведений о текущем развитии ситуации соответствующим государственным службам. Вопросы синтеза оптимальных алгоритмов обработки информации выходят за рамки данной работы, но, очевидно, что перспективным, в первую очередь, является применение концепции искусственного интеллекта, реализуемой на базе нейросетевых алгоритмов.

### **Заключение**

Проведенный обзор зарубежных и отечественных источников информации свидетельствует о перспективности выбранного направления, связанного с созданием сети многофункциональных мобильных метеорологических комплексов для своевременного обнаружения опасных погодных явлений в режиме реального времени. Установлено, что существующие на текущий момент разработки в данной области не в полной мере могут решать задачи детального всестороннего метеорологического мониторинга из-за своей достаточно узкой направленности. Перспективным на наш взгляд является создание многофункциональной системы, состоящей из подвижных комплексов, которая бы, потенциально, включала в себя различные каналы получения метеорологической информации, главным из которых является сеть радарных установок на базе ФАР. Безусловно, требуется провести дополнительное изучение

вопроса баланса стоимости и эффективности подобной системы в нескольких различных исполнениях (с различным уровнем сложности структуры), например: экономичном, базовом, расширенном. В любом случае, важность и актуальность рассматриваемой проблемы мониторинга опасных метеорологических явлений однозначно свидетельствует о необходимости активизации исследовательских работ в данном направлении.

*Автор выражает благодарность своим научным руководителям-консультантам, сотрудникам Омского государственного технического университета: Антону Борисовичу Ионову, Александру Ивановичу Щелканову, Игорю Викторовичу Богачкову, Артему Павловичу Аверченко.*

### **Литература**

1. Соколов Ю.И. Риски экстремальных погодных явлений // Проблемы анализа и риска. 2018. №3. С. 6-21.
2. Алексеева А.А., Лосев В.М. Прогноз опасных конвективных явлений погоды в летний период года // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. №4. С. 127-143.
3. Опасные природные явления: учебн. пособие / Назаренко А.В. – Ч.3 – Воронеж: Изд-во ИПЦ ВГУ, 2008. 62 с.
4. Шихов А.Н., Калинин Н.А., Быков А.В., Ажигов И.О., Шумихина А.В. Смерчи в условиях слабой конвективной неустойчивости атмосферы: анализ двух случаев на востоке европейской территории России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. №5. С. 255-268.
5. Sherburn K.D., Parker M.D. High-shear, low-CAPE environments: What we know and where to go next // Preprints of the 27th Conference on Severe Local Storms. 2014. 14 p.
6. Smith B.T., Guyer J.L., Dean A.R. The climatology, convective mode and mesoscale environment of cool season severe thunderstorms in the Ohio and Tennessee valleys, 1995-2006 // Preprints of the 24th Conference on Severe Local Storms. 2008. 12 p.
7. Polyanszky Z., Bondor G. Non-mesocyclone Tornadoes // Technical Soaring. 2010. Vol. 15. № 1. P. 8-15.
8. Baumgardt D.A., Cook K. Preliminary evaluation of a parameter to forecast environments conducive to non-mesocyclone tornadogenesis // Preprints of the 24th Conference on Severe Local Storms. 2006. 6 p.
9. Homeyer C.R., Sandmael T.N., Potvin C.K., Murphy A.M. Distinguishing Characteristics of Tornadic and Nontornadic Supercell Storms from Composite Mean Analyses of Radar Observations // Monthly Weather Review. 2020. Vol. 148. P. 5015-5040.
10. Caruso J.M., Davies J. Tornadoes in Nonmesocyclone Environments with Preexisting Vertical Vorticity along Convergence Boundaries // Electronic Journal of Operational Meteorology. 2005. P. 1-36.
11. Putsay M., Kerkman J., Szenyan I. Case Study of the 20 May 2008 Tornadic Storm in Hungary // Atmospheric Research. 2011. Vol. 100. Issue 4. P. 657-679.
12. Speheger D.A., Doswell C.A., Stumpf G.J. The Tornadoes of 3 May 1999: Event Verification in Central Oklahoma and Related Issues // Weather and Forecasting. 2002. Vol. 17. Issue 3. P. 362-381.
13. French M.M., Skinner P.S., Wicker L.J., Bluestein H.B. Documenting a Rare Tornado Merger Observed in the 24 May 2011 El Reno–Piedmont, Oklahoma, Supercell // Monthly Weather Review. 2015. Vol. 143. Issue 4. P. 3025-3043.
14. Sills D.M. et al. The Northern Tornadoes Project // Bulletin of the Amer. Meteor. Soc. 2020. Vol. 101. Issue 12. P. 2113-2132.

15. Antonescu B., Schultz D.M., Holzer A., Groenemeijer P. Tornadoes in Europe: An Underestimated Threat // *Bulletin of the Amer. Meteor. Soc.* 2017. Vol. 98. Issue. 4. P. 713-728.
16. Вараксин А.Ю., Ромаш М.Э., Копейцев В.Н. Торнадо. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011. 344 с.
17. Black A.W., Ashley W.S. The Relationship between Tornadic and Nontornadic Convective Wind Fatalities and Warnings // *Weather, Climate, and Society.* 2011. Vol. 3. Issue 1. P. 31-47.
18. Jungbluth K. The tornado warning process during a fast-moving low-topped event: 11 April 2001 in Iowa // *Preprints, 21st Conf. on Severe Local Storms, San Antonio, TX, Amer. Meteor. Soc.* 2002. P. 339-332.
19. Schroder Z., Elsner J.B. Estimating “Outbreak”-Level Tornado Counts and Casualties from Environmental Variables // *Weather, Climate, and Society.* 2021. Vol. 13. Issue 3. P. 473-485.
20. Finch J., Bikos D. Russian tornado outbreak of 9 June 1984 // *Electronic J. Severe Storms Meteor.* 2012. Vol. 7. Issue 4. P. 1-28.
21. Шихов А.Н., Ажигов И.О., Быков А.В. Смерчи и шквалы на Урале в июне 2017 года: анализ по спутниковым данным // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* 2018. № 1. С. 272-281.
22. Шихов А.Н., Быков А.В. Изучение двух случаев сильных смерчей в Предуралье // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* 2015. № 3. С. 124-133.
23. Моделирование и прогноз опасных метеорологических явлений конвективного происхождения на Урале / Быков А.В.; под ред. Н.А. Калинина. Пермь: Изд-во ФГБОУ ПГНИУ, 2018. 151 с.
24. Groenemeijer P.H., van Delden A. Sounding-derived parameters associated with large hail and tornadoes in the Netherlands // *Atmospheric Research.* 2005. Vol. 83. Issue 2-4. P. 473-487.
25. Miglietta M.M., Mazon J., Rotunno R. Numerical Simulations of a Tornadic Supercell over the Mediterranean // *Weather and Forecasting.* 2017. Vol. 32. Issue 3. P. 1209-1226.
26. Kumjian M.R., Lombardo K., Loeffler S. The Evolution of Hail Production in Simulated Supercell Storms // *J. of the Atmospheric Sciences.* 2021. Vol. 78. Issue 11. P. 3417-3440.
27. Pucik T., Kolar M., Ryva D. Sounding-derived parameters and their ability to forecast individual severe weather threats for the region of central Europe // *Proc. of the 7th European Conference on Severe Storms (ECSS2013), Helsinki, Finland.* 2013. 4 p.
28. NWS Louisville Scientific Training Documents. Электронный ресурс: <https://www.weather.gov/lmk/trainingdoc>.
29. Kumjian M.R. et al. Gargantuan Hail in Argentina // *Amer. Meteor. Soc.* 2020. Vol. 101. Issue 8. P. 1241-1258.
30. Teule T.S. et al. The vulnerability of solar panels to hail // *VU Research Portal.* 2021. P. 4-59.
31. Абшаев М.Т. Крупномасштабный суперячейковый градовый процесс на Северном Кавказе 19 августа 2015 г // *Сб. тр. 2-й межд. научн. конф. «Инновационные методы и средства исследований в области физики атмосферы, гидрометеорологии, экологии и изменения климата».* Ставрополь, 21-25 сентября 2015 г. С. 34-42.
32. Dotzek N., Friedrich K. Downburst-producing thunderstorms in southern Germany: Radar analysis and predictability // *Atmospheric Research.* 2009. Vol. 93. Issue 1-3. P. 457-473.
33. Rose M.A. Downbursts // *National Weather Digest.* 1996. Vol. 21. №1. P. 12-17.

34. Поморцева А.А., Калинин Н.А. Аналитический обзор современного состояния исследований шквалов: условия возникновения, методы диагноза и прогноза // Географический вестник. 2016. №3. С.90-104.
35. Шихов А.Н., Быков А.В. Анализ условий развития и оценка последствий сильных шквалов в Пермском крае 18 июля 2012 года // Геоинформационное обеспечение пространственного развития Пермского края: сб. науч. тр. Пермь. 2012. С. 33–43.
36. Gatzen C. A Derecho in Europe: Berlin, 10 July 2002 // Notes and correspondence. 2004. Vol. 19. P. 639-645.
37. Chmielewski T., Szer J, Bobra P. Case study of a derecho wind storm on August 11-12, 2017 in Poland: part one // 29th International Conference on Structural Failures. 2019. Vol. 284. P. 1-10.
38. Furgione L.K. The Historic Derecho of June 29, 2012 // National Weather Service. 2013. 40 p.
39. Чернокульский А.В. и др. Шквалы и смерчи на европейской части России 15 мая 2021 г.: диагностика и моделирование // Метеорология и гидрология. 2022. №11. С.71-90.
40. Всё о Второй мировой – Радиолокаторы. Электронный ресурс: <https://wwii.space/радиолокаторы/>
41. Всё о Второй мировой – Радиолокаторы | Великобритания. Электронный ресурс: <https://wwii.space/радиолокаторы-великобритания/>
42. Best W.H. Radars over the hump: recollections of the first weather radar network // Bulletin of the Amer. Meteor. Soc. 1973. Vol. 54. №3. P. 205-208.
43. Whiton R.C. et al. History of Operational Use of Weather Radar by U.S. Weather Services. Part I: The Pre-NEXRAD Era // Weather and Forecasting. 1998. Vol. 13. Issue 2. P. 219-243.
44. Crum T.D., Saffle R.E., Wilson J.W. An Update on the NEXRAD Program and Future WSR-88D Support to Operations // Weather and Forecasting. 1998. Vol. 13. Issue 2. P. 253-262.
45. Krajewski W.F., Vignal B. Evaluation of Anomalous Propagation Echo Detection in WSR-88D Data: A Large Sample Case Study // J. of Atmospheric and Oceanic Technology. 2001. V. 18. Issue 5. P. 807-814.
46. Stumpf G.J. et al. The National Severe Storms Laboratory Mesocyclone Detection Algorithm for the WSR-88D // Weather and Forecasting. 1998. Vol. 13. Issue 2. P. 304-326.
47. Keenan T., Glasson K., Cummings F., Bird T.S., Keeler J., Lutz J. The BMRC/NCAR C-Band Polarimetric (C-POL) Radar System // J. of Atmospheric and Oceanic Technology. 1998. Vol. 15. Issue 4. P. 871-886.
48. Gourley J.J., Tabary P. Jacques Parent du Chatelet. Data Quality of the Meteo-France C-Band Polarimetric Radar // J. of Atmospheric and Oceanic Technology. 2006. Vol. 23. Issue 10. P. 1340-1356.
49. Wakimoto R.M. et al. Photogrammetric Analysis of the 2013 El Reno Tornado Combined with Mobile X-Band Polarimetric Radar Data // Monthly Weather Review. 2015. Vol. 143. Issue 7. P. 2657-2683.
50. Gorsdorf U. et al. A 35-GHz Polarimetric Doppler Radar for Long-Term Observations of Cloud Parameters – Description of System and Data Processing // J. of Atmospheric and Oceanic Technology. 2015. Vol. 32. Issue. 4. P. 675-690.
51. Matrosov S.Y., Ryzhkov A.V., Maahn M., de Boer G. Hydrometeor Shape Variability in Snowfall as Retrieved from Polarimetric Radar Measurements // J. of Applied Meteorology and Climatology. 2020. Vol. 59. Issue 9. P. 1503-1517.

52. Trapp R.J., Schultz D.M., Ryzhkov A.V., Holle R.L. Multiscale Structure and Evolution of an Oklahoma Winter Precipitation Event // *Monthly Weather Review*. 2001. Vol. 129. Issue 3. P. 486-501.
53. Tanamachi R.L., Bluestein H.B., Houser J.B., Frasier S.J., Hardwick K.M. Mobile, X-band, Polarimetric Doppler Radar Observations of the 4 May 2007 Greensburg, Kansas, Tornado Supercell // *Monthly Weather Review*. 2012. Vol. 140. P. 2103-2125.
54. Joe P., Lapczak S. Evolution of the Canadian Operational Radar Network // *Proceedings of ERAD*. 2002. P. 370-382.
55. Zrnich D.S. Doppler Radar for USA Weather Surveillance / *Doppler Radar Observations* // Edited by J. Bech and J.L. Chau. 2012. P. 3-32.
56. Saltikoff E., Huuskonen A., Koistinen J., Jarvinen H. Quality assurance in the FMI Doppler Weather Radar Network // *Boreal Environment Research*. 2010. Vol. 15. P. 579-594.
57. Mahale V.N., Brotzge J.A., Bluestein H.B. The Advantages of a Mixed-Band Radar Network for Severe Weather Operations: A Case Study of 13 May 2009 // *Weather and Forecasting*. 2014. Vol. 29. P. 78-98.
58. Junyent F., Chandrasekar V. Theory and Characterization of Weather Radar Networks // *J. of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2009. V. 26. P. 474-491.
59. Wilson J.W. Evaluation of Precipitation Measurements with the WSR-57 Weather Radar // *J. of Applied Meteorology*. 1964. Vol. 3. P. 164-174.
60. Bieringer P., Ray P.S. A Comparison of Tornado Warning Lead Times with and without NEXRAD Doppler Radar // *Weather and Forecasting*. 1996. Vol. 11. P. 47-52.
61. Junyent F., Chandrasekar V., McLaughlin D., Insanic E., Bharadwaj N. The CASA Integrated Project 1 Networked Radar System // *J. of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2010. Vol. 27. P. 61-78.
62. Pazmany A.L., Mead J.B., Bluestein H.B., Snyder J.C., Houser J.B. A Mobile Rapid-Scanning X-band Polarimetric (RaXPoL) Doppler Radar System // *J. of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2013. Vol. 30. P. 1398-1413.
63. Bluestein H.B. et al. Radar in Atmospheric Sciences and Related Research: Current Systems, Emerging Technology, and Future Needs // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2014. Vol. 95. Issue 12. P. 1850-1861.
64. Isom B. et al. The Atmospheric Imaging Radar: Simultaneous Volumetric Observations Using a Phased Array Weather Radar // *J. of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2013. Vol. 30. P. 655-675.
65. Asai K., Kikuchi H., Ushio T., Hobara Y. Validation of X-Band Multiparameter Phased-Array Weather Radar by Comparing Data from Doppler Weather Radar with a Parabolic Dish Antenna // *J. of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2021. Vol. 38. P. 1561-1570.
66. Weber M. et al. Towards the Next Generation Operational Meteorological Radar // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2021. Vol. 102. Issue 7. P. E1357-E1383.
67. Toth M., Trapp R.J., Wurman J., Kosiba K.A. Comparison of Mobile-Radar Measurements of Tornado Intensity with Corresponding WSR-88D Measurements // *Weather and Forecasting*. 2013. V. 28. P. 418-426.
68. French M.M., Kingfield D.M. Tornado Formation and Intensity Prediction Using Polarimetric Radar Estimates of Updraft Area // *Weather and Forecasting*. 2021. Vol. 36. P. 2211-2231.
69. Heinselman P.L. et al. Rapid Sampling of Severe Storms by the National Weather Radar Testbed Phased Array Radar // *Weather and Forecasting*. 2008. Vol. 23. P. 808-824.
70. Wu C., Liu L., Liu X. Advances in Chinese Dual-Polarization and Phased-Array Weather Radars: Observational Analysis of a Supercell in Southern China // *J. of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2018. Vol. 35. P. 1785-1806.

71. Kumjian M.R., Ryzhkov A.V., Melnikov V.M., Schuur T.J. Rapid-Scan Super-Resolution Observations of a Cyclic Supercell with a Dual-Polarization WSR-88D // *Monthly Weather Review*. 2010. Vol. 138. P. 3762-3786.
72. Bodine D.J., Kumjian M.R., Palmer R.D., Heinselman P.L., Ryzhkov A.V. Tornado Damage Estimation Using Polarimetric Radar // *Weather and Forecasting*. 2013. Vol. 28. P. 139-158.
73. Tromel S., Ryzhkov A.V., Hickman B., Muhlbauer K., Simmer C. Polarimetric Radar Variables in the Layers of Melting and Dendritic Growth at X Band—Implications for a Nowcasting Strategy in Stratiform Rain // *J. of Applied Meteorology and Climatology*. 2019. Vol. 58. P. 2497-2522.
74. Schuur T.J., Park H-S., Ryzhkov A.V., Reeves H.D. Classification of Precipitation Types during Transitional Winter Weather Using the RUC Model and Polarimetric Radar Retrievals // *J. of Applied Meteorology and Climatology*. 2012. Vol. 51. P. 763-779.
75. Straka J.M., Zrníc D.S., Ryzhkov A.V. Bulk Hydrometeor Classification and Quantification Using Polarimetric Radar Data: Synthesis of Relations // *J. of Applied Meteorology*. 2000. Vol. 39. P. 1341-1372.
76. Ryzhkov A.V., Zrníc D.S. Depolarization in Ice Crystals and Its Effect on Radar Polarimetric Measurements // *J. of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2007. Vol. 24. P. 1256-1267.
77. Heinselman P.L., Ryzhkov A.V. Validation of Polarimetric Hail Detection // *Weather and Forecasting*. 2006. Vol. 21. P. 839-850.
78. Ryzhkov A.V., Schuur T.J., Burgess D.W. Polarimetric Tornado Detection // *J. of Applied Meteorology*. 2005. Vol. 44. P. 557-570.
79. Ryzhkov A.V. et al. Polarimetric Radar Characteristics of Melting Hail. Part I: Theoretical Simulations Using Spectral Microphysical Modeling // *J. of Applied Meteorology and Climatology*. 2013. Vol. 52. P. 2849-2870.
80. Ryzhkov A.V. et al. Polarimetric Radar Characteristics of Melting Hail. Part II: Practical Implications // *J. of Applied Meteorology and Climatology*. 2013. Vol. 52. P. 2871-2886.
81. Ortega K.L., Krause J.M., Ryzhkov A.V. Polarimetric Radar Characteristics of Melting Hail. Part III: Validation of the Algorithm for Hail Size Discrimination // *J. of Applied Meteorology and Climatology*. 2016. Vol. 55. P. 829-848.
82. May P.T., Cummings F., Koutsovasilis J., Jones R., Shaw D. The Australian Bureau of Meteorology 1280-MHz Wind Profiler // *J. of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2002. Vol. 19. P. 911-923.
83. Lau E. et al. The DeTect Inc. RAPTOR VAD-BL Radar Wind Profiler // *J. of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2013. Vol. 30. P. 1978-1984.
84. Srinivasulu P., Yashoda P., Kamaraj P., Rao T.N., Jayaraman A. 1280-MHz Active Array Radar Wind Profiler for Lower Atmosphere: System Description and Data Validation // *J. of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2012. Vol. 29. P. 1455-1470.
85. Giangrande S.E., Ryzhkov A.V. Calibration of Dual-Polarization Radar in the Presence of Partial Beam Blockage // *J. of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2005. Vol. 22. P. 1156-1166.
86. Palmer R., Fulton C., Salazar J., Sigmarsson H., Yearly M. An Update on the “Horus” All-Digital Polarimetric Phased Array Weather Radar // *Proc. of 99th AMS Annual Meeting*. Phoenix. 6-10 January 2019.
87. Ryzhkov A.V., Giangrande S.E., Melnikov V.M., Schuur T.J. Calibration Issues of Dual-Polarization Radar Measurements // *J. of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2005. Vol. 22. P. 1138-1155.

88. Starzec M., Homeyer C.R., Mullendore G.L. Storm Labeling in Three Dimensions (SL3D): A Volumetric Radar Echo and Dual-Polarization Updraft Classification Algorithm // *Monthly Weather Review*. 2017. Vol. 145. P. 1127-1145.
89. Torres S.M., Schwartzman D. A Simulation Framework to Support the Design and Evaluation of Adaptive Scanning for Phased-Array Weather Radars // *J. of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2020. Vol. 37. P. 2321-2339.
90. Nguyen C.M., Chandrasekar V. Electronic Scan Strategy for Phased Array Weather Radar Using a Space–Time Characterization Model // *J. of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2017. Vol. 34. P. 921-938.
91. Loney M.L., Zrníc D.S., Straka J.M., Ryzhkov A.V. Enhanced Polarimetric Radar Signatures above the Melting Level in a Supercell Storm // *J. of Applied Meteorology*. 2002. Vol. 41. P. 1179-1194.
92. Zrníc D.S., Melnikov V.M., Ryzhkov A.V. Correlation Coefficients between Horizontally and Vertically Polarized Returns from Ground Clutter // *J. of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2006. Vol. 23. P. 381-394.
93. Cheong B.L., Hoffman M.W., Palmer R.D., Fraser S.J., Lopez-Dekker F.J. Phased-Array Design for Biological Clutter Rejection: Simulation and Experimental Validation // *J. of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2006. Vol. 23. P. 585-598.
94. Saltikoff E. et al. The Threat to Weather Radars by Wireless Technology // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2016. Vol. 97. Issue 7. P. 1159-1167.
95. Nai F. et al. The Impact of Elevation Sidelobe Contamination on Radar Data Quality for Operational Interpretation // *J. of Applied Meteorology and Climatology*. 2020. Vol. 59. P. 707-724.
96. Ivić I.R. An Approach to Simulate the Effects of Antenna Patterns on Polarimetric Variable Estimates // *J. of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2017. Vol. 34. P. 1907-1934.
97. Ryzhkov A.V. The Impact of Beam Broadening on the Quality of Radar Polarimetric Data // *J. of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2007. Vol. 24. P. 729-744.
98. Wang Y., Yu T.-Y., Ryzhkov A.V., Kumjian M.R. Application of Spectral Polarimetry to a Hailstorm at Low Elevation Angle // *J. of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2019. Vol. 36. P. 567-583.
99. Schechter D.A. A Method for Diagnosing the Sources of Infrasound in Convective Storm Simulations // *J. of Applied Meteorology and Climatology*. 2011. Vol. 50. P. 2526-2542.
100. Schechter D.A., Nicholls M.E., Persing J., Bederd A.J. Jr. Infrasound Emitted by Tornado-Like Vortices: Basic Theory and a Numerical Comparison to the Acoustic Radiation of a Single-Cell Thunderstorm // *J. of Atmospheric Sciences*. 2008. Vol. 65. P. 685-713.
101. White B.C., Elbing B.R., Faruque I.A. Infrasound measurement system for real-time in situ tornado measurements // *Atmos. Meas. Tech*. 2022. Vol. 15. P. 2923-2938.
102. Schechter D.A., Nicholls M.E. Generation of Infrasound by Evaporating Hydrometeors in a Cloud Model // *J. of Applied Meteorology and Climatology*. 2010. Vol. 49. P. 664-675.
103. Bedard A.J. Jr. Low-Frequency Atmospheric Acoustic Energy Associated with Vortices Produced by Thunderstorms // *Monthly Weather Review*. 2005. Vol. 133. P. 241-263.
104. Chunchuzov I.P., Kulichkov S.N., Popov O.E., Perepelkin V.G. Infrasound Generation by Meteorological Fronts and Its Propagation in the Atmosphere // *J. of the Atmospheric Sciences*. 2021. Vol. 78. P. 1673-1686.