

Федеральное государственное бюджетное военное образовательное учреждение высшего образования «Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского» Министерства обороны Российской Федерации

На правах рукописи

Жуков Владимир Юрьевич

**РАСПОЗНАВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ОПАСНЫХ ЯВЛЕНИЙ
ПОГОДЫ В МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ
РАДИОЛОКАЦИИ**

Специальность 25.00.30 – Метеорология, климатология, агрометеорология.

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Санкт-Петербург - 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном военном образовательном учреждении высшего образования «Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского» Министерства обороны Российской Федерации

Научный консультант: доктор физико-математических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ **Щукин Георгий Георгиевич**

**Официальные
оппоненты:**

доктор физико-математических наук,
профессор **Аджиев Анатолий Хабасович**

доктор физико-математических наук,
профессор **Крюковский Андрей Сергеевич**

доктор технических наук, профессор
Сарычев Валентин Александрович

**Ведущая
организация:**

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования «Северо-Кавказский
федеральный университет» г. Ставрополь.

Защита состоится «_____» _____ 2019 года в ____ часов на заседании диссертационного совета Д.212.197.01 в Российском государственном гидрометеорологическом университете по адресу: 195196, г. Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98, тел. (812) 633-01-82, 372-50-92.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Российского государственного гидрометеорологического университета.

Ваш отзыв на автореферат просим направлять по адресу 192007, Россия, Санкт-Петербург, ул. Воронежская, дом 79, Российский государственный университет, Диссертационный совет Д.212.197.01, Ученому секретарю.

Автореферат разослан «_____» _____ 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат географических
наук, доцент

Л.В.Кашлев
а

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования: Опасные явления погоды (ОЯП) – гроза, град, смерч и др. – способны причинить вред здоровью людей, нанести значительный урон зданиям, сельскому хозяйству, энергетике и т.д. Их своевременное распознавание позволяет подготовиться к грозящей опасности, а иногда и применить меры по ее устранению. Для данных целей создано большое количество технических средств. Особое место среди них занимают метеорологические радиолокаторы (МРЛ). Их главное преимущество перед другими техническими средствами состоит, во-первых, в универсальности (способности обнаруживать не один, а целый ряд различных опасных явлений) и, во-вторых, в максимальной приближенности к объектам исследования, дающей возможность подробно их рассмотреть, а, следовательно, с наибольшей вероятностью распознавать тающуюся в них опасность.

Созданные изначально как средства обеспечения аэропортов, МРЛ быстро доказали свою эффективность и в других областях. В результате все развитые страны мира создали национальные сети штормооповещения. Наша страна не оставалась в стороне от этого пути. В конце семидесятых годов прошлого столетия был создан радиолокатор МРЛ-5, превосходящий по своим характеристикам все известные в то время некогерентные МРЛ. На его основе была создана сеть, число радиолокаторов которой доходила до 120. В 2010 году был создан многопараметрический радиолокатор ДМРЛ-С, также превосходящий на момент создания все известные аналоги. Теперь на его основе формируется новая сеть штормооповещения из 140 станций.

Возможности многопараметрического радиолокатора значительно превосходят возможности радиолокатора МРЛ-5. Вместо одной характеристики принимаемого сигнала – мощности – он оценивает шесть, что достигается внедрением когерентного режима работы и использованием сигналов с двумя видами поляризации электромагнитной волны. Это обуславливает получение от него значительно большего количества информации о наблюдаемых метеоцелях и открывает большие перспективы в плане распознавания последних. Например, стало возможным дистанционно определять вид осадков (жидкие, твердые или смешанные), обнаруживать опасный сдвиг ветра, различать скопление птиц и т.п. Достигается это путем одновременного учета нескольких параметров отражений, рассмотрения их в комплексе.

Методикам оценивания этих параметров и их использованию в задачах обнаружения ОЯП посвящено большое количество работ. Среди их авторов прежде всего надо выделить основоположников метеорологической радиолокации Л. Баттана, Д. Атласа, Д. Зрнича и Р. Довиака. Из отечественных ученых – это В.Д. Степаненко, Г.Г. Щукин, М.Т. Абшаев. Внедрением спектральной обработки в практику радиометеорологических наблюдений занимались в ЦАО (В.В. Костарев, А.Г. Горелик) и ГГО им. А.И. Воейкова (В.М. Мельников). Разработке теории поляриметрии в радиолокации в большой степени мы обязаны сотрудникам ВКА имени А.Ф. Можайского: В.А. Потехину,

Д.Б. Канарейкину, М.Б. Варганову, а также ученым из других организаций - А.И. Козлову, А.И. Логвину, В.А. Сарычеву. Приложением этой теории к задачам радиометеорологии занимались А.Б. Шупяцкий в ЦАО, Ю.А. Мельник и А.В. Рыжков - в ГГО.

Однако объединение всех оцениваемых параметров принимаемого сигнала, дающее качественный скачок в решении рассматриваемой задачи, в сети штормооповещения РФ не реализуются. Опасные явления погоды (за малым исключением) распознаются на основании одних только оценок мощности, как это делалось в некогерентных МРЛ. Соответственно и перечень данных явлений остается практически без изменений. На настоящий момент в него входят ливень, гроза, град, шквал, смерч.

Опыт показывает, что этого недостаточно на настоящий момент. Существуют крайне опасные явления, которые можно своевременно распознать в новых сложившихся условиях и тем самым спасти сотни человеческих жизней. Так, Совет Международной организации гражданской авиации (ИКАО) одной из главных технических проблем, стоящих перед авиацией рассматривает явление сдвига ветра. По его данным за прошедшие 40 лет по меньшей мере два десятка случаев авиационных происшествий были напрямую связаны с этим явлением.

Одновременно необходимо улучшать характеристики распознавания явлений из уже существующего списка.

Таким образом, разработка методов распознавания и исследования опасных явлений погоды с помощью многопараметрического метеорологического радиолокатора, использующих получаемые им оценки мощности принимаемого сигнала, его спектральные и поляризационные характеристики, является **актуальной задачей**.

Целью работы является распознавание и исследование опасных явлений погоды средствами метеорологической радиолокации с использованием всех параметров отраженного сигнала, оцениваемых современным многопараметрическим радиолокатором.

Разрешаемое в работе противоречие – между необходимостью распознавать большое количество опасных явлений погоды и несовершенством существующих на данный момент методов, применяемых для этих целей в сети штормооповещения РФ.

Объект исследования – опасные явления погоды.

Предмет исследования – методы обработки радиолокационного сигнала, отраженного опасными явлениями погоды, с целью их своевременного распознавания и исследования.

Научная проблема, решаемая в диссертации – разработка научно-методического аппарата, включающего в себя теоретическое обоснование и практические рекомендации по распознаванию и исследованию опасных явлений погоды на основе оценок мощности, спектральных и поляризационных характеристик отраженного ими радиолокационного сигнала.

Для достижения цели исследования в диссертации поставлены и решены следующие частные задачи исследования:

1. Провести системный анализ современного состояния радиолокационных методов исследования и распознавания опасных явлений погоды.

2. Исследовать особенности радиолокационного сигнала, отраженного опасными явлениями погоды на основе разработанных моделей данных явлений.

3. На основе созданных и уже существующих моделей разработать методы распознавания опасных явлений погоды, использующие все оцениваемые многопараметрическим радиолокатором параметры создаваемых ими отражений.

4. Провести экспериментальные исследования применимости на практике разработанных методов распознавания опасных явлений погоды.

5. Исследовать возможности оптимизации условий наблюдения опасных явлений погоды многопараметрическим радиолокатором за счет использования примененных в нем технических решений.

Научная новизна:

— Впервые создана модель сдвига ветра в пограничном слое атмосферы, отличающаяся тем, что позволяет установить однозначную зависимость между параметрами сдвига ветра и параметрами пространственного распределения ширины спектра отражений.

— Впервые разработана модель участка атмосферы, содержащего вертикальный поток элементарных отражателей, отличающаяся тем, что отраженный сигнал представляется в виде суммы двух составляющих со случайными соотношениями мощностей и доплеровских сдвигов частоты.

— Разработан новый метод обнаружения сдвига ветра в пограничном слое атмосферы, отличающийся тем, что основан на использовании оценок ширины спектра отраженного сигнала и не зависит от ширины луча антенны радиолокатора.

— Разработан новый метод восстановления вертикального профиля ветра на высотах до 500 м, отличающийся тем, что использует оценки ширины спектра отражений и позволяет радиолокатору выдавать информацию о профиле ветра в данном диапазоне высот с такой разрешающей способностью, которые были ему до этого недоступны.

— Разработан новый метод обнаружения вертикальных потоков воздуха, отличающийся тем, что использует для указанных целей оценки ширины спектра амплитуды отраженного сигнала, и позволяет обнаруживать нисходящие и восходящие потоки воздуха на малых углах места антенны радиолокатора.

— Сформулированы рекомендации по оптимизации условий наблюдения опасных явлений погоды, отличающиеся тем, что используют уже реализованные в многопараметрическом радиолокаторе технические решения - сложный зондирующий импульс, двойную поляризацию излучаемой электромагнитной волны - и позволяющие увеличить метеорологический потенциал, расширить интервал однозначного измерения радиальной скорости цели, подавить помехи от местных предметов.

Научная значимость работы:

— Созданная модель сдвига ветра, способствует более глубокому пониманию процессов формирования отражений от метеообразований.

— Исследованный процесс прохождения сигнала с двухмодальным спектром через амплитудный детектор вносит вклад в развитие статистической радиотехники.

Практическая значимость работы:

— Новые методы обнаружения сдвига ветра и восстановления вертикального профиля ветра по оценкам ширины спектра принимаемого сигнала дает возможность реализовать в метеорологическом радиолокаторе функции, выполняемые в настоящее время специальными техническими средствами – радиопрофилемерами - и, тем самым, избежать установки на аэродромах данных дорогостоящих устройств.

— Метод обнаружения вертикальных потоков воздуха на основе измерения ширины спектра амплитуды принимаемого сигнала делает возможным распознавание микропорывов, а также восходящих потоков воздуха, что важно для идентификации зон болтанки самолетов и кучевых облаков на ранней стадии развития.

— Разработанные рекомендации по оптимизации условий наблюдения ОЯП обеспечат выделение полезного сигнала в случае его наблюдения совместно с помехой от местных предметов и способствуют увеличению точности оценивания спектральных характеристик отражений.

Основные положения, выносимые на защиту:

1) Модель сдвига ветра, устанавливающая связь между параметрами сдвига ветра и характеристиками пространственного распределения спектральных характеристик отраженного сигнала [10; 11; 19].

2) Модель области пространства, в котором существует участок с вертикальным движением элементарных отражателей, позволяющая определить особенности отраженного радиолокационного сигнала, полученного на малых углах места антенны [14; 40].

3) Метод обнаружения сдвига ветра в пограничном слое атмосферы по оценкам ширины спектра принимаемых отражений [13; 16; 18].

4) Метод восстановления вертикального профиля ветра в слое высотой до 500 м по оценкам ширины спектра принимаемых отражений [11; 14; 15].

5) Метод обнаружения вертикальных потоков воздуха на основе измерений ширины спектра амплитуды принимаемого сигнала [14; 40].

6) Рекомендации по оптимизации условий наблюдения опасных явлений погоды [3; 12; 20].

Обоснованность и достоверность результатов работы подтверждается всесторонним анализом предшествующих научных работ в области обработки сигналов, принимаемых метеорологическим радиолокатором, корректностью постановки научных задач исследования, строгостью принятых допущений и ограничений, логической непротиворечивостью рассуждений, а также корректным использованием современного математического аппарата.

Достоверность основных результатов исследований подтверждается соответствием результатов экспериментов выводам теоретических вычислений, непротиворечивостью частных результатов исследования результатам других авторов; апробацией на всероссийских научно-технических конференциях и семинарах кафедры; публикацией результатов в ряде ведущих научных изданий.

Личный вклад автора:

Постановка задачи, выбор методов исследования, теоретическая проработка поставленных задач выполнены лично автором.

Набор экспериментальных данных и их обработка осуществлены совместно с соискателем и дипломниками, у которых автор был научным руководителем

Автор лично участвовал в разработке системы вторичной обработки информации радиолокатора ДМРЛ-С, создании радиолокатора «Контур МЕТЕО-01» и всепогодного лидарно-радиолокационного комплекса для определения профиля ветра.

Апробация результатов. Основные результаты работы докладывались на следующих научных конференциях и симпозиумах:

1. VII Российская научно-техническая конференция «Навигация, гидрография и океанография: приоритеты развития и инновации морской деятельности», «НГО-2011», (Санкт-Петербург, 2011 г.);
2. XXVII, XXVIII, XXIX, XXX Всероссийский симпозиум «Радиолокационное исследование природных сред» (Санкт-Петербург, 2011, 2013, 2015, 2017 г.г.);
3. II, III, IV, V Всероссийская конференция «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды» (Санкт-Петербург, 2012, 2014, 2016, 2018 г.г.);
4. II, III, IV, V, VI, VII, VIII Всероссийские Армандовские чтения: (Муром, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018 г.г.);
5. VII Всероссийская конференция по атмосферному электричеству (Санкт-Петербург, 2012);
6. Всероссийская конференция по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы (Нальчик, 2013);
7. XXIV Всероссийская научная конференция «Распространение радиоволн», посвященная 100-летию со дня рождения профессора В. М. Полякова. (Иркутск, 2014);
8. XIV Санкт-петербургская межрегиональная конференция «Региональная информатика «РИ-2014» (Санкт-Петербург, 2014);
9. XXV Всероссийская открытая конференция «Распространение радиоволн», посвященная 80-летию отечественных ионосферных исследований (Томск, 2016);
10. IV Всероссийская научно-практическая конференция «Академические Жуковские чтения» (Воронеж, 2017);
11. X Санкт-Петербургская межрегиональная конференция «Информационная безопасность регионов России» (ИБРР-2017) (Санкт-Петербург, 2017);

12. XI Всероссийская конференция «Радиолокация и радиосвязь» (Москва, 2017).

Основные публикации по теме диссертации. По теме диссертации опубликовано 50 работ, в том числе 20 в журналах, рекомендованных ВАК для публикации основных научных результатов, в том числе 3 в изданиях, учитываемых в базе SCOPUS.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав основного материала, заключения и списка цитируемой литературы, содержащего 215 ссылок. Общий объем диссертации – 312 страницы, включая 14 таблиц и 147 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** отражена общая характеристика работы, обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели диссертации и решаемые задачи, основные положения, выносимые на защиту, обоснованы научная ценность и практическая значимость полученных результатов работы, приведено краткое содержание диссертации.

В первой главе диссертации проанализированы информационные возможности многопараметрического метеорологического радиолокатора. Констатируется, что современный метеорологический радиолокатор – сложный технический комплекс, способный получать большой объем информации об окружающем пространстве посредством оценивания шести параметров принимаемого сигнала:

- 1) мощности;
- 2) средней частоты энергетического спектра;
- 3) ширины энергетического спектра;
- 4) дифференциальной отражаемости;
- 5) дифференциальной фазы;
- 6) модуля коэффициента взаимной корреляции поляризационных составляющих.

Рассматривается в отдельности каждый из этих параметров с точки зрения его информативности и способов его измерения.

Делается вывод о том, что новые радиолокационные данные могут быть применены в задачах распознавания и исследования следующих явлений: сильный и ураганный ветер; вертикальный сдвиг ветра; микропорыв; пыльная буря; скопление птиц и насекомых.

Кроме этого на их основе могут быть разработаны новые методы распознавания явлений из уже существующего списка, а именно ливня, града, шквала и смерча.

Вторая глава посвящена разработке моделей сдвига ветра и вертикального потока частиц, установлению влияния параметров этих моделей на характеристики информационных продуктов метеорологического радиолокатора.

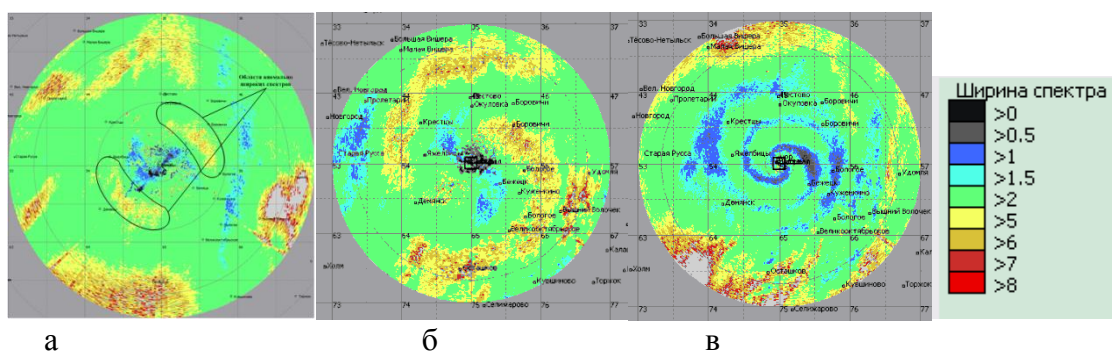
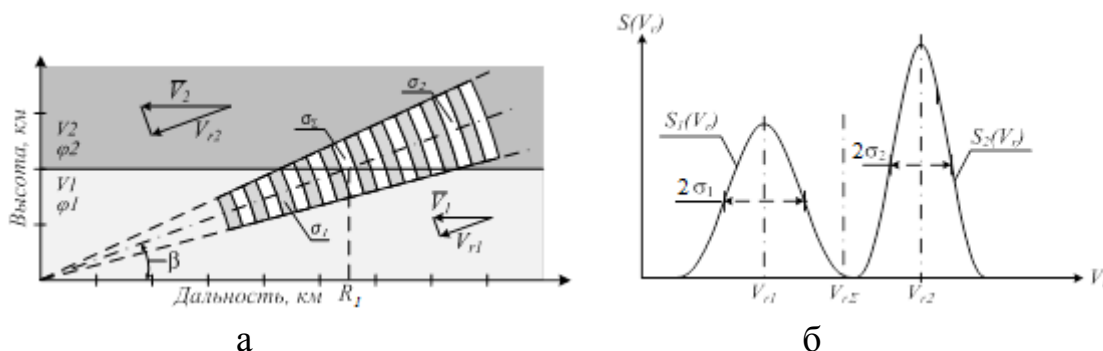


Рисунок 1 - Карты распределения ширины спектра радиальных скоростей частиц по поверхности конических разрезов, полученных радиолокатором ДМРЛ-С при углах места антенны $0,5^\circ$ (а), $1,8^\circ$ (б) и $3,4^\circ$ (в)

После того, как в оперативную работу были введены радиолокаторы ДМРЛ-С, специалисты получили возможность наблюдать получаемые ими данные и, в частности, карты ширины спектра радиальных скоростей элементарных отражателей (или, иначе, карты ширины спектра принимаемого сигнала). На них достаточно часто образовывались специфические распределения параметра трех видов, приведенных на Рисунке 1.

Было сделано предположение о том, что причина этого – существование в зоне обзора сдвига ветра, т.е. наличие двух слоев атмосферы с разными параметрами ветра. При их одновременном наблюдении радиолокатором (Рисунок 2а) принимаемый сигнал является суммой двух составляющих. В каждом из слоев распределение скоростей частиц описывается Гауссовой функцией со своим средним значением и дисперсией. Результирующий энергетический спектр такого сигнала является суммой двух Гауссовых кривых, т.е. становится двухмодальным, как это представлено на Рисунке 2б.



V_1 , V_2 – скорости ветра в первом и во втором слое,
 φ_1 , φ_2 – направления ветра в первом и во втором слое,
 V_{r1} , V_{r2} – среднее значение радиальной скорости частиц в первом и во втором слое,
 $S_1(Vr)$, $S_2(Vr)$ – спектральные составляющие, соответствующие первому и второму слою,
 σ_1 , σ_2 – ширины спектра сигнала, отраженного от первого и от второго слоя.

Рисунок 2 - Схема наблюдения радиолокатором сдвига ветра (а) и образующийся при этом спектр радиальных скоростей частиц, расположенных внутри элемента разрешения с координатой дальности R_1 (б)

Моменты этого спектра во многом зависят от соотношения мощностей составляющих сигнала. Когда последние примерно одинаковы, дисперсия резко увеличивается и на упомянутой карте фиксируется аномально широкий спектр со

значением, большим или равным 6 м/с. Кроме этого, они зависят от разницы средних радиальных скоростей частиц в каждом из слоев, а, значит, от азимута антенны, что и приводит к распределению параметра, представленного на Рисунке 1а. Схема его формирования объясняется Рисунком 3.

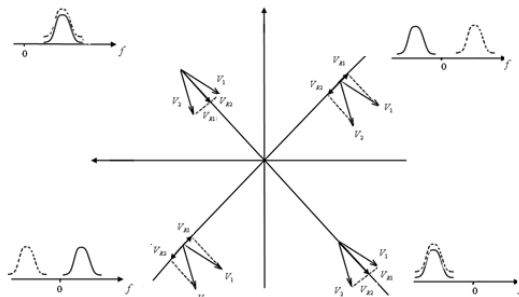


Рисунок 3 - Схема формирования спектра отраженного сигнала для примера, изображенного на Рисунке 1а. Сплошной линией обозначен спектр радиальных скоростей гидрометеоров в 1-м слое, пунктиром – во втором

Для проверки сделанного предположения и объяснения появления на картах двух других характерных распределений параметра разработана модель сдвига ветра в предположении о том, что окружающее радиолокатор пространство слоисто однородно, т.е. на каждой высоте h радиолокационная отражаемость $Z(h)$ и направление движения частиц $\varphi(h)$ постоянны, а их скорости распределены по нормальному закону с одинаковыми средним $V_0(h)$ и среднеквадратическим $\sigma_v(h)$ значениями.

Окружающее пространство считается состоящим из трех горизонтальных слоев, характеризующихся каждый своим распределением указанных выше параметров. В нижнем (первом) и верхнем (третьем) они постоянны, а в среднем (втором) направление и/или скорость движения частиц изменяются с высотой по заданному закону. Дальность наблюдения ограничена 50 км, высота – 1,5 км.

Входными параметрами являются диаграмма направленности антенны радиолокатора $G(\alpha, \beta)$, где α и β ее азимут и угол места. Она аппроксимируется двумерной гауссовой функцией шириной θ на уровне 0,5 по мощности в обеих плоскостях. Зондирующий импульс представляется прямоугольной функцией длительностью $\tau_{\text{и}}$. Поскольку исследуется работа радиолокатора на малых углах места, наклоном импульсного объема пренебрегается и считается, что он ориентирован вертикально при всех значениях β . Обзор пространства происходит путем сканирования по азимуту при фиксированном угле места.

В процессе обзора каждый из введенных слоев создает отраженный сигнал с энергетическим спектром

$$S_i(f) = \int_{h_i}^{h_{i+1}} \frac{A_i}{\sqrt{2\pi}\sigma_{fi}} \exp\left(-\frac{(f-f_{0i})^2}{2\sigma_{fi}^2}\right) dh, \quad (1)$$

где A_i – мощность i -й составляющей суммарного сигнала, определяемая выражением

$$A_i = \frac{KZ_i}{R_0^3} \int_{h_i}^{h_{i+1}} \exp\left(-\frac{4\ln 2(h-\beta R_0)^2}{\theta^2}\right) dh; \quad (2)$$

K – коэффициент, определяемый характеристиками радиолокатора;
 h_i – высота нижней границы i – го слоя;
 R_0 – координата наклонной дальности центра элемента разрешения;
 f_{0i} – средняя частота энергетического спектра отражений от i – го слоя,
определяемая выражением

$$f_{0i} = \frac{2V_{0i}}{\lambda} \text{Cos}(\alpha - \varphi_i) \text{Cos}\beta, \quad (3)$$

$$\sigma_{fi} = \frac{2\sigma_{vi}}{\lambda}; \quad (4)$$

λ – длина волны радиолокатора.

Для слоев с постоянными параметрами, к которым относятся нижний и верхний слои, соответствующие им спектры описываются выражением

$$S_i(f) = \frac{A_i}{\sqrt{2\pi}\sigma_{fi}} \exp\left(-\frac{(f-f_{0i})^2}{2\sigma_{fi}^2}\right), \quad (5)$$

где A_i - мощность i -ой составляющей, определяемая формулой

В среднем слое параметры ветра принимаются линейно зависящими от высоты. Соответствующий ему энергетический спектр определяется выражением

$$S_2(f; \alpha, \beta, R_0) = \frac{KA_2}{R_0^3} \int_{h_2}^{h_3} \exp\left(-\frac{4\ln(2)(h-\beta R_0)^2}{\theta^2} - \frac{(f-f_{02}(h))^2}{2\sigma_{f2}^2}\right) dh, \quad (6)$$

где

$$f_{02}(h) = \frac{2}{\lambda} \left(V_{01} + \frac{V_{03}-V_{01}}{h_3-h_2} (h-h_2) \right) \text{Cos}(\alpha - \varphi_2(h)); \quad (7)$$

$$\varphi_2(h) = \varphi_1 + \frac{\varphi_3-\varphi_1}{h_3-h_2} (h-h_2). \quad (8)$$

Суммарный сигнал, принимаемый радиолокатором в рассматриваемом случае, является суммой трех составляющих, отраженных каждым из слоев

$$S_{\Sigma}(f; \alpha, \beta, R_0) = \sum_{i=1}^3 S_i(f; \alpha, \beta, R_0). \quad (9)$$

Его ширина определяется как второй центральный момент данного спектра

$$\sigma_{f\Sigma}(\alpha, \beta, R_0) = \left(\int_{-\infty}^{\infty} f^2 S_{\Sigma}(f; \alpha, \beta, R_0) df - \left(\int_{-\infty}^{\infty} f S_{\Sigma}(f; \alpha, \beta, R_0) df \right)^2 \right)^{0,5}. \quad (10)$$



Рис. 4. Блок-схема модели сдвига ветра при наблюдении его метеорологическим радиолокатором

В итоге получаем выражение для пространственного распределения ширины спектра сигнала. В виде блок-схемы полученная модель представлена на Рисунке 4.

Для проверки правильности сделанного предположения разработана программа численного решения уравнения (10). Установлено, что пространственное распределение рассматриваемого параметра существенно зависит от соотношения вертикальных размеров элемента разрешения и второго слоя. Соответственно этому модель разделена на три варианта, названных по числу попадающих внутрь разрешаемого элемента радиолокатора слоев трех-, двух- и однослойным. Примеры схем наблюдения радиолокатором цели в каждом из этих вариантов и получаемые при этом карты ширины спектра отражений приведены на Рисунках 5 и 6.

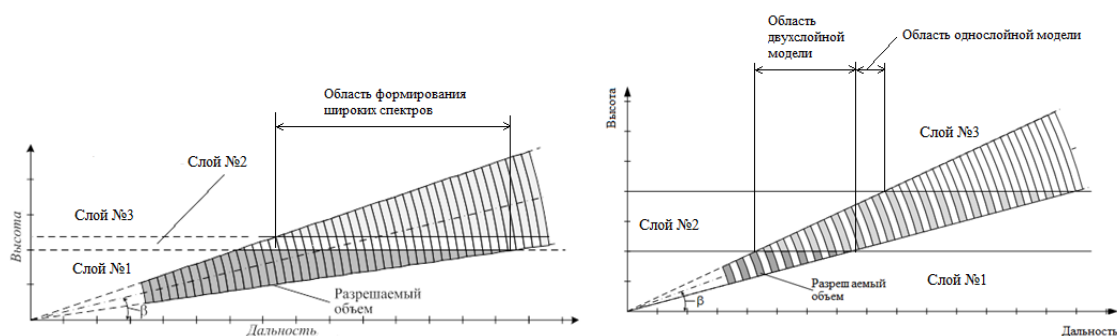


Рисунок 5 - Схемы наблюдения радиолокатором слоя со сдвигом ветра, соответствующие трехслойной (слева) и двух- и однослойной (справа) моделям

Очевидно, что распределения параметра на картах рисунка 6 фактически идентичны тем, что приведены на Рисунке 1. Это подтверждает правильность предположения о порождении этих распределений наличием сдвига ветра. Изменение зависимости параметров ветра с высотой во втором слое приводит к изменениям распределения параметров на рассматриваемых картах, что доказывает возможность решения обратной задачи – по особенностям распределения параметра на карте восстановить параметры сдвига ветра.

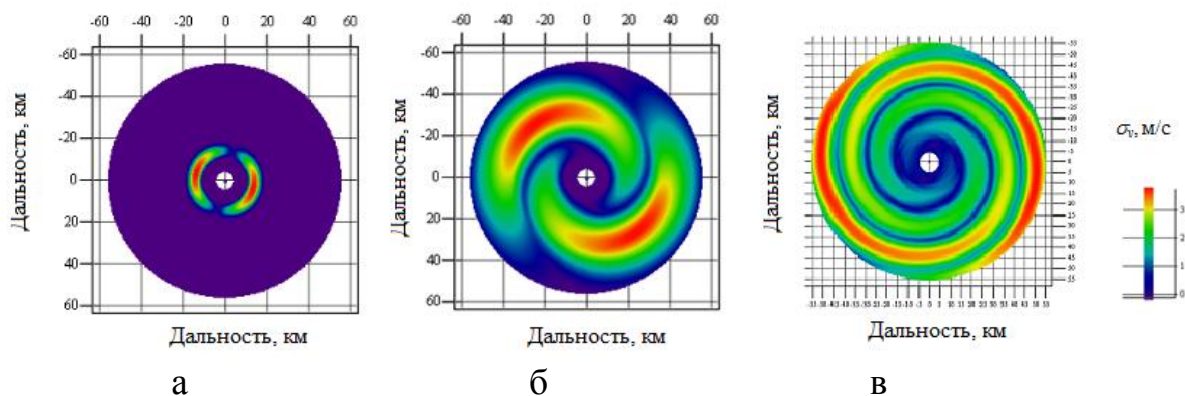


Рис. 6. Распределения параметра на карте ширины спектра принимаемого сигнала, соответствующие трех- (а), двух- (б) и однослойному вариантам модели.

Вторая модель касается наблюдения радиолокатором микропорыва или любого другого локального вертикального движения элементарных отражателей. Моделируется ширина спектра амплитуды отражений, формируемых в упомянутых условиях. Схема наблюдения радиолокатором данного явления представлена на Рисунке 7.

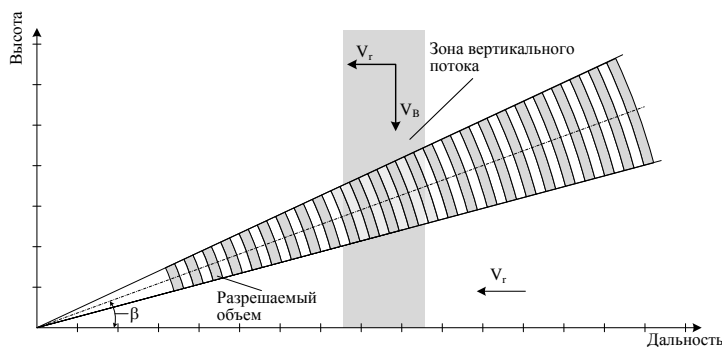


Рисунок 7 - Схема наблюдения радиолокатором микропорыва

Окружающее пространство представляется в виде фона и зоны вертикального потока, представляемой в виде вертикального цилиндра. Фон характеризуется радиолокационной отражаемостью $Z_{\text{фон}}$ и горизонтальной скоростью движения частиц, распределенной по нормальному закону со средним значением V_r и среднеквадратическим отклонением σ_{vr} . Зона вертикального потока с отражаемостью $Z_{\text{пот}}$, отличается тем, что внутри нее частицы, помимо горизонтального движения имеют вертикальное со средним значением V_v и среднеквадратическим отклонением σ_{vv} . Угол места антенны при этом не превосходит 5° , т.е. достаточно мал для того, чтобы вертикальная скорость могла сформировать достаточную по величине радиальную составляющую для обнаружения ее штатной системой обработки. Под последней понимается система фазовых детекторов и вычисление по их выходным данным спектральных характеристик сигнала методом парных импульсов.

Делается предположение о том, что в рассматриваемых условиях гораздо более информативным параметром будет ширина спектра амплитуды принимаемого сигнала. Иначе, применение амплитудного детектирования в данном случае становится эффективнее фазового. Однако оценивания ширины спектра одного только продетектированного сигнала недостаточно, т.к. увеличение данного параметра может быть вызвано различными причинами. Поэтому для рассматриваемого случая показателем существования в принятом отражении двух составляющих служит расширение спектра модуля сигнала σ_{fmod} при неизменной величине ширины спектра самого сигнала $\sigma_{f\Sigma}$.

Представим принимаемый от элемента разрешения с координатой наклонной дальности R_0 сигнал в виде суммы двух составляющих: сформированной фоном ($s_{\text{фон}}(t)$) и вертикальным потоком ($s_{\text{пот}}(t)$)

$$s_{\Sigma}(t) = s_{\text{фон}}(t) + s_{\text{пот}}(t), \quad (11)$$

Каждая из них является случайным процессом с мощностью

$$A_{\text{фон}} = \frac{K_1 Z_{\text{фон}}}{R_0^4} \int_{v_{\text{фон}}} G(v) dv \quad (12)$$

и

$$A_{\text{пот}} = \frac{K_1 Z_{\text{пот}}}{R_0^4} \int_{v_{\text{пот}}} G(v) dv \quad (13)$$

соответственно и нормированными корреляционными функциями

$$r_{\text{фон}}(\tau) = \exp\left(-\frac{\sigma_{v_{\Gamma}}^2 \tau^2}{2} - j\left(\omega_0 - \frac{2\pi V_{\Gamma}}{\lambda}\right)\tau\right), \quad (14)$$

$$r_{\text{пот}}(\tau) = \exp\left(-\frac{\sigma_{v_{\text{пот}}}^2 \tau^2}{2} - j\left(\omega_0 - \frac{2\pi(V_{\Gamma} + V_B \sin\beta)}{\lambda}\right)\tau\right), \quad (15)$$

где K_1 – коэффициент, определяемый параметрами радиолокатора;

$v_{\text{фон}}$ и $v_{\text{пот}}$ – объемы фонового пространства и зоны потока, попавшие внутрь элемента разрешения радиолокатора, описываемого функцией $G(v)$;

ω_0 – угловая частота несущего колебания.

Соотношение мощностей составляющих суммарного сигнала и разность их средних частот зависит от многих условий – скорости вертикального движения частиц, взаимного расположения потока и элемента разрешения и т.д. – и не могут быть рассчитаны для каждого набора координат. Поэтому суммарный сигнал в данном случае представим в виде двух слагаемых со случайными изменяющимися в широких пределах отношением мощностей $\varepsilon = A_{\text{пот}}/A_{\text{фон}}$ и относительной разностью средних радиальных скоростей $v = (|V_{0 \text{ пот}} - V_{0 \text{ фон}}|)/\sigma_{v_{\Gamma}}$.

Третья глава посвящена разработке методов распознавания опасных явлений на основе созданных в предыдущей главе моделей. Для этого они решены аналитически и на основе полученных формул решены обратные задачи. Здесь же рассмотрены методы распознавания других ОЯП и исследована возможность их применения в отечественном радиолокаторе ДМРЛ-С.

Для построения метода распознавания сдвига ветра рассматривалась отдельно каждый из вариантов построенной выше модели.

Численное решение трехслойного варианта при различных значениях задаваемых параметров показало, что отражения от второго (среднего) слоя практически не влияют на ширину спектра суммарного сигнала, если их мощность не превосходит мощности других составляющих. Поскольку последнее условие на практике выполняется, далее учитываем отражения только от верхнего и нижнего слоев. Находим второй центральный момент суммарного спектра, состоящего из двух Гауссовых функций,

$$\sigma_{f_{\Sigma}}(\alpha, \beta, R_0) = \left(\frac{A_1}{A_1 + A_3} \sigma_{f_1}^2 + \frac{A_3}{A_1 + A_3} \sigma_{f_3}^2 + \frac{A_1 A_3}{(A_1 + A_3)^2} (f_{01} - f_{03})^2 \right)^{0,5}. \quad (16)$$

Применение данной формулы затруднено присутствием в ее составе значений мощности составляющих сигнала. Каждая из них определяется величиной той части слоя, что попадает внутрь элемента разрешения. Чтобы оценить их величину необходимо знать точное значение отражаемости каждого из слоев внутри элемента разрешения и высоту границ каждого из слоев. Практически это невозможно.

Обойти данную трудность можно, если перейти к рассмотрению максимального значения рассматриваемого параметра. Имеется в виду

абсолютный максимум, т.е. поиск его по двум координатам – азимуту и дальности. Дело облегчается тем, что при фиксированном угле места значения средних частот спектра зависят только от азимута (формула (4)), значения мощности – только от дальности (формула (3)), а среднеквадратические отклонения частоты постоянны ввиду изотропности турбулентности. Очевидно, что по координате азимута максимум находится там, где максимально значение разности средних частот спектра $|f_{01} - f_{03}|$. Для нахождения точки максимума по координате дальности приравняем нулю производную функции (18) по R_0 и учитываем выполняемое в точке существования аномально широкого спектра неравенство $(f_{01} - f_{03})^2 \gg |\sigma_{f1}^2 - \sigma_{f3}^2|$. Отсюда определяем, что искомый максимум находится в точке выполнения равенства $A_1 = A_3$. Применяя его в формуле (16) и переходя от частот к радиальным скоростям, получаем рабочую формулу для нахождения величины вектора разности средних скоростей в верхнем и нижнем слоях

$$\Delta V = |V_{01} - V_{03}|_{max} = \sqrt{4\sigma_{V_{max}}^2 - 2\sigma_{V1}^2 - 2\sigma_{V3}^2}. \quad (17)$$

Для определения величины сдвига ветра необходимо еще оценить толщину второго слоя, в котором этот сдвиг существует. Для этого достаточно проанализировать карту вертикального распределения ширины спектра радиальных скоростей частиц. Разрез следует делать в направлении расположения максимальных значений параметра или перпендикулярно направлению на зоны разрыва кольца больших значений параметра (выбор зависит от особенностей конкретной карты). Схема формирования вертикального данного разреза приведена на Рисунке 8.



Рисунок 8 - Схема формирования вертикального распределения ширины спектра принимаемого сигнала

Отсюда следует, что верхняя граница слоя со сдвигом ветра определяется как высота верхней точки разрешаемого элемента на дальности, соответствующей началу формирования наблюдаемой на карте зоны повышенных значений ширины спектра $\tilde{h}_3 = (\beta + \theta/2)R_{0 \text{ нач}}$. Нижняя граница слоя оценивается как высота нижней точки элемента разрешения на дальности, соответствующей концу упомянутой зоны $\tilde{h}_2 = (\beta - \theta/2)R_{0 \text{ кон}}$. Искомая оценка толщины слоя $\tilde{H} = \tilde{h}_3 - \tilde{h}_2$.

Для аналитического решения двухслойного варианта модели обратим внимание на то, что одновременно со спиралью больших значений параметра на карте ширины спектра существуют спирали малых значений, как это хорошо

видно на Рисунке 6б. Как показано на Рисунке 3, при наличии сдвига ветра минимум ширины спектра отражений возникает на азимуте антенны, при котором значения средних радиальных скоростей частиц в каждом из наблюдаемых слоев становятся равными. Математически это выражается формулой $V_{R01} = V_{R02}$.

Первый (нижний) слой характеризуется постоянным значением вектора средней скорости. Поэтому $V_{R01} = V_{01} \text{Cos}(\varphi - \varphi_1) \text{Cos}\beta$. Во втором слое скорость и направления ветра линейно изменяются с высотой

$$V_{02}(h) = V_{01} + W(h - h_2), h \geq h_2, \quad (18)$$

$$\varphi_2(h) = \varphi_1 + \Omega(h - h_2), h \geq h_2, \quad (19)$$

где W – сдвига ветра по величине;

Ω – сдвиг ветра по направлению.

Для облегчения дальнейших расчетов вводим упрощенную аппроксимацию элемента разрешения в вертикальной плоскости в виде квадрата со стороной $r\sqrt{\pi}$, где $r = \theta R_0$. Тогда средняя радиальная скорость частиц второго слоя, попавших внутрь разрешаемого объема, определяется выражением

$$V_{R02} = \frac{\text{Cos}\beta}{h_0 - h_2 + \frac{\sqrt{\pi}r}{2}} \int_{h_2}^{h_0 + \frac{r\sqrt{\pi}}{2}} (V_{01} + W(h - h_2)) \text{Cos}(\alpha - (\varphi_1 + \Omega(h - h_2))) dh, \quad (20)$$

где $h_0 = \beta R_0$ – высота центра разрешаемого объема. После математических преобразований приходим к равенству

$$\frac{d\alpha}{dR} = \frac{\Omega}{4} \left(\beta + \frac{\sqrt{\pi}}{4} \theta \right), \quad (21)$$

т.е. находим функциональную связь между скоростью «завития» спирали малых значений параметра на карте конического разреза ширины спектра сигнала и скоростью изменения с высотой направления движения элементарных отражателей. Отдельно надо отметить, что поведение спирали практически не зависит от величины сдвига ветра по величине W .

Однослойный вариант модели характерен тем, что в нем аномально широких спектров не образуется, и анализу может быть подвержена только скорость «завития» спирали малых значений. Поскольку, как было показано выше, сдвиг ветра по величине не влияет на поведение спирали, считаем, что изменяется с высотой только направление ветра в соответствии с формулой (23). Среднее по разрешаемому объему значение радиальной скорости частиц определяется выражением

$$V_{r02} = \int_{h_0 - \frac{R_0\theta}{4}}^{h_0 + \frac{R_0\theta}{4}} V_{02} \text{Cos}\beta \text{Cos}(\varphi_1 + \Omega h - \alpha) \frac{2}{R_0\theta\sqrt{\pi}} dh. \quad (22)$$

Аналогично находим среднее значение квадрата радиальных скоростей

$$E(V_{r02}^2) = \int_{h_0 - \frac{R_0\theta}{4}}^{h_0 + \frac{R_0\theta}{4}} (V_{02} \text{Cos}\beta \text{Cos}(\varphi_1 + \Omega h - \alpha))^2 \frac{2}{R_0\theta\sqrt{\pi}} dh. \quad (23)$$

Решая уравнение

$$\frac{d}{d\alpha} (E(V_{r02}^2) - (V_{r02})^2) = 0, \quad (24)$$

находим зависимость, аналогичную (23),

$$\frac{d\alpha}{dR_0} = \beta\Omega. \quad (25)$$

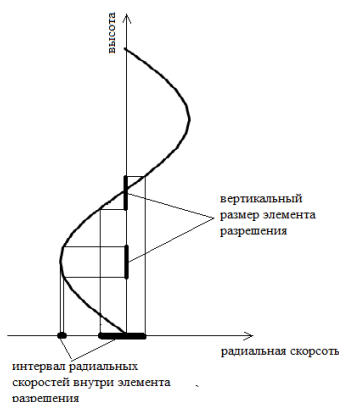


Рисунок 9 - Схема образования спирали малых значений ширины спектра отражений при однослойном варианте модели

Схема, объясняющая физику процесса образования исследуемой спирали, приведена на Рисунке 9. На ней распределение радиальной скорости частиц (в виде синусоиды) соответствует случаю, когда на минимальной высоте антенна радиолокатора перпендикулярна вектору скорости ветра. При изменении азимута антенны начальная фаза данной синусоиды изменяется – она смещается вверх или вниз по оси высот в зависимости от направления вращения вектора скорости. Соответственно изменяется и высота расположения ее максимумов, в которых и формируется спектр минимальной ширины. При фиксированном угле места антенны изменение высоты соответствует увеличению дальности, таким образом устанавливается линейная зависимость координат дальности и азимута участков малых значений рассматриваемого параметра, проявляющаяся на карте в виде спирали.

Полученные соотношения позволяют сформулировать следующий метод распознавания сдвига ветра в пограничном слое атмосферы и восстановления профиля ветра в слое высотой до 500 м, представленный на Рисунке 10 в виде блок-схемы.

Для разработки метода распознавания вертикального воздушного потока определяем корреляционную функцию принимаемого радиолокатором в данном случае сигнала

$$R_{\Sigma}(\tau) = A_{\text{фон}} r_{\text{фон}}(\tau) + A_{\text{пот}} r_{\text{пот}}(\tau). \quad (26)$$

Корреляционная функция амплитуды случайного процесса связана с корреляционной функцией самого процесса соотношением

$$R_{\text{mod}}(\tau) \approx \frac{\pi \sigma_{\Sigma}^2}{2} R_{\Sigma}^2(\tau). \quad (27)$$

Ширина спектра амплитуды суммарного сигнала определяем выражением

$$\sigma_{\text{mod}} = \sqrt{\frac{\int_0^{\infty} R_{\Sigma}^2(\tau) d\tau}{\int_0^{\infty} \tau^2 R_{\Sigma}^2(\tau) d\tau}}. \quad (28)$$

Подставляя его в формулу (30), получаем выражение, которое невозможно решить аналитически. Примеры численного решения приведены на Рисунке 11.

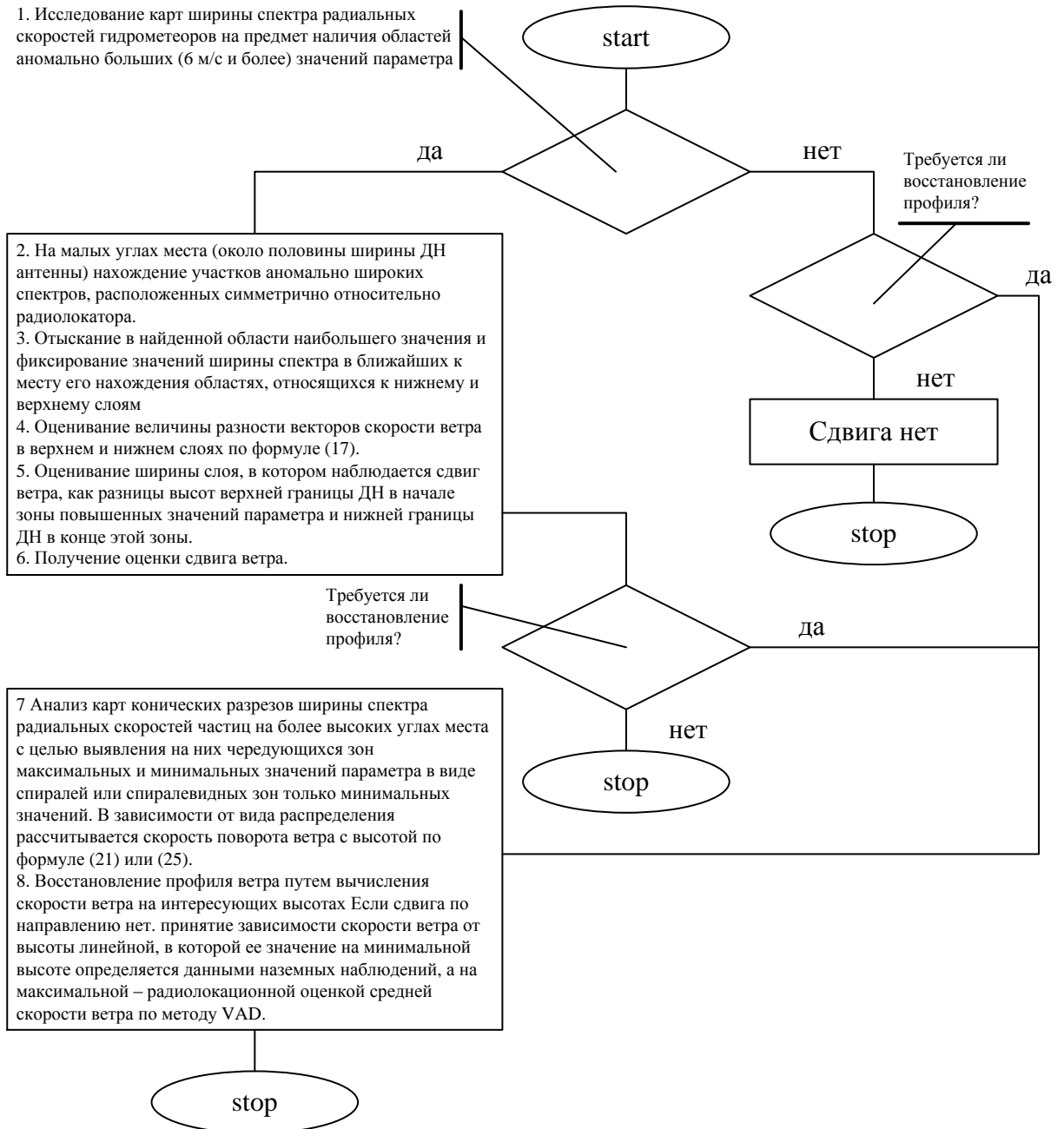


Рисунок 10 - Блок-схема метода обнаружения сдвига ветра и восстановления его профиля.

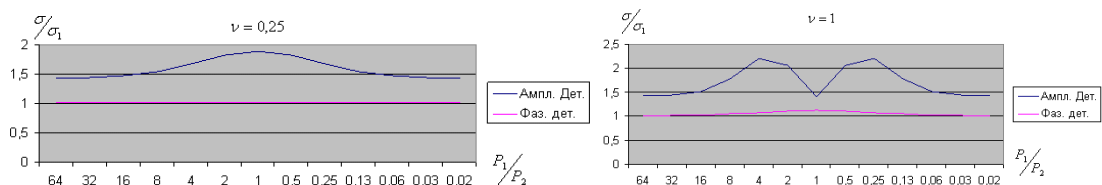


Рисунок 11 - Зависимости ширины спектра сигнала на выходе амплитудного и фазового детекторов от отношения мощностей отражений от фона и потока при $\sigma_{vг} = \sigma_{vв}$ и различных значениях величины $\nu = \frac{V_B \sin \beta}{\sigma_{vг}}$.

Приведенные результаты вычислений подтверждают сделанное предположение о том, что ширина спектра сигнала на выходе амплитудного детектора является гораздо более чувствительным показателем того, что спектр сигнала является двухмодальным, чем этот же параметр сигнала на выходе

фазового детектора. При этом существует данный эффект при малых разностях средних частот составляющих сигнала, не превышающих значения $2\sigma_{\text{вг}}$. Именно эти соотношения характерны для случая наблюдения вертикального потока под малыми углами места антенны.

На этом основывается метод распознавания вертикального потока в доплеровском метеорологическом радиолокаторе:

1. вводится отдельный канал обработки принимаемых сигналов, задачей которого является выделение амплитуды отражений и определение ширины спектра получаемого случайного процесса в каждом элементе разрешения радиолокатора;

2. полученная таким образом оценка сравнивается оценкой ширины спектра сигнала, полученной в том же элементе разрешения штатными методами. Появление зон, в которых отношение этих величин оказывается больше, чем в $\sqrt{2}$ раз, указывает на существование здесь вертикального потока частиц.

Шквал в некогерентном радиолокаторе идентифицируется по косвенным признакам – высоте верхней границы облачности и особенностям пространственного распределения радиолокационной отражаемости. Наличие когерентного режима позволяет решать эту задачу с помощью оценок среднего значения энергетического спектра принимаемых отражений, т.е. непосредственно. При этом обнаруживается не только шквал, но и сильный ветер любого происхождения.

Рассмотрен обобщенный метод VAD (дисплей азимутальной скорости), при котором зона обзора разбивается на участки требуемого размера (область \mathbf{D}), и в каждом из тех, что представляют интерес, ищутся оценки квадратурных составляющих скорости ветра (\tilde{V} и \tilde{U}) путем аппроксимации получаемых оценок средней радиальной скорости частиц \tilde{K}_i .

Для этого метода получены зависимости между дисперсией оценок (D_{Σ}), временем наблюдения и выбранным размером области \mathbf{D} :

$$D_{\Sigma} = D(\tilde{U}) + D(\tilde{V}), \quad (29)$$

где

$$D(\tilde{U}) = \frac{\sum_i^m D(\tilde{K}_i) \left(\sum_j^m \sin \varphi_j \sin(\varphi_j - \varphi_i) \right)^2}{p \left(\sum_i^m \sum_j^m \sin \varphi_j \cos \varphi_i \sin(\varphi_j - \varphi_i) \right)^2}; \quad (30)$$

$$D(\tilde{V}) = \frac{\sum_i^m D(\tilde{K}_i) \left(\sum_j^m \cos \varphi_j \sin(\varphi_j - \varphi_i) \right)^2}{p \left(\sum_i^m \sum_j^m \cos \varphi_i \sin \varphi_j \sin(\varphi_i - \varphi_j) \right)^2}; \quad (31)$$

$D(\tilde{K})$ – дисперсия, определяемая методом нахождения оценки среднего значения спектра радиальных скоростей частиц;

φ_i – азимут антенны, при котором получена i -ая оценка;

m – число элементов разрешения по азимуту, приходящихся на один участок, по которому усредняются данные,

p – число оценок, получаемых под одним азимутом.

Показывается, что более подробную информацию о пространственном распределении скорости воздуха дает метод бистатической радиолокации (Рисунок 12).

Ее практическое применение до сих пор тормозилось особенностью построения приемника, которая заключалась в том, что антенна последнего не может быть остронаправленной, а это резко снижает мощность входного сигнала.

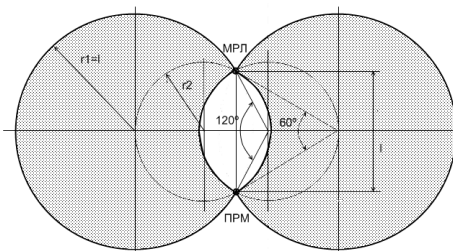


Рисунок 12 - Схема расположения рабочей зоны бистатической системы «Радиолокатор (МРЛ) – приемник (ПРМ)».

Проведенный анализ современного состояния вопроса показывает, что данная проблема преодолевается за счет применения в радиолокаторах сложных зондирующих сигналов. Эквивалентная импульсная мощность (у ДМР-С, например, она составляет 900 кВт) в значительной степени компенсирует потери от слабой направленности антенн. Расчеты показывают, что в данных условиях на дальностях до 50 км рассматриваемая система будет работоспособна при радиолокационной отражаемости цели, большей или равной -20 дБ, что соответствует отражательной способности среднего тумана.

Опасным явлением, связанным с осадками, может быть либо сильный ливень, либо большое количество осадков, выпавших за определенное время. В обоих случаях непосредственному измерению радиолокатором подлежит их интенсивность.

В ДМРЛ-С для этой цели реализован метод, основанный на предположении о распределении размеров капель по закону Маршалла-Пальмера, точность которого недопустимо мала. Поэтому актуален поиск новых путей решения рассматриваемого вопроса.

В этом могут помочь поляризационные измерения, причем в двух аспектах:

- Дистанционным распознаванием типа осадков, что позволяет правильно выбрать коэффициенты в формуле, основанной на распределении Маршалла-Пальмера;

- Оцениванием их интенсивности при помощи метода, основанного на применении поляризационных характеристик принимаемых отражений.

По оценкам специалистов последний метод в два раза увеличивает точность измерений, что делает актуальной задачу его внедрения на сеть штормооповещения России. Делается вывод о необходимости проверки его

применимости в радиолокаторе ДМРЛ-С, обладающим рядом особенностей, способных затруднить данное внедрение.

Град – явление, идентификация которого в наибольшей степени модернизируется поляризационными измерениями. Вместо косвенных признаков градоопасности облака, применяемых в некогерентных радиолокаторах, они позволяют непосредственно обнаруживать области образования града и оценивать среднюю величину градин.

Предлагается поиск зон интенсивного градообразования начинать с обнаружения восходящих потоков, являющихся необходимым условием их появления. Использование для этих целей спектральной обработки сигнала возможно только на близких расстояниях. Преодолеть данное ограничение позволяет использование модуля коэффициента взаимной корреляции поляризационных составляющих отражений.

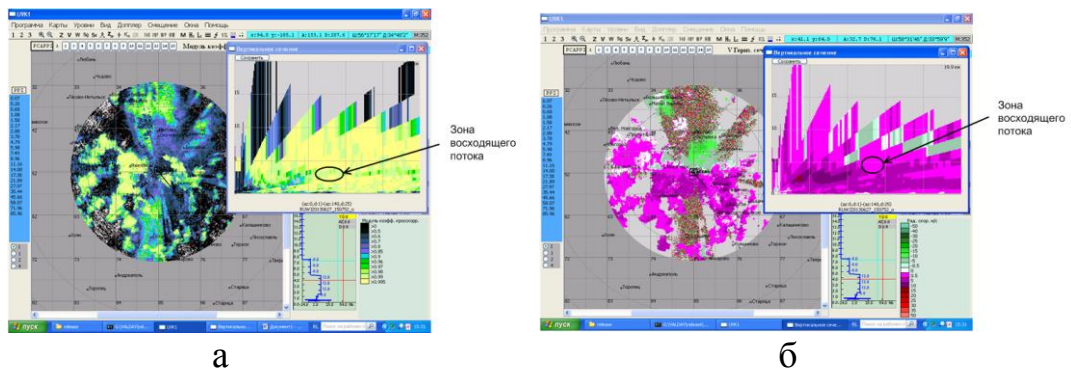


Рисунок 13 - Карты модуля коэффициента взаимной корреляции поляризационных составляющих сигнала (а), среднего значения спектра радиальных скоростей частиц (б).

При движении частиц сверху вниз на вертикальных разрезах данного параметра хорошо просматривается зона таяния в виде полосы его пониженного значения. При движении в обратном направлении таяния не происходит и в упомянутой полосе образуется разрыв. Именно его обнаружение говорит о наличии в этом месте интенсивного восходящего потока. Данное утверждение подтверждено примером наблюдения грозового облака, расположенное на малой дальности, достаточной для фиксации вертикального движения гидрометеоров методами спектральной обработки (Рисунок 13).

Далее исследуется область облака, расположенная над разрывом в зоне таяния. Близкое к нулю значение дифференциальной отражаемости и большое значение радиолокационной отражаемости указывает на существование здесь крупного града. Для расчета его размера требуется знать сухие или обводненные гидрометеоры мы наблюдаем. Информация об этом содержится в величине модуля коэффициента взаимной корреляции создаваемых ими отражений. После этого становится возможным установить, превысил ли диаметр градин порог, достаточный для того, чтобы долететь до земли, не растаяв.

Смерч - наиболее трудно распознаваемое из всех обнаруживаемых радиолокатором опасное явление погоды.

В доплеровском радиолокаторе достаточно надежное распознавание данного явления возможно по появлению большого скачка величины среднего значения спектра сигналов, полученных из рядом расположенных элементов разрешения. Обусловлен этот эффект большой скоростью вращения воздуха, но проявляется только в случае, если размер разрешаемого объема радиолокатора меньше размеров наблюдаемого смерча (Рисунок 14).

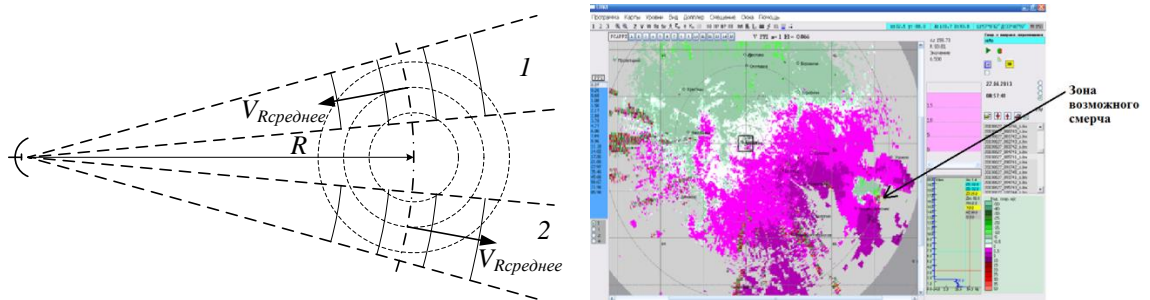


Рисунок 14 - Схема образования скачка средней радиальной скорости отражений от смерча (слева) и случай наблюдения подобного скачка на карте средних радиальных скоростей (справа).

Выполняется данное условие, как правило, на малых дальностях. В остальных же случаях предиктором может служить только увеличение ширины спектра отражений, а это параметр, зависящий от множества других факторов (например, от сдвига ветра).

Делается предположение о том, что помочь делу обнаружения смерчей могут поляризационные параметры, а именно модуль коэффициента взаимной корреляции составляющих сигнала. Этот параметр чутко реагирует на присутствие в элементе разрешения отражателей неметеорологического происхождения. Поскольку смерч в процессе своего существования поднимает с земли большое количество пыли, листьев и т.п. предметов, значение упомянутого параметра уменьшается, что и может быть использовано как предиктор наблюдения данного опасного явления.

Пыльная буря, во-первых, сама является опасным явлением, во-вторых, может быть ложно идентифицирована как осадки и тем самым внести ошибку в оценку их количества за выбранный промежуток времени. Некогерентный радиолокатор неспособен ее распознать. Поляризационные же измерения решают эту задачу, для чего предлагается использовать три характерных признака:

- значение модуля коэффициента взаимной корреляции меньше 0,8;
- нахождение оценки дифференциальной отражаемости в пределах $-1 - 1$ дБ;
- занятие целью достаточно большой площади пространства, начиная от самых нижних высот.

Скопление птиц и насекомых представляет опасность для воздушных судов, идущих на взлет или посадку. В некогерентном радиолокаторе распознавать данное опасное явление предлагалось путем межобзорной обработки – траектории полета птиц прямолинейны и не совпадают по направлению с ветром.

Однако подобный метод результативен только при наблюдении птиц в чистом небе. Отражения от метеообразований маскируют эхо птиц.

В когерентном радиолокаторе существует возможность использовать для решения поставленной задачи наличие в спектре принятых отражений составляющих с частотой взмаха крыльев. Однако требования к длительности выборки, позволяющей выделить такие малые частоты, несовместимы с требованиями к радиолокатору, включенному в сеть штормоповещения.

Наибольшей эффективности в данном случае следует ожидать от поляризационных измерений. Распознавание данного явления при этом основано на выполнении двух условий:

- значение модуля коэффициента взаимной корреляции поляризационных составляющих сигнала менее 0,8;
- значение дифференциальной отражаемости более 5 дБ.

Четвертая глава состоит из описаний экспериментальных проверок эффективности методов обработки информации многопараметрического радиолокатора. К сожалению, распознавание не всех опасных явлений подвергнуто такой проверке. Для одних это было невозможно из-за сложностей постановки эксперимента (микрорыв, сильный ветер), для других главная проблема – редкость его появления в климатических условиях России (смерч, пыльная буря).

Экспериментальная проверка разработанной методики распознавания сдвига ветра проведена на данных радиолокатора ДМРЛ-С. Спектральные характеристики принимаемого сигнала в нем оцениваются методом парных импульсов (МПИ), основанном на предположении о гауссовой форме спектра отражений. В соответствии же с изложенной выше теорией в интересующих нас условиях спектр сигнала становится двухмодальным, т.е. совсем не похожим на гауссову кривую. Поэтому исследовано поведение данной стандартной процедуры оценивания ширины спектра при наличии в этом спектре двух максимумов.

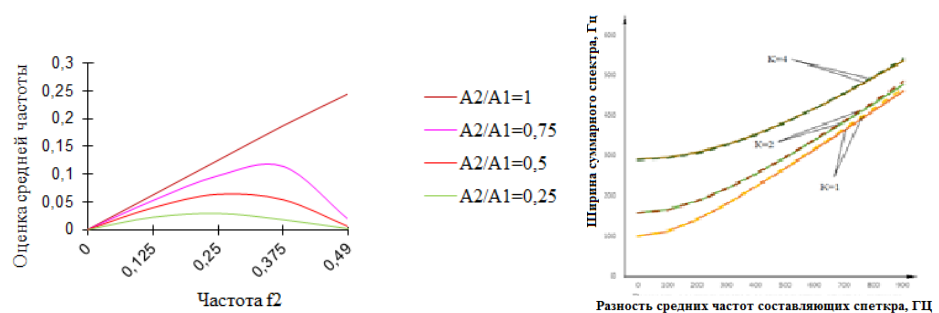


Рисунок 15 - Зависимость оценки средней частоты спектра от отношения мощностей его составляющих (A_2/A_1) при равной ширине спектров составляющих и средних значениях $f_1 = 0$ и $f_2 = 0,49f_{cp}$ (слева) и зависимость оценок ширины спектра сигнала от разности средних частот спектра его составляющих при различных отношениях ширины их спектра и их мощностей $A_2/A_1 = 1$. Сплошная линия – истинное значение параметра, пунктирная – оценка, полученная методом парных импульсов.

Пример сравнения для случая, когда составляющие спектра имеют одинаковую ширину, среднее значение одной из них равно 0, а значение второй измеряется от 0 до $0,49f_{гр}$, где $f_{гр}$ – граничная частота интервала однозначного измерения скорости, можно видеть на Рисунке 15. Здесь же приведены результаты аналогичного исследования для оценок ширины спектра сигнала.

Установлено, что оценки среднего значения спектра в рассматриваемом случае оказываются смещенными. Величина смещения зависит от отношения мощностей составляющих сигнала и не может быть компенсирована. Оценки ширины спектра отражений оказываются несмещенными, т.е. данные радиолокатора ДМРЛ-С могут использоваться в проверке метода.

Исследованы данные радиолокатора ДМРЛ-С, установленного в г. Валдай Новгородской области, в период с декабря 2010 г. по февраль 2011 г. Поскольку в качестве эталонных значений использовались данные аэрологического зондирования, отбирались лишь радиолокационные обзоры, наиболее близкие по времени к моменту запуска зонда (0 и 12 часов УМТ), общим числом 180. Из них по критериям надежной работы исследуемого метода (средняя отражаемость целей не менее 10 дБ и облачность не хуже 6 баллов) был отобран 71 обзор. Далее они проверялись на наличие характерных особенностей распределения параметра на картах ширины спектра радиальных скоростей частиц. Всего набралось 19 карт с такими особенностями. Для них рассчитывалась величина сдвига ветра по разработанной методике и проверялась на превышение порога 1 м/с на 30 м.

Одновременно по данным аэрологической станции «Бологое», расположенной в 45 км от радиолокатора, в 19 отобранных обзорах искались сдвиги ветра, превышающие указанную пороговую величину, на высотах до 1,5 км. Результаты сведены в таблицу 1, где случаи обнаружения сдвига ветра величиной более 1 м/с на 30 м выделены цветом.

Из девяти случаев сдвига ветра, обнаруженного аэрологическим зондированием, восемь распознаны радиолокатором. Ни одного случая ложного распознавания не выявлено.

На реальных радиолокационных данных проверена методика восстановления профиля направления ветра по оценкам ширины спектра отражений. В качестве эталона в этом случае принят «стандартный» профиль скорости ветра в слое Экмана. Во внимание принята только часть слоя от 100 до 400 м, внутри которого вектор скорости ветра поворачивается с высотой почти равномерно со средней скоростью 0,12 град/м.

Из карт конических разрезов ширины спектра радиальных скоростей гидрометеоров, сделанных на малых (до трех градусов) углах места антенны отобраны те из них, что содержат спирали малых значений параметра, расположенные в самом начале развертки луча. Пример такой карты представлен на Рисунке 16.

Фиксировались точки этой спирали, расположенные на высоте 100 и 400 м над землей, после чего по полученной расчетным путем формуле определялась скорость вращения ветра. Всего исследовано 40 карт, среднее значение искомой скорости – 0,115 град/м. Расчетное значение этого коэффициента - 0,12 град./м.

Таблица 1. – Сводная таблица расчетов сдвига ветра.

Месяц, год	Дата	Время (UTC), ч	Величина сдвига, м/с на 30 м	
			Метод на основе анализа ширины спектра сигнала	Метод на основе данных аэрологического зондирования
Декабрь, 2011	3	00	1,96	2,09
	5	00	1,3	1,02
	10	00	1,5	1,82
	16	12	0	0
	18	12	2,6	2,8
Январь, 2012	3	12	0	0
	4	12	1,4	1,97
	5	00	2,6	1,55
	7	00	0	0
	12	00	0	2,76
	13	00	2,5	4
	15	12	0	0
	21	12	0	0
22	00	0	0	
Февраль, 2012	5	12	0	0
	8	00	0	0
	22	00	0	0
	23	00	1,4	1,04
	24	00	0	0

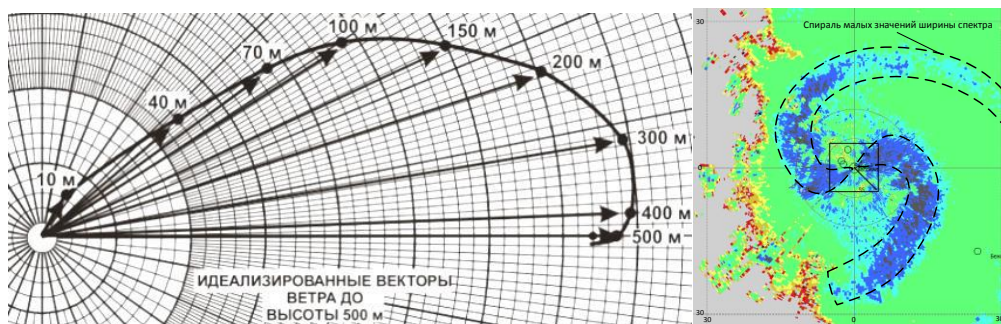


Рисунок 16 - Спираль Экмана (слева) и соответствующая ей спираль малых значений на карте ширины спектра радиальных скоростей частиц (справа).

Проведена экспериментальная проверка методики распознавания градоопасного облака на основе поляризационных измерений. Использованы данные радиолокатора ДМРЛ-С в г. Валдай. Методика исследования состоит в следующем:

- на сайте <http://www.pogodaiklimat.ru/archive.php> фиксировались случаи наблюдения града. При этом просматривались данные двадцати метеостанций, попадающих в зону обзора радиолокатора ДМРЛ-С, установленного в г. Валдай Новгородской области, соответствующие по времени имеющимся в распоряжении автора радиолокационным данным – теплые периоды (с мая по сентябрь) 2011 – 2013 годов;

- рассматривались циклы радиолокационных обзоров, проведенные за 30 минут до фиксации града;
- проверялись карты дифференциальной отражаемости на наличие деполаризационного ослабления, проявляющегося в виде зон отрицательных значений параметра, расположенных на высоте более 300 м. Их присутствие указывает на наличие в облаке крупного града и автоматически ведет к признанию его градоопасным;
- на карте коэффициента взаимной корреляции делались вертикальные разрезы исследуемой цели. В наблюдаемых на указанных разрезах зонах таяния частиц, имеющих вид горизонтальных полос пониженного значения данного параметра, находились «разрывы», однозначно указывающие на наличие в этой области восходящих потоков воздуха;
- в области, находящейся над «разрывом», т.е. выше нулевой изотермы, оценивалась радиолокационная отражаемость. Если она оказывалась больше 30 дБ, переходили к оценке дифференциальной отражаемости. Нахождение последней в пределах -1 - +1 дБ, указывало на существование здесь крупных градин;
- оценивалась величина коэффициента кросс-корреляции отражений исследуемой части пространства. Нахождение этих оценок в пределах 0,98 – 1 говорит о том, что наблюдаемый град сухой. Это дает возможность однозначно оценить его диаметр;
- по величине радиолокационной отражаемости рассчитывался диаметр сформировавшихся градин и сравнивался с некоторым расчетным значением, определяемым как минимальный размер градины, способной долететь до земли, не растаяв полностью. Превышение получаемой оценки данного расчетного значения говорит о появлении градоопасной области в исследуемой метеоцели.

Всего зафиксировано 13 случаев выпадения града. Для всех получен положительный прогноз о возможности наступления рассматриваемого опасного явления.

Проведена проверка применимости в радиолокаторе ДМРЛ-С нового метода оценивания интенсивности осадков. Данные радиолокатора, установленного в г. Валдай обрабатывались традиционным и старым методами и сравнивались на предмет отсутствия грубых расхождений (Рисунок 17). За последнее принималась разница в оценках более 300%. В итоге проверено 32 пары карт, грубых расхождений данных на них не выявлено, в результате чего новый метод можно считать применимым на сети штормоповещения РФ.

По результатам эксперимента сформулированы рекомендации по обработке данных.

В пятой главе рассматриваются дополнительные возможности, которые появляются у метеорологического радиолокатора благодаря примененным в нем техническим решениям, а также за счет объединения получаемой им информации с данными других технических средств дистанционного зондирования. К упомянутым техническим решениям относятся:

- сложный зондирующий сигнал;

- излучение волн двойной поляризации;
- минимизация аппаратуры.

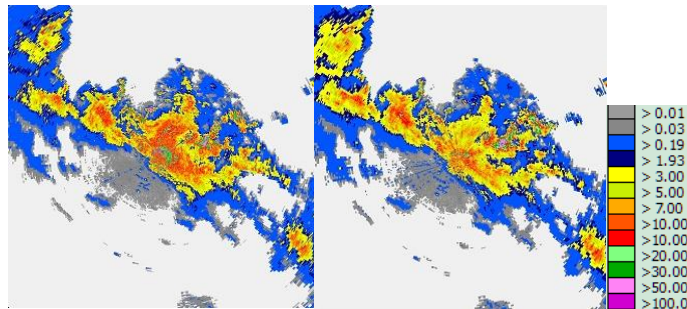


Рисунок 17 - Карта интенсивности осадков, рассчитанной традиционным (слева) и новым методом (справа).

Сложный зондирующий сигнал (НЧМ импульс) был разработан для выполнения требований по средней наработке на отказ и впервые применялся в серийном метеорологическом радиолокаторе. Поэтому внедрению его в практику радиометеорологических наблюдений предшествовали теоретические исследования, показавшие, что его применение не приводит к искажению формы и спектра принимаемого сигнала.

Для подтверждения факта подавления фильтром сжатия боковых лепестков выходного сигнала до уровня -50дБ совместно с ОАО «НПО «ЛЭМЗ» был поставлен эксперимент по сравнению данных, получаемые с помощью НЧМ сигнала и обычного импульса, давший положительный результат.

Исследован вопрос об использовании НЧМ импульса для «окраски» сигнала при преодолении неоднозначности по дальности путем череспериодной смены знака модулирующей функции. Для этого смоделирован сигнал на выходе фильтра сжатия в указанных условиях и рассчитана средняя частота его спектра. В результате доказана несмещенность оценок данного параметра.

Излучение волн двойной поляризации, имеющее целью получение дополнительной информации о наблюдаемых объектах, предоставляет дополнительную возможность «окраски» импульсов и расширения за счет этого интервала однозначного измерения скорости. Проведены расчеты точности получаемых при этом оценок мощности, дифференциальной отражаемости, дифференциальной фазы и модуля коэффициента взаимной корреляции поляризационных составляющих принимаемого сигнала. Результаты позволяют утверждать, что точность оценок при переходе к череспериодному излучению при одновременном удвоении частоты следования импульсов остается практически такой же, что и при одновременном излучении.

Еще одно дополнительное применение поляризационных измерений – их использование для фильтрации помех, создаваемых местными предметами. Предлагается метод подавления рассматриваемой помехи, основанный на привлечении еще одного поляризационного параметра сигнала, а именно модуля коэффициента взаимной корреляции его поляризационных составляющих.

Минимизация аппаратуры привела к такому уменьшению массы и габаритных характеристик приемо-передатчиков, что их стало возможным

размещать непосредственно на антенне. Это позволило создавать малогабаритные радиолокаторы с диаметром антенны около 1,5 метров, что открывает перспективы для использования малогабаритных радиолокаторов в качестве дополнительного оборудования в сети штормооповещения. Их применение может стать хорошей альтернативой уплотнению сети. Пример взаимного расположения радиолокаторов приведен на Рисунке 18.

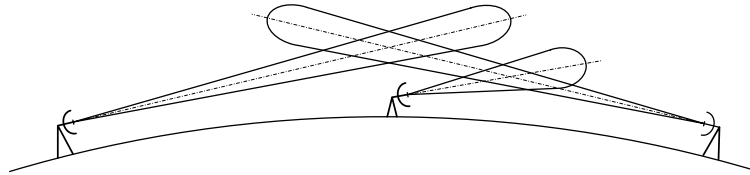


Рис. 18. Схема расположения диаграмм направленности радиолокаторов ДМРЛ-С и место возможной установки малогабаритного радиолокатора.

Необходимо только убедиться в том, насколько информация малогабаритных радиолокаторов согласуется с данными радиолокаторов, используемых на сети. Для проверки этого проведено экспериментальное исследование. Проверялся отечественный малогабаритный радиолокатор «Контур МЕТЕО-01». Данные для сравнения брались с установленного в аэропорту Пулково радиолокатора «Метеор 500С». Обе РЛС имели различные характеристики, располагались в разных местах и имели различный режим работы. Это заставило разработать специальную методику сравнения данных, основанную на вычислении коэффициента корреляции получаемых ими оценок отражаемости наблюдаемых целей.

Статистической обработке была подвергнута выборка из 4,5 тысяч пар результатов измерений. Результаты теоретических расчетов и практических данных приведены в Таблице 2.

Таблица 2. Результаты теоретических и статистических расчетов по определению коэффициента корреляции оценок, получаемых радиолокаторами «Метеор 500» и «Контур МЕТЕО-01»

Интервал дальностей	Расчетное значение	Результат статистической обработки
0-50 км	0,6	0,73
50-100 км	0,69	0,67
100-150 км	0,7	0,45

Они показывают хорошее совпадение оценок, получаемых обоими радиолокаторами, на дальностях до 100 км. Очевидно, именно эта величина должна быть принята как максимальная для малогабаритного радиолокатора с характеристиками, подобными тем, что имеет «Контур МЕТЕО-01».

В этой же главе рассмотрены вопросы совмещения данных метеорологического радиолокатора с данными других метеорологических приборов. К последним относятся СВЧ радиометры и лидары.

Идея совместных измерений с радиометром родилась еще в 60-е годы прошлого века. Создание пассивно-активной радиолокационной станции – комплекса, объединяющего два технических средства – позволяет распределить получаемую радиометром интегральную оценку водности по объему наблюдаемой метеоцели при помощи данных радиолокатора об относительном распределении воды в нем. При этом возможно вычисление вертикально интегрированной водности, позволяющей с высокой степенью вероятности диагностировать опасные явления, связанные с конвективной облачностью.

Измерения должны проводиться синхронно, что и составляло главную трудность в создании такого комплекса из-за большой инерционности радиометров. В настоящее время эта трудность преодолена, что позволило создать ПАРЛС на основе радиолокатора ДМРЛ-С. Приводятся схемы построения и основные характеристики созданной аппаратуры.

Объединение с лидаром дает эффект в случае измерения профиля ветра. Для обеспечения работоспособности при любых метеорологических условиях актуально создание комплекса профилометров ИК и радиодиапазона, объединенных единой системой обработки сигнала и размещенных на одной поворотной платформе. При этом, как показывают расчеты, хорошее перекрытие всех возможных метеорологических ситуаций достигается в случае присутствия в комплексе двух радиолокаторов с длиной волны 8 мм (Ka-диапазон) и 3 см (X-диапазон).

Приводятся расчеты характеристик радиопрофилемеров, входящих в состав комплекса, созданного на базе лидара ЛС-014 (ООО «Лазерные системы», Санкт-Петербург), метеокомплекса 1Б67 (ЦКБА, г. Тула) и радиолокатора «Контур ВЦ» (ООО «Контур-НИИРС», Санкт-Петербург).

В заключении сформулированы основные результаты, полученные при работе над диссертацией.

На основе теоретических и экспериментальных исследований поставлена и решена крупная проблема повышения информативности и качества работы сети штормооповещения Российской Федерации, основу которой составляют отечественные многопараметрические радиолокаторы ДМРЛ-С. Получены следующие основные результаты:

1. Проанализировано современное состояние радиолокационных методов распознавания и исследования опасных явлений погоды. Установлено, что существует большой незадействованный на настоящий момент времени потенциал повышения эффективности работы современного метеорологического радиолокатора, заключающийся в использовании всех оцениваемых им параметров принимаемых отражений. Определены основные направления решения данной задачи: более полное использование такого ресурса, как информационные возможности ширины спектра отражений, и рассмотрение всех получаемых оценок в комплексе. Это позволяет улучшить показатели распознавания тех опасных явлений погоды, что на настоящий момент подлежат радиолокационному распознаванию, а также расширить список последних.

2. Исследованы особенности наблюдения сдвига ветра в пограничном слое атмосферы доплеровским радиолокатором на основе численного решения модели данного опасного явления погоды. Выделены три варианта модели в зависимости от соотношения вертикальных размеров слоя атмосферы со сдвигом ветра и разрешаемого объема радиолокатора. Для каждой из них определены характерные пространственные распределения ширины спектра отражений. Доказана связь между параметрами сдвига ветра (величина сдвига, наличие сдвига по направлению, ширина слоя) и параметрами пространственного распределения ширины спектра отражений (его максимальное значение, наличие спиралей больших и малых значений, скорость «завития» этих спиралей и т.д.).

3. На основе решения обратной задачи разработаны методы распознавания сдвига ветра в пограничном слое атмосферы, а также восстановления профиля ветра на высотах до 500 м по оценкам ширины спектра принимаемых отражений. В отличие от используемых на данный момент методов, применяющих оценки средней частоты спектра, новые обеспечивают требуемую разрешающую способность независимо от ширины диаграммы направленности антенны радиолокатора и длительности его зондирующего импульса. Их реализация в современном метеорологическом радиолокаторе не требует внесения каких-либо изменений в его конструкцию или режим работы.

4. Исследованы особенности радиолокационного наблюдения вертикального потока элементарных отражателей под малыми углами места антенны с помощью моделирования данного потока, позволяющего представить создаваемые при этом отражения в виде суммы двух составляющих с различным соотношением мощностей и разницей доплеровских сдвигов частоты, не превосходящей по величине суммы ширин спектра этих составляющей.

5. На основе созданной модели разработан метод распознавания микропорывов и иных вертикальных потоков частиц, использующий оценки ширины спектра сигналов на выходе фазового и амплитудного детекторов.

6. Проанализированы возможности использования уже известных методов распознавания и исследования опасных явлений, основанных на применении спектральных и поляризационных характеристик принимаемого сигнала. Показано, что с их помощью могут эффективно распознаваться градоопасные облака, осадки большой интенсивности, смерч, шквал, сильный и ураганный ветер, пыльная буря, скопление птиц и насекомых.

7. Проведены экспериментальные исследования, включающие в себя разработку методик получения данных различными методами, их обработки и сравнения между собой. Достигнуты следующие результаты:

- подтверждена эффективность метода распознавания сдвига ветра по оценкам ширины спектра принимаемых отражений путем сравнения получаемых таким образом данных с данными температурно-ветрового зондирования;
- доказана возможность восстановления профиля ветра для высот до 500 м по оценкам ширины спектра принимаемых отражений путем сравнения получаемых таким образом данных с результатами теоретических расчетов скорости изменения направления ветра с высотой в слое Экмана;

- опробован метод распознавания градоопасного облака на основе оценок поляризационных параметров отражений путем сравнения получаемых с его помощью данных с данными наземных метеорологических станций;
- показана принципиальная возможность применения в отечественном радиолокаторе ДМРЛ-С метода определения интенсивности осадков по оценкам поляризационных параметров отражений путем сравнения получаемых с его помощью данных с данными метода, основанного на распределении размеров капель по закону Маршалла-Пальмера;
- установлена способность малогабаритного радиолокатора «Контур МЕТЕО-01» эффективно обнаруживать метеорологические цели в радиусе 100 км путем сравнения получаемой им информации с данными радиолокатора «Метеор – 500 С».

8. Показаны возможности оптимизации условий наблюдения ОЯП за счет применения сложного зондирующего импульса для повышения метеорологического потенциала радиолокатора и расширения интервала однозначного измерения средней скорости частиц, использования для этой же цели череспериодной смены поляризации излучаемой волны, привлечения оценок поляризационных характеристик цели для подавления отражений от местных предметов в случае совместного наблюдения помехи и полезного сигналов.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ.

В изданиях, входящих в перечень ВАК РФ:

1. Жуков, В.Ю. Состояние и перспективы радиофизических исследований атмосферы и подстилающей поверхности / В.Ю. Жуков, Г.Г. Щукин, В.Д. Степененко, С.П. Образцов, Д.М. Караваев, Ю.В. Рыбаков // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И.Воейкова. – 2009. - № 560. - С. 143-168.
2. Жуков, В.Ю. Доплеровский радиолокационный метод определения характеристик поля ветра и некоторые результаты / В.Ю. Жуков, И.А. Готюр, Ю.В. Кулешов, С.В. Чернышев, Г.Г. Щукин // Ученые записки РГГМУ. – 2011. – № 21. – С. 66–75.
3. Жуков, В.Ю. Исследование возможности повышения оперативности работы метеорадиолокатора ДМРЛ за счет поочередного излучения ортогональных широкополосных сигналов. / В.Ю. Жуков // Ученые записки РГГМУ. – 2011. - № 21. – С. 112-117.
4. Жуков, В.Ю. Информационные возможности доплеровских метеорологических радиолокаторов с двойной поляризацией / В.Ю. Жуков, И.А. Готюр, А.М. Девяткин, Ю.В. Кулешов, Г.Г. Щукин // Ученые записки РГГМУ. – 2013. – № 32. – С. 66–83.
5. Жуков, В.Ю. Состояние и перспективы сети доплеровских метеорологических радиолокаторов / В.Ю. Жуков, Г.Г. Щукин // Метеорология и гидрология – 2014. – №2. – С. 92–100.
6. Жуков, В.Ю. Использование мобильного метеорологического радиолокатора «Контур МЕТЕО-01» в работах по активному воздействию на

облака / В.Ю. Жуков, А.А. Бычков, Б.П. Колосков, В.П. Корнеев, А.В. Шаповалов, Г.Г. Щукин // Известия ВУЗов. Северокавказский регион. Естественные науки.- 2014. - №4. - С. 62-65.

7. Жуков, В.Ю. Лидарно-радиолокационный метеорологический комплекс / В.Ю. Жуков, Г.Г. Щукин, А.С. Борейшо, М.Ю. Ильин, М.А. Коняев // Известия ВУЗов. Физика – 2015.- т.58, №10/3. - С. 100-104.

8. Жуков, В.Ю. Обнаружение сдвига ветра на основе анализа карт ширины спектра сигнала, принимаемого метеорологическим радиолокатором / В.Ю. Жуков, Д.А. Денисенков // Вестник РосНОУ. – 2015. – № 10. – С. 10–13

9. Жуков, В.Ю. Применение радиолокационных методов для метеообеспечения авиации ВМФ / В.Ю. Жуков, Г.Г.Щукин, А.Е.Дроздов, Н.Н.Жильцов, М.Ю.Ильин, В.П.Свиридов // Навигация и гидрография. - 2015. - №41. - С. 59-67.

10. Жуков, В.Ю. Современные проблемы метеорологической радиолокации / В.Ю. Жуков, Г.Г. Щукин // Радиотехника и электроника. – 2016. – Т.61 № 10. – С. 927–939.

11. Жуков, В.Ю. О влиянии сдвига ветра на пространственное распределение ширины спектра радиолокационного сигнала / В.Ю. Жуков, Д.А. Денисенков // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2016. – № 1 (21). – С. 5–14.

12. Жуков, В.Ю. Развитие метода пассивно-активной радиолокации для задач штормооповещения / В.Ю. Жуков, Г.Г. Щукин, Д.М. Караваев, И.С. Вылегжанин // Труды военно-космической академии имени А.Ф.Можайского. – 2016. - №2 (653). - С.146-150.

13. Жуков, В.Ю. Верификация метода обнаружения сдвига ветра по оценкам ширины спектра радиолокационного сигнала / В.Ю. Жуков, Д.А. Денисенков, О.А. Сивак, Г.Г. Щукин // Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. – 2016. – № 2 (653). – С. 159–163.

14. Жуков, В.Ю. Радиолокационные исследования поля ветра в атмосфере / В.Ю. Жуков, Д.А. Денисенков, Д.М. Караваев, Г.Г. Щукин // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2016. – № 12/2. – С. 15–19.

15. Жуков, В.Ю. Диагностика ветра по данным доплеровского метеорологического радиолокатора / В.Ю. Жуков, А.М. Девяткин, Ю.В. Кулешов, С.В. Чернышев, Г.Г. Щукин // Навигация и гидрография. – 2017. – №44. - С. 62-71.

16. Жуков, В.Ю. Метод обнаружения сдвига ветра при помощи доплеровского метеорологического радиолокатора / В.Ю. Жуков, Д.А. Денисенков, Р.В. Первушин, Г.Г. Щукин // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2016. – № 3 (23). – С. 68–73.

17. Жуков, В.Ю. Экспериментальная проверка метода определения сдвига ветра по ширине спектра радиолокационного сигнала / В.Ю. Жуков, Д.А. Денисенков, М.А. Жданова, В.Ю. Жуков, Г.Г. Щукин // Ученые записки РГГМУ. – 2016. – № 45. – С. 113–118.

18. Жуков, В.Ю. Исследование эффективности метода обнаружения сдвига ветра по оценкам ширины спектра радиолокационного сигнала /

В.Ю. Жуков, Д.А. Денисенков, В.Ю. Жуков, О.А. Сивак, Г.Г. Щукин // Ученые записки РГГМУ. - 2016. - №42 - С. 109-116.

19. Жуков, В.Ю. Восстановление поля скорости воздушных потоков в метеорологической радиолокации / В.Ю. Жуков, А.М. Девяткин, Д.А. Денисенков, Ю.В. Кулешов, С.В. Чернышев, Г.Г. Щукин // Метеорология и гидрология. – 2018.- №1. - С. 107-115.

20. Жуков, В.Ю. Экспериментальная проверка нового радиолокационного метода оценивания интенсивности осадков / В.Ю. Жуков М.С. Рыков, Г.Г. Щукин // Ученые записки РГГМУ. – 2018. - №52. - С. 22-28.

В трудах Всероссийских конференций и симпозиумов:

21. Жуков, В.Ю. Обнаружение опасных явлений погоды с использованием малогабаритного доплеровского метеорологического локатора / В.Ю. Жуков, С.Г. Алехин, И.В. Гончаров, А.М. Девяткин, М.О. Иванец, А.А. Корыстин, Ю.В. Кулешов, А.С. Подчасский, С.В. Чернышев, Г.Г. Щукин // Труды VII Российской научно-технической конференции «Навигация, гидрография и океанография: приоритеты развития и инновации морской деятельности». – Санкт-Петербург, 2011. - С. 450-453.

22. Жуков, В.Ю. Основные направления модернизации малогабаритного доплеровского метеорологического радиолокатора / В.Ю. Жуков, И.В. Гончаров, А.М. Девяткин, М.О.Иванец, А.А. Корыстин, Ю.В. Кулешов, С.В. Чернышев, Г.Г. Щукин, С.Б. Каренин, С.М. Иванов, А.Ф. Правенький // Труды XXVII Всероссийского симпозиума «Радиолокационное исследование природных сред». - Выпуск 9, Том 2. – Санкт-Петербург, 2012. - С. 378–385.

23. Жуков, В.Ю. Состояние и перспективы использования поляризационных измерений в метеорологической радиолокации / В.Ю. Жуков, И.С. Вылегжанин, А.В. Рыжков, // Труды XXVII Всероссийского симпозиума «Радиолокационное исследование природных сред». - Выпуск 9, Том 2. – Санкт-Петербург, 2012. - С. 263 – 270.

24. Жуков, В.Ю. Когерентный метеорологический радиолокатор с поляризационной селекцией сигнала для оснащения сети Росгидромета / В.Ю. Жуков, В.Н. Стасенко, Ю.В. Мельничук, М.Т. Абшаев, А.В. Шапрвалов, Б.М. Вовшин, И.С. Вылегжанин, В.С. Ефремов // Труды XXVII Всероссийского симпозиума «Радиолокационное исследование природных сред». - Выпуск 9, Том 2. – Санкт-Петербург, 2012. - С. 212 – 219.

25. Жуков, В.Ю. Малогабаритный мобильный радиолокатор «Контур МЕТЕО-01» для исследования атмосферных образований / В.Ю. Жуков, Д.В. Амурский, Б.П. Колосков, В.П. Корнеев, Г.Г. Щукин, С.Е. Зеленский, С.А. Иванов, А.Н. Репин, С.В. Мельник, В.Н. Стасенко, А.В. Шаповалов // Труды XXVII Всероссийского симпозиума «Радиолокационное исследование природных сред», Выпуск 9, т. 2. –СПб., 2012 - С. 220 – 227.

26. Жуков, В.Ю. Результаты опытной эксплуатации малогабаритного метеорологического радиолокатора «Контур МЕТЕО-01» / В.Ю. Жуков, А.В. Клейменова, Б.П. Колосков, В.П. Корнеев, Г.Г. Щукин // Сборник трудов II-й

Всероссийской конференции «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды», т.1. – СПб., 2012 - С. 387-393.

27. Жуков, В.Ю. Теория и практика поляризационных измерений в метеорологической радиолокации. / В.Ю. Жуков, Б.М. Вовшин, И.С. Вылегжанин, А.А. Пушков, Г.Г. Щукин // II Всероссийские Армандовские чтения: Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред. Материалы V Всероссийской научной конференции - Муром, 2012. - С. 49-54.

28. Жуков, В.Ю. Информационное обеспечение с использованием малогабаритного доплеровского метеорологического радиолокатора / В.Ю. Жуков, С.Г. Алехин, И.В. Гончаров, А.М. Девяткин, М.О. Иванец, А.А. Корыстин, Ю.В. Кулешов, А.С. Подчасский, С.В. Чернышев, Г.Г. Щукин // Сборник трудов 2-й Всероссийской конференции «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды». - т.1. - Санкт-Петербург, 2012. - С. 310-316.

29. Жуков, В.Ю. Когерентная метеорологическая радиолокация / В.Ю. Жуков, И.В. Гончаров, И.А. Готюр, А.М. Девяткин, Ю.В. Кулешов, Г.Г. Щукин // Сборник статей памяти В.Д. Степаненко к 90-летию со дня рождения. - Санкт-Петербург, 2013. - С. 102-117.

30. Жуков, В.Ю. Об особенностях радиолокационных измерений радиальной скорости гидрометеоров при двухмодальном спектре отраженного ими сигнала / В.Ю. Жуков, Г.Г. Щукин // Труды XXIII Всероссийского симпозиума «Радиолокационное исследование природных сред». - Санкт-Петербург, 2013. - С. 337-344.

31. Жуков, В.Ю. Обоснование метода оценивания доплеровского сдвига частоты эхо-сигнала метеообразований при негауссовой форме их спектра / В.Ю. Жуков, Г.Г. Щукин // III Всероссийские Армандовские чтения. - Муром, 2013. С. - 198-200.

32. Жуков, В.Ю. Состояние и перспективы сети метеорологических радиолокаторов / В.Ю. Жуков, Г.Г. Щукин // XXIV Всероссийская научная конференция «Распространение радиоволн», посвященная 100-летию со дня рождения профессора В.М. Полякова. Труды конференции. - Иркутск, 20014. - С. 133-136.

33. Жуков, В.Ю. Применение методов многопозиционной радиолокации для метеорологических наблюдений / В.Ю. Жуков, Г.Г. Щукин // Труды III Всероссийской научной конференции «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды», т.2. – Санкт-Петербург, 2014. –С. 72-75.

34. Жуков, В.Ю. Состояние и перспективы развития современной метеорологической радиолокации / В.Ю. Жуков, Г.Г. Щукин // IV Всероссийские Армандовские чтения: Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред. Материалы VI Всероссийской научной конференции. – Муром, 2014. - С. 7-11.

35. Жуков, В.Ю. Исследование возможности применения метеорологических радиолокаторов для обнаружения сдвига ветра в пограничном слое атмосферы / В.Ю. Жуков, Д.А. Денисенков, Г.Г. Щукин // Материалы XIV

Санкт-Петербургской международной конференции «Региональная информатика «РИ-214». – Санкт-Петербург, 2014. – С. 63-68.

36. Жуков, В.Ю. Лидарно-радиолокационный комплекс для определения профиля ветра в пограничном слое атмосферы / В.Ю. Жуков, Г.Г. Щукин, А.С. Борейшо, М.Ю. Ильин, М.А. Коняев, В.В. Стерлядкин, А.Г. Горелик // Труды XXIX Всероссийского симпозиума «Радиолокационное исследование природных сред». - Санкт-Петербург, 2015. - С. 88-93.

37. Жуков, В.Ю. Оценивание характеристик высотного распределения скорости ветра в пограничном слое атмосферы с помощью карт ширины спектра сигнала, принимаемого метеорологическим радиолокатором / В.Ю. Жуков, Д.А. Денисенков // Труды XXIX Всероссийского симпозиума «Радиолокационное исследование природных сред». - Санкт-Петербург, 2015. - С. 332-338.

38. Жуков, В.Ю. Исследование зависимости пространственного распределения ширины спектра радиолокационного сигнала от распределения ветра по высоте в пограничном слое атмосферы / В.Ю. Жуков, Д.А. Денисенков, Г.Г. Щукин // V Всероссийские Армандовские чтения: Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике. Материалы V Всероссийской научной конференции. – Муром, 2015. - С. 176-180.

39. Жуков, В.Ю. Разработка метеорологического пассивно-активного радиолокатора на базе ДМРЛ-С / В.Ю. Жуков, Г.Г. Щукин, И.А. Вылегжанин, Д.М. Караваев // V Всероссийские Армандовские чтения: Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике. Материалы V Всероссийской научной конференции. – Муром, 2015. – С. 58-66.

40. Жуков, В.Ю. Дополнительные информативные возможности малогабаритного метеорологического радиолокатора «Контур МЕТЕО-01». / В.Ю. Жуков, А.А. Бычков, Г.Г. Щукин // V Всероссийские Армандовские чтения: Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике. Материалы V Всероссийской научной конференции. – Муром. - 2015. - С. 134-139.

41. Жуков, В.Ю. Метеорологический полигон Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского и его развитие / В.Ю. Жуков, Г.Г. Щукин Ю.В. Кулешов, И.А. Готюр, И.В. Гончаров, Д.М. Караваев, С.В. Чернышев // Материалы IV Всероссийской научной конференции «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды». - Санкт-Петербург, 2016. - С. 156-161.

42. Жуков, В.Ю. Прогнозирование града с помощью доплеровского поляриметрического радиолокатора / В.Ю. Жуков, О.Г. Мондоева, Г.Г. Щукин // Сборник трудов VI Всероссийских Армандовских чтений «Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред». - Муром, 2016. - С. 283-286.

43. Жуков, В.Ю. Современные методы дистанционного зондирования ветра в задачах метеорологического обеспечения пусков ракет космического назначения / В.Ю. Жуков, К.И. Макарова // Системы гидрометеорологического, экологического и аэрокосмического мониторинга: методологические аспекты повышения качества функционирования. Сб. науч. ст. по материалам IV

Всероссийской науч.-практ. конф. «Академические Жуковские чтения», т.1. – Воронеж, 2017. - С. 84-87.

44. Жуков, В.Ю. Борьба с помехами от местных предметов в метеорологической радиолокации / В.Ю. Жуков Г.Г. Щукин // XXX Симпозиум по радиолокационному зондированию природных сред. – Санкт-Петербург, 2017. – С. 249-255.

45. Жуков, В.Ю. Пример наблюдения мезоциклона метеорологическим многопараметрическим радиолокатором / В.Ю. Жуков, Г.Г. Щукин // Сборник трудов VII Всероссийских Армандовских чтений «Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред». - Муром, 2017, С. 191-196.

46. Жуков, В.Ю. Определение величины сдвига ветра по направлению с помощью карт ширины спектра радиолокационного сигнала / В.Ю. Жуков, Д.А. Денисенков. // Сборник трудов VII Всероссийских Армандовских чтений «Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред». - Муром, 2017. - С. 197-202.

47. Жуков, В.Ю. Метод восстановления профиля ветра по оценкам ширины спектра радиолокационного сигнала / В.Ю. Жуков // XVI Санкт-петербургская международная конференция «Региональная информатика «РИ-2017». Материалы конференции. - Санкт-Петербург, 2017. – С. 269-270.

48. Жуков, В.Ю. Оценивание интенсивности осадков в многопараметрическом метеорологическом радиолокаторе / В.Ю. Жуков М.С. Рыков Г.Г. Щукин // Труды ВКА имени А.Ф.Можайского. - 2018. - №4 (662). - С. 213-217.

49. Жуков, В.Ю.. О возможности измерения сдвига ветра по направлению в доплеровском метеорологическом радиолокаторе / В.Ю. Жуков, Д.А. Денисенков, Г.Г. Щукин // Труды ВКА имени А.Ф.Можайского. - 2018. - №4 (662). - С. 124-128.

50. Жуков, В.Ю. Метод восстановления профиля ветра по оценкам ширины спектра радиолокационного сигнала / В.Ю. Жуков, Д.А. Денисенков, Г.Г. Щукин // VII Всероссийские Армандовские чтения. II Всероссийская научная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн». – Муром, 2018. – С. 315-318.