

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.

Диссертация
на соискание ученой степени доктора физико-математических наук

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

Санкт-Петербург - 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО РАДИОЛОКАТОРА.....	16
1.1 ХАРАКТЕРИСТИКИ СИГНАЛА, ИЗМЕРЯЕМЫЕ СОВРЕМЕННЫМИ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИМИ РАДИОЛОКАТОРАМИ.....	16
1.2 ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ.....	19
1.3 ИЗМЕРЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК.....	25
1.4 ПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ.....	40
ВЫВОДЫ.....	47
2 МОДЕЛИ СДВИГА ВЕТРА И МИКРОПОРЫВА.....	51
2.1. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ СДВИГА ВЕТРА.....	51
2.2 МОДЕЛЬ МИКРОПОРЫВА.....	87
ВЫВОДЫ.....	91
3 МЕТОДЫ РАСПОЗНАВАНИЯ ОПАСНЫХ ЯВЛЕНИЙ ПОГОДЫ В МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ РАДИОЛОКАЦИИ.....	93
3.1 РАЗРАБОТКА МЕТОДА РАСПОЗНАВАНИЯ СДВИГА ВЕТРА ПО ОЦЕНКАМ ШИРИНЫ СПЕКТРА ПРИНИМАЕМОГО СИГНАЛА.....	93
3.2 РАЗРАБОТКА МЕТОДА РАСПОЗНАВАНИЯ ЗОНЫ ВЕРТИКАЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ЧАСТИЦ.....	107
3.3 МЕТОДЫ РАСПОЗНАВАНИЯ ШКВАЛА И СИЛЬНОГО ВЕТРА В МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ РАДИОЛОКАЦИИ.....	113

3.4 РАСПОЗНАВАНИЕ ОПАСНЫХ ЯВЛЕНИЙ, СВЯЗАННЫХ С ОСАДКАМИ.....	133
3.5 РАСПОЗНАВАНИЕ ГРАДА.....	144
3.6 РАСПОЗНАВАНИЕ СМЕРЧА.....	154
3.7 РАСПОЗНАВАНИЕ ПЫЛЬНОЙ БУРИ.....	157
3.8. РАСПОЗНАВАНИЕ СКОПЛЕНИЯ ПТИЦ И НАСЕКОМЫХ.....	158
ВЫВОДЫ.....	163
4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА НЕКОТОРЫХ МЕТОДОВ РАСПОЗНАВАНИЯ ОПАСНЫХ ЯВЛЕНИЙ В МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ РАДИОЛОКАЦИИ.....	166
4.1 ПРОВЕРКА МЕТОДА РАСПОЗНАВАНИЯ ОПАСНОГО СДВИГА ВЕТРА.....	168
4.2 ПРОВЕРКА МЕТОДА РАСПОЗНАВАНИЯ СДВИГА ВЕТРА ПО НАПРАВЛЕНИЮ.....	188
4.3 ПРОВЕРКА МЕТОДА РАСПОЗНАВАНИЯ ГРАДА...	192
4.4 ПРОВЕРКА МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ОСАДКОВ.....	226
ВЫВОДЫ.....	230
5 ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ ТЕХНИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ СОВРЕМЕННЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ РАДИОЛОКАТОРОВ.....	231
5.1 СЛОЖНЫЙ СИГНАЛ.....	232
5.2 ВОЗМОЖНОСТЬ РАСШИРЕНИЯ ИНТЕРВАЛА ОДНОЗНАЧНОГО ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ЦЕЛИ В ПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКОМ РАДИОЛОКАТОРЕ.....	245
5.3 МАЛОГАБАРИТНЫЕ РАДИОЛОКАТОРЫ И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЛЯ ЗАДАЧ	

ШТОРМООПОВЕЩЕНИЯ.....	248
5.4 БОРЬБА С ОТРАЖЕНИЯМИ ОТ МЕСТНЫХ ПРЕДМЕТОВ В МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОМ РАДИОЛОКАТОРЕ.....	263
5.5 ПЕРСПЕКТИВЫ КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ РАДИОЛОКАТОРОВ С ДРУГИМИ ТЕХНИЧЕСКИМИ СРЕДСТВАМИ.....	269
ВЫВОДЫ.....	282
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	284
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	287
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	288

ВВЕДЕНИЕ

Опасные явления погоды (ОЯП) – гроза, град, смерч и др. – способны причинить вред здоровью людей, нанести значительный урон зданиям, сельскому хозяйству, энергетике и т.д. Своевременное распознавание ОЯП позволяет подготовиться к их приходу, а иногда и применить меры по борьбе с ними [74]. Это во много раз уменьшает наносимый ущерб или вообще устраниет таковой. 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 ОЯП) и, во-вторых, в максимальной приближенности к объектам исследования, дающей возможность подробно их рассмотреть, а, следовательно, с наибольшей вероятностью распознавать таящуюся 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 [82]. 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 [6], Д. Атласа [169], Д. Зрничя и Р. Довиака [178]. Из отечественных ученых – это В.Д. Степаненко [11], Г.Г. Щукин [94; 86], М.Т. Абшаев [0]. Внедрением спектральной обработки в практику радиометеорологических наблюдений занимались в ЦАО (В.В. Костарев [89], А.Г. Горелик [23]) и ГГО им. А.И. Воейкова (В.М. Мельников [104]). Разработке теории поляриметрии в радиолокации в большой степени мы обязаны сотрудникам ВКА имени А.Ф. Можайского: В.А. Потехину [123; 124], Д.Б. Канарейкину [80; 79], М.Б. Варганову [14], а также ученым из других организаций - А.И. Козлову, А.И. Логгину, В.А. Сарычеву [85; 84]. Приложением этой теории к задачам радиометеорологии занимались А.Б. Шупляцкий [166] в ЦАО, Ю.А. Мельник [103] и А.В. Рыжков [143] - 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 [126].

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 (ICAO) одной из главных технических проблем, стоящих перед авиацией рассматривает явление сдвига ветра [142]. По его данным за прошедшие 40 лет по меньшей мере два десятка случаев авиационных происшествий были напрямую связаны с этим явлением [111].

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 обеспечивают 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.

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.

3) Метод обнаружения сдвига ветра в пограничном слое атмосферы по оценкам ширины спектра принимаемых отражений.

4) Метод восстановления вертикального профиля ветра в слое высотой до 500 м по оценкам ширины спектра принимаемых отражений.

5) Метод обнаружения вертикальных потоков воздуха на основе измерений ширины спектра амплитуды принимаемого сигнала.

6) Рекомендации по оптимизации условий наблюдения опасных явлений погоды.

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 конференции «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, 20014);
- 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 страниц, включая 14 таблиц и 147 рисунков.

В первой главе проанализированы информационные возможности многопараметрического метеорологического радиолокатора. Рассматривается каждый из шести измеряемых им параметров сигнала с точки зрения его информативности и способов оценивания.

Делается вывод о том, что новые данные могут быть применены в задачах распознавания следующих опасных явлений, не обнаруживаемых в настоящее время отечественными радиолокаторами: 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.

Анализируются карты ширины спектра радиальных скоростей гидрометеоров, получаемые на современной сети штормооповещения РФ, а также результаты исследований, предшествующих разработке отечественного радиолокатора ДМРЛ-С. На их основе делается предположение о том, что характерные распределения параметра на указанных картах вызываются существованием в зоне обзора сдвига ветра. Предлагается механизм образования данных распределений, основанный на том, что спектр отраженного в рассматриваемом случае сигнала становится двухмодальным, а его ширина аномально большой. Строится математическая модель пространственного распределения ширины спектра принимаемого сигнала в случае наблюдения сдвига ветра. На основе численного решения полученных соотношений строятся карты конических разрезов данного параметра для различных соотношений размера разрешаемого объема и размеров слоя с изменяющимися параметрами ветра, совпадающие с реальными картами.

Предлагается использовать оценки ширины спектра амплитуды принимаемых отражений для задач распознавания микропорыва и других зон локального вертикального движения воздуха. Строится модель данного

параметра, оцениваемого радиолокатором при наблюдении под малыми углами места.

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. Получены соотношения, позволяющие по параметрам распределения ширины спектра отражений, наблюдаемым на соответствующих картах, распознать опасный сдвиг ветра, восстановить вертикальный профиль ветра на высотах до 500 м. Приводятся расчеты ширины спектра сигнала на выходе амплитудного детектора, показывающие возможность распознавать зоны вертикальных движений воздуха.

Здесь же рассмотрены методы распознавания других ОЯП (шквал, сильный ветер, ливни, град, смерч, пыльная буря, скопление птиц и насекомых), и исследована возможность их применения в отечественном радиолокаторе ДМРЛ-C.

Четвертая глава состоит из описаний экспериментальных проверок эффективности методов обработки информации многопараметрического радиолокатора. Исследованы методы восстановления профиля ветра, распознавания сдвига ветра, града, определения интенсивности осадков. Разрабатываются методики проведения эксперимента, способы обработки данных, приводятся полученные результаты.

В пятой главе исследованы дополнительные возможности, которые появляются у метеорологического радиолокатора благодаря примененным в нем следующим техническим решениям: сложный зондирующий сигнал; излучение волн двойной поляризации; минимизация аппаратуры. Предложены варианты их использования в задачах повышения метеорологического потенциала радиолокатора, расширения интервала однозначного измерения радиальной скорости частиц, построения малогабаритных радиолокаторов.

Здесь же рассмотрены вопросы совмещения данных метеорологического радиолокатора с данными других метеорологических приборов - СВЧ радиометром и лидаром.

В **заключении** сформулированы основные результаты, полученные в ходе диссертационных исследований.

1. Особенности работы метеорологического радиолокатора и измеряемые им характеристики принимаемого сигнала

1.1 Особенности работы метеорологического радиолокатора

Метеорологическая радиолокация – область радиолокации, имеющая дело с особого вида целями: различного типа облаками, осадками, атмосферными фронтами, смерчами и т.п. [10]. Перечислим основные ее отличия от других областей данной науки [62].

1. Распределение наблюдаемых целей по очень большому объему. При этом имеется неоднородность этого распределения по концентрации, размеру, форме и агрегатному состоянию составляющих цель частиц, а, следовательно, большая пространственная изменчивость параметров отраженного сигнала.

2. Временная изменчивость цели. В процессе своего существования метеообразования проходят несколько стадий развития, характеризующиеся большим разнообразием параметров, влияющих на характеристики создаваемых отражений. Обе перечисленных особенности обуславливают специфику проведения наблюдений пространства, а именно, широко применяемая в классической радиолокации процедура сопровождения цели, в метеорологической радиолокации просто не имеет смысла.

3. Измерение амплитуды входного сигнала. Данная процедура присуща исключительно метеорологической радиолокации. В остальных случаях (например, в задаче распознавания формы наблюдаемого предмета) амплитуда тоже может представлять интерес, но только ее относительное значение. Здесь же информация о свойствах элементарных отражателей и их количестве заключена в абсолютном значении данного параметра. Это ведет к необходимости периодической калибровки метеорологического радиолокатора (МРЛ), а также учета затухания и рассеяния электромагнитной волны на пути ее распространения до цели и обратно.

4. Особый характер формирования отраженного сигнала, заключающийся в том, что он является суммой большого количества элементарных сигналов, сформированных частицами, находящимися внутри элемента разрешения. Очевидно, что величина этой суммы зависит как от концентрации частиц, так и от величины указанного объема. В итоге при одинаковой мощности излучения величина отражений оказывается пропорциональной длительности зондирующего импульса (или эквивалентной длительности в случае сложного сигнала). Получается, что мощность отражений пропорциональна излученной энергии. Учитывая тот факт, что увеличение длительности зондирующего импульса ведет к улучшению чувствительности приемника из-за сужения полосы пропускания, получается уникальная возможность оптимизации работы МРЛ за счет нахождения компромисса между его разрешающей способностью и мощностью СВЧ-генератора.

5. Отличная от классической радиолокации точечной цели зависимость мощности принимаемого сигнала от расстояния – обратная пропорциональность квадрату расстояния, а не его четвертой степени. Это обусловлено тем, что в формировании отражений участвует весь разрешаемый объем, а не часть его, равная площади облучаемого объекта.

6. Большой динамический диапазон входного сигнала. Накопленный опыт радиолокационных наблюдений метеорологических образований показывает, что их отражающие свойства (метеорологическая отражаемость) изменяются в пределах 70 дБ. К этому необходимо добавить примерно 30 дБ, обусловленных различием расстояний до цели, и 10 дБ для обеспечения линейности приемного тракта при максимальной мощности сигнала. В итоге динамический диапазон приемника должен находиться в пределах 100-110 дБ. В период использования некогерентных радаров проблема решалась изготовлением приемников с логарифмической амплитудной характеристикой. Если же нужен линейный тракт, применяют два приемника, на вход одного из которых сигнал подается

предварительно ослабленным. При этом возникает проблема постоянного контроля и периодической подстройки «склейки» двух характеристик.

7. Широкий спектр входного сигнала. Данный параметр зависит от того, насколько различаются радиальные скорости частиц, попавших внутрь элемента разрешения. Очевидно, что эти различия значительно превосходят те, что имеют место у элементов монолитной цели типа самолета. Кроме этого, ширина спектра имеет тенденцию увеличиваться по мере увеличения расстояния, что вызывается ростом поперечных размеров разрешаемого объема, достигающих на дальностях 100 км величин от 0,5 до нескольких километров. С одной стороны, большая ширина спектра играет положительную роль при оценивании мощности отражений, ибо дает возможность набрать большое количество независимых отсчетов при достаточно малой величине выборки. С другой, это вызывает трудности при оценивании самой этой величины. Общепринято, что необходимым условием измерения ширины спектра является условие превышения коэффициентом корреляции сигнала при временном сдвиге, равном периоду повторения зондирующих импульсов T_n , величины 0,5. Для обеспечения указанного условия при всех возможных значениях параметра приходится увеличивать частоту следования зондирующих сигналов, что уменьшает интервал однозначного измерения скорости частиц (интервал Найквиста). Это, в свою очередь, приводит к необходимости вобуляции частоты, а, следовательно, к усложнению алгоритмов обработки.

8. Ограниченнная величина скорости частиц. Это, наверное, единственная особенность, имеющая только положительные последствия. Зная, что абсолютные значения радиальной скорости частиц не могут превышать 50-60 м/с, легче планировать обработку сигнала. Кроме того, данное ограничение значительно облегчает выбор типа сложного зондирующего сигнала. Достаточно анализировать поведение его функции неопределенности только в узкой полосе возможных доплеровских частот, не принимая во внимание то, как она ведет себя вне заданных границ.

9. Преобладание среди наблюдаемых элементарных отражателей частиц, имеющих форму тела вращения. Это позволило оптимально определить базис при поляризационных наблюдениях. Согласно теоретическим исследованиям [84] в этом случае он должен быть линейным, что и реализуется во всех поляриметрических радиолокаторах

Перечисленные особенности приводят к необходимости применять при разработке метеорологических радиолокаторов присущие только им технические решения и методы оценки параметров принимаемого сигнала [82; 156]. Всего современный МРЛ измеряет шесть таких параметров. К ним относятся:

1. мощность;
2. средняя частота энергетического спектра;
3. ширина энергетического спектра;
4. дифференциальная отражаемость;
5. дифференциальная фаза;
6. модуль коэффициента взаимной корреляции поляризационных составляющих.

Рассмотрим каждый из них более подробно.

1.2 ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ

Это наиболее изученный параметр, измеряемый всеми без исключения метеорологическими радиолокаторами, включая самые первые, которые только его одного и измеряли. Многолетний опыт работы в данной области обобщен в известнейших монографиях [141; 151; 40]. Были разработаны методики обнаружения с его помощью таких опасных природных явлений, как гроза, град, ливень, высокий уровень осадков. Они применяются и сегодня и показывают хорошие результаты [119]. Современная техника не привносит ничего принципиально нового в эти измерения, за исключением одного, рассматриваемого ниже момента.

Главными трудностями на пути измерения данного параметра всегда были большой динамический диапазон отраженного метеоцелью сигнала и его большая пространственная изменчивость. Считается, что мощность отражений может измениться на 50 дБ на расстоянии 250 м. Это предъявляет особо жесткие требования к приемнику радиолокатора:

- 1) его динамический диапазон должен быть не менее 70 дБ;
- 2) для расширения диапазона нельзя использовать автоматическую регулировку усиления, т.к. схем, обеспечивающих подобное быстродействие, попросту не существует.

В первых метеорологических радиолокаторах данная проблема решалась с помощью логарифмического усилителя. При этом оценка мощности искалась как среднее значение выходного сигнала за определенный период времени

$$\tilde{P} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_{Bx_i} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \log U_{Bx_i} = \frac{1}{2N} \log \prod_{i=1}^N U_{Bx_i}^2, \quad (1.1)$$

где N - число импульсов, отраженных от одного элемента разрешения.

Очевидно, что в итоге процедура мало походила на нахождение средней по выборке мощности сигнала, и получаемая таким образом оценка была смещенной. Величина смещения зависела от неизвестного априори закона распределения вероятности входного сигнала. Невозможность учесть ее при измерениях приводило к естественному и единственному возможному в данном случае варианту – считать ее пренебрежимо малой и не учитывать при расчетах.

Кроме того, целью измерений было оценивание не мощности таковой, а радиолокационной отражаемости цели, связанной с мощностью известным соотношением

$$Z = \frac{\tilde{P}R^2}{P_{\text{ш}}\Pi}, \quad (1.2)$$

где $P_{\text{ш}}$ - уровень шумов на входе приемника;

R - расстояние до элемента разрешения;

Π - метеорологический потенциал радиолокатора.

Для устранения зависимости величины оценки от расстояния R и обусловленного ею расширения динамического диапазона входного сигнала (считается, что это добавляет еще 30 дБ) применялась временная регулировка усиления (ВАРУ). Она заключалась во введении затухания в волноводный тракт радиолокатора при приеме сигналов, приходящих с малой дальности, с постепенным ослаблением ее по закону $1/R^2$. Это вносило дополнительную погрешность в измерения.

Появление быстродействующих аналогово-цифровых преобразователей (АЦП) позволило строить линейные приемники с динамическим диапазоном 100 дБ. Таким образом, перекрывается вся область возможных значений мощности сигнала с учетом доли, вносимой изменением дальности, и устраняется смещение получаемой оценки.

Связь радиолокационной отражаемости с физическими характеристиками наблюдаемого объекта для применяемых в метеорологической радиолокации длин волн сантиметрового и дециметрового диапазонов имеет вид [141]

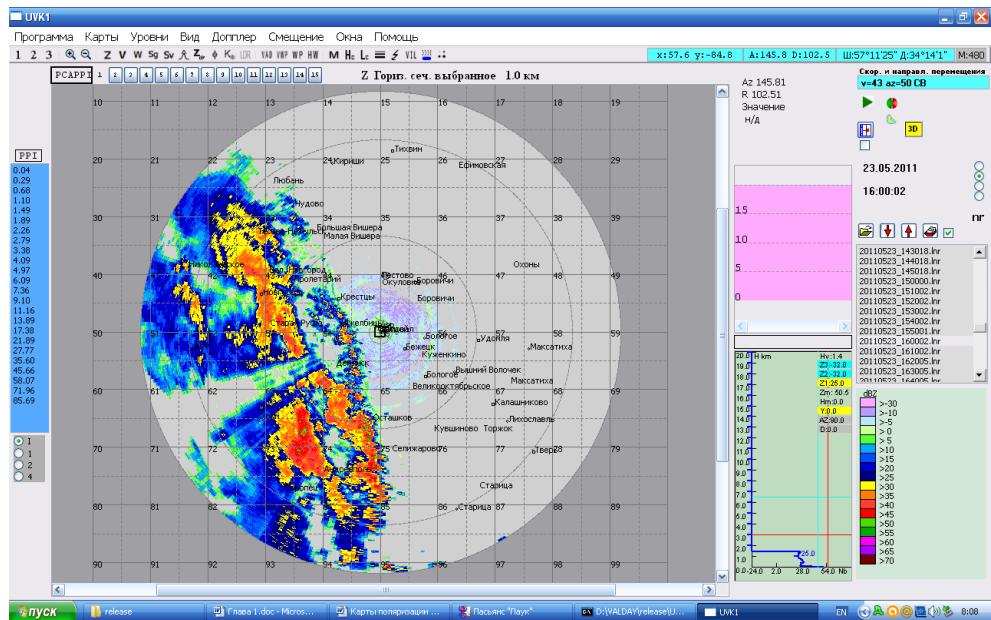
$$Z = \sum_{i,\nu} d_i^6 \left| \frac{m_i^2 - 1}{m_i^2 + 2} \right|^2, \quad (1.3)$$

где d_i - диаметр частицы, из которых состоит метеообразование;

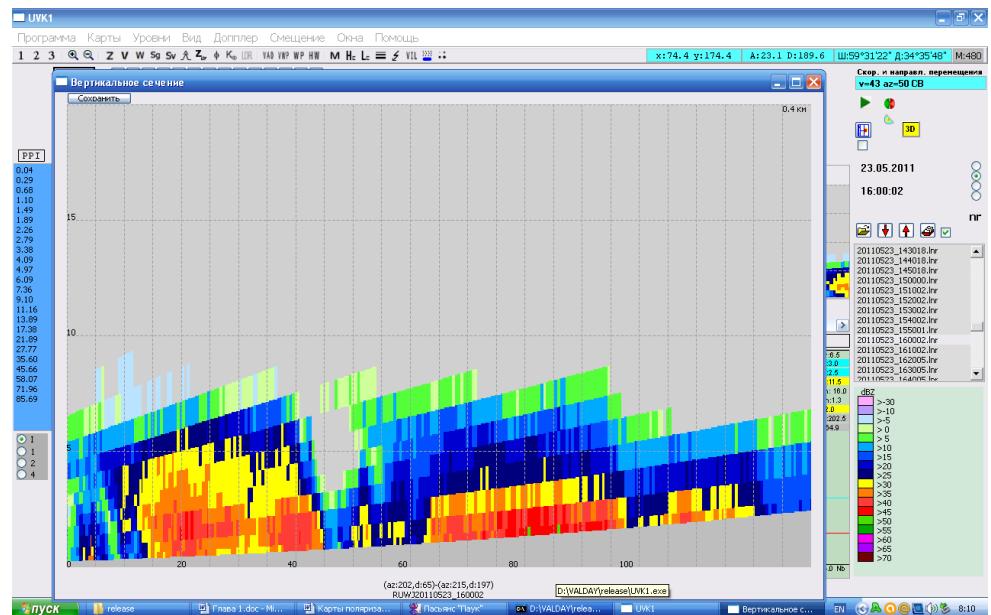
m - показатель преломления вещества частицы, суммирование ведется по единице объема. Следовательно, ее величина определяется тремя параметрами: концентрацией частиц; их размерами; их агрегатным состоянием. Последний определялся по температуре воздуха. Поскольку влияние переменной d входит в формулу с показателем степени 6, на практике полагают, что из оставшихся двух параметров именно она полностью и определяет значение Z . Линейной же зависимостью от концентрации пренебрегают, считая ее примерно одинаковой для всех видов целей, надежно обнаруживаемых метеорологическими радиолокаторами – дождевых облаков и осадков.

На основе измерений мощности принимаемого сигнала программа вторичной обработки информации радиолокатора формирует целый ряд карт:

1. Распределения радиолокационной отражаемости в выбранном горизонтальном, вертикальном слое или по коническому разрезу (Рисунок 1.1);



а)



б)

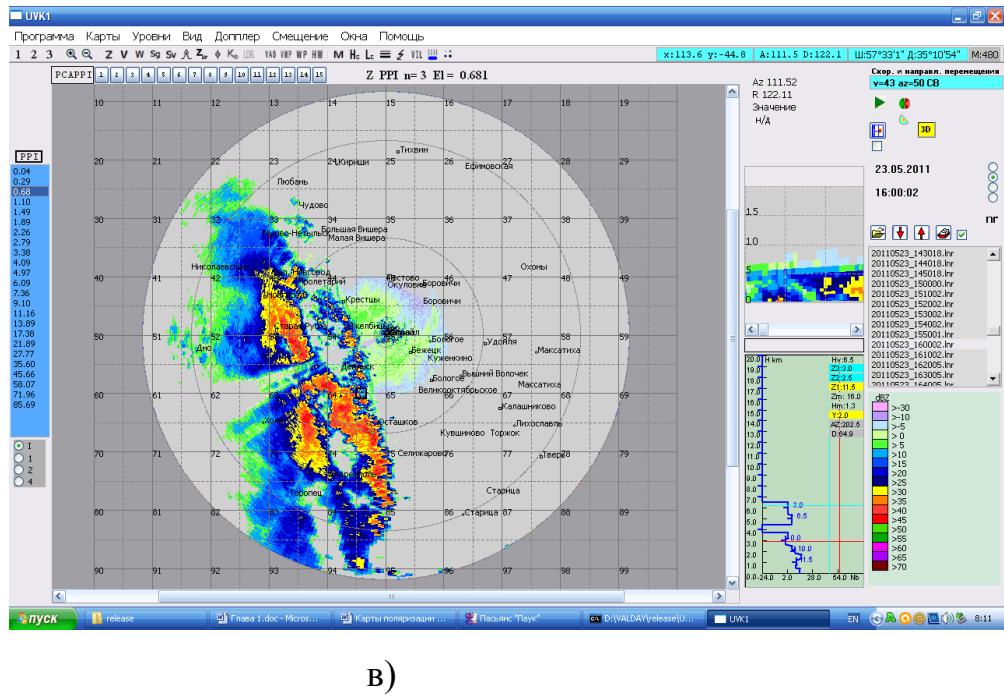
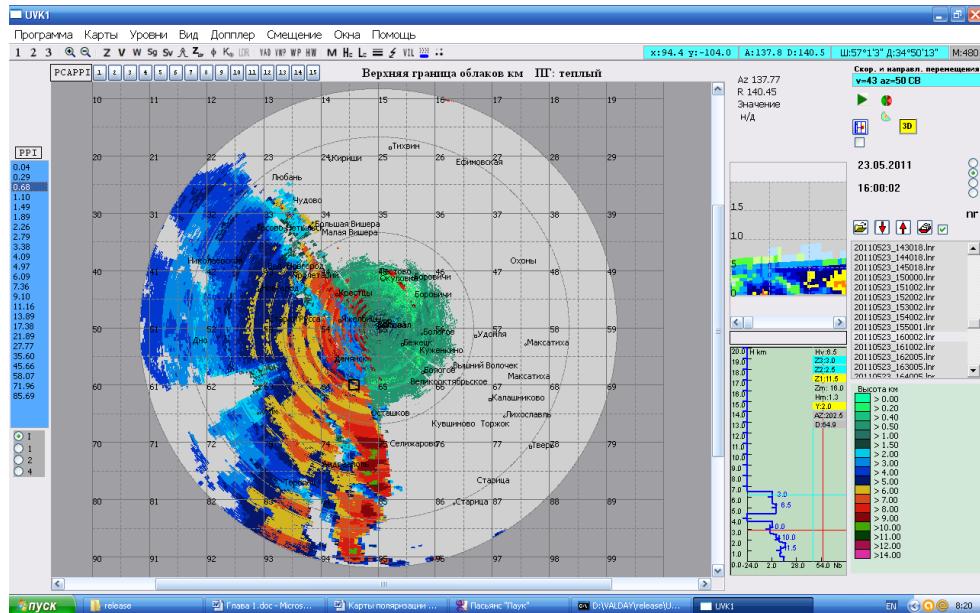
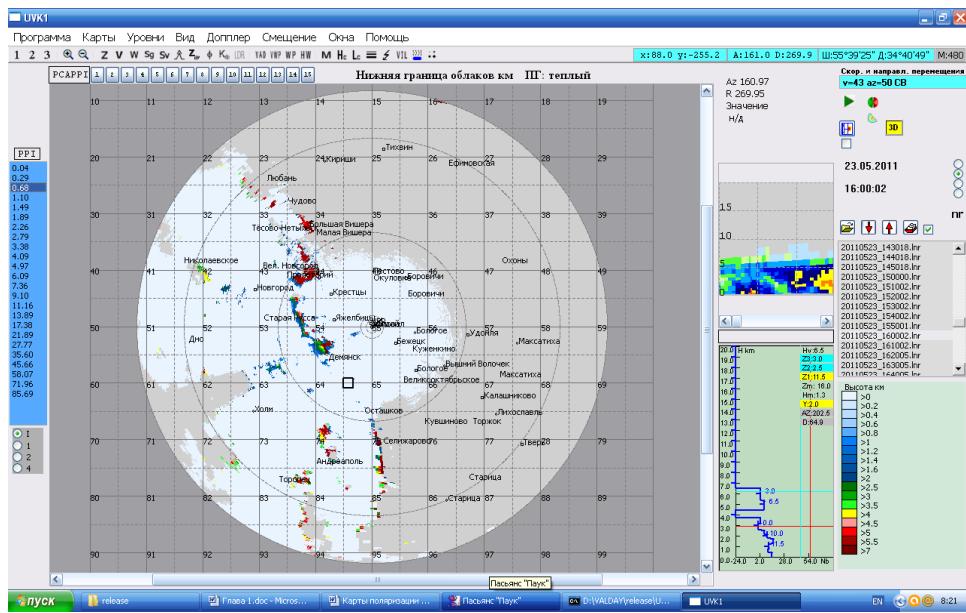


Рисунок 1.1 - Карты радиолокационной отражаемости, полученные радиолокатором ДМРЛ-С в г. Валдай 23.05.2011 в 16:00: а) – горизонтальный разрез на уровне 1 км; б)- вертикальный разрез; в) – конический разрез под углом места 0,68°

2. Верхней и нижней границ облакности (Рисунок 1.2);





б)

Рисунок 1.2 - Карты верхней (а) и нижней (б) границ облачности, полученные радиолокатором ДМРЛ-С в г. Валдай 23.05.2011 в 16-00

3. Интенсивности осадков (Рисунок 1.3);

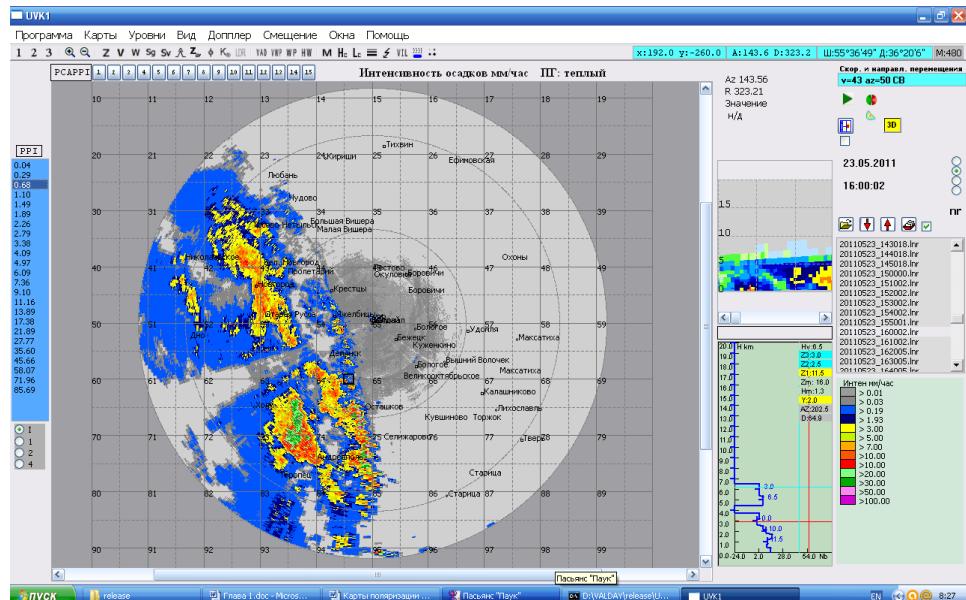


Рисунок 1.3 - Карта интенсивности осадков, полученная радиолокатором ДМРЛ-С в г. Валдай 23.05.2011 в 16-00

4. Вертикальной интегрированной водности (Рисунок 1.4)

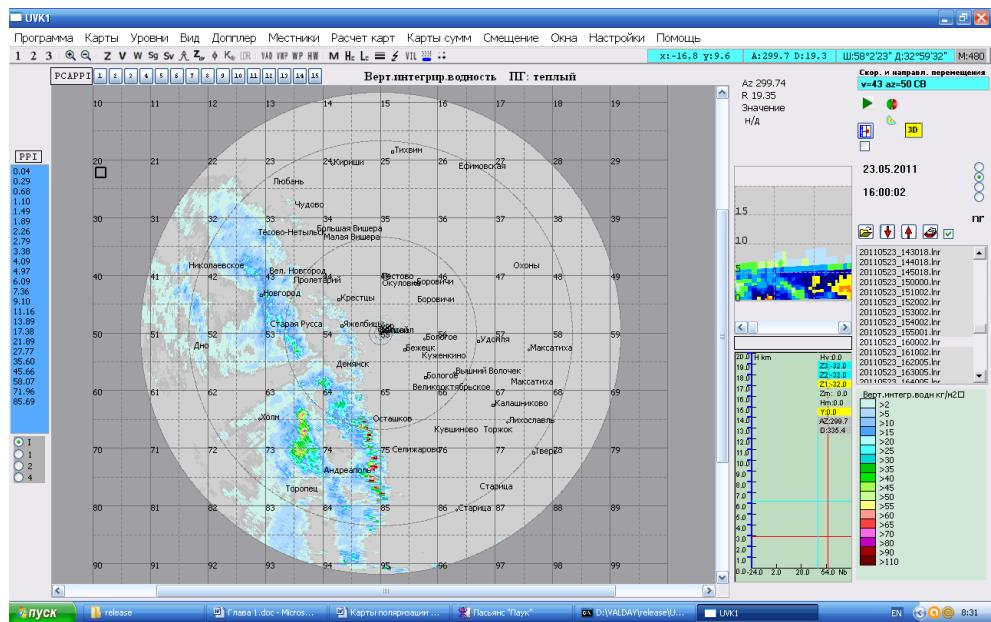


Рис. 1.4 - Карта вертикальной интегрированной водности, полученная радиолокатором ДМРЛ-С в г. Валдай 23.05.2011 в 16-00

5. Видимости (Рисунок 1.5);

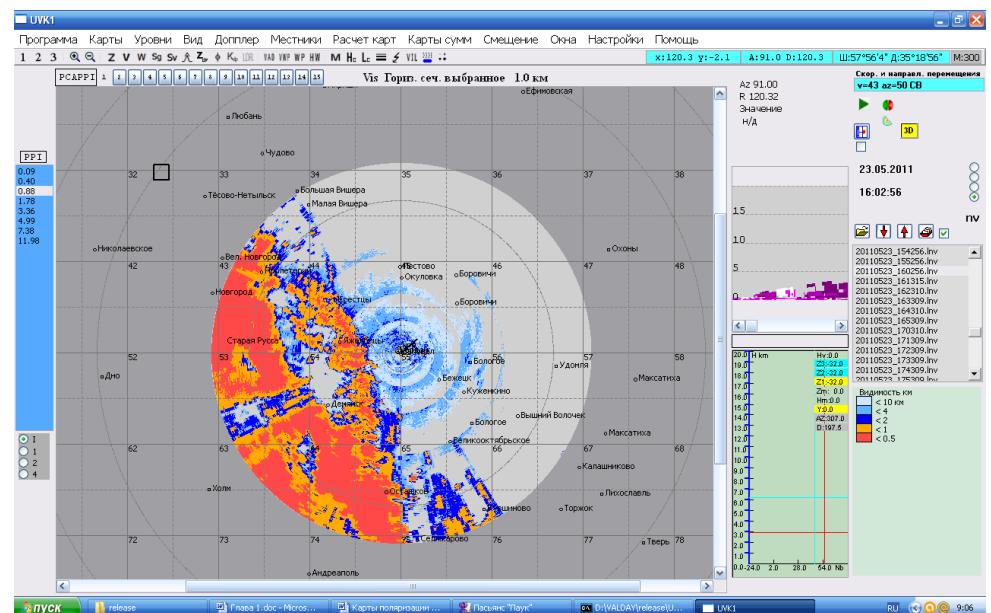


Рисунок 1.5 - Карта видимости, полученная радиолокатором ДМРЛ-С в г. Валдай 23.05.2011 в 16-00

1.3 СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Следующими в хронологическом порядке характеристиками, измеряемыми метеорологическими радиолокаторами, стали средняя частота и ширина

энергетического спектра принимаемых ими отражений. Началом практического применения указанных измерений следует признать 1988 год, когда США развернули на своей территории сеть штормооповещения NEXRAD из когерентных метеорологических радиолокаторов WSR-88. Таким образом, оценивание параметров спектра тесно связывается с введением в МРЛ когерентного режима работы.

Однако измерять спектральные характеристики принимаемого сигнала пытались и в некогерентных метеорологических радиолокаторах (МРЛ). В Главной геофизической обсерватории (ГГО) изучали возможность оценивания ширины спектра принимаемых отражений, используя связь автокорреляционных функций исходного сигнала, и той, что получается на выходе линейного или квадратичного детектора. В Центральной аэрологической обсерватории (ЦАО) шли другим путем – измеряли разницу средних частот спектра сигналов, отраженных от различных участков пространства, разнесенных по координате дальности на 0,5 – 1 км. Делалось это путем подачи принимаемого в данный момент и задержанного на время, соответствующее указанным расстояниям, сигналов на входы фазового детектора, для чего был разработан специальный прибор «УИТ» (устройство измерения турбулентности) [133]. Развития эти работы не получили, т.к. доплеровские радиолокаторы доказали свою гораздо большую по сравнению с ними эффективность. Однако новейшие исследования [13] показывают, что полностью отказываться от данного направления еще рано и амплитудный детектор при определенных условиях может быть предпочтен фазовому при спектральном анализе выходного сигнала.

Успешному внедрению доплеровских радаров в практику радиолокационного зондирования атмосферы способствовали труды многих как иностранных (Р. Довиак, Д. Зрнич), так и отечественных (В. В. Костарев, А. Г. Горелик) ученых. Результаты их исследований были обобщены в ряде печатных изданий [23; 105; 178].

В любом случае целью измерений являются оценки не самих спектральных характеристик принимаемого сигнала, а связанных с ними параметров распределения радиальной составляющей скорости ветра внутри элемента разрешения РЛС. Но оценить последние непосредственно радиолокация не в состоянии. Ей доступны лишь скорости элементарных отражателей, которые могут и не совпадать со скоростью воздуха. Кроме того, спектр входного сигнала не есть просто спектр радиальных скоростей гидрометеоров V_R , пересчитанный в значения доплеровского сдвига частоты F_d согласно известному выражению

$$F_d = \frac{2V_R}{\lambda}, \quad (1.4)$$

где λ - длина волны радиолокатора. Этому препятствует присутствие в вычислениях весовой функции распределения мощности отражений или, иначе, размеров частиц от их радиальной скорости. Возникновение данной зависимости связано с различной вовлекаемостью воздушным потоком частиц различной массы.

Следовательно, оценки, получаемые при помощи спектрального анализа, в общем случае оказываются смещенными. Учесть данную погрешность практически невозможно. Остается лишь пренебречь ею на основе ряда допущений и предположений. Например, о том, что распределение скоростей одинаково для всех частиц независимо от их размера. Дело облегчается еще и тем, что в оперативной работе используется не сам спектр, но его характеристики – среднее значение и ширина. Поскольку они находятся путем осреднения значений спектра с различными весовыми коэффициентами, влияние на точность их оценивания рассмотренных факторов значительно меньше, чем на оценки формы энергетического спектра.

Далее рассмотрим информативность каждой из упомянутых характеристик.

Среднее значение энергетического спектра принимаемого сигнала

В свете упомянутых выше допущений средняя частота энергетического спектра принимаемого радиолокатором сигнала связана со средней по разрешаемому объему скоростью частиц $V_{\text{средн.}}$ соотношением

$$F_{\text{средн.}} = \frac{2V_{\text{средн.}}}{\lambda} \cos(\alpha - \beta) \cos(\varphi - \gamma), \quad (1.5)$$

где α и φ - угол места и азимут антенны;

β и γ - направление вектора скорости ветра в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Отсюда следует, что одиночное измерение в одном элементе разрешения не несет никакой информации, ибо зависит сразу от трех неизвестных. Их число уменьшается, если наблюдения проводятся при крайних значениях угла места антенны – 90 и 0 градусов.

В первом случае, когда луч радара расположен вертикально, мы имеем идеальный вариант зависимости только от одной переменной – вертикальной составляющей скорости частиц, определяемой перемещением воздуха в этом направлении и гравитационным падением гидрометеоров. Несмотря на удобство данных измерений, в радиолокаторах сети штормооповещения они не применяются ввиду малой эффективности. Получаемые в рассматриваемом случае данные относятся лишь к одной точке пространства, и нет смысла использовать для их получения дорогостоящий радиолокатор с дальностью обзора 250 км.

Зато применять такой режим работы есть смысл в специальных радарах, призванных оценивать интенсивность осадков и распределение дождевых капель по размерам. Таковым, например, является автоматический бесконтактный осадкомер «Капля», разработанный НПО «Тайфун» [118].

Для определения среднего по охватываемой радиолокатором площади вектора скорости в некотором выбранном горизонтальном слое при наблюдении под нулевым и близким к нему углами места существует много методов [183]:

- UVT, в котором направление ветра определяется как тангенциальное к азимуту антенны, соответствующему нулевой радиальной скорости гидрометеоров, а скорость ветра находится по величине доплеровского сдвига частоты принимаемого сигнала антенной, ориентированной вдоль найденного направления [103];

- VVP (Volume Velocity Processing) – разработан Волдтеуфелем и Корбином в 1979г. Применяется для восстановления векторного поля в некотором объеме. В данном методе для представления поля ветра используется усеченный ряд Тейлора, включающий только первые производные скорости по координатам. [196; 178].

- VARD (Velocity Area Display) – разработан Истербруком в 1975. В данном методе используется сканирование в коническом секторе [187].

- Наибольшее распространение в метеорологических радиолокаторах находит применение метод восстановления вектора средней по наблюдаемому пространству скорости ветра при наблюдении под малыми углами места антенны. Он получил название VAD от английского Velocity Azimuth Display. В частности, он реализован в ДМРЛ-С.

В отличие от наблюдения под углом места 90 градусов здесь однозначной зависимости не получается, т.к. остаются две неизвестные величины – скорость V и направление ветра γ . Неоднозначность преодолевается за счет того, что при вращении антенны угол между вектором скорости и осью луча антенны постоянно изменяется (Рисунок 1.6) [11].

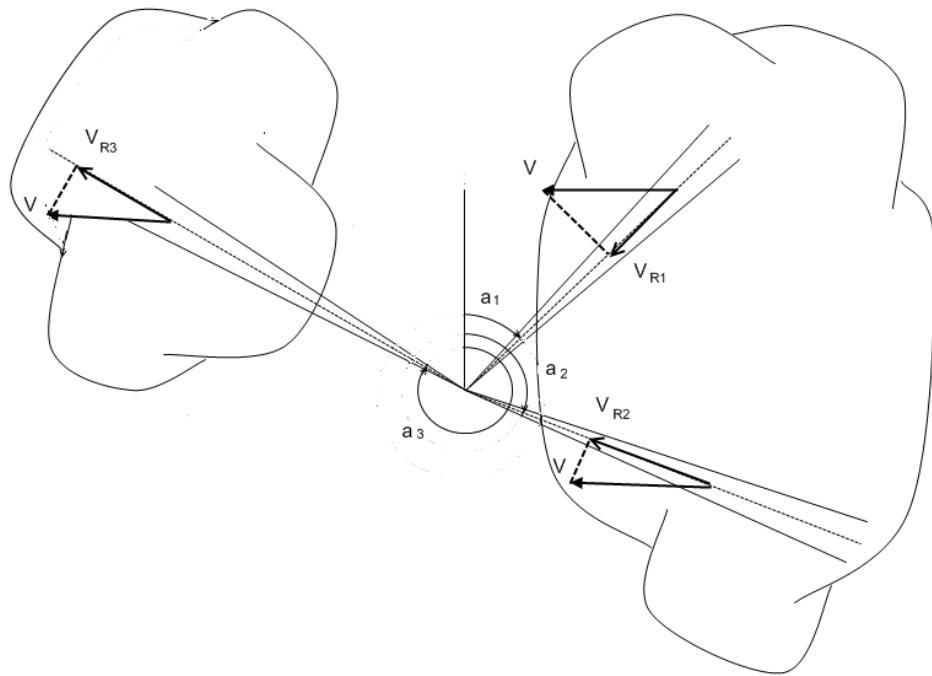


Рисунок 1.6 - Изменение радиальной составляющей скорости ветра V_R при сканировании антенны в горизонтальной плоскости

В результате этого мы получаем массив оценок средней радиальной скорости частиц для каждого элемента разрешения, расположенного в рассматриваемом слое и заполненного частицами метеообразования,

$$\tilde{V}_{Ri} = V \cos(\varphi_i - \gamma). \quad (1.6)$$

По полученным данным надо найти оценки величины и направления скорости ветра в интересующем нас слое пространства $\tilde{V}, \tilde{\theta}$. Для решения подобных задач применяют метод наименьших квадратов, заключающийся в минимизации функции

$$F = \sum_{i,j} (\tilde{V} \cos(\varphi_i - \tilde{\gamma}) - \tilde{V}_{Rij})^2. \quad (1.7)$$

Иными словами, надо подобрать такие значения искомых величин, при которых функция F принимает минимальное значение. Как известно, для этого достаточно решить следующую систему уравнений $\frac{dF}{d\tilde{V}} = 0, \frac{dF}{d\tilde{\theta}} = 0$.

Пример восстановленных методом VAD параметров вектора средней по рассматриваемому слою скорости ветра приведен на Рисунок 1.7.

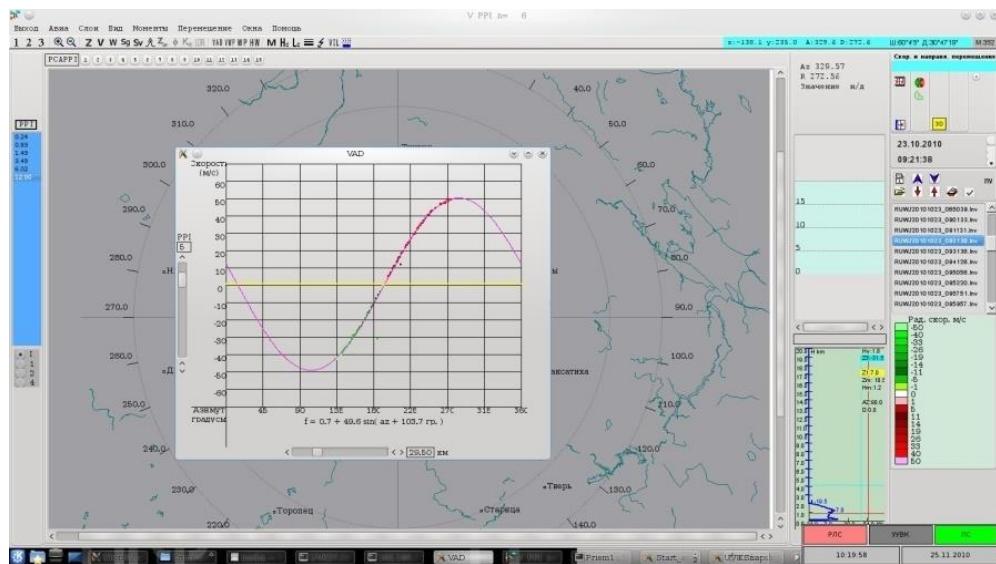


Рисунок 1.7 - Пример дисплея азимутальной скорости (VAD) радиолокатором ДМРЛ-С

Рассчитывая подобным образом скорость ветра для различных горизонтальных слоев окружающего пространства, получают вертикальный профиль ветра (Рисунок 1.8) и карту изменения данного профиля во времени (Рисунок 1.9).

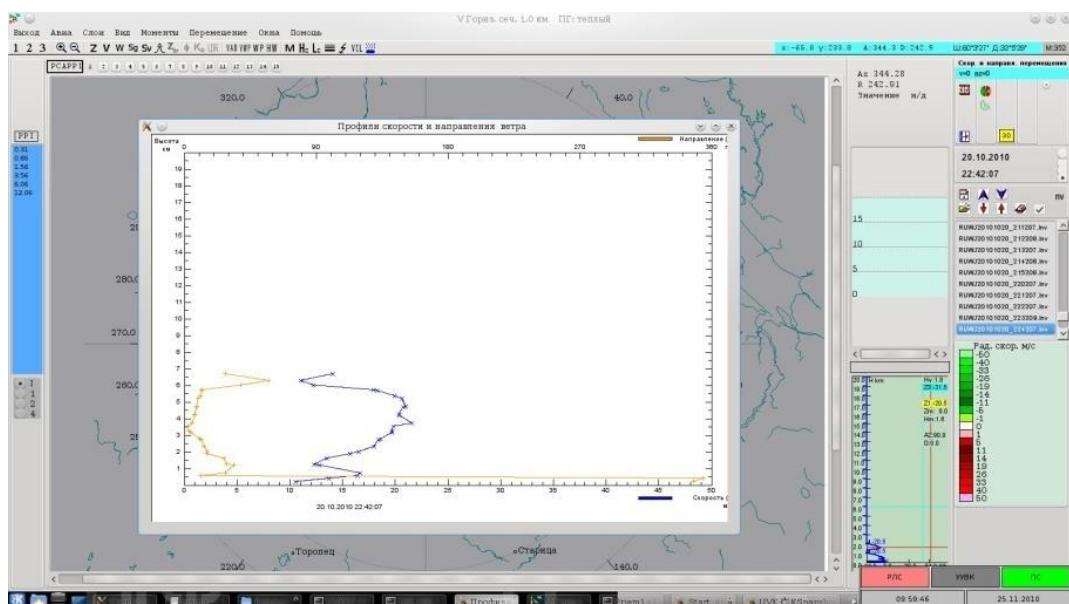


Рисунок 1.8 - Пример расчета вертикального профиля ветра (WP) радиолокатором ДМРЛ-С

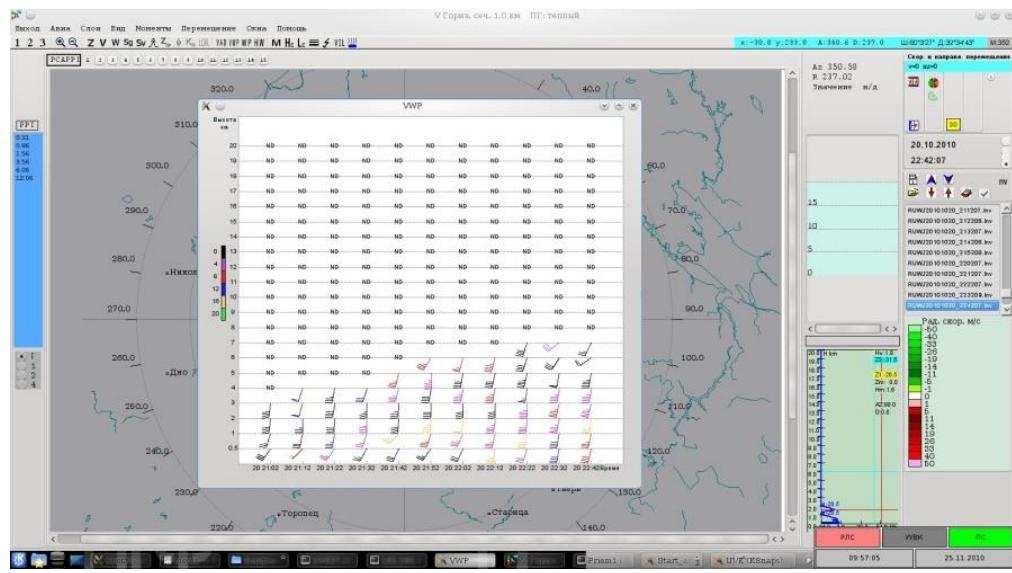
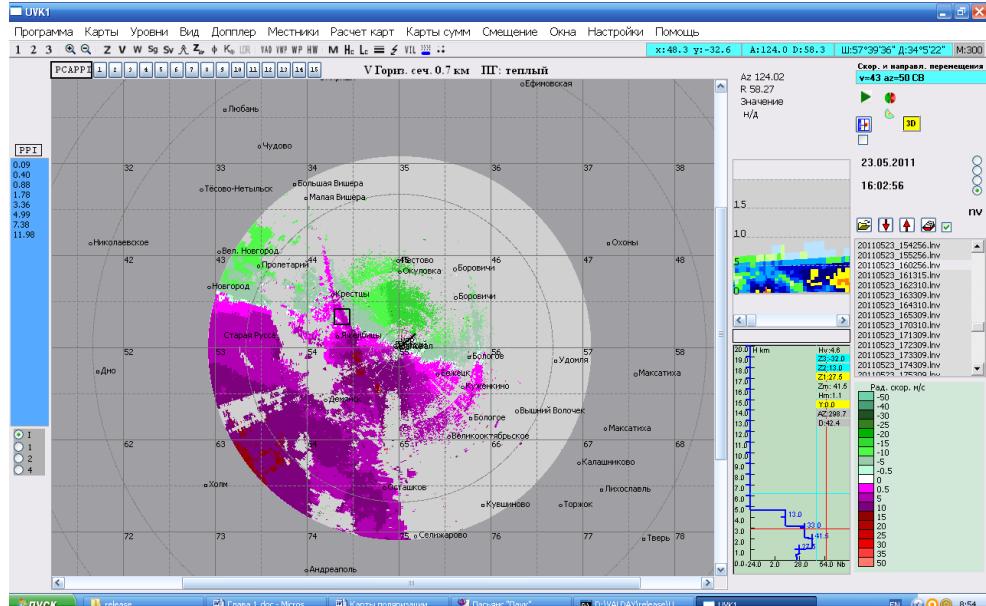


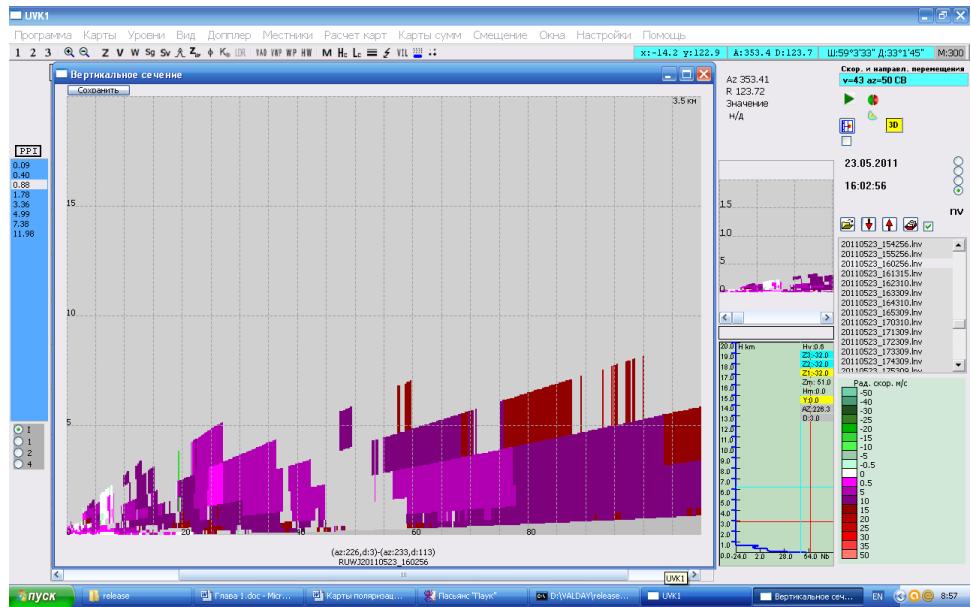
Рисунок 1.9 - Пример карты временного изменения профиля ветра

На основании измерений средней радиальной скорости частиц программой вторичной обработки радиолокатора, кроме уже приведенных, формируются следующие карты:

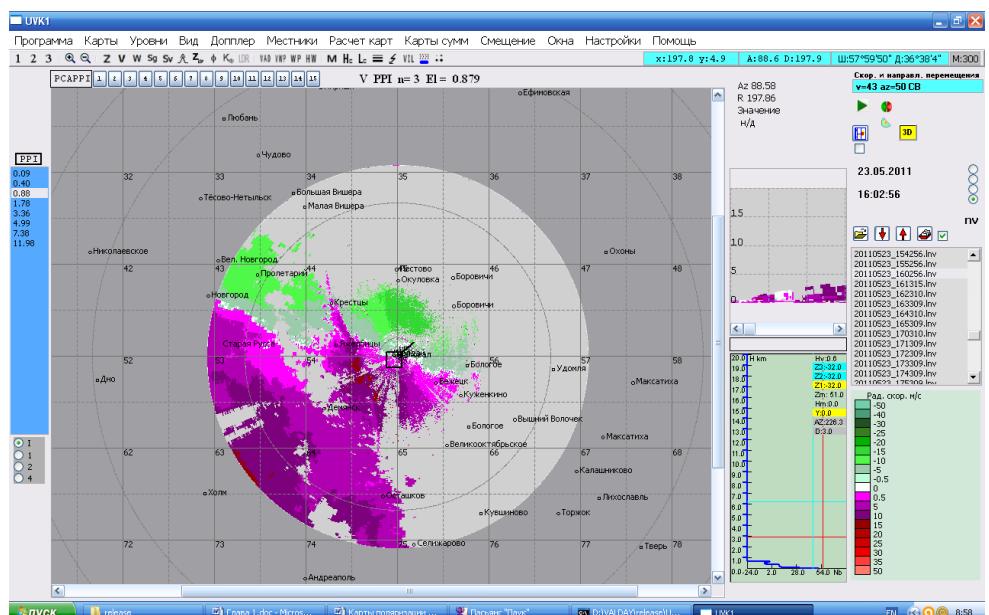
1. Распределения данного параметра по выбранным горизонтальному, вертикальному или коническому разрезам (Рисунок 1.10);



a)



б)



в)

Рисунок 1.10 - Карты средней радиальной скорости частиц, полученные радиолокатором ДМРЛ-С в г. Валдай 23.05.2011 в 16-03: а) – горизонтальный разрез на уровне 0,7 км; б) – вертикальный разрез; в) – конический разрез под углом места антенны 0,88°

2. Восстановленного горизонтального ветра (Рисунок 1.11);

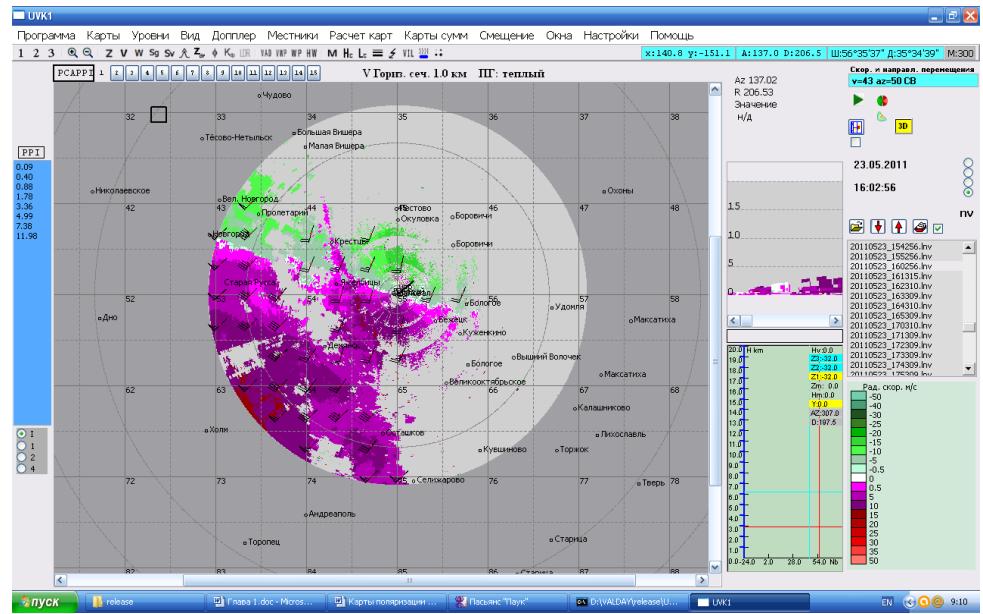
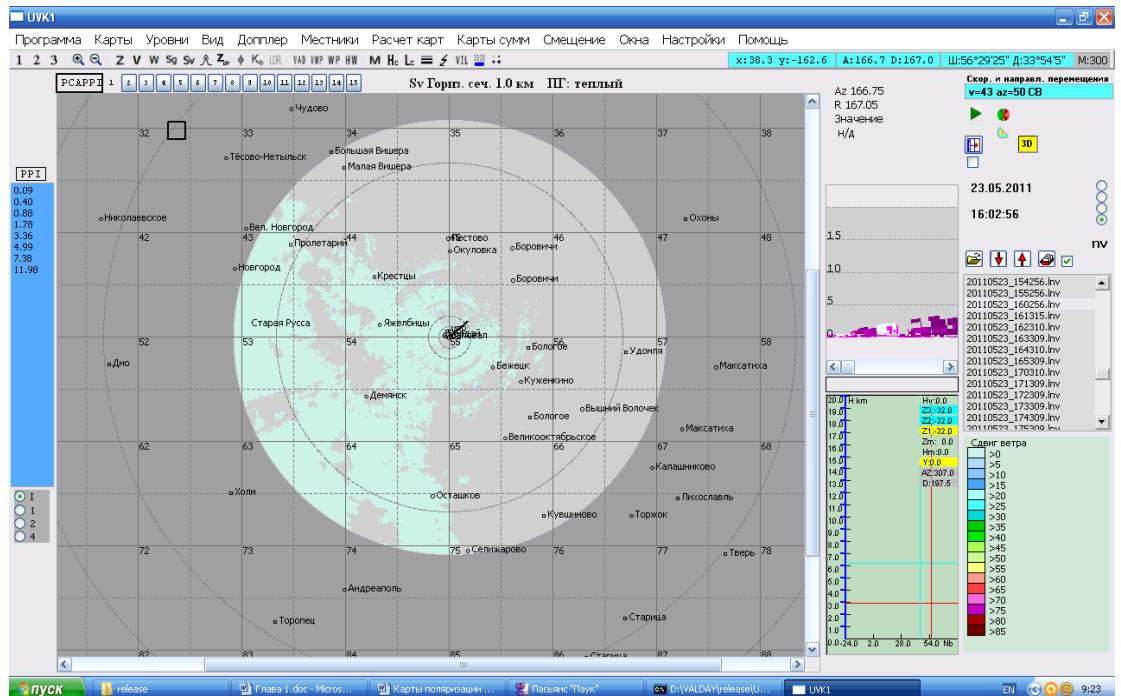
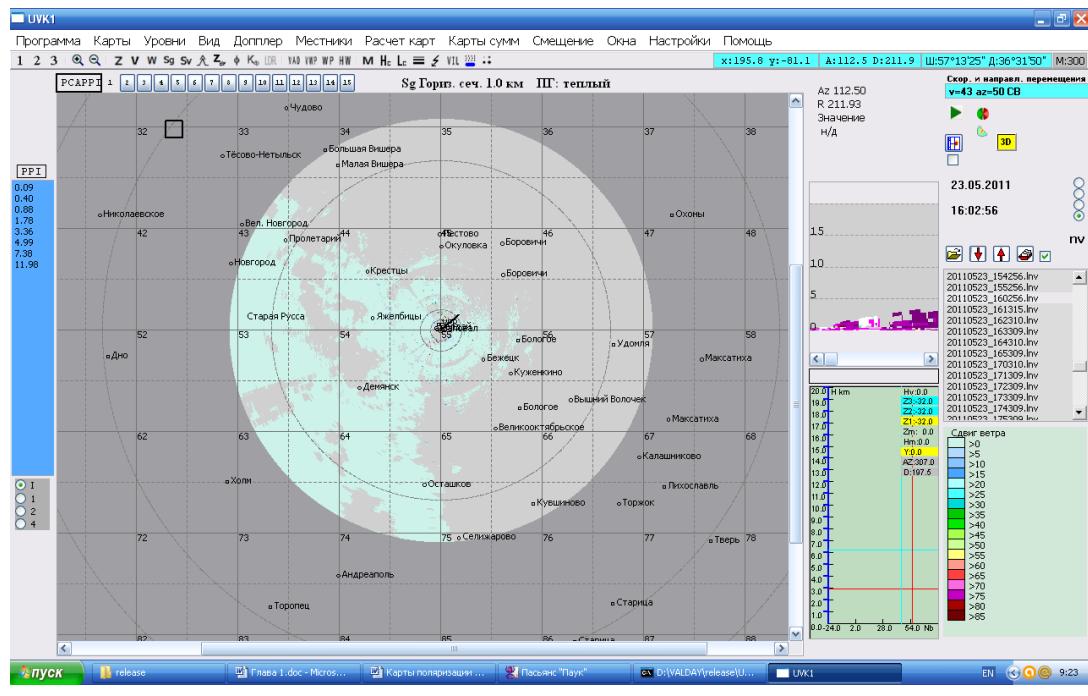


Рисунок 1.11 - Карта восстановленного горизонтального ветра в горизонтальном слое на высоте 1 км, полученная радиолокатором ДМРЛ-С в г. Валдай 23.05.2011 в 16-03

3. Вертикального и горизонтального сдвигов ветра (Рисунок 1.12);



a)



(б)

Рисунок 1.12 - Карты вертикального (а) и горизонтального (б) сдвигов ветра, полученные радиолокатором ДМРЛ-С в г. Валдай 23.05.2011 в 16-03.

Ширина энергетического спектра принимаемого сигнала

Аналогично средней по разрешаемому объему радиальной скорости частиц считается, что ширина спектра этих скоростей σ_v функционально связана с шириной энергетического спектра принимаемого сигнала σ_f

$$\sigma_v = \frac{\lambda \sigma_f}{2}. \quad (1.8)$$

Очевидно, что она является показателем того, насколько разбросаны скорости элементарных отражателей относительно их среднего значения. Дело осложняется тем, что значение данного параметра влияет целый ряд факторов. Как правило, их насчитывают пять [181]:

1. турбулентность;
2. сдвиг ветра;
3. модуляция сигнала из-за вращения антенны;
4. разница гравитационного падения гидрометеоров различного диаметра;
5. изменение ориентации и колебание частиц.

То, что наблюдения проводятся под малыми углами места антенны, скорость вращения антенны достаточно мала (стандартной считается скорость 6 оборотов в минуту), а длина волны несущего колебания метеорологического радиолокатора, как правило, во много раз больше размеров гидрометеоров, позволяет пренебречь вкладом трех последних факторов. Тогда для получения той части ширины спектра, что определяется турбулентностью σ_t , достаточно из суммарной оценки параметра вычесть вклад, вносимый сдвигом ветра σ_s

$$\sigma_t = \sigma_V - \sigma_s. \quad (1.9)$$

Для его нахождения применяется довольно сложная процедура, состоящая в измерении средней радиальной скорости частиц в смежных с рассматриваемым элементах разрешения и определении по ним локального сдвига ветра по каждой из трех координат W_h, W_v, W_R [177; 172]. На практике применяют упрощенную формулу [178]

$$\sigma_s = \sqrt{\left(\frac{R\theta W_h}{16 \ln 2}\right)^2 + \left(\frac{R\theta W_v}{16 \ln 2}\right)^2 + \left(\frac{0,35c\tau W_R}{2}\right)^2}, \quad (1.10)$$

где R - дальность цели;

θ - ширина диаграммы направленности антенны;

c - скорость света;

τ - длительность зондирующего импульса.

Решение о том, насколько опасна турбулентность в наблюдаемом участке, принимается не по величине ширины спектра сигнала, а по рассчитываемой на ее основе скорости диссипации кинетической энергии ε . Если внешний масштаб турбулентности превосходит размеры разрешаемого объема радиолокатора, используют формулу

$$\varepsilon = \frac{0,72\sigma_t^3 4\sqrt{\ln 2}}{R\theta A^{3/2}}, \quad (1.11)$$

где A - постоянная, принимаемая обычно равной 1,6. В случае невыполнения упомянутого условия применяют формулу

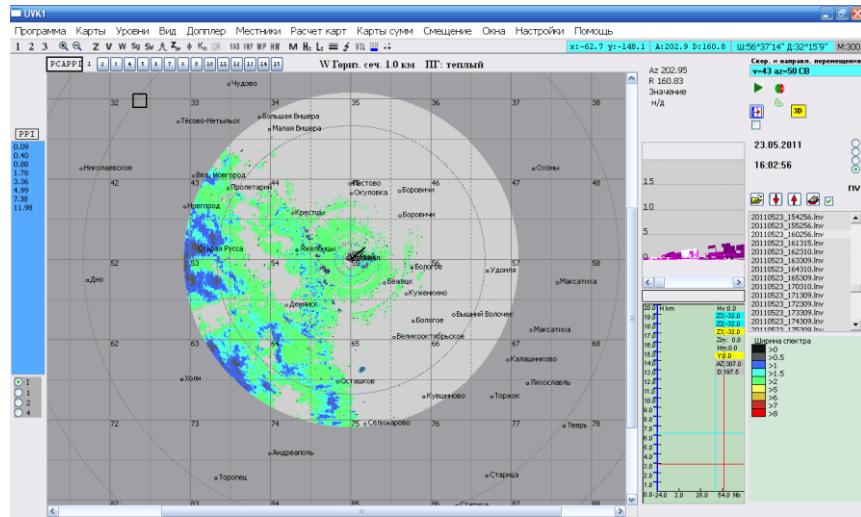
$$\varepsilon = \frac{2\sigma_t^3}{0,35c\tau(1,35A)^{3/2}} \left(\frac{11}{15} + \frac{4\theta^2}{15 \cdot 0,175c\tau \cdot 16\ln 2} \right)^{-3/2}. \quad (1.12)$$

Выбор одной из них основывается на априорных данных о масштабах турбулентности, характерных для места установки радиолокатора.

Следует отметить одну характерную особенность измерения ширины спектра отраженного сигнала. Этот параметр, наверное, более всех других подвержен воздействию шумов. Поэтому принято оценивать его только при отношении сигнал-шум не менее 20 дБ [188].

Карты, формируемые программой вторичной обработки информации радиолокатора по результатам измерения ширины спектра радиальных скоростей частиц:

1. Распределения данного параметра по выбранным горизонтальному, вертикальному или коническому разрезам (Рисунок 1.13);



a)

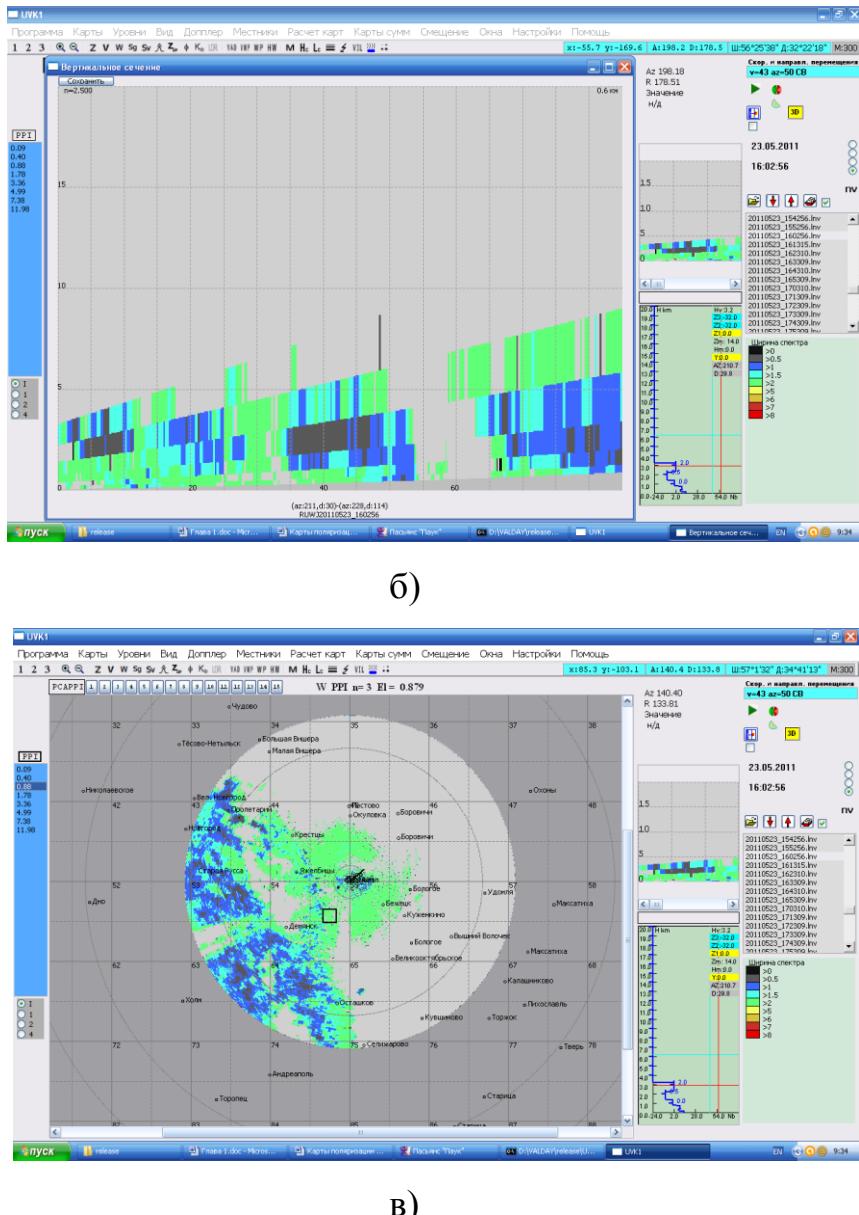


Рисунок 1.13 - Карты ширины спектра радиальных скоростей частиц, полученные радиолокатором ДМРЛ-С в г. Валдай 23.05.2011 в 16-03: а) – горизонтальный разрез на уровне 1 км; б) – вертикальный разрез; в) – конический разрез под углом места антенны $0,88^\circ$

2. Турублентности (Рисунок 1.14);

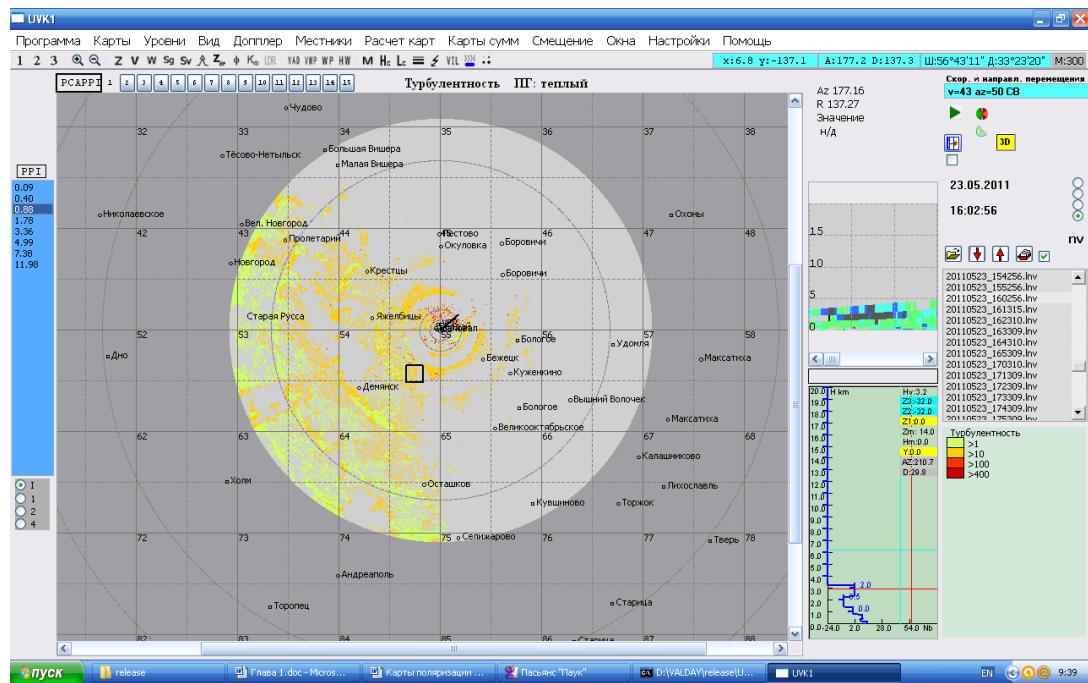


Рисунок 1.14 - Карта турбулентности, полученная радиолокатором ДМРЛ-С в г. Валдай

23.05.2011 в 16-03

Методы оценивания спектральных характеристик сигнала

Методы, которые применяются в метеорологической радиолокации для оценки спектральных характеристик, можно разделить на две группы:

1. универсальные;

2 специальные.

К первым относятся методы, применяемые во многих других областях техники. В первую очередь это преобразование Фурье и всевозможные его модификации. Однако в последнее время он подвергается все большей критике и в практику внедряются параметрические методы [95]. В любом случае принцип оценивания один – сначала ищется форма спектра, затем находятся его первый и второй центральный моменты.

Специальные методы – различные модификации метода парных импульсов [68; 146]. В его основе лежит предположение о гауссовой форме энергетического спектра сигнала, отраженного метеообразованием. Тогда его средняя частота и ширина находятся в соответствии с формулами

$$\tilde{f}_{\text{сред}} = \frac{1}{T_{\text{n}}} \arctg \left(\frac{\text{Im}(\tilde{r}(T_{\text{n}}))}{\text{Re}(\tilde{r}(T_{\text{n}}))} \right), \quad (1.13)$$

$$\tilde{\sigma}_f = \sqrt{-\frac{2}{T_{\text{n}}} \ln(\text{Re}^2(\tilde{r}(T_{\text{n}})) + \text{Im}^2(\tilde{r}(T_{\text{n}})))}, \quad (1.14)$$

где \tilde{r} - оценка автокорреляционной функции входного сигнала;

T_{n} - период повторения зондирующих импульсов.

Современные исследования показывают, что в значительном числе случаев описание спектра эхо- сигналов метеообразований гауссовой кривой не соответствует действительности [185]. Однако метод обладает в этом смысле хорошей устойчивостью, т.е. погрешность измерений мало меняется при отклонении формы спектра от гауссовой. Она может быть минимизирована введением, например, коэффициентов для холодного и теплого времени года [42].

Однако, как будет показано ниже, существуют случаи, когда ни один из рассмотренных методов не может быть применен непосредственно, и следует искать другие подходы к решению данной задачи.

1.4 ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

К поляризационным характеристикам относятся:

- 1) дифференциальная отражаемость;
- 2) дифференциальная фаза;
- 3) модуль коэффициента взаимной корреляции поляризационных составляющих сигнала.

Измерение их возможно только в поляриметрических радиолокаторах, т.е. имеющих возможность излучать и принимать радиоволны различной поляризации. Широкое практическое применение они получили совсем недавно, около 2010 года, и сразу доказали свою высокую эффективность.

Дифференциальная отражаемость

Дифференциальная отражаемость Z_{DR} определяется как отношение радиолокационных отражаемостей цели, полученных при горизонтальной (Z_h) и вертикальной (Z_v) поляризации облучающей волны

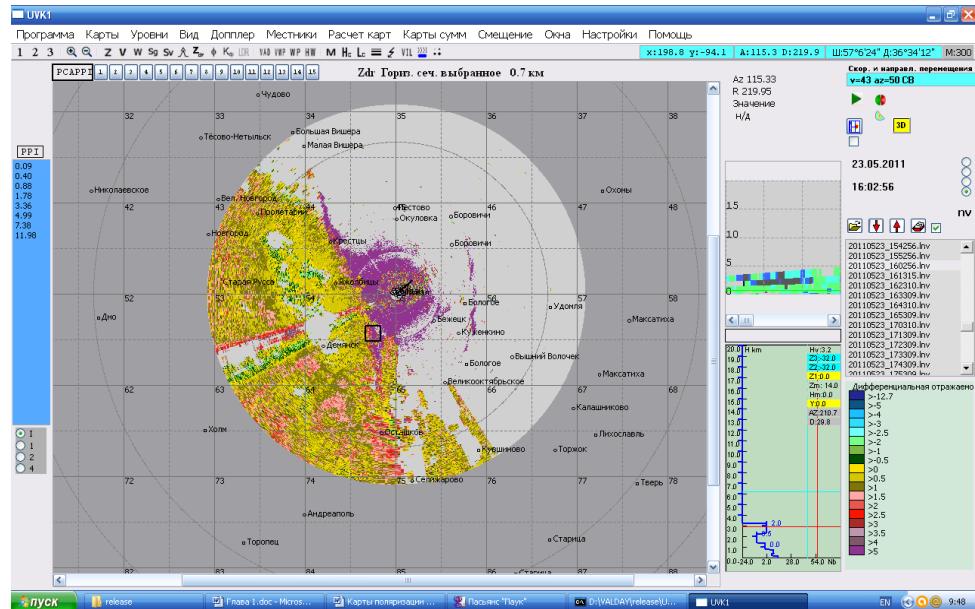
$$Z_{DR} = \frac{Z_h}{Z_v}. \quad (1.15)$$

Ее информационные возможности основаны на различии в отражении от жидких и ледяных частиц [143]. Первые при свободном падении сплющиваются и приобретают форму эллипса вращения, у которого отношение горизонтальной оси к вертикальной тем больше, чем больше масса частицы. В результате дифференциальная отражаемость их эхо-сигнала, выраженная в дБ, положительна, а ее значение зависит от размера элементарных отражателей. Ледяные же частицы характеризуются равными отражаемостями по обеим поляризационным компонентам за счет либо шарообразной формы (град, крупка), либо хаотичной ориентации (ледяные иглы, снежинки). Для них Z_{DR} равно приблизительно нулю дБ.

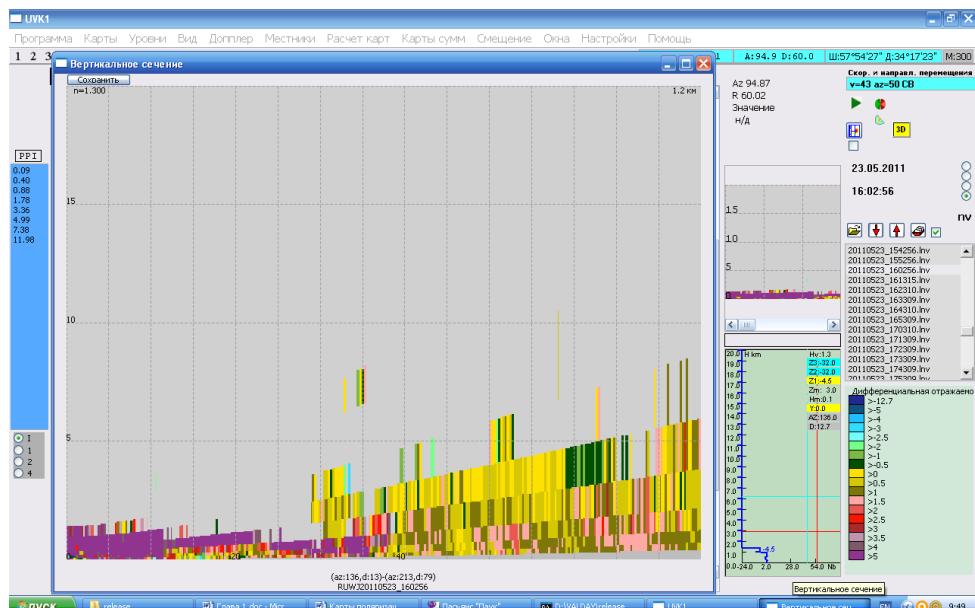
Кроме того, при помощи оценок дифференциальной отражаемости хорошо различаются цели, имеющие иную природу – местные предметы (местники) и скопления птиц и насекомых. Последние характеризуются значительно большим, чем у капли воды, отношением горизонтальных размеров к вертикальным. В результате дифференциальная отражаемость их эхо-сигнала в несколько раз больше, чем у метеообразований. Местные же предметы, способные создать помехи при работе радиолокатора (заводские трубы, вышки, деревья, высокие здания и т.д.) имеют в большинстве случаев вертикальную ориентацию. Создаваемые ими отражения имеют Z_{DR} , меньше единицы ($Z_{DR} < 0$ дБ), и могут быть отфильтрованы от полезного сигнала.

На основании измерения дифференциальной отражаемости программой вторичной обработки информации радиолокатора формируются карты

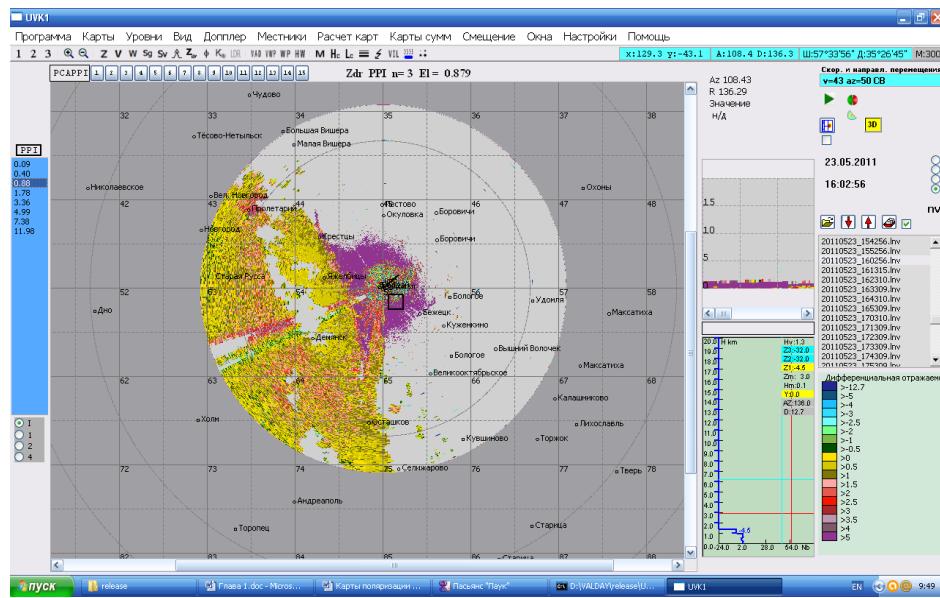
распределения данного параметра по выбранным горизонтальному, вертикальному или коническому разрезам (Рисунок 1.15).



а)



б)



в)

Рисунок 1.15 - Карты распределения дифференциальной отражаемости, полученные радиолокатором ДМРЛ-С в г. Валдай 23.05.2011 в 16-03: а) – горизонтальный разрез на уровне 0,7 км; б) – вертикальный разрез; в) – конический разрез под углом места антенны 0,88°

Дифференциальная фаза

Дифференциальная фаза Φ_{DR} определяется как аргумент коэффициента взаимной корреляции r_{hv} вертикально и горизонтально поляризованных составляющих принятого сигнала

$$\Phi_{DR} = \arg(r_{hv}), \quad (1.16)$$

где

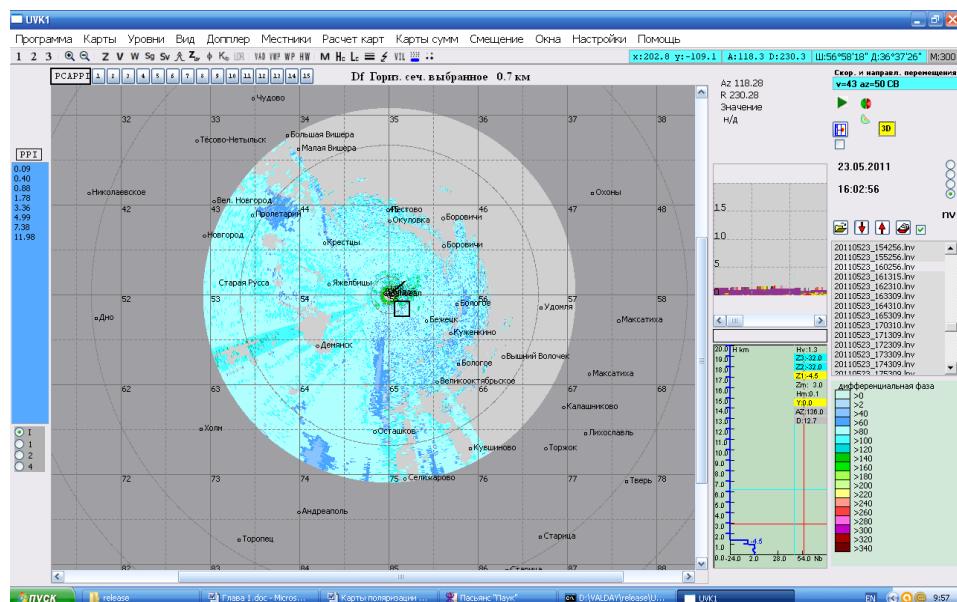
$$r_{hv} = \frac{\langle H^* V \rangle}{(P_h P_v)^{1/2}}, \quad P_h = \langle |H|^2 \rangle, \quad P_v = \langle |V|^2 \rangle; \quad (1.17)$$

H и V - сигналы, принимаемые по горизонтальному и вертикальному каналам соответственно, угловые скобки означают осреднение по времени.

Данный параметр уникален тем, что в отличие от всех остальных является результатом эффектов не отражения, а распространения. Из-за деформации жидких капель параметры среды для вертикально и горизонтально поляризованных волн становятся различными и зависящими от размеров и концентрации гидрометеоров. В случае твердых осадков условия

распространения обеих волн практически одинаковы, и разница в их фазах значительно уменьшается по сравнению с распространением в дожде. В результате рассматриваемый параметр может применяться для определения агрегатного состояния частиц и, если они жидкие, для измерения интенсивности осадков. Ко всему прочему дифференциальная фаза - параметр неэнергетический, что делает ее независимой, во-первых, от частичного блокирования луча (например, местными предметами) и, во-вторых, от калибровки приемного тракта радиолокатора. Последнее свойство дает возможность саму ее использовать для данной калибровки.

На основании измерений дифференциальной фазы программой вторичной обработки информации радиолокатора формируются карты распределения данного параметра по выбранным горизонтальному, вертикальному и коническому разрезам (Рисунок 1.16).



a)

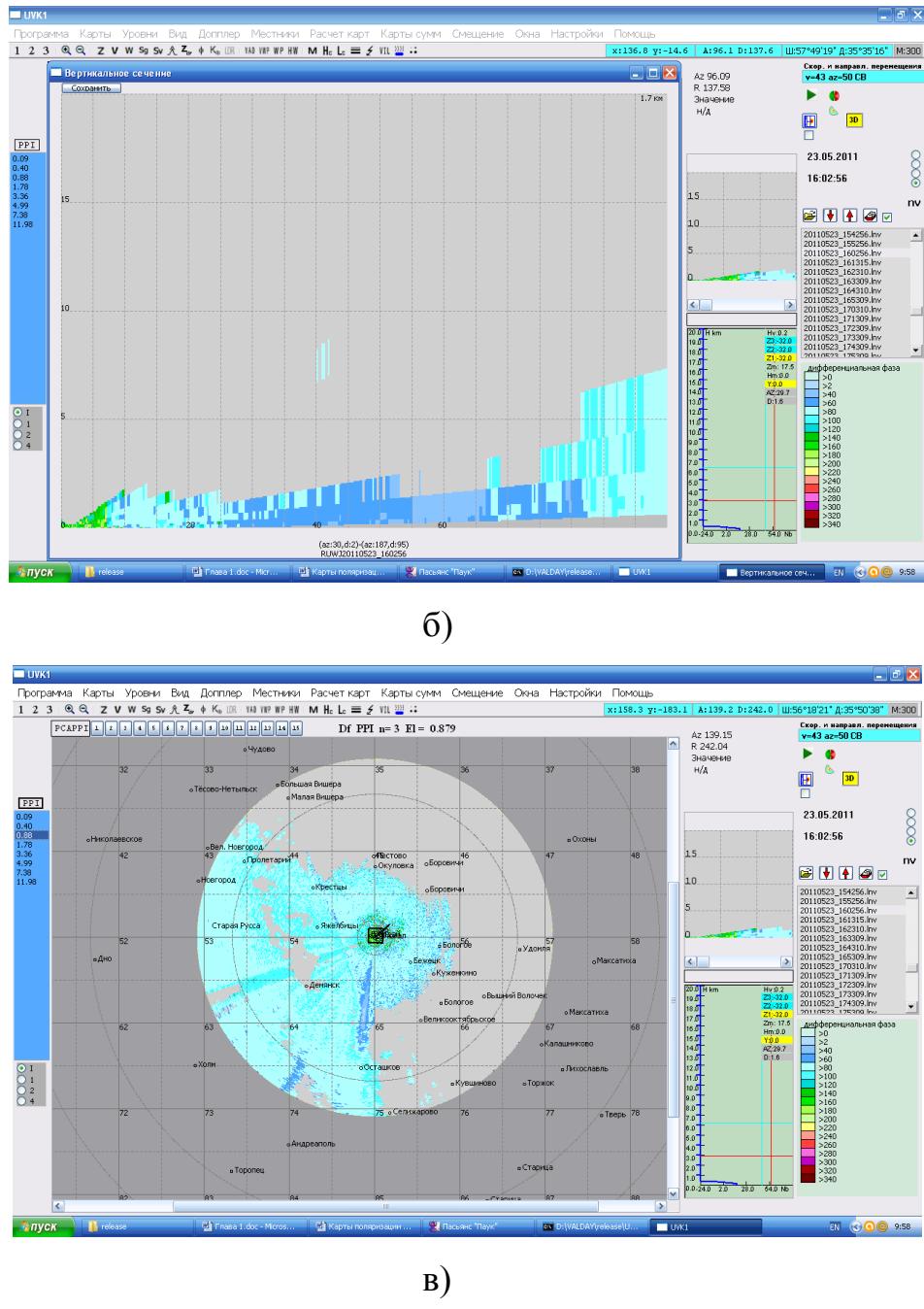


Рисунок 1.16 - Карты распределения дифференциальной фазы, полученные радиолокатором ДМРЛ-С в г. Валдай 23.05.2011 в 16-03: а) – горизонтальный разрез на уровне 0,7 км; б) – вертикальный разрез; в) – конический разрез под углом места антенны 0,88°

Модуль коэффициента взаимной корреляции

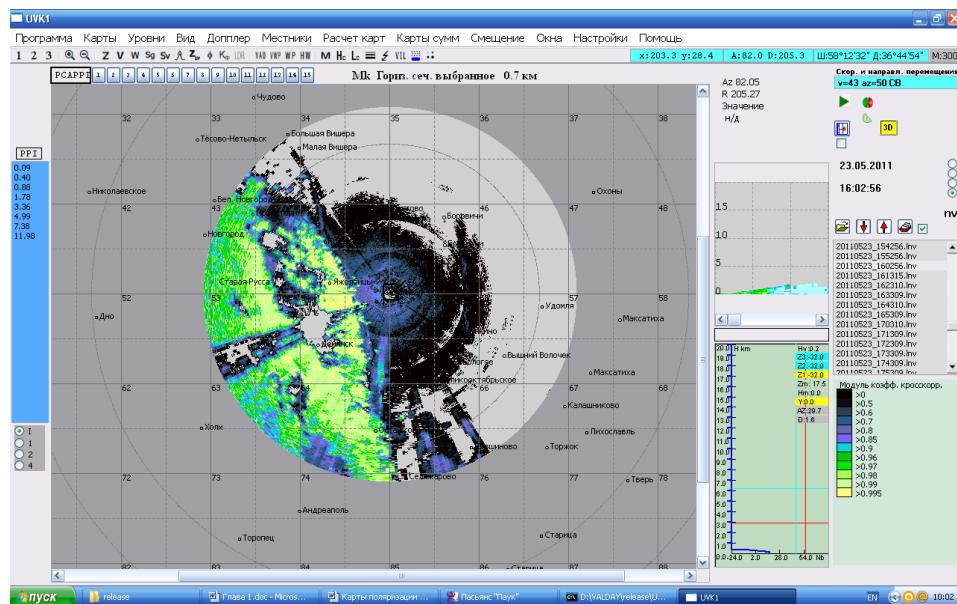
Модуль коэффициента взаимной корреляции оценивается в соответствии с выражением

$$\rho_{hv} = \text{mod}(r_{hv}). \quad (1.18)$$

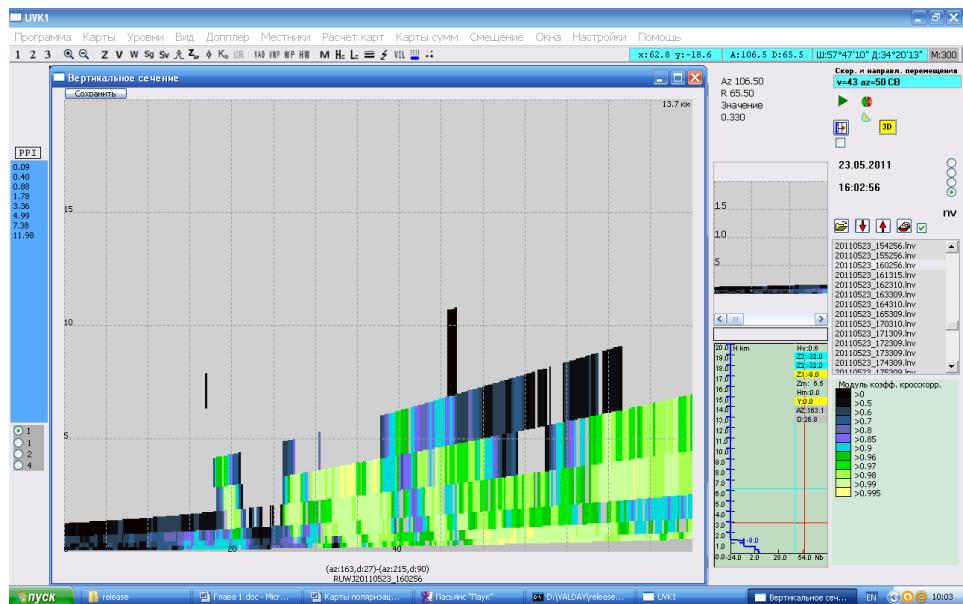
Главной его особенностью является то, что он имеет значение, близкое к единице, для метеорологических объектов и значительно меньшее для целей иного происхождения. Таким образом, оценивание коэффициента взаимной корреляции открывает широкие возможности в области борьбы с отражениями от местных предметов, идентификации пыльных бурь, скопления насекомых и птиц.

Кроме того, он применим для различия мокрого снега и тающего града от тех же частиц в сухом или полностью растаявшем состоянии, поскольку для первых имеет значение меньшее, чем для вторых. Главная сложность при этом состоит в том, что разница между указанными величинами составляет несколько сотых процента, и для таких тонких измерений необходимо, чтобы применяемое при этом оборудование отвечало большим, нежели обычно, стандартам качества. В первую очередь это относится к антенне и приемнику радиолокатора.

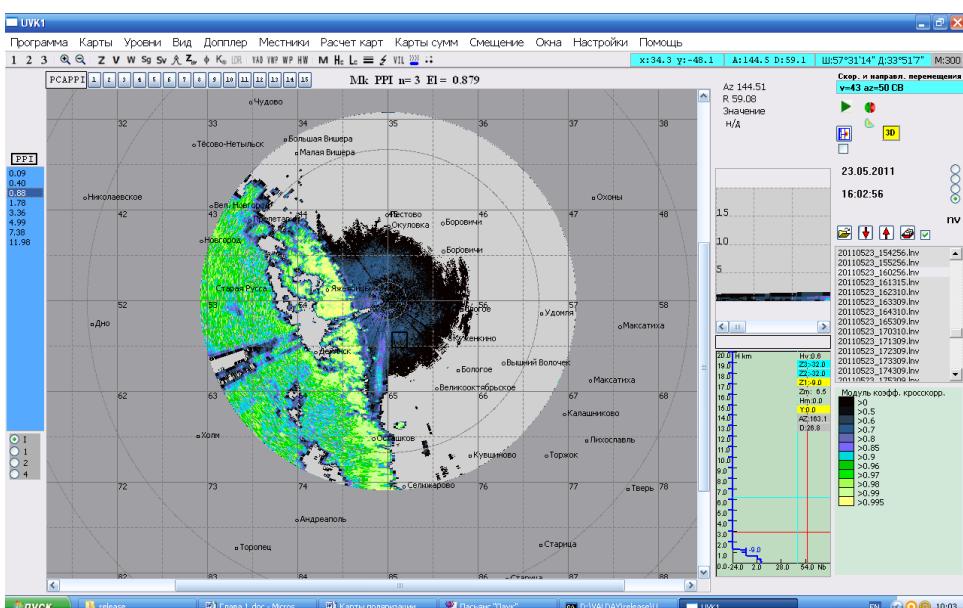
На основании измерений модуля коэффициента взаимной корреляции программой вторичной обработки информации радиолокатора формируются карты распределения данного параметра по выбранным горизонтальному, вертикальному и коническому разрезам (Рисунок 1.17).



a)



б)



в)

Рисунок 1.17 - Карты распределения модуля коэффициента взаимной коррекции, полученные радиолокатором ДМРЛ-С в г. Валдай 23.05.2011 в 16:03: а) – горизонтальный разрез на уровне 0,7 км; б) – вертикальный разрез; в) – конический разрез под углом места антеннны 0,88°

ВЫВОДЫ

Из выше изложенного следует, что современный метеорологический радиолокатор, в частности, отечественный ДМРЛ-С, имеющий когерентный и

поляризационный режимы работы, является мощным инструментом получения информации о состоянии атмосферы. Шесть характеристик отраженного сигнала, доступные для его системы вторичной обработки информации, позволяют значительно расширить перечень опасных явлений природы, которые могут им своевременно обнаруживаться и диагностироваться на предмет дальнейшего развития и передвижения [70; 63]. К таковым относятся сдвиги ветра, микропорывы, скопление птиц и насекомых и т.д. Выполнение других функций, традиционно выполняемых некогерентными МРЛ, может быть улучшено. Например, возможность определения агрегатного состояния наблюдаемых частиц позволяет правильно рассчитать интенсивность осадков по мощности принимаемого сигнала за счет однозначного определения величины показателя преломления в формуле (1.3).

Однако ничего подобного не происходит. Для формирования своей главной карты опасных явлений погоды (Рисунок 1.18) из всех ранее приведенных используются лишь карты распределения радиолокационной отражаемости и верхней границы облачности. Идентификация гроз, града, ливня и др. явлений ведется на основе алгоритмов, разработанных еще для некогерентных МРЛ [141]. Единственное, сделанное на текущий момент добавление – учет изменения средней частоты спектра радиальных скоростей частиц в рядом расположенных элементах разрешения при распознавании смерча.

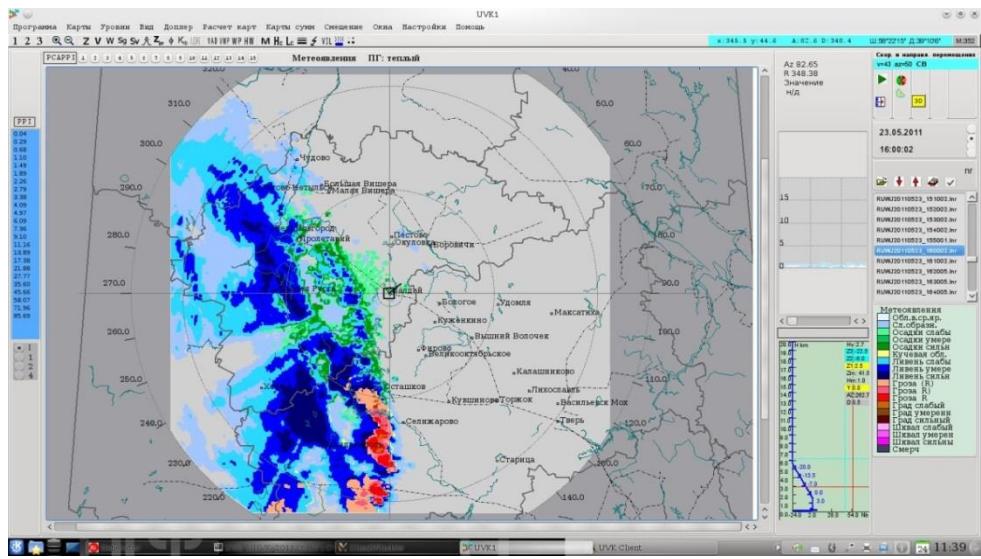


Рисунок 1.18 - Карта опасных явлений, полученная радиолокатором ДМРЛ-С в г. Валдай 23.05.2011 в 16-00

Остальные измеряемые параметры выводятся на экран или печать в виде карт их распределения по различным разрезам. В ряде случаев оператор по превышению параметром какого-либо порогового значения может определить наступление опасной ситуации. Например, выделить зону интенсивных осадков. Но зачастую для этого требуется комплексный анализ нескольких параметров. Так, для выявления градоопасной области нужно совместить данные о радиолокационной отражаемости, дифференциальной отражаемости и модуле коэффициента взаимной корреляции в каждом выводимом на карту элементе разрешения. Выполнить подобную методику «вручную» практически невозможно. Требуется автоматизация данного процесса [58].

Для ряда опасных явлений (град, шквал, ливень, смерч, пыльная буря, скопление птиц и насекомых) методы распознавания с привлечением всех выходных данных многопараметрического радиолокатора уже существуют [129; 131; 51; 21]. Исследования в этом случае заключаются в проверке их применимости в условиях отечественной сети штормооповещения, т.е. в радиолокаторе ДМРЛ-С. Одновременно существуют явления (сдвиг ветра, микропорывы), для которых такие методы еще требуется разработать, для чего, прежде всего, следует создать модели указанных явлений и найти связь их

параметров с характеристиками выходных данных радиолокатора, получаемые при их наблюдении. Этой задаче посвящена следующая глава.

2 МОДЕЛИ СДВИГА ВЕТРА И МИКРОПОРЫВА.

Сдвиг ветра и микропорывы – опасные явления, для которых уже существуют методы распознавания когерентными метеорологическими радиолокаторами. Однако их эффективность оставляет желать лучшего, что делает актуальным разработку новых путей решения рассматриваемой задачи [125]. В данной работе предлагается совершенно новые методы, основанные на использовании оценок такого «недооцененного» до сих пор параметра, как ширина спектра принимаемых отражений [28; 130; 108]. Их разработка базируется на описываемых далее математических моделях, устанавливающих связь указанных оценок с параметрами этих опасных явлений [29].

2.1. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ СДВИГА ВЕТРА.

Сдвиг ветра – опасное явление природы, способное угрожать безопасности полета различных воздушных судов во время их взлета и посадки. Поэтому основными потребителями данного вида информации являются аэропорты и космодромы. При этом предъявляемые к ней требования очень различны: космодромам нужен профиль ветра до высот в несколько десятков километров [57], аэропорты же интересует слой атмосферы до высоты 500 метров [112].

Определить скорость ветра на больших высотах не под силу метеорологическому радиолокатору. Необходимые для его работы элементарные отражатели здесь отсутствуют, а получить сколько-нибудь значимые эхо-сигналы от неоднородностей среды не позволяет используемый в них размер длины волны несущего колебания. Здесь требуются волны дециметрового и метрового диапазонов [24]. Для получения подобной информации строятся специальные устройства – профилометры [207]. Их устройство и принципы работы несколько отличны от тех, что характерны для радиолокаторов, и в данной работе не рассматриваются. Далее ограничиваемся исследованием данного явления только на малых высотах.

Различают вертикальный и горизонтальный сдвиги ветра. Первый измеряется в м/с на 100 футов (30 метров), второй – м/с на 600 метров [25]. Уже в том, какие единицы измерения приняты для каждого из них имеется информация о степени опасности их для воздушного судна. Например, в руководстве Международной организации гражданской авиации [142] рассматривается только вертикальный сдвиг. Поэтому далее сосредоточимся тоже именно на нем.

О том, какое внимание уделяется обнаружению данного вида опасному явлению говорит количество различной аппаратуры, созданной специально для его оперативного обнаружения. По физическим принципам работы данные изделия разделяются на четыре группы [169; 171; 186]:

1. Радиолокационные (радары) [18; 201];
2. Оптические (лидары) [41; 65; 66; 127];
3. Акустические (содары) [148; 90; 91; 92; 99];
4. Радиоакустические [78; 189; 194; 205; 199].

Поскольку мы определились ранее в том, что рассматриваем задачу распознавания сдвига ветра применительно к задачам авиации, последние две группы оборудования приходиться признать неприменимыми в наших условиях из-за слишком большого уровня помех, создаваемого их работе двигателями самолетов. Остаются радары и лидары, образующие взаимодополняющую пару и обеспечивающие независимость проведения измерений от сложившихся метеорологических условий. Лидар работоспособен в «чистой атмосфере» с метеорологической дальностью видимости до 5 км, радар же эффективен при наличии в окружающем пространстве элементарных отражателей, как правило, гидрометеоров, способных создать отражения достаточной мощности. Примером такого использования рассматриваемой аппаратуры может служить аэропорт Гонконга, схема размещения метеорологического оборудования которого приведена на Рисунке 2.1. [142]. Автоматическая система, обрабатывающая данные этих датчиков [175; 176] позволила достичь 95%-й достоверности обнаружения сдвига ветра.



Рисунок 2.1 - Схема расположения метеорологического оборудования в аэропорте Гонконга

Одновременно с разного вида профилометрами в аэропортах устанавливаются метеорологические радиолокаторы. Естественно возникает желание передать им функции радиолокационного измерителя профиля ветра и тем сэкономить на покупке дорогостоящего оборудования. Как выясняется, измерять интересующий нас параметр радиолокатор может двумя способами:

1. Посредством восстановления вертикального профиля ветра;
2. С помощью оценок ширины спектра принимаемого сигнала.

Далее рассмотрим каждый из них отдельно.

Распознавание сдвига ветра путем восстановлением вертикального профиля горизонтального движения частиц

Большинство современных метеорологических радиолокаторов, в том числе и отечественный ДМРЛ-С, снабжены программой, реализующей метод VAD восстановления средней скорости ветра в выбранном слое пространства. Он основан на аппроксимации получаемых в процессе сканирования антенны в горизонтальной плоскости оценок средней частоты спектра отражений от расположенных на одной высоте разрешаемых объемов пространства функцией

$$\tilde{f}_{cp}(\alpha, \beta, R_0) = \frac{2V}{\lambda} \cos(\alpha - \varphi) \cos \beta, \quad (2.1)$$

где α , β , R_0 – соответственно азимут, угол места и наклонная дальность центра элемента разрешения;

$\tilde{f}_{\text{cp}}(\alpha, \beta, R_0)$ – средняя частота спектра сигнала, отраженного этим элементом разрешения;

V – скорость ветра на высоте $h = \beta R_0$;

λ – длина волны радиолокатора.

Проведение таких измерений в слоях, расположенных на различных высотах, как раз и воссоздает изменение среднего вектора скорости движения частиц с высотой, т.е. искомый профиль ветра. В главе 1 на Рисунках 1.7-1.9 представлены получаемые при этом выходные продукты: дисплей азимутальной скорости; график изменения скорости и направления ветра с высотой; изменения профиля ветра во времени.

В принципе, это то, что и требуется получить, за единственным исключением – измерения проводятся с шагом примерно 250 м по высоте. Внутри слоя такого размера усредняются скорости элементарных отражателей. В результате, измерения получаются слишком грубыми для решения поставленной задачи, в которой требуется измерять сдвиг в м/с на 30 м. Следовательно, именно 30 м – верхний предел толщины слоя упомянутого усреднения. Для выполнения данного условия линейный размер элемента разрешения радиолокатора не должен превышать указанного значения. При ширине луча антенны 1 градус максимальная дальность получения оценок оказывается равной 1700 м. Минимальная дальность определяется границей дальней зоны Френеля, где диаграмму направленности антенны можно считать сформированной, [213; 190]

$$R_{\min} = \frac{4D^2}{\lambda} = 1500 \text{ м}, \quad (2.2)$$

где D – диаметр антенны, равный 4,5 м;

λ – длина волны несущего колебания (5,3 см).

Очевидно, что рабочая зона по координате дальности состоит всего из одного элемента разрешения. Таким образом, радиолокатор ДМРЛ-С не имеет возможности установить антенну на некоторый угол места и провести измерения для восстановления профиля ветра, как это делается в профилометрах, за один

скан луча. Единственный возможный для него способ – последовательное сканирование в горизонтальной плоскости с пошаговым перемещением луча в вертикальной. Чтобы получить оценки средней скорости ветра во всем интересующем слое толщиной 500 м с шагом 30 м ему придется сделать 16 сканирований. Учитывая, что скорость вращения антенны в режиме определения спектральных характеристик сигнала равна 3 оборотам в минуту, всего на рассматриваемую процедуру будет затрачено около 5 минут.

Требуемый темп обновления информации в метеорологических радиолокаторах – 10 минут. Примерно 7 из них тратится на выполнение двух обзоров – в режимах «отражаемость» и «скорость». Следовательно, для восстановления профиля ветра радиолокатору ДМРЛ-С придется полностью или частично прекратить выполнение «прямых обязанностей». В итоге, мы получаем еще один профилометр, только гораздо более дорогой, чем тот, работу которого собирались взять на себя.

В связи со сказанным актуальным становится поиск такого метода распознавания опасного сдвига ветра, который не требовал бы внесения изменений ни в конструкцию, ни в режим работы радиолокатора. Это достигается в случае использования для решения рассматриваемой задачи оценок не среднего значения, а ширины спектра принимаемого сигнала.

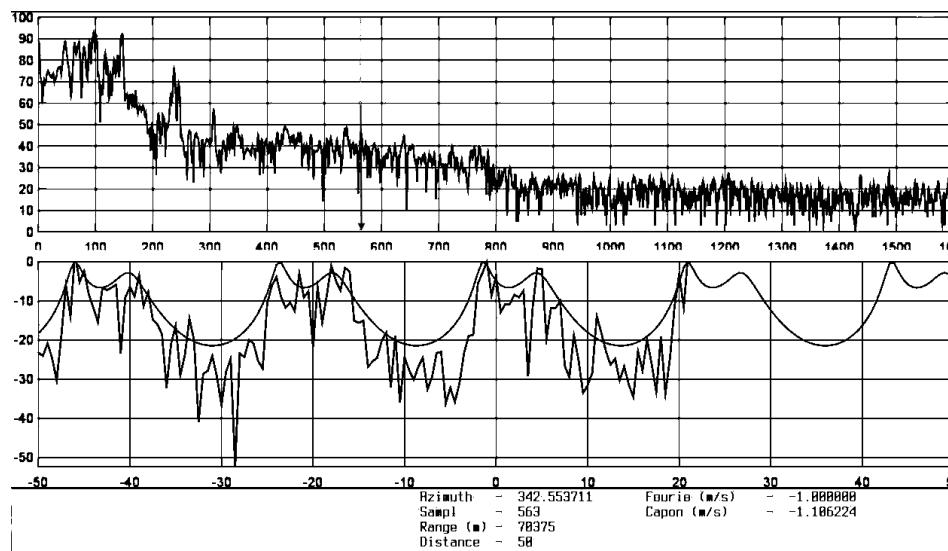
Распознавание сдвига ветра по оценкам ширины спектра принимаемого сигнала

Влияние сдвига ветра на форму спектра отраженного сигнала

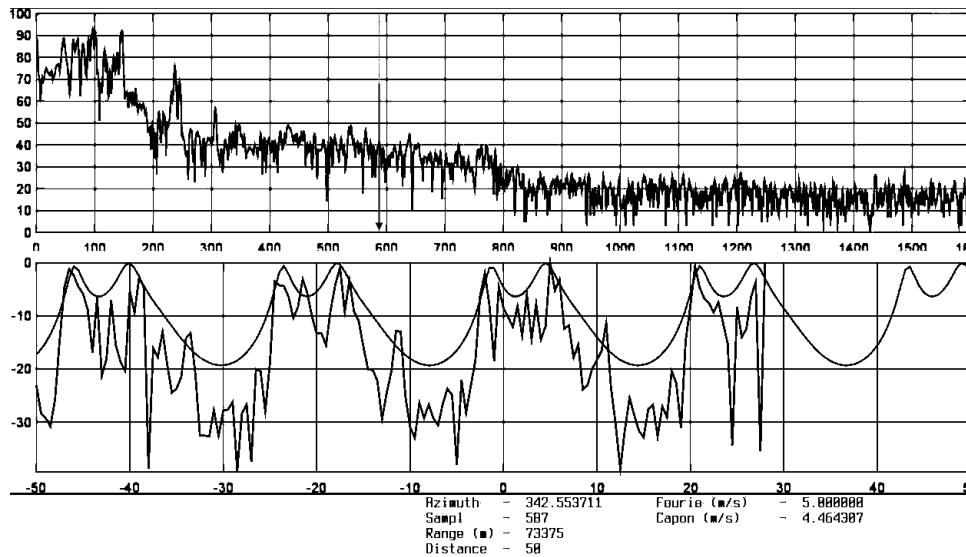
Стандартные процедуры оценки спектральных характеристик сигнала в метеорологических доплеровских радиолокаторах основываются на предположении о том, что его спектр имеет только один максимум. Более того, наиболее распространенный метод парных импульсов основан на еще более жестком предположении о гауссовой форме этого спектра. Такое допущение позволяет значительно сократить число вычислений, требуемых для получения

оценки параметра и, следовательно, упростить применяемую для этих целей аппаратуру.

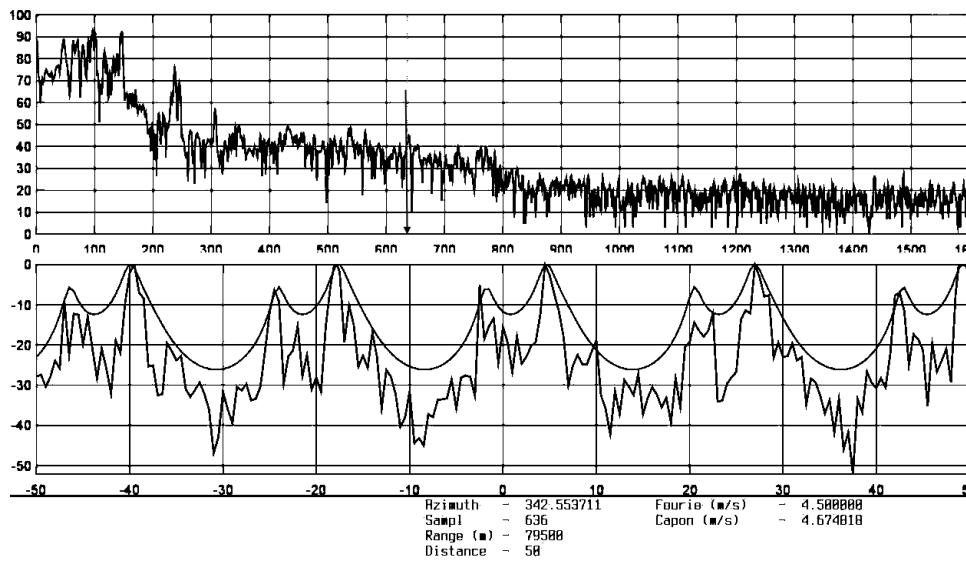
Однако практика показывает, что данные условия выполняются не всегда [185]. В частности, в 2009 году при проведении экспериментальных исследований возможности использования в метеорологической радиолокации сложного широкополосного сигнала, был получен странный результат. А именно, в пределах одного луча антенны наблюдался резкий скачок средней частоты спектра с изменением ее знака. Согласно критериям, применяемым во вторичной обработке сигналов, такое возможно при наблюдении торнадо. Но дело происходило в Москве и в январе, что начисто исключало подобную трактовку. Тем более что визуально наблюдалась сплошная слоистообразная облачность с обложными осадками в виде мокрого снега. Более детальное рассмотрение полученных данных показало, что в основе явления лежит присутствие в спектре принимаемого сигнала двух локальных максимумов, отношение величин которых изменяется с увеличением дальности. Сказанное иллюстрируется Рисунком 2.2.



a



б



в

Рисунок 2.2 - Примеры спектров, измеренных на разных дальностях в пределах одного луча антенны

На верхних графиках представлена полученная при неподвижномлуче реализация распределения мощности сигнала одна и та же для всех трех представленных случаев. По оси абсцисс откладываются порядковые номера элементов разрешения по дальности с ценой деления 150 м, по оси ординат – мощность в дБ относительно одного разряда квантования. Хорошо просматриваются сигналы от местных предметов до дальностей приметно 300 стробов, далее до 700-го строба видны отражения метеоцели. Вертикальной

линией со стрелкой обозначено положение элемента разрешения, спектр отражений от которого приведен на нижнем графике. Здесь более плавная линия соответствует оценке спектра по методу Кейпона, более изрезанная – быстрому преобразованию Фурье (БПФ). Приведены расчеты сразу для нескольких интервалов однозначного измерения частоты. В данном случае достаточно обращать внимание только на один из них, заключенный в границы $-10, +10$ м/с.

На Рисунке 2.2а дальность строба равна 70375 метрам, и в спектре принятого от него сигнала присутствуют два локальных максимума, один из которых (расположенный в области отрицательных частот) явно превалирует. Под графиком справа указаны результаты оценки частоты максимума спектра для каждого из примененных методов. В обоих случаях она отрицательна.

На Рисунке 2.2б представлена зона «дребезга», когда величины обоих максимумов сравнялись. Дальность строба здесь увеличена до 73375 метров и оба метода дают положительные оценки частоты. При дальнейшем продвижении строба по оси абсцисс лидерство захватывает локальный максимум, расположенный правее нулевой отметки, как это видно на Рисунке 2.2в.

Резкий скачок частоты, идущий вразрез с общепринятыми критериями, был обусловлен еще и тем, что она оценивалась не как среднее значение спектра, а как значение, соответствующее его максимуму. Это было в принципе неправильно, но сыграло положительную роль, т.к. заставило обратить внимание на наблюдавшийся феномен. В случае «правильного» оценивания изменение частоты с увеличением дальности происходило бы плавно и могло остаться незамеченным. В дальнейшем данные эксперимента были проанализированы на предмет выявления двухмодальных спектров и установлено, что среди общего числа они занимают примерно половину [206]. Следовательно, вопрос о том, как ведут себя оценки спектральных параметров в рассматриваемых условиях, актуален и весьма важен.

На Рисунке 2.3 представлена возможная схема наблюдения радиолокатором окружающего пространства, объясняющая рассмотренную выше ситуацию и образующийся при этом двухмодальный спектр радиальных скоростей частиц.

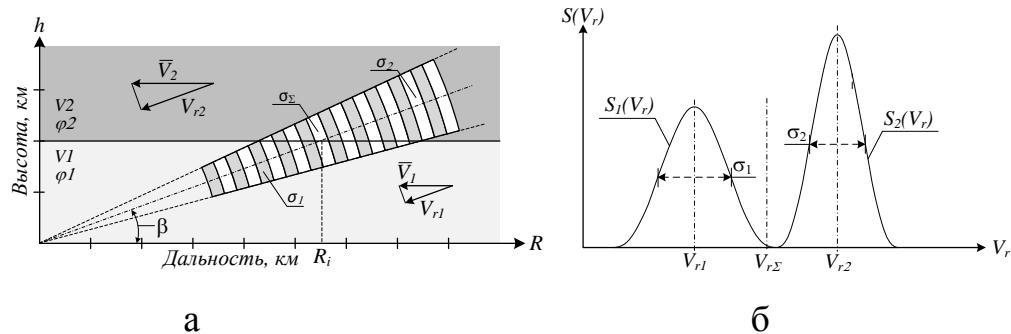


Рисунок 2.3 - Схема наблюдения радиолокатором окружающего пространства (а) и образующийся при этом спектр радиальных скоростей частиц (б). V_1 , V_2 – скорости ветра в первом и во втором слое, φ_1 , φ_2 – направления ветра в первом и во втором слое, V_{r1} , V_{r2} – среднее значение радиальной скорости частиц в первом и во втором слое, $S_1(V_r)$, $S_2(V_r)$ – спектральные составляющие, соответствующие первому и второму слою, σ_1 , σ_2 – ширины спектра сигнала, отраженного от первого и от второго слоя

Предполагается, что в зоне обзора радиолокатора присутствуют одновременно два горизонтальных отражающих слоя, расположенных достаточно близко один от другого. При этом на малых дальностях элемент разрешения заполняется в основном нижним слоем, в то время как верхний захватывается лишь краем луча антенны. По мере увеличения расстояния верхний слой смещается ближе к центру элемента разрешения, нижний же становится ближе к его краю. В результате весовые коэффициенты, с которыми суммируются сигналы от каждого из слоев, перераспределяются в пользу верхнего.

Данная ситуация заставляет вспомнить тот факт, что в классической радиолокации ось доплеровских частот играет роль четвертого измерения. При невозможности разрешить цели по пространственным координатам, остается возможность наблюдать их раздельно в частотной области. В метеорологической радиолокации такая обработка до сих пор не применялась, но в данном случае она напрашивается сама собой.

На основании изложенного может быть предложен, казалось бы, простой алгоритм обнаружения сдвига ветра [36]:

- идентификация спектра принятого сигнала как двухмодального, для чего должен быть разработан специальный критерий;
- оценивание средней частоты и ширины отдельно для каждой из спектральных составляющих;
- оценивание высоты расположения каждого из слоев по результатам измерений, полученных при различных углах места положения антенны;
- расчет искомой величины сдвига ветра по полученным данным.

Такая обработка сигнала позволит получить несмещенную оценку радиальной скорости гидрометеоров для каждой из высот, на которых расположены отражающие слои, и далее интерполировать и экстраполировать значения радиальной скорости ветра на высотах, расположенных между слоями и вне их соответственно.

Тонкое место предлагаемого алгоритма – разработка критерия распознавания двухмодальности спектра и методики разделения его на составляющие, представляющая собой сложную математическую задачу. Гораздо более простым и практически ценным является другой критерий двухмодальности спектра принимаемого сигнала – появление на карте ширины спектра радиальных скоростей частиц аномально больших значений параметра. Далее исследуем, как связаны ширина спектра с величиной сдвига ветра.

Зависимость ширины спектра сигнала от величины сдвига ветра

При попадании внутрь разрешаемого объема радиолокатора двух слоев гидрометеоров с различными скоростями составляющих их частиц, формируются сигнал, который можно представить в виде суммы двух независимых составляющих

$$S(t) = S_1(t) + S_2(t). \quad (2.3)$$

Его корреляционная функция равна сумме корреляционных функций каждой из составляющих [25]

$$R(\tau) = R_1(\tau) + R_2(\tau). \quad (2.4)$$

Нормированная корреляционная функция определяется выражением

$$r(\tau) = \frac{A_1 r_1(\tau) + A_2 r_2(\tau)}{A_1 + A_2}, \quad (2.5)$$

где A_1 и A_2 - мощности соответствующих составляющих сигнала;

$r_i(\tau)$ - нормированная корреляционная функция i -ой составляющей.

Следовательно, энергетический спектр суммарного сигнала будет равен взвешенной по мощности сумме спектров каждой из составляющих $s_1(\omega)$ и $s_2(\omega)$

$$s(\omega) = \frac{A_1 s_1(\omega) + A_2 s_2(\omega)}{A_1 + A_2}, \quad (2.6)$$

В известные формулы для расчета среднего значения и ширины спектра сигнала

$$\omega_{CP} = \int_V \omega s(\omega) d\omega, \quad (2.7)$$

$$\sigma_\omega^2 = \int_V \omega^2 s(\omega) d\omega - \left(\int_V \omega s(\omega) d\omega \right)^2 \quad (2.8)$$

подставляем выражение (2.6) и после несложных математических преобразований получаем следующие выражения для оценок интересующих нас величин

$$\omega_{CP} = \frac{A_1}{A} \omega_1 + \frac{A_2}{A} \omega_2, \quad (2.9)$$

$$\sigma_\omega^2 = \frac{A_1}{A} \sigma_{\omega_1}^2 + \frac{A_2}{A} \sigma_{\omega_2}^2 + \frac{A_1 A_2}{A^2} (\omega_1 - \omega_2)^2, \quad (2.10)$$

где $A = A_1 + A_2$ - суммарная мощность сигнала;

ω_1, ω_2 - средние значения;

σ_1, σ_2 - ширина спектра составляющих сигнала.

Из (2.9) следует, что среднее значение двухмодального спектра не может применяться для определения радиальной скорости частиц на высоте

расположения центра разрешаемого объема радиолокатора. Взвешенность отсчетов энергетического спектра по мощности, которой пренебрегали при наличии одной моды (см. п. 1.3), в присутствии второго максимума начинает играть решающую роль. Если вернуться к примеру, представленному на Рисунке 2.3, становится очевидным тот факт, что рассматриваемый параметр может быть равным ω_0 только в случае равенства мощностей сигналов, отраженных частицами каждого из потоков. В других же случаях он может принимать любое значение в интервале от ω_1 до ω_2 (Рисунок 2.4).

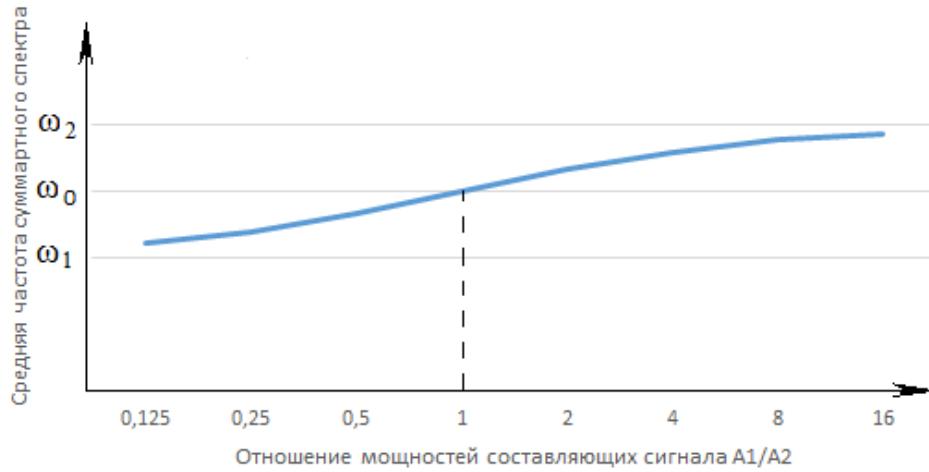


Рисунок 2.4 - Зависимость средней частоты двухмодального спектра от отношения мощностей составляющих его частей. ω_1 и ω_2 – средние частоты каждой из составляющих суммарного сигнала

В отношении же второго центрального момента σ_ω^2 можно сказать только то, что его значение определяется двумя факторами:

1. взвешенной суммой значений ширины спектра каждой из составляющих сигнала;

2. разницей средних частот спектра этих составляющих.

Именно последнее обстоятельство играет решающую роль в расширении спектра отражений от участка со сдвигом ветра. В результате данного эффекта на карте ширины спектра радиальных скоростей частиц появляются зоны аномально больших значений с характерными особенностями их пространственного

распределения. Исследуем подробнее, какая информация может быть извлечена из упомянутых карт [33].

Информативность карты ширины спектра радиальных скоростей гидрометеоров

Вопрос об информативности карты ширины спектра сигнала или спектра скоростей элементарных отражателей внутри элемента разрешения радиолокатора поднимался уже давно, что иллюстрируется Рисунком 2.5. На нем приведен результат одного из экспериментов, проведенных в 80-х годах прошлого века, когда исследовалась возможность получения дополнительной информации по оценкам ширины спектра сигнала на выходе амплитудного детектора радиолокатора МРЛ-5. Ожидалось, что зона повышенной турбулентности будет представляться на карте конического разреза в виде кольца больших значений измеряемого параметра. Однако наряду с картами ожидаемого вида часто получались и другие, на которых данные зоны имели вид двух дуг с расположенными друг напротив друга разрывами.

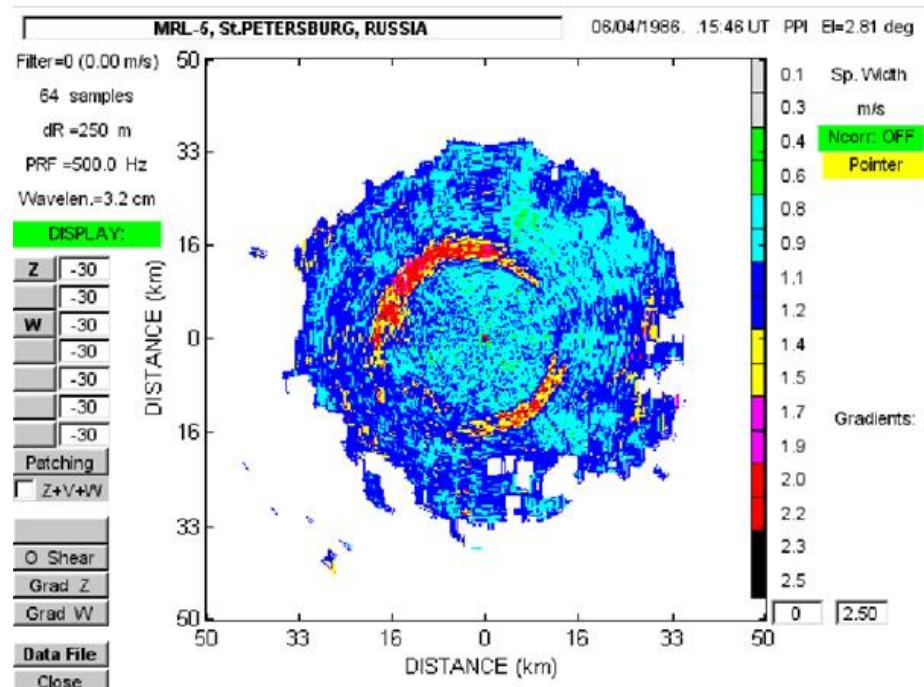


Рисунок 2.5 - Карта распределения ширины спектра выходного сигнала, полученного на выходе амплитудного детектора радиолокатора МРЛ-5, по поверхности конического разреза, полученная 08 апреля 1986 г.

Наличие на представленной карте полуколец объяснялось тогда следующим образом – мы наблюдаем слой атмосферы, в котором имеет место сдвиг скорости ветра по его величине без изменения направления. Тurbулентность в этом слое мала и практически не влияет на ширину спектра отражений. При азимуте антенны, совпадающим с направлением ветра внутри разрешаемого объема радиолокатора имеет место большой разброс скоростей из-за их сдвига по величине и спектр имеет максимальную ширину. При повороте антенны на 90° в горизонтальной плоскости радиальная составляющая скоростей ветра во всех наблюдаемых слоях становится равной нулю, сдвига как такового нет, и ширина спектра эхо-сигнала падает до минимума. Это и приводит к наблюдаемым разрывам кольца.

Отсутствие в то время доплеровских метеорологических радиолокаторов не позволяло сопоставить данную карту с картой радиальных скоростей гидрометеоров, чтобы подтвердить или опровергнуть приведенное объяснение. В результате оно дожило до сегодняшних дней, и только сейчас подвергается критике [20].

С учетом изложенного выше данная карта может быть объяснена следующим образом (Рисунок 2.6):

1. луч локатора захватывает одновременно два отражающих слоя с разными значениями скорости (V_1 и V_2) направления (φ_1 и φ_2) движения частиц в каждом из них;
2. на тех значениях азимута, на которых разница радиальных скоростей частиц (V_{R1} и V_{R2}) в слоях максимальна (в данном случае это направление северо-запад – юго-восток) спектр принимаемого сигнала получается двухмодальным, вследствие чего оценка ширины спектра получается аномально большой;
3. на ортогональном направлении радиальные скорости частиц в обоих слоях становятся равными, максимумы их радиальных скоростей совмещаются, и ширина суммарного спектра значительно уменьшается.

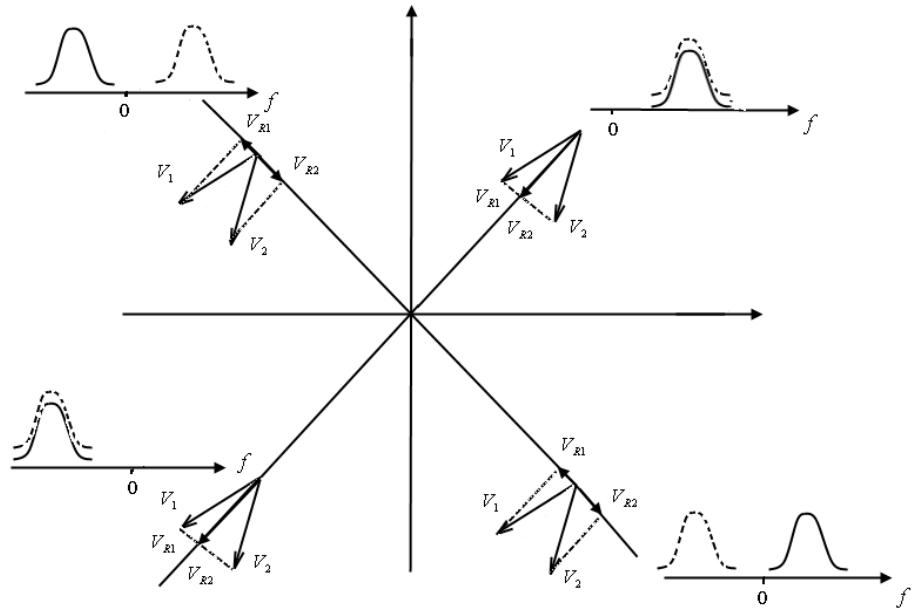


Рисунок 2.6 - Схема формирования спектра отраженного сигнала для примера, изображенного на рис.3.5. Сплошной линией обозначен спектр радиальных скоростей гидрометеоров в 1-м слое, пунктиром – во втором

Подтвердить или опровергнуть сделанные предположения можно только путем сравнения рассматриваемых карт ширины спектра радиальных скоростей гидрометеоров с полученными одновременно картами других параметров, в частности, среднего значения упомянутого спектра. До 2011 года, когда на сеть штормооповещения Росгидромета стали поступать отечественные доплеровские и поляриметрические радиолокаторы ДМРЛ-С, приходилось пользоваться чужими данными. В частности, в распоряжении автора оказались карты ширины спектра радиальных скоростей гидрометеоров [179], среднего значения их радиальной скорости и радиолокационной отражаемости, соответствующие одному и тому же коническому сечению под углом 2°, полученные 27 ноября 2001 года в штате Оклахома (США) и представленные на Рисунке 2.7.

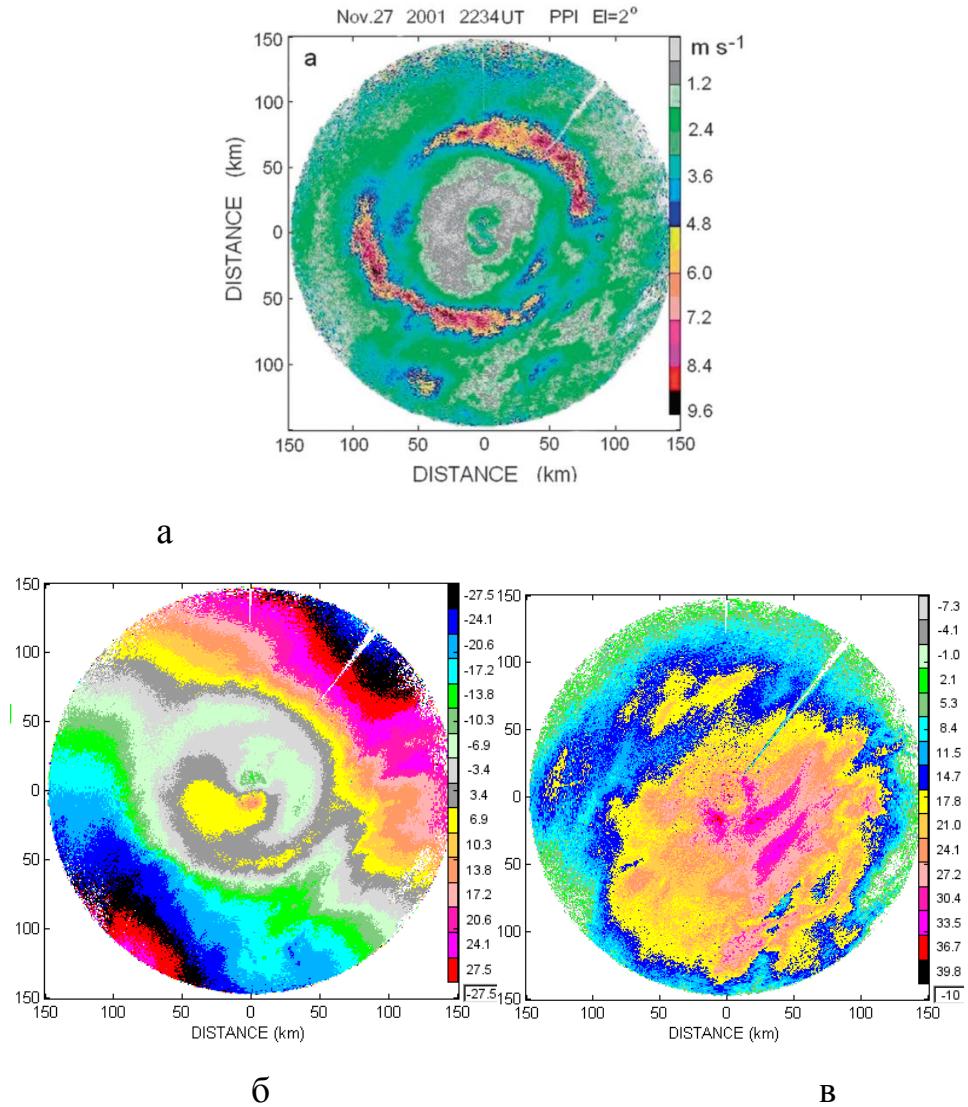


Рисунок 2.7 - Распределение по поверхности конического разреза, полученного при угле места 2 град., ширины спектра скоростей гидрометеоров (а), их средних радиальных скоростей (б) и радиолокационной отражаемости метеоцели (в)

На карте ширины спектра отчетливо видны два полукольца повышенного значения параметра. Сравнение ее с двумя другими картами позволяет сделать следующие выводы:

1. Расположение разрывов кольца не совпадает с зонами нулевых радиальных скоростей. Если из центра карты провести лучи через центры разрывов, они окажутся смещенными относительно направлений на эти зоны примерно на двадцать градусов против часовой стрелки.

2. Если совместить карты ширины спектра и радиальных скоростей, то явно видно, что области широких спектров не совпадают с областями больших градиентов скорости, как это должно было бы быть, являясь они порождением простого сдвига ветра. Для этого достаточно обратить внимание на поведение верхнего полукольца в четвертом квадранте – оно находится в зоне очень слабых изменений радиальной скорости гидрометеоров.

3. Ширина спектра радиальных скоростей частиц в области своих максимальных значений оказывается больше той величины, которую бы она имела при равномерном распределении скоростей гидрометеоров в разрешаемом объеме радиолокатора (данное распределение обладает наибольшей величиной второго центрального момента среди всех распределений, не имеющих нескольких максимумов). Для доказательства этого утверждения рассмотрим, как изменяется параметр на Рисунок 2.7а вдоль луча, проведенного под углом азимута 30°. Зона широкого спектра расположена здесь на дальностях от 70 до 95 км. Если с помощью Рисунка 2.7в восстановить распределение радиальной скорости ветра по высоте, то в начале интервала он меняется от 0 до 14 м/с, а в конце от 14 до 31 м/с (это с учетом того, что линейный размер импульсного объема по половинной мощности меняется при этом от 1 км до 1,5 км). Полагая распределение скорости внутри разрешаемого элемента равномерным, получим для нижней и верхней границ зоны соответственно

$$\sigma_{VH} = \left(\frac{1}{14} \int_0^{14} x^2 dx - \left(\frac{1}{14} \int_0^{14} x dx \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} = 4 \text{ м/с}, \quad (2.11)$$

$$\sigma_{VB} = \left(\frac{1}{17} \int_{17}^{31} x^2 dx - \left(\frac{1}{17} \int_{17}^{31} x dx \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} = 4,9 \text{ м/с}. \quad (2.12)$$

Эти значения примерно в 1,5 раза меньше наблюдаемых, т.е. на карте мы имеем те самые аномально большие значения параметра, указывающие на появление двухмодальных спектров. Их второй центральный момент соответственно полученной ранее формуле (2.10), в которой в качестве аргумента

используем радиальную скорость частиц V_R вместо пропорциональной ей угловой частоты ω , равен

$$\sigma_V^2 = \frac{A_1}{A} \sigma_{V1}^2 + \frac{A_2}{A} \sigma_{V2}^2 + \frac{A_1 A_2}{A^2} (V_{R1} - V_{R2})^2, \quad (2.13)$$

где $A = A_1 + A_2$ - суммарная мощность сигнала;

V_{R1}, V_{R2} - средние значения спектра радиальных скоростей частиц, формирующих каждую из составляющих суммарного сигнала;

A_1, A_2 - мощности этих составляющих.

Отсюда вытекает объяснение поведению полуколец вблизи разрывов, которые постепенно сужаются, отклоняясь при этом в сторону больших значений дальности. Если бы уширение спектра определялось наличием равномерного изменения скорости ветра внутри разрешаемого объема, кольцо по мере изменения азимута антенны должно было бы, не сужаясь, сливаться с общим фоном и потом также без всякого сужения возродиться. В случае же двухмодальности все обретает гармонию. Ширина зоны аномально больших значений определяется при этом последним слагаемым в формуле (2.13). Когда луч антенны направлен в сторону, где имеет место максимальное расхождение радиальных скоростей частиц (азимуты 30° и 210° в нашем случае), достаточно, чтобы один из составляющих суммарного сигнала имел даже небольшую мощность относительно другого, чтобы данное слагаемое вносило существенный вклад в величину ширины спектра σ_V . Следовательно, даже на тех дальностях, где луч антенны захватывает лишь малую часть одного из слоев, проявляется эффект аномального расширения спектра, и ширина зоны больших значений рассматриваемого параметра обретает максимальную ширину (Рисунок 2.8).

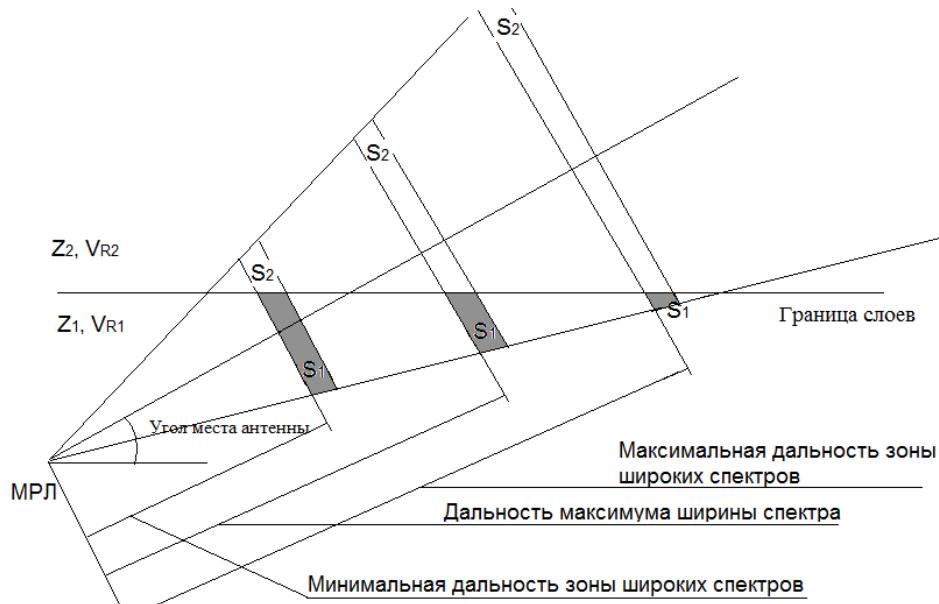


Рисунок 2.8 - Схема формирования зоны аномально широких спектров при пересечении лучом антенны границы слоев атмосферы, характеризующихся отражаемостью Z_1 , Z_2 и радиальной скоростью частиц V_{R1} , V_{R2} . S_1 , S_2 – части объема элемента разрешения радиолокатора, заполненные частицами первого и второго слоя соответственно

По мере отклонения антенны от указанного выше направления радиальные скорости сближаются по оси частот. Теперь, для того чтобы играть прежнюю роль в общей сумме, нашему слагаемому приходится компенсировать уменьшение сомножителя, обусловленного разностью скоростей, увеличением другого, т.е. увеличением мощности одной составляющей сигнала относительно другой. Такое увеличение достигается путем перераспределения долей первого и второго слоев, попадающих внутрь элемента разрешения радиолокатора S_1 и S_2 (Рисунок 2.8) в сторону выравнивания мощностей создаваемых ими отражений. При этом начальная и конечная дальности зоны больших значений ширины спектра сближаются – полукольцо сужается. Максимальное для каждого угла места антенны значение рассматриваемого нами слагаемого достигается (как это будет показано ниже) в точке, где мощности отражений от каждого из слоев оказываются одинаковыми, т.е. выполняется равенство

$$S_1 Z_1 = S_2 Z_2. \quad (2.14)$$

Этим объясняется смещение исследуемой зоны в сторону меньших значений отражаемости – к краю карты на Рисунке 2.7а.

Этим же объясняются появления дополнительных областей больших значений ширины спектра возле точек разрыва. Во втором квадранте оно вызвано локальным увеличением отражаемости одного из слоев, а в четвертом «дыркой» в одном из них. В обоих случаях нарушаются соотношения мощностей, приводящие к доминированию одной из составляющих и невозможности второй влиять на ширину спектра.

Ввод в строй новых радиолокаторов ДМРЛ-С значительно расширил возможности для исследований в рассматриваемой области. Так, были обнаружены характерные распределения ширины спектра скоростей частиц в виде тех, что приведены на Рисунке 2.9.

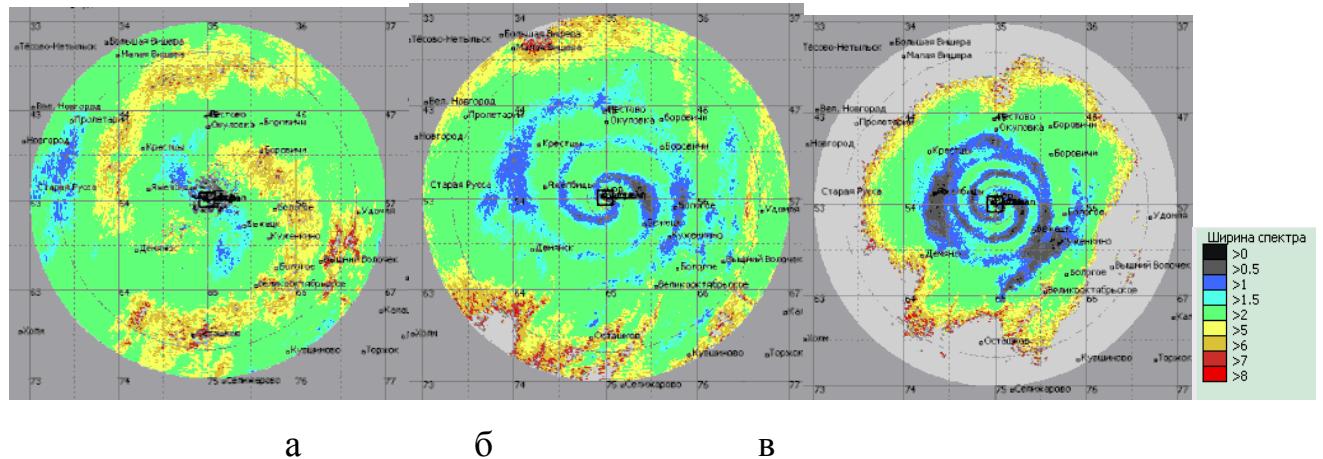


Рисунок 2.9 - Карты распределения ширины спектра радиальных скоростей частиц по поверхности конических разрезов, полученных радиолокатором ДМРЛ-С при углах места антенны $0,5^\circ$ (а), $1,8^\circ$ (б) и $3,4^\circ$ (в)

На первой карте, соответствующей нулевому углу места антенны, хорошо видны зоны аномально широких спектров, имеющие вид двух спиралей, симметричных относительно точки расположения радиолокатора. На двух других подобные области отсутствуют, зато появляются зоны малого значения параметра, также расположенные в виде двух симметричных спиралей. Подобные

фигуры, более или менее ярко выраженные, – довольно частое явление во время холодного периода года. Были проанализированы данные радиолокатора, установленного в г. Валдай, с января по март 2011 года. В результате установлено, что из 88 дней, в течение которых проводились наблюдения, они имели место в 50. Практически всегда, когда в зоне действия радиолокатора присутствовали метеоцели достаточной для наблюдения спиралей площасти, они присутствовали. Дней, когда данная закономерность не выполнялась, выявлено всего 2.

Следовательно, можно констатировать, что появление подобных пространственных распределений ширины спектра сигнала (или радиальных скоростей наблюдаемых элементарных отражателей) – явление частое, и изучение его с целью использования закодированной таким образом информации для обнаружения опасных сдвигов ветра – актуальная задача.

Для того чтобы двигаться далее, надо быть уверенным в правильности сделанного предположения. Поэтому процесс получения оценок ширины спектра радиальных скоростей гидрометеоров был смоделирован и исследован на предмет соответствия получаемых при его помощи карт распределения рассматриваемого параметра реальным, выдаваемым радиолокатором ДМРЛ-С.

Описание модели сдвига ветра

Модель создается для того, чтобы понять, как параметры пространственного распределения вектора скорости ветра влияют на характеристики сигнала, принимаемого радиолокатором при наблюдении сдвига ветра. Следовательно, получаемые результаты во многом зависят от характеристик самого радиолокатора, с которыми, прежде всего, и требуется определиться.

Разрешаемый объем радиолокатора вдоль координаты дальности считаем равномерным в пределах пространственной протяженности излучаемого импульса τ_i . По двум другим координатам используем наиболее широко

применяемую [138] аппроксимацию диаграммы направленности антенны Гауссовой кривой

$$D(\alpha, \beta) = \exp \left[-4 \ln 2 \frac{(\alpha_0 - \alpha)^2 + (\beta_0 - \beta)^2}{\Theta^2} \right], \quad (2.15)$$

где Θ – ширина диаграммы направленности (ДН) антенны в обеих плоскостях на уровне 0,5 по мощности, принимавшаяся равной 1 градусу по аналогии с диаграммой направленности антенны радиолокатора ДМРЛ-С;

α_0 и β_0 – координаты центра ДН.

Поскольку исследуется случай наблюдения под очень малыми значениями угла места, наклоном элемента разрешения пренебрегаем и считаем его ориентированным вертикально. Тогда разрешаемый объем на дальности R_0 описывается формулой

$$G(R, \alpha, \beta) = \exp \left[-4 \ln 2 \frac{(h_0 - h)^2 + (x_0 - x)^2}{R_0^2 \Theta^2} \right],$$

$$R_0 - \frac{c\tau_i}{2} < R < R_0 + \frac{c\tau_i}{2}, \quad (2.16)$$

где h – высота;

R – дальность;

x – координата оси, расположенной перпендикулярно двум первым.

Для решения второй из поставленных задач вспомним, что интересующий нас слой атмосферы – от 0 до 500 м. Уверенное его наблюдение возможно в радиусе примерно 50 км. Далее начинает сказываться кривизна земной поверхности. Следовательно, принимаем указанную дальность граничной, а поверхность внутри нее плоской.

Считаем окружающее пространство слоисто однородным, т.е. полагаем, что для всех точек, находящихся на одной высоте постоянными являются следующие четыре параметра:

- радиолокационная отражаемость;
- скорость ветра;
- направление ветра;
- ширина спектра радиальных скоростей элементарных отражателей.

Право на это в отношении параметров ветра дает заключение о том, что в горизонтальной плоскости средний вектор скорости неизменен в радиусе более 100 км [87; 27]. Что касается радиолокационной отражаемости, это возможно потому, что ее влияние на исследуемый нами процесс минимально и обуславливается только ее средним значением.

Ширина спектра радиальных скоростей частиц в каждом отдельном слое обуславливается факторами [170; 195; 188; 184; 182; 204; 173; 174], не являющимися предметом рассмотрения данного раздела. Нас интересует только та составляющая суммарного значения этого параметра (см. формулу 2.13), которая зависит от разности средних частот. Поэтому ширина спектра каждой из составляющих суммарного сигнала считается постоянной для всего слоя.

Рассмотрим горизонтальный слой атмосферы толщиной dh , расположенный на высоте h . Энергетический спектр отраженного им сигнала считаем имеющим Гауссову форму. Записываем его в общем виде следующим образом

$$S_i(h) = \frac{A(h)}{\sqrt{2\pi}\sigma_f(h)} \exp\left(-\frac{(f-f_0(h))^2}{2\sigma_f^2(h)}\right), \quad (2.15)$$

где $A(h)$ - мощность отраженного сигнала;

$f_0(h)$ – средняя частота энергетического спектра, определяемая выражением

$$f_0(h) = \frac{2V_0(h)}{\lambda} \cos(\alpha - \varphi(h)) \cos \beta; \quad (2.16)$$

$$\sigma_f(h) = \frac{2\sigma_v(h)}{\lambda}; \quad (2.17)$$

λ – длина волны радиолокатора;

$V_0(h)$, $\sigma_v(h)$ и $\varphi(h)$ - соответственно среднее значение спектра скоростей частиц в рассматриваемом слое, ширина этого спектра и среднее направление их движения.

Для нахождения мощности отражения воспользуемся уравнением метеорологической радиолокации [141] с той лишь разницей, что вертикальный размер отражающего участка равен не высоте элемента разрешения, а бесконечно малой величине dh . Тогда искомая мощность определяется формулой

$$A(h) = \frac{64 \pi^3 P_{\text{пер}} G_0^2 \theta \rho K_{AB}}{4^5 \ln(2) \lambda^4 R_0^3} Z(h) dh, \quad (2.18)$$

где $P_{\text{пер}}$ – импульсная мощность передатчика;

G_0 – коэффициент усиления антенны;

$\rho = \frac{c\tau_i}{2}$ - пространственная протяженность зондирующего импульса;

K_{AB} – коэффициент полезного действия антенно-волноводного тракта на прием и передачу;

R_0 – дальность центра разрешаемого элемента;

$Z(h)$ - значение радиолокационной отражаемости цели на высоте h .

Объединяя все величины, характеризующие радиолокатор, в одной постоянной K , переписываем эту формулу в виде

$$A(h) = \frac{K}{R_0^3} Z(h) dh. \quad (2.19)$$

Представляем окружающее пространство в виде трех слоев, нижнюю границу которых обозначаем h_1 , h_2 и h_3 . Каждый из них характеризуется равномерным распределением по высоте радиолокационной отражаемости и ширины энергетического спектра формируемого сигнала. При этом нижний (первый) и верхний (третий) имеют также равномерное распределение вектора скорости ветра, который считаем строго горизонтальным, т.к. рассматриваем наблюдения только на малых углах места, когда вертикальные перемещения воздуха не способны оказать никакого влияния на отраженный сигнал. Все изменения с вектором скорости считаем происходящими в расположеннном между ними промежуточном (втором) слое. Для дальности центра разрешаемого объема R_0 спектр отраженного каждым из слоев сигнала определяется общей формулой

$$S_i(f) = \int_{h_i}^{h_{i+1}} \frac{A_i}{\sqrt{2\pi}\sigma_{f_i}} \exp\left(-\frac{(f-f_{0i})^2}{2\sigma_{f_i}^2}\right) dh, \quad (2.20)$$

где A_i - мощность i -ой составляющей, определяемая формулой

$$A_i = \frac{KZ_i}{R_0^3} \int_{h_i}^{h_{i+1}} G(h) dh; \quad (2.21)$$

$G(h)$ - функция, описывающая разрешаемый объем по координате высоты;

h_i – высота нижней границы i -го слоя;

f_{0i} – средняя частота энергетического спектра отражений от i -го слоя, определяемая выражением

$$f_{0i} = \frac{2V_{0i}}{\lambda} \cos(\alpha - \varphi_i) \cos \beta; \quad (2.22)$$

$$\sigma_{fi} = \frac{2\sigma_{vi}}{\lambda}. \quad (2.23)$$

Для нижнего и верхнего слоев с постоянным значением средних значений скорости V_{0i} , направления ветра φ_{0i} , отражаемости Z_i и шириной спектра скоростей σ_{vi} имеем

$$S_i(f) = \frac{A_i}{\sqrt{2\pi}\sigma_{fi}} \exp\left(-\frac{(f-f_{0i})^2}{2\sigma_{fi}^2}\right), \quad (2.24)$$

$$\text{где } A_i = \frac{KZ_i}{R_0^3} \int_{h_i}^{h_{i+1}} \exp\left(-\frac{4\ln 2(h-\beta R_0)^2}{R_0^2 \theta^2}\right) dh, \quad (2.25)$$

$$f_{0i} = \frac{2V_{0i}}{\lambda} \cos(\alpha - \varphi_i) \cos \beta, \quad (2.26)$$

$$\sigma_{fi} = \frac{2\sigma_{vi}}{\lambda}, \quad h_4 = \infty. \quad (2.27)$$

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

$$\begin{aligned} S_2(f; \alpha, \beta, R_0) &= \\ &= \frac{KA_2}{R_0^3} \int_{h_2}^{h_3} \exp\left(-\frac{4\ln(2)(h-\beta R_0)^2}{\theta^2} - \frac{(f-f_{02}(h))^2}{2\sigma_{f2}^2}\right) dh, \end{aligned} \quad (2.28)$$

где

$$f_{02}(h) = \frac{2}{\lambda} \left(V_{01} + \frac{V_{03}-V_{01}}{h_3-h_2} (h-h_2) \right) \cos(\alpha - \varphi_2(h)); \quad (2.29)$$

$$\varphi_2(h) = \varphi_1 + \frac{\varphi_3-\varphi_1}{h_3-h_2} (h-h_2). \quad (2.30)$$

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

$$S_\Sigma(f; \alpha, \beta, R_0) = \sum_{i=1}^3 S_i(f; \alpha, \beta, R_0). \quad (2.31)$$

Искомая ширина спектра радиальных скоростей гидрометеоров определяется как второй центральный момент данного спектра

$$\sigma_{v\Sigma}(\alpha, \beta, R_0) = \frac{2}{\lambda} \left(\int_{-\infty}^{\infty} f^2 S_{\Sigma}(f; \alpha, \beta, R_0) df - \left(\int_{-\infty}^{\infty} f S_{\Sigma}(f; \alpha, \beta, R_0) df \right)^2 \right)^{0.5}. \quad (2.32)$$

Графически полученная модель сдвига ветра при наблюдении его метеорологическим радиолокатором представлена на Рисунке 2.10.

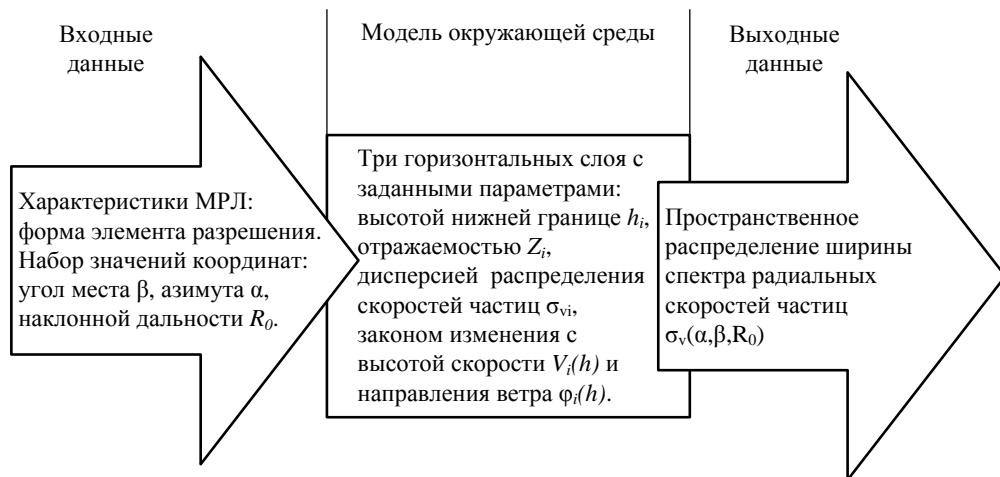


Рисунок 2.10 - Блок-схема модели сдвига ветра при наблюдении его метеорологическим радиолокатором

Большое значение имеет то, как соотносятся толщина среднего слоя и линейный размер элемента разрешения радиолокатора. С этой точки зрения все возможные ситуации можно разделить на две группы:

1. Линейный размер элемента разрешения значительно больше толщины промежуточного слоя;
2. Линейный размер элемента разрешения меньше толщины промежуточного слоя или их размеры примерно равны.

Схема наблюдения радиолокатором окружающего пространства, соответствующая первой группе ситуаций представлена на Рисунке 2.11. Характерной особенностью этого случая является попадание внутрь разрешаемого объема радиолокатора сразу трех слоев. Поэтому соответствующий ему вариант модели назван трехслойным.

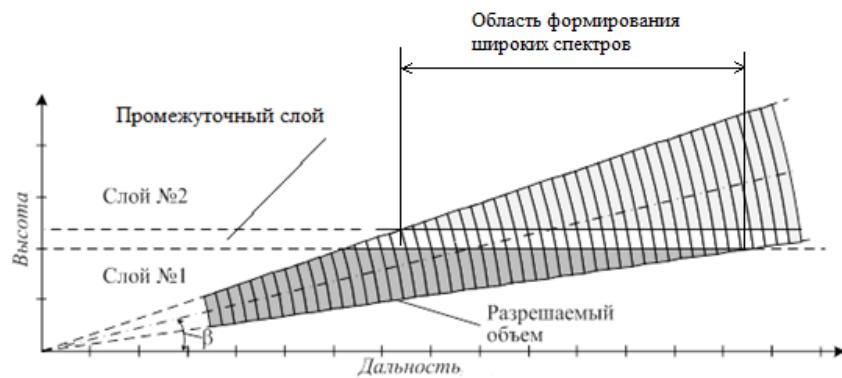


Рисунок 2.11 - Схема наблюдения радиолокатором пространства, соответствующая трехслойному варианту модели

На схеме выделена область, где в случае достаточного различия друг от друга средних частот спектра отражений от каждого из слоев возможно формирование аномально широких спектров. При этом зонами, где в разрешаемый объем попадают только два слоя ввиду их малости можно пренебречь. Пренебрегалось также влиянием отражений, создаваемых промежуточным слоем, т.к. даже если их мощность сравнима с той, что создает наиболее отражающий слой, на спектральной оси она равномерно распределяется между спектрами сигналов от первого и второго слоев, и ее влияние на величину результирующих спектральных параметров минимизируется.

Схема наблюдения, соответствующая второй группе ситуаций приведена на Рисунке 2.12.

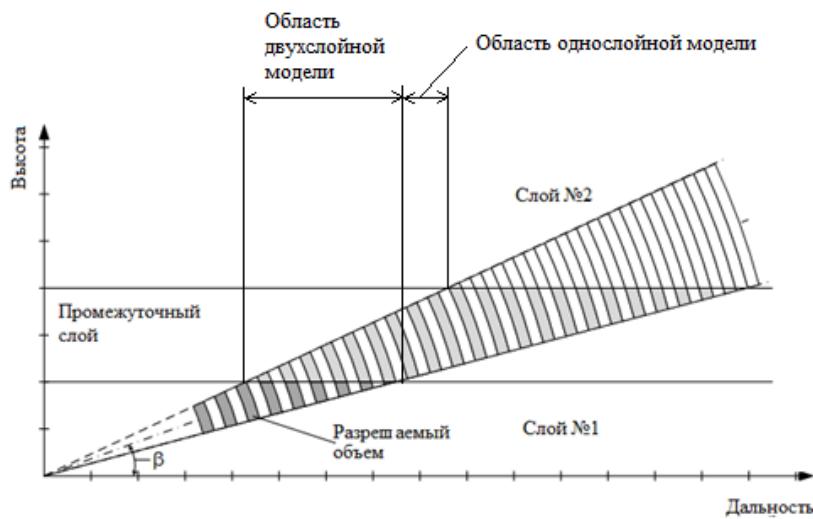


Рисунок 2.12 - Схема наблюдения радиолокатором двух слоев гидрометеоров с промежуточным слоем большой толщины между ними, требующей применения двух- и однослойных моделей

Как видно из данной схемы исследованию здесь подлежат именно те промежуточные для Рисунка 2.11 ситуации нахождения внутри элемента разрешения двух слоев. Кроме того, добавляется случай нахождения данного элемента полностью внутри промежуточного слоя. Соответствующие им варианты модели были названы двух и однослойными.

Для проверки сделанного предположения о взаимосвязи параметров профиля ветра в наблюдаемом радиолокатором пространстве и пространственным распределением получаемых им оценок ширины спектра принимаемого сигнала проведены численные расчеты полученных соотношений.

Результаты численной проверки полученных соотношений

Результаты были получены с помощью программы «mathlab». Имитировалось сканирование радиолокатором окружающего пространства под постоянным углом места, который устанавливался равным 2,5 градусам. Изменение азимута антенны происходило дискретно с шагом в 1 градус. Для каждого положения луча антенны он разбивался на дискреты по дальности с шагом 250 м. В каждом получаемом таким образом элементе разрешения

рассчитывалась ширина спектра отражений в соответствии с одним из трех исследуемых вариантов пространственного распределения вектора скорости ветра. Результаты выводились на печать в виде карты ширины спектра радиальных скоростей частиц, участвующих в формировании отраженного сигнала.

Рассмотрены следующие случаи:

1 Два слоя с разным направлением ветра (φ_1, φ_2) в каждом из них, создающие отражения различной мощности (K_1, K_2), т.е. моделируется сдвиг ветра по направлению в предположении, что промежуточный слой отсутствует (Рисунок 2.13).

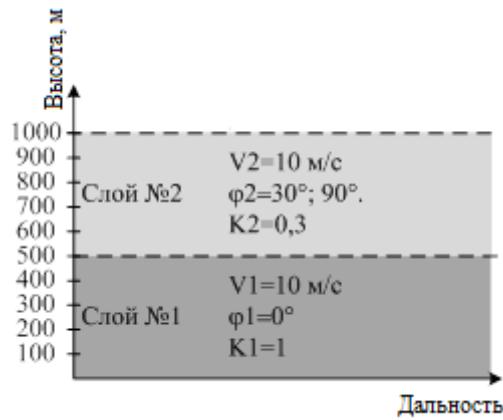


Рисунок 2.13 - Вертикальный профиль ветра для случая сдвига ветра по направлению.

Результаты моделирования для двух значений направления ветра во втором (верхнем) слое φ_2 30 и 90 градусов и при $\varphi_1 = 0$ представлены на Рисунке 2.14. На нем хорошо видно, что линия, по которой проходит зона разрыва кольца совпадает с биссектрисой угла, образованного векторами скорости частиц в каждом из слоев. Ширина спектра радиальных скоростей частиц увеличивается с увеличением разницы $\varphi_2 - \varphi_1$.

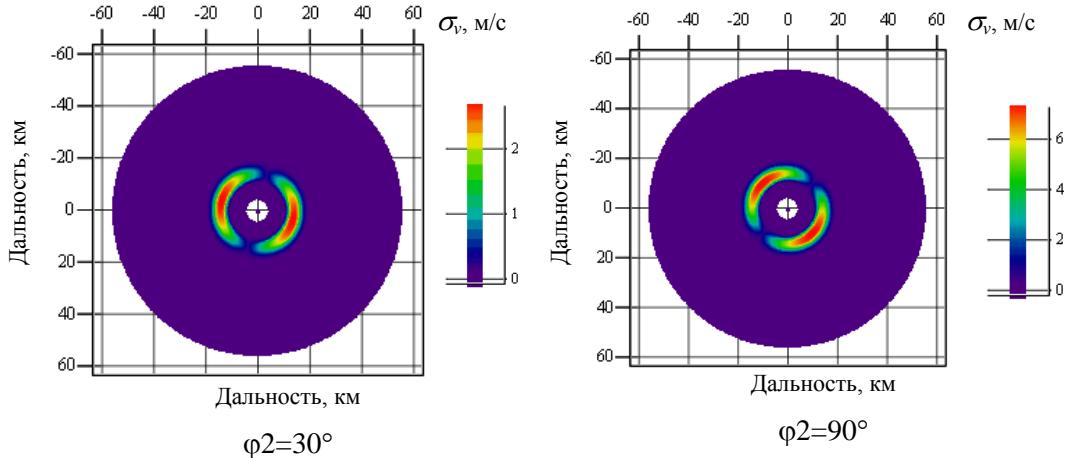


Рисунок 2.14 - Карты распределения ширины спектра радиальных скоростей частиц по поверхности конического разреза при наблюдении двух слоев с разным направлением ветра

2. Два слоя с разными направлением (φ_1, φ_2) и скоростью (V_1, V_2) в каждом из них.

От предыдущего случая данный отличается наличием сдвига ветра по величине. Полученные результаты моделирования показывают отсутствие каких-либо существенных различий в картах, соответствующим обеим метеообстановкам. Главная особенность – теперь ось разрыва кольца не совпадает с биссектрисой угла между векторами скорости и не перпендикулярна оси, по которой располагаются максимумы рассматриваемого параметра.

Далее переходим к рассмотрению ситуаций, соответствующих двухслойной модели.

3. Два слоя со сдвигом ветра по величине во втором.

В данном случае промежуточный слой отсутствует, и изменения скорости начинаются от границы слоев и заканчиваются на верхней границе второго слоя (Рисунок 2.15).

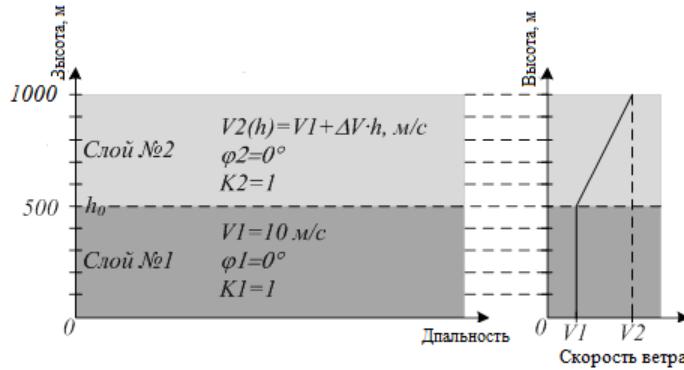


Рисунок 2.15 - Вертикальный профиль ветра для третьего варианта моделирования

Результаты проведенных расчетов показывают (Рисунке 2.16), что в рассматриваемом случае зоны аномально широких спектров приобретают более тотальный характер и могут достигать больших значений.

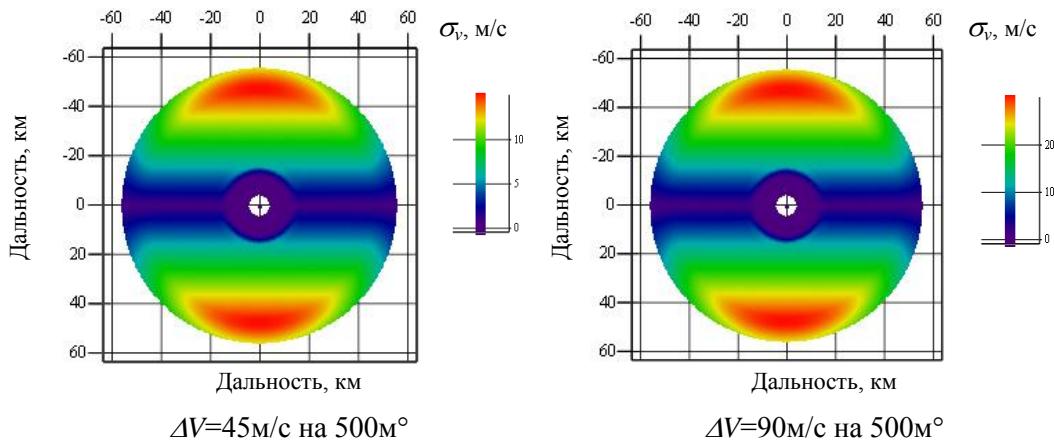


Рисунок 2.16 - Карта распределения ширины спектра радиальных скоростей частиц по конической поверхности, полученная в результате моделирования для случая №3.

4. Два слоя со сдвигом ветра по направлению во втором.

Вертикальный профиль скорости ветра в данном случае имеет вид, представленный на Рисунке 2.17. Соответствующие ей карты ширины спектра радиальных скоростей частиц – на Рисунке 2.18.

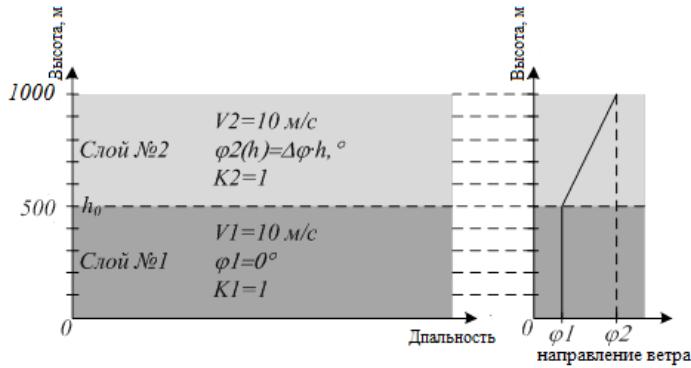


Рисунок 2.17 - Вертикальный профиль ветра для четвертого случая моделирования

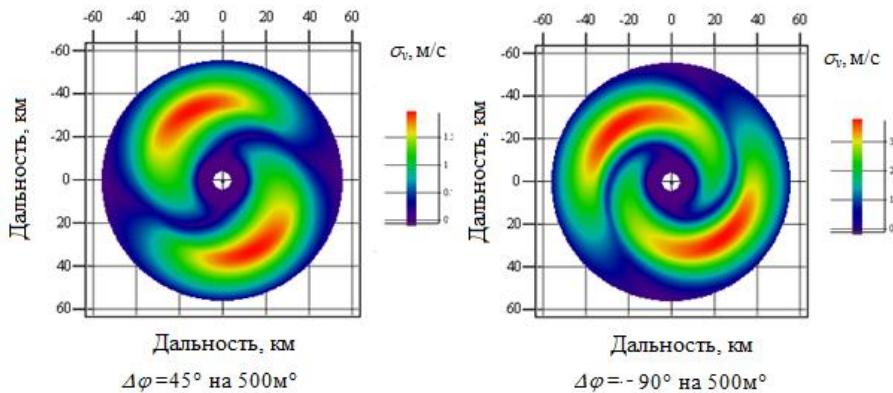


Рисунок 2.18 - Карта распределения ширины спектра радиальных скоростей частиц по конической поверхности, полученная в результате моделирования для случая №4

Очевидно, что получаемые расчетным путем карты хорошо согласуются с теми, что имеют место на практике и приведены на Рисунке 2.9. Наблюдаются чередующиеся спирали максимальных и минимальных значений параметра. Скорость из «завития» зависит от того, как быстро и в каком направлении изменяется с высотой вектор скорости ветра. Последнее свойство может быть использовано на практике для нахождения параметров вертикального профиля ветра.

Перейдем к рассмотрению однослоиной модели, при которой предполагается, что весь элемент разрешения располагается внутри слоя с изменяющимися параметрами ветра.

5. Один слой с изменяющимся с высотой направлением ветра.

Считаем радиолокационную отражаемость и скорость ветра постоянными во всем окружающем пространстве, а направление ветра изменяющимся по

закону $\varphi(h) = \varphi_0 + \Omega h$, где φ_0 – направление ветра у земли, Ω скорость изменения направления ветра с высотой, h – высота. Результаты моделирования представлены на рисунке 2.19.

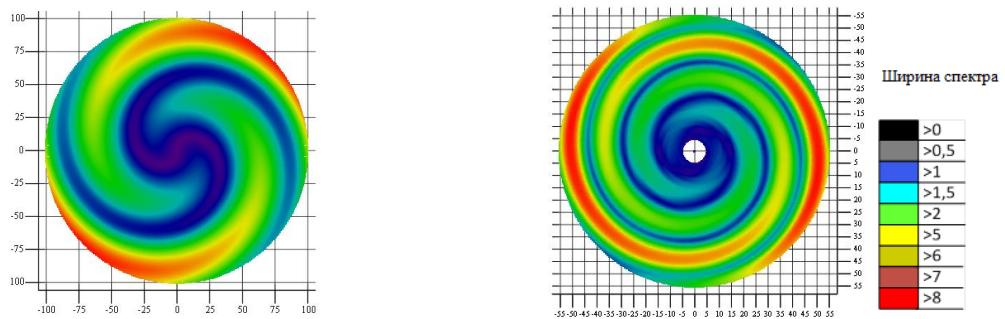


Рисунок 2.19 - Карты распределения ширины спектра радиальных скоростей частиц по конической поверхности для разных значений скорости поворота ветра, полученные в результате моделирования для случая №5

В данном случае значительное уширение спектра имеет место только после того, как спирали опишут полукруг. На практике такого не наблюдалось, поэтому можно уверенно считать, что вращение вектора скорости ветра с высотой приводит только к образованию спиралей подобных тем, что наблюдаются на Рисунках 2.9б и 2.9в.

Далее исследовались случаи трехслойного варианта модели. Окружающее пространство разбивалось на три слоя. Все изменения ветра происходят в среднем из них, в то время как в нижнем и верхнем все параметры остаются стабильными.

6. Три слоя со сдвигом ветра по величине в среднем из них (промежуточном).

Вертикальный профиль скорости ветра для данного случая представлен на Рисунке 2.20, рассчитанные в соответствии с ним карты ширины спектра радиальных скоростей частиц – на Рисунке 2.21.

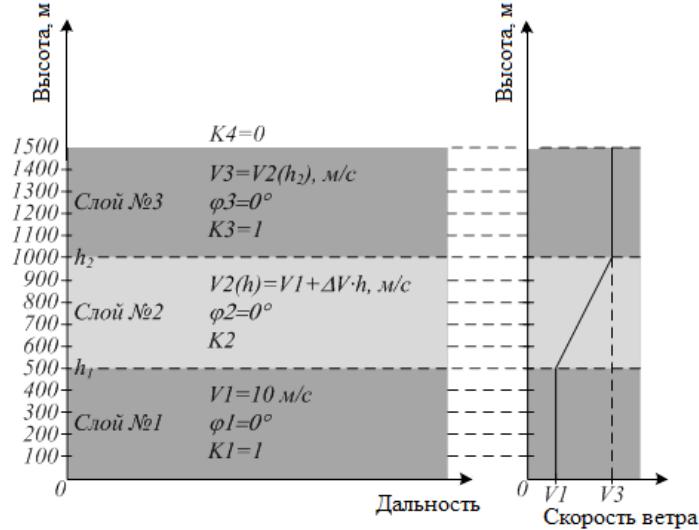


Рисунок 2.20 - Вертикальный профиль ветра для пятого случая моделирования

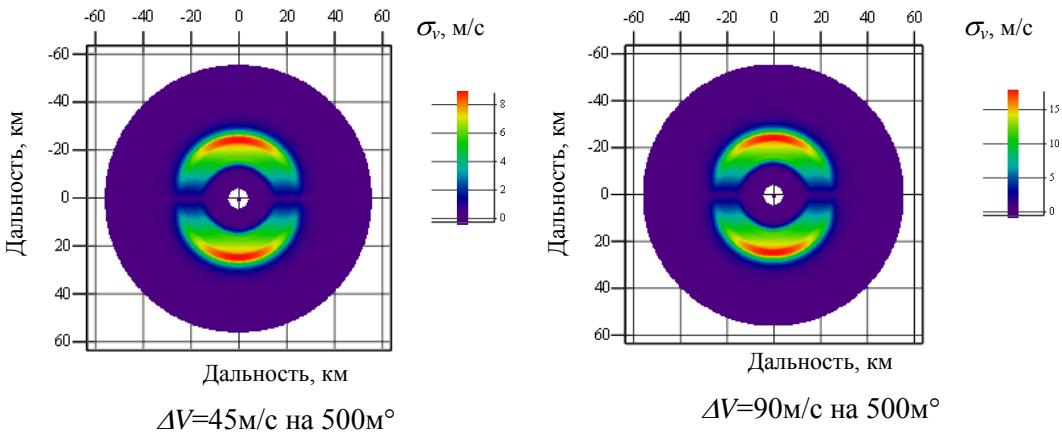


Рисунок 2.21 - Карта распределения ширины спектра радиальных скоростей частиц по конической поверхности, полученная в результате моделирования для случая №6

Полученные результаты очень похожи на те, что имели место в третьем варианте моделирования. Аномальное расширение спектра происходит и его величина зависит от величины сдвига ветра.

7. Три слоя со сдвигом ветра по направлению в среднем из них (промежуточном).

Вертикальный профиль скорости ветра для данного случая представлен на рисунке 2.22, рассчитанные в соответствии с ним карты ширины спектра радиальных скоростей частиц – на Рисунке 2.23.

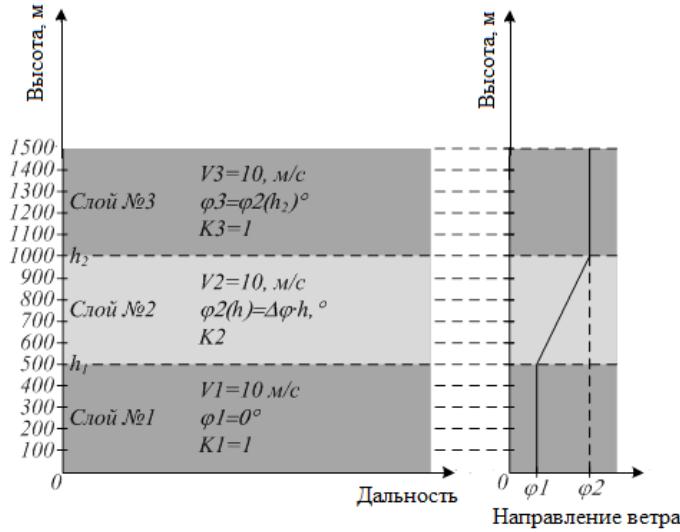


Рисунок 2.22 - Вертикальный профиль ветра для седьмого случая моделирования

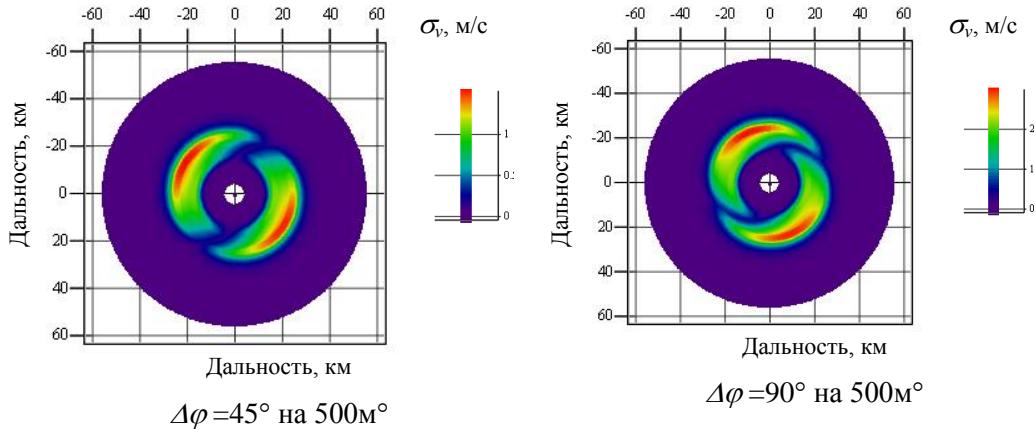


Рисунок 2.23 - Карта распределения ширины спектра радиальных скоростей частиц по конической поверхности, полученная в результате моделирования для случая №7

Получаем результаты, аналогичные случаю №4 – явная зависимость скорости «завития» спирали от особенностей вертикального профиля ветра. Разница состоит в том, что спираль образуется в зоне разрыва, после чего зона аномально широких спектров становится аналогичной случаю 1. Следовательно, в зоне спирали имеет место двухслойный вариант модели, когда в элемент разрешения попадают только нижний и промежуточный слой. При изменении дальности луч антенны захватывает все три слоя и формируется кара, аналогичная случаю №1.

Из результатов проведенных исследований вытекают следующие выводы:

1. Предположение о взаимосвязи параметров сдвига ветра и характерных распределений параметров создаваемых им отражений, в частности, ширины спектра радиальных скоростей гидрометеоров, полностью подтверждается;

2. Аномально широкие спектры появляются на картах ширины спектра в тех случаях, когда спектр принимаемого сигнала становится двухмодальным, т.е. когда в элемент разрешения радиолокатора попадают два или три слоя гидрометеоров, движущихся с разной скоростью. Значение максимума рассматриваемого параметра тесно связаны с величиной сдвига ветра в одном из наблюдаемых слоев;

3. При нахождении разрешаемого объема радиолокатора полностью в слое с изменяющимися параметрами скорости частиц аномального расширения спектра практически не происходит;

4. Наибольший практический интерес представляет трехслойной вариант модели, т.к. при наличии слоя со сдвигом ветра при угле места антенны равном половине ширины ее диаграммы направленности на какой-нибудь из дальностей наступает момент, когда в элемент разрешения радиолокатора попадут все три слоя. Отличительной особенностью такого варианта является появление на карте ширины спектра радиальных скоростей гидрометеоров зон аномально больших значений параметра в виде симметрично расположенных концентрических дуг. Максимальное значение получаемой при этом ширины спектра несет информацию о разности векторов скорости ветра в верхнем и нижнем слоях и не зависит от того, получена эта разность за счет изменения скорости ветра или его направления. Сказанное подтверждается исунком 2.23а, где спираль больших значений на начальном этапе «завивается» очень быстро, а на дальности около 90 км обретает вид дуги окружности.

5. Карта, получаемая в трехслойном варианте модели практически не зависит от свойств промежуточного слоя за исключением случая, когда его отражаемость значительно превосходит отражаемость других слоев, что на практике не наблюдается. Очевидно, это происходит из-за того, что мощность

создаваемого им отражения равномерно распределяется на оси частот между средними значениями спектра остальных составляющих сигнала.

6. Двух- и однослойная модели соответствуют ситуации, когда антенна радиолокатора поднята до такого уровня, когда слой с нестабильными параметрами ветра наблюдается на достаточно малой дальности, при которой размер элемента разрешения становится меньше или равным толщине этого слоя. Основной результат, который может быть при этом получен – это извлечение информации о повороте ветра с высотой. По тому, с какой скоростью «завиваются» возникающие в данном случае спирали максимальных и минимальных значений параметра, можно судить о том, насколько быстро происходит этот поворот. Таким образом, информация о суммарной (вызванной изменением скорости и направления) величине сдвига, полученная при малом угле места антенны, может быть дополнена данными о поведении направления ветра с высотой. Далее ничто не мешает рассчитать и сдвиг ветра по величине.

2.2 МОДЕЛЬ МИКРОПОРЫВА

Микропорыв – локальное нисходящее движение холодного воздуха, образующееся в кучевых облаках и представляющее большую опасность для воздушных судов, идущих на посадку. Непосредственное обнаружение данного опасного явления одним радиолокатором практически невозможно по следующим причинам:

1. Из-за того, что движение вертикально, создаваемый им доплеровский сдвиг частоты при характерных для метеорологического радиолокатора малых углах места антенны очень мал;
2. Диаметр воздушного потока, как правило, меньше размеров разрешаемого объема радиолокатора, и создаваемые им отражательные эффекты «тонут» в общем фоне отражений от соседних с ним участков метеоцели.

Поэтому приходится либо довольствоваться наблюдением косвенных признаков существования микропорыва, либо выстраивать более сложную,

нежели одиночный радиолокатор, систему наблюдения. Далее рассмотрим возможные методы решения проблемы по отдельности.

Обнаружение микропорыва с помощью оценок средней радиальной скорости частиц

Как уже было сказано, обнаружить микрошвал непосредственным измерением средней радиальной скорости увлекаемых им частиц практически невозможно вследствие малой величины последней. Остается обнаруживать связанные с его возникновением эффекты. К ним относятся:

1. Конвергенция воздушного потока в зоне образования микрошвала, а именно в верхней части наблюдаемого облака;
2. Дивергенция ветра у поверхности земли.

Схема применяемых при этом радиолокационных наблюдений представлена на Рисунке 2.24.

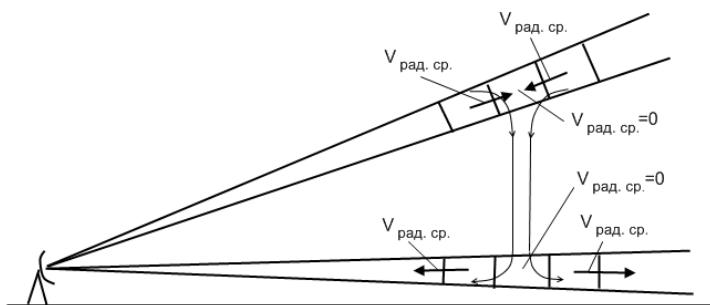


Рисунок 2.24 - Схема распознавания микрошвала по оценкам средних значений спектра принимаемого сигнала

В результате характерных движений воздуха в верхней и нижней части потока в близлежащих элементах разрешения фиксируются доплеровские сдвиги частоты разного знака. Такой «переброс» частот на ограниченном участке дальности считается признаком существования микропорыва.

Данный метод реализован в американских радиолокаторах контроля метеообстановки в районе аэропорта TDWR и является единственным

применяемым на практике. Однако он использует косвенные признаки, которые могут быть вызваны или, наоборот, замаскированы другими явлениями. Поэтому актуален поиск других методов распознавания микропорыва, основанных на прямых признаках его существования. Перспективным в этом плане представляется использование оценок ширины спектра сигнала на выходе амплитудного детектора. Основой для разработки данного метода служит следующая модель микропорыва.

Модель вертикального потока, позволяющая распознавать его по оценкам ширины спектра отражений

Схема наблюдения радиолокатором данного явления представлена на Рисунке 2.25.

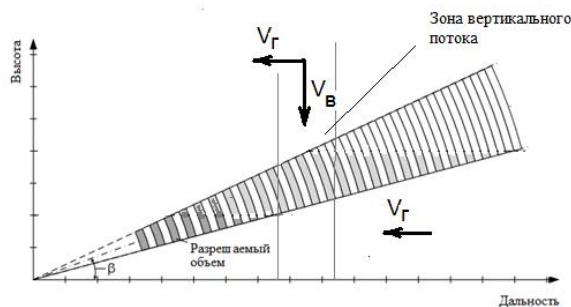


Рисунок 2.25 - Схема наблюдения радиолокатором микропорыва

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_{v_r} . Зона вертикального потока с отражаемостью $Z_{\text{пот}}$, отличается тем, что внутри нее частицы, помимо горизонтального движения имеют вертикальное со средним значением V_b и среднеквадратическим отклонением σ_{v_b} . 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 ($s_{\text{пот}}(t)$)

$$s_{\Sigma}(t) = s_{\text{фон}}(t) + s_{\text{пот}}(t), \quad (2.33)$$

Каждая из них является случайным процессом с мощностью

$$A_{\text{фон}} = \frac{K_1 Z_{\text{фон}}}{R_0^4} \int_{v_{\text{фон}}} G(v) dv \quad (2.34)$$

и

$$A_{\text{пот}} = \frac{K_1 Z_{\text{пот}}}{R_0^4} \int_{v_{\text{пот}}} G(v) dv \quad (2.35)$$

соответственно и нормированными корреляционными функциями

$$r_{\text{фон}}(\tau) = \exp \left(-\frac{\sigma_{v_{\text{фон}}}^2 \tau^2}{2} - j \left(\omega_0 - \frac{2\pi V_{\text{ф}}}{\lambda} \right) \tau \right), \quad (2.36)$$

$$r_{\text{пот}}(\tau) = \exp \left(-\frac{\sigma_{v_{\text{пот}}}^2 \tau^2}{2} - j \left(\omega_0 - \frac{2\pi (V_{\text{ф}} + V_{\text{Б}} \sin \beta)}{\lambda} \right) \tau \right), \quad (2.37)$$

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.

На выходе амплитудного детектора выделяется модуль суммарного сигнала. 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 эхо-сигнал в данном случае сводится к сумме двух слагаемых с изменяющимся в широких пределах отношением мощностей $\epsilon = A_{\text{пот}}/A_{\text{фон}}$ и относительной разностью средних радиальных скоростей $v = (|V_0 \text{ пот} - V_0 \text{ фон}|)/\sigma_{v\Gamma}$. В процессе наблюдения вертикального потока радиолокатором указанные относительные величины с большой степенью вероятности будут принимать такие значения, которые приведут к росту ширины спектра сигнала на выходе амплитудного детектора при неизменном значении этого параметра у непродетектированного сигнала. Условия появления такого эффекта рассматриваются в следующей главе.

ВЫВОДЫ

1. На основании имеющегося опыта экспериментальных исследований делается предположение о том, что характерные распределения параметра на получаемых метеорологическим радиолокатором картах ширины спектра радиальных скоростей частиц вызваны наличием в окружающей среде сдвига ветра. Предлагается механизм появления таких карт, основанный на том, что в рассматриваемом случае спектр отраженного сигнала становится двухмодальным, а его ширина зависит от азимута антенны. Вводится понятие аномально широкого спектра, появление которого характерно при наблюдении сдвига ветра.

2. Разработанная модель сдвига ветра позволяет объяснить возникновение на картах ширины спектра радиальных скоростей гидрометеоров характерных распределений параметра в виде концентрических дуг или спиралей аномально больших значений ширины спектра, а также спиралей его малых значений.

3. Численные решения полученных соотношений показывают идентичность смоделированных карт с реальными. Это доказывает правильность сделанного предположения о том, что появление характерных распределений параметра на картах ширины спектра радиальных скоростей частиц связано с существованием сдвига ветра. Констатируется, что изменение какого-либо параметра вертикального сдвига ветра вызывает изменения на соответствующих картах, что говорит о принципиальной возможности решения обратной задачи – по особенностям распределения параметра на карте определить параметры сдвига ветра.

4. Аналогично случаю сдвига ветра, делается предположение о возможности распознавания еще одного опасного явления, также приводящего к появлению двухмодальных спектров – микропорыва или иной локальной области вертикального движения отражателей. Ввиду малой величины разности радиальных скоростей, возникающей в данном случае, предлагается привлечь информацию о ширине спектра сигнала на выходе амплитудного детектора. Разрабатывается модель вертикального потока, позволяющая распознавать его по оценкам ширины спектра отражений.

3 МЕТОДЫ РАСПОЗНАВАНИЯ ОПАСНЫХ ЯВЛЕНИЙ ПОГОДЫ В МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ РАДИОЛОКАЦИИ

В данной главе разрабатываются методы распознавания сдвига ветра и областей вертикального движения частиц на основе созданных в предыдущей главе моделей. Предлагается также метод восстановления профиля ветра на высотах до 500 м при помощи оценок ширины спектра принимаемых отражений.

Кроме того, рассматриваются уже известные методы распознавания ОЯП на предмет возможности их применения на отечественной сети штормооповещения.

3.1 РАЗРАБОТКА МЕТОДА РАСПОЗНАВАНИЯ СДВИГА ВЕТРА ПО ОЦЕНКАМ ШИРИНЫ СПЕКТРА ПРИНИМАЕМОГО СИГНАЛА

Как было показано в предыдущей главе, параметры распределения параметра на карте ширины спектра отраженного сигнала тесно связаны с параметрами наблюдаемого сдвига ветра. Это означает, что возможно решение обратной задачи, для чего необходимо найти аналитические решения полученных соотношений.

Решение обратной задачи распознавания сдвига ветра по пространственному распределению ширины спектра принимающего сигнала

Созданная модель области пространства со сдвигом ветра в зависимости от соотношений размера слоев и размера элемента разрешения радиолокатора делится на три варианта: трех-, двух- и однослойный соответственно числу одновременно наблюдаемых слоев. Каждый из них создает свой особенный рисунок на карте исследуемого параметра и требует уникального подхода к поиску решения обратной задачи. Ниже рассмотрим отдельно каждый из упомянутых вариантов.

Трехслойный вариант модели

Принимаемый сигнал считаем состоящим из двух слагаемых, каждая из которых имеет гауссов спектр с различными средней частотой и шириной.

Отражениями от промежуточного слоя, как уже упоминалось, пренебрегаем. Выражение для ширины спектра (точнее, для ее квадрата) радиальных скоростей частиц для рассматриваемого случая было уже найдено (см. формулу (2.13)). Из него находим величину изменения радиальной составляющей скорости ветра

$$\Delta V = V_{R2} - V_{R1} = \sqrt{\frac{A_1+A_2}{A_1 A_2} \left(\sigma_V^2 - \frac{A_1}{A_1+A_2} \sigma_{V1}^2 - \frac{A_2}{A_1+A_2} \sigma_{V2}^2 \right)}, \quad (3.1)$$

где V_{R1} , V_{R2} , σ_{V1} , σ_{V2} – среднее значение и ширина энергетического спектра радиальных скоростей частиц каждого из слоев;

σ_V – ширина энергетического спектра радиальных скоростей всех частиц, попавших внутрь элемента разрешения радиолокатора;

A_1 , A_2 – мощности составляющих суммарного сигнала, обусловленных частицами каждого из слоев, попавших внутрь элемента разрешения радиолокатора.

Очевидно, что применять эту формулу на практике не представляется возможным ввиду того, что величины A_1 и A_2 , зависящие от метеорологической отражаемости слоев и от величины той части разрешаемого объема, которую занимают частицы слоя, нам неизвестны. Для нахождения более практически значимой формулы, позволяющей построить алгоритм определения искомой величины ΔV , найдем, при каких отношениях A_1/A_2 достигается максимум ширины спектра суммарного сигнала.

Для этого определим производную от σ_V по A_1 , используя формулу (2.13),

$$\frac{d\sigma_V}{dA_1} = \frac{\frac{A_2}{(A_1+A_2)^2} \left(\sigma_{V1}^2 - \sigma_{V2}^2 + \frac{(V_{R1} - V_{R2})^2 (A_2 - A_1)}{(A_1 + A_2)} \right)}{2 \sqrt{\frac{A_1}{A_1+A_2} \sigma_{V1}^2 + \frac{A_2}{A_1+A_2} \sigma_{V2}^2 + \frac{A_1 A_2}{(A_1+A_2)^2} (V_{R1} - V_{R2})^2}}. \quad (3.2)$$

Приравнивая ее нулю, находим точку максимума

$$A_1 = A_2 \frac{\left(V_{R1} - V_{R2} \right)^2 + \left(\sigma_{V1}^2 - \sigma_{V2}^2 \right)}{\left(V_{R1} - V_{R2} \right)^2 - \left(\sigma_{V1}^2 - \sigma_{V2}^2 \right)}. \quad (3.3)$$

Примем во внимание тот факт, что мы рассматриваем случай, когда ширина двухмодального спектра принимаемого сигнала становится аномально большой.

Как известно, для того, чтобы спектр стал двухмодальным, т.е. чтобы было возможно разрешить две Гауссовые кривые, требуется выполнение условия $|V_{R1} - V_{R2}| > \sigma_{V1} + \sigma_{V2}$. Для того же, чтобы влияние на результат последнего слагаемого в формуле 2.13 стало значительным, необходимо, как минимум, выполнение неравенства $|V_{R1} - V_{R2}| > 2(\sigma_{V1} + \sigma_{V2})$. Это и то, что ширина спектра радиальных скоростей частиц в слоях со стабильными параметрами ветра варьируется, как правило, в пределах 2-3 м/с, позволяет утверждать, что $(V_{R1} - V_{R2})^2 \gg |\sigma_{V1}^2 - \sigma_{V2}^2|$. Следовательно, вторыми слагаемыми в числителе и знаменателе формулы 3.18 можно пренебречь и получить условием достижения максимума величиной σ_V равенство мощностей $A_1 = A_2$. Это значительно упрощает формулу 3.18 и приводит ее к виду

$$\Delta V = \sqrt{4\sigma_{V_{\max}}^2 - 2\sigma_{V1}^2 - 2\sigma_{V2}^2}. \quad (3.4)$$

где $\sigma_{V_{\max}}$ - максимальное из значений ширины спектра радиальных скоростей частиц, наблюдаемых в зоне их аномального расширения.

Отсюда вытекает следующая методика определения разности скоростей частиц в наблюдаемых слоях:

1. Выявление характерных зон повышенных значений на карте ширины спектра радиальных скоростей гидрометеоров;
2. Нахождение оценки максимального значения данного параметра $\tilde{\sigma}_{V_{\max}}$;
3. Определение оценки параметра для слоев, расположенных выше и ниже слоя с аномалией ветра $\tilde{\sigma}_{V1}$ и $\tilde{\sigma}_{V2}$. При этом отсчеты следует брать на той же дальности, на которой зафиксирован $\tilde{\sigma}_{V_{\max}}$, чтобы исключить эффект увеличения ширины спектра за счет увеличения линейного размера элемента разрешения радиолокатора;
4. Вычисление величины $\tilde{\Delta V}$ по полученным данным с помощью формулы (3.4).

Однако конечным интересующим нас результатом является не величина разности скоростей частиц в двух наблюдаемых слоях, а сдвиг ветра, т.е. скорость

его изменения с высотой. Для этого недостает информации о толщине слоя, внутри которого произошел сдвиг. Оценить ее можно как разницу высот верхней границы ДН антенны в начале зоны повышенных значений ширины спектра и нижней границы ДН в конце этой зоны (Рисунок 3.1).

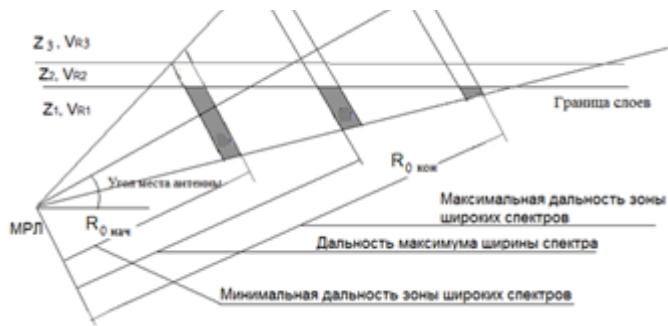


Рисунок 3.1 - Схема формирования вертикального распределения ширины спектра принимаемого сигнала

Возникает вопрос, на каком азимуте антенны получать данную оценку? Так, на Рисунке 2.9а спираль больших значений ширины спектра начинается чуть ли не на нулевой дальности и распространяется до 100 километровой отметки. Тут надо вспомнить, что спираль больших значений возникает в ситуации, соответствующей двухслойной модели. В этом случае разрешаемый объем радиолокатора захватывает только два из трех слоев. Когда же его размер увеличивается до того, что в него попадают все три слоя, спираль пропадает, а зона больших значений приобретает форму дуги окружности. Именно этот эффект наблюдается на Рисунке 2.9а на дальности 100 км. Отсюда заключаем, что фиксировать момент начала зоны широких спектров следует на том же азимуте, на котором был найден максимально широкий спектр, значение которого использовано в формуле 3.4. Это гарантирует нам, что внутрь разрешаемого объема попали все три слоя. Следовательно, для оценивания величины сдвига ветра предложенную выше методику следует дополнить пунктами:

5. Определение оценки толщины слоя \tilde{H} , внутри которого происходит сдвиг ветра, описанным выше способом;
6. Нахождение искомой величины сдвига ветра

$$\tilde{W} = \frac{\tilde{V}}{\tilde{H}}. \quad (3.5)$$

Таким образом решается основная задача – обнаружение опасного сдвига ветра. При этом получаемая величина не зависит от того, вызван сдвиг изменением скорости ветра, его направлением или и тем и другим фактором одновременно. Однако карта ширины спектра радиальных скоростей частиц может дать дополнительную информацию о том, меняется ли направление ветра с высотой и какова скорость его изменения. Эффекты, которые могут быть использованы в данном случае, проявляются в двух- и однослойной моделях окружающего пространства.

Двухслойный вариант модели

В этом случае внутри элемента разрешения радиолокатора находятся частицы, принадлежащие двум слоям: одному со стабильными характеристиками ветра и другому, в котором вектор средней скорости частиц изменяется с высотой по величине и направлению. При этом на карте ширины спектра радиальных скоростей гидрометеоров формируются чередующиеся спирали повышенных и минимальных значений параметра, как это видно на Рисунках 2.9б и 2.9в. Поскольку спектр формирующихся в заданных условиях отражений состоит из двух частей, к нему применима формула (2.13). В отличие от предыдущего случая в этом удобнее взять за точки отсчета расположения не максимумов рассматриваемого параметра, а его минимумов, т.к. при этом исчезает зависимость величины параметра от отношения отражаемостей слоев. Условием возникновения минимума является выполнение равенства

$$V_{R1} = V_{R2}. \quad (3.6)$$

Первая из приведенных величин, соответствующая слову со стабильными параметрами ветра, легко определяется по известной формуле

$$V_{R1} = V_1 \cos(\varphi - \gamma_1), \quad (3.7)$$

где V_1 – средняя скорость ветра в первом слое;

γ_1 – направление ветра в первом слое;

φ – азимут антенны радиолокатора.

Считаем, что наблюдения проводятся под малыми углами места, в результате чего его можно не учитывать. Для нахождения второй величины прибегнем к упрощенной аппроксимации диаграммы направленности (ДН) антенны в виде прямоугольника в поперечном сечении с длиной стороны, равной $r\sqrt{\pi}$ (Рисунок 3.2). Таким образом, площадь поперечного сечения ДН остается такой, как и при аппроксимации поперечного сечения кругом. Как уже упоминалось выше, это не ведет к значительным отклонениям оценок спектральных параметров сигнала, зато существенно облегчает дальнейшие математические выкладки.

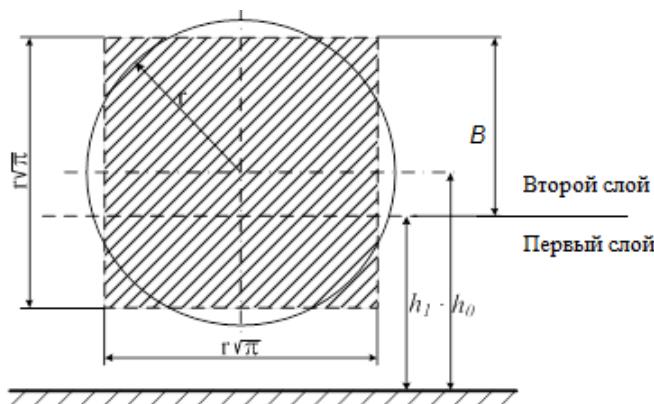


Рисунок 3.2 - Аппроксимация поперечного сечения ДН квадратом и схема расположения элемента разрешения радиолокатора относительно слоев гидрометеоров

Введем следующие обозначения: h_1 – высота границы между слоями гидрометеоров; h_0 – высота центра элемента разрешения радиолокатора; $B = h_0 - h_1 + \frac{\sqrt{\pi}}{2}r$ – толщина части второго слоя, попавшей внутрь элемента разрешения. Изменения скорости и направления ветра во втором слое представим в виде

$$V_2 = V_1 + W(h - h_1), \quad h \geq h_1 \quad (3.8)$$

и

$$\gamma_2 = \gamma_1 + \Omega(h - h_1), \quad h \geq h_1 \quad (3.9)$$

соответственно, где W – сдвиг ветра;

Ω – скорость изменения направления ветра с высотой.

Тогда в предположении того, что распределение частиц второго слоя внутри разрешаемого объема, т.е. вдоль отрезка, обозначенного на Рисунке 3.2 буквой B , равномерно

$$V_{R_2} = \int_{h_1}^{h_0 + \frac{r\sqrt{\pi}}{2}} (V_1 + W(h - h_1)) \cos(\varphi - (\gamma_1 + \Omega(h - h_1))) \frac{1}{B} dh. \quad (3.10)$$

Делаем замену переменных $z = \varphi - \gamma_1 - \Omega(h - h_1)$, после чего получаем

$$V_{R_2} = -\frac{1}{B\Omega} \int_{\varphi-\gamma_1}^{\varphi-\gamma_1-B\Omega} \left(V_1 + W \frac{\varphi - \gamma_1 - z}{\Omega} \right) \cos(z) dz = -\frac{1}{B\Omega} [I_1 - I_2], \quad (3.11)$$

где

$$I_1 = \left(V_1 + W \frac{\varphi - \gamma_1}{\Omega} \right) (\sin(\varphi - \gamma_1 - B\Omega) - \sin(\varphi - \gamma_1)), \quad (3.12)$$

$$I_2 = \frac{W}{\Omega} ((\varphi - \gamma_1 - B\Omega) \sin(\varphi - \gamma_1 - B\Omega) - (\varphi - \gamma_1) \sin(\varphi - \gamma_1) + \cos(\varphi - \gamma_1 - B\Omega) - \cos(\varphi - \gamma_1)) \quad (3.13)$$

Преобразуем два последних выражения, используя формулы сложения тригонометрических функций и учитывая, что величина $B\Omega$ (угол поворота вектора скорости ветра в пределах элемента разрешения радиолокатора) достаточно мала, чтобы выполнялось равенство $\sin B\Omega \approx B\Omega$. Тогда

$$I_1 = \left(V_1 + W \frac{\varphi - \gamma_1}{\Omega} \right) 2 \cos\left(\varphi - \gamma_1 - \frac{B\Omega}{2}\right) \sin\left(-\frac{B\Omega}{2}\right) \approx, \quad (3.14)$$

$$\approx -\left(V_1 + W \frac{\varphi - \gamma_1}{\Delta} \right) B\Omega \cos\left(\varphi - \gamma_1 - \frac{B\Omega}{2}\right)$$

$$I_2 = \frac{W}{\Omega} ((\varphi - \gamma_1) (\sin(\varphi - \gamma_1 - B\Omega) - \sin(\varphi - \gamma_1)) - B\Omega \sin(\varphi - \gamma_1 - B\Omega) - 2 \sin\left(\varphi - \gamma_1 - \frac{B\Omega}{2}\right) \sin\left(-\frac{B\Omega}{2}\right)) =$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{W}{\Omega} \left((\varphi - \gamma_1) \left(2 \cos \left(\frac{\varphi - \gamma_1 - B\Omega + \varphi - \gamma_1}{2} \right) \sin \left(\frac{\varphi - \gamma_1 - B\Omega - \varphi + \gamma_1}{2} \right) \right) - \right. \\
&\quad \left. - B\Omega \sin(\varphi - \gamma_1 - B\Omega) + 2 \frac{B\Omega}{2} \sin \left(\varphi - \gamma_1 - \frac{B\Omega}{2} \right) \right) = \\
&= \frac{W}{\Omega} \left((\varphi - \gamma_1) \left(2 \cos \left(\varphi - \gamma_1 - \frac{B\Omega}{2} \right) \sin \left(-\frac{B\Omega}{2} \right) \right) - B\Omega \sin(\varphi - \gamma_1 - B\Omega) + \right. \\
&\quad \left. + B\Omega \sin \left(\varphi - \gamma_1 - \frac{B\Omega}{2} \right) \right) = \frac{W}{\Omega} \left(-\frac{B\Omega}{2} (\varphi - \gamma_1) 2 \cos \left(\varphi - \gamma_1 - \frac{B\Omega}{2} \right) - \right. \\
&\quad \left. - B\Omega \sin(\varphi - \gamma_1 - B\Omega) + B\Omega \sin \left(\varphi - \gamma_1 - \frac{B\Omega}{2} \right) \right) = \\
&= BW \left(-(\varphi - \gamma_1) \cos \left(\varphi - \gamma_1 - \frac{B\Omega}{2} \right) + \sin \left(\varphi - \gamma_1 - \frac{B\Omega}{2} \right) - \sin(\varphi - \gamma_1 - B\Omega) + \right) = \\
&= BW \left(-(\varphi - \gamma_1) \cos \left(\varphi - \gamma_1 - \frac{B\Omega}{2} \right) + 2 \cos \left(\varphi - \gamma_1 - \frac{3B\Omega}{4} \right) \sin \left(\frac{B\Omega}{4} \right) \right) = \\
&= BW \left(-(\varphi - \gamma_1) \cos \left(\varphi - \gamma_1 - \frac{B\Omega}{2} \right) + \frac{B\Omega}{2} \cos \left(\varphi - \gamma_1 - \frac{3B\Omega}{4} \right) \right) \tag{3.15}
\end{aligned}$$

Подставляем результаты в (3.11), после чего получаем

$$\begin{aligned}
V_{R2} &= -\frac{1}{B\Omega} \left[- \left(V_1 + W \frac{\varphi - \gamma_1}{\Omega} \right) B\Omega \cos \left(\varphi - \gamma_1 - \frac{B\Omega}{2} \right) - \right. \\
&\quad \left. - BW \left(\frac{B\Omega}{2} \cos \left(\varphi - \gamma_1 - \frac{3B\Omega}{4} \right) - (\varphi - \gamma_1) \cos \left(\varphi - \gamma_1 - \frac{B\Omega}{2} \right) \right) \right] = \\
&= \frac{1}{B\Omega} \left[\left(V_1 B\Omega \cos \left(\varphi - \gamma_1 - \frac{B\Omega}{2} \right) + B\Omega W \frac{\varphi - \gamma_1}{\Omega} \cos \left(\varphi - \gamma_1 - \frac{B\Omega}{2} \right) \right) + \right. \\
&\quad \left. + BW \frac{B\Omega}{2} \cos \left(\varphi - \gamma_1 - \frac{3B\Omega}{4} \right) - BW (\varphi - \gamma_1) \cos \left(\varphi - \gamma_1 - \frac{B\Omega}{2} \right) \right] = \\
&= \left(V_1 \cos \left(\varphi - \gamma_1 - \frac{B\Omega}{2} \right) + \frac{BW}{2} \cos \left(\varphi - \gamma_1 - \frac{3B\Omega}{4} \right) \right). \tag{3.16}
\end{aligned}$$

Теперь решаем уравнение (3.6), подставляя в него выражения (3.7) и (3.16),

$$\begin{aligned}
V_1 \cos(\varphi - \gamma_1) &= \left(V_1 \cos \left(\varphi - \gamma_1 - \frac{B\Omega}{2} \right) + \frac{BW}{2} \cos \left(\varphi - \gamma_1 - \frac{3B\Omega}{4} \right) \right) \\
V_1 \left(-2 \sin \left(\varphi - \gamma_1 - \frac{B\Omega}{4} \right) \sin \left(-\frac{B\Omega}{4} \right) \right) &+ \frac{BW}{2} \cos \left(\varphi - \gamma_1 - \frac{3B\Omega}{4} \right) = 0 \\
V_1 \Omega \sin \left(\varphi - \gamma_1 - \frac{B\Omega}{4} \right) &+ W \cos \left(\varphi - \gamma_1 - \frac{3B\Omega}{4} \right) = 0. \tag{3.17}
\end{aligned}$$

Последнее слагаемое представим в виде

$W \cos\left(\varphi - \gamma_1 - \frac{\Delta A}{4} - \frac{\Delta A}{2}\right)$ и применим формулу для косинуса суммы углов.

Тогда (3.17) преобразуется в следующие уравнения:

$$\frac{-2W}{(2V_1\Omega + WB\Omega)} = \operatorname{tg}\left(\varphi - \gamma_1 - \frac{B\Omega}{4}\right) \quad (3.18)$$

или

$$\varphi - \gamma_1 - \frac{B\Omega}{4} = \operatorname{arctg}\left(\frac{-2W}{(2V_1 + WB)\Omega}\right). \quad (3.19)$$

Примем во внимание тот факт, что сдвиг ветра в пограничном слое атмосферы – порождение нестабильного состояния последнего, что исключает его появление при нулевой или малой скорости ветра в нижнем слое (V_1). Физический смысл произведения WB – это величина изменения скорости ветра на том участке второго слоя, что попал внутрь элемента разрешения радиолокатора. Поэтому независимо от величины W по крайней мере на начальном участке спирали, где B мало, справедливо неравенство

$$2V_1 >> WB. \quad (3.20)$$

Это дает возможность переписать уравнение (3.19) в виде

$$\varphi - \gamma_1 - \frac{\left(h_0 - h_1 + \frac{\sqrt{\pi}}{2}r\right)\Omega}{4} = \operatorname{arctg}\left(\frac{-W}{V_1\Omega}\right). \quad (3.21)$$

Отсюда находим коэффициент «завития» спирали, учитывая, что $h_0 = \beta R$ и $r = \frac{\theta}{2}R$, где β – угол места антенны, R – дальность цели, Θ – ширина диаграммы направленности антенны на уровне 0,5 мощности,

$$\frac{d\varphi}{dR} = \frac{\Omega}{4} \left(\beta + \frac{\sqrt{\pi}}{4} \Theta \right). \quad (3.22)$$

Итогом проведенных расчетов для случая, соответствующего двухслойной модели окружающего пространства, является следующая методика нахождения оценки скорости изменения направления ветра с высотой:

1. На начальном участке спирали, образуемой минимальными значениями параметра на карте ширины спектра радиальных скоростей гидрометеоров, выбираются две точки с координатами (R_1, φ_1) и (R_2, φ_2) .

2. Ищется оценка скорости поворота ветра с высотой

$$\tilde{\Omega} = \frac{4}{\left(\beta + \frac{\sqrt{\pi}}{4}\theta\right)} \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{R_2 - R_1}. \quad (3.23)$$

Примером ситуации, соответствующей двухслойной модели служит карта на Рисунке 2.9а. К сожалению, из-за низкого положения антенны спираль малых значений параметра не просматривается. Это не значит, что она вообще не существует. Просто значение минимумов не настолько мало, чтобы выйти за пределы установленного интервала значений, отмечаемого на карте зеленым цветом. Однако хорошо видна спираль высоких значений, подчиняющаяся тем же законам, что и спираль минимальных. В самом начале ее «завитие» идет с относительно малой скоростью. С ростом дальности принятное нами условие 3.20 перестает выполняться и спираль начинает «завиваться» быстрее. На дальности около 90 км внутрь элемента разрешения радиолокатора попадают частицы третьего слоя со стабильными параметрами ветра. Здесь вращение вектора скорости прекращается, и зона больших значений рассматриваемого параметра приобретает форму правильных дуг.

Анализируя формулу (3.23), можно увидеть, что при нижнем положении антенны ($\beta \approx 0,5^\circ$) вращение спирали с увеличением высоты центра разрешаемого объема радиолокатора (h_0) происходит в четыре раза медленнее вращения вектора скорости ветра. Это легко объяснимо, т.к. при одинаковой длине векторов скорости частиц (это предположение мы сделали для начального участка спирали, где влияние сдвига ветра еще мало) азимут области минимальных значений ширины спектра сигнала располагается в направлении биссектрисы угла между данными векторами (п.2.1 первый случай). Следовательно, с ростом высоты направление на эту область (участок малых значений ширины спектра) будет поворачиваться в два раза медленнее, чем вектор средней скорости частиц из

промежуточного слоя. Сам же этот вектор есть среднее значение спектра отражений от слоя со сдвигом ветра. На начальном участке спирали, где приращения спектра малы, его можно считать равномерно распределенным. Одна его граница совпадает со средней скоростью частиц в первом слое, а вторая растет по мере увеличения h_0 со скоростью изменения скорости частиц во втором. Среднее значение такого спектра растет в два раза медленнее роста одной из его границ. В итоге получаем тот самый коэффициент 4 соотношения между скоростью «завития» спирали и скоростью поворота ветра в промежуточном слое.

Карты, представленные на Рисунках 2.9б и 2.9в, соответствующие большим, чем на Рисунке 2.9а углам места антенны, уже не попадают под разработанную выше модель. Характерная для них особенность – отсутствие зон аномально широких спектров. Это вызвано тем, что при поднятии луча разрешающий объем радиолокатора уже на малых дальностях выходит за границы нижнего слоя и полностью помещается внутрь промежуточного с изменяющимися параметрами ветра. Как было показано выше, этому случаю соответствует однослочная модель. Перейдем к ее рассмотрению.

Однослоинный вариант модели

Изменение направления ветра с высотой описываем формулой

$$\gamma = \gamma_0 + \Omega h, \quad (3.24)$$

где γ_0 – направление ветра у поверхности земли.

Применяя ту же аппроксимацию диаграммы направленности антенны, что и в предыдущем подразделе, найдем среднее по разрешаемому объему значение радиальных скоростей частиц

$$\begin{aligned} V_r &= \int_{h_0 - \frac{R\theta\sqrt{\pi}}{4}}^{h_0 + \frac{R\theta\sqrt{\pi}}{4}} V_0 \cos(\beta) \cos(\gamma_0 + \Omega h - \varphi) \frac{2}{R\theta\sqrt{\pi}} dh = \\ &= \frac{4V_0 \cos(\beta)}{R\theta\sqrt{\pi}\Omega} \sin\left(\frac{kR\theta\sqrt{\pi}}{4}\right) \cos(\gamma_0 + \Omega h_0 - \varphi) \end{aligned}, \quad (3.25)$$

где V_0 – скорость ветра, которую считаем постоянной во всем слое;

β – угол места антенны;

Ω – ширина диаграммы направленности антенны на уровне 0,5 мощности.

Найдем среднее значение квадрата скоростей частиц

$$\begin{aligned} E(v_r^2) &= \int_{h_0 - \frac{R\theta\sqrt{\pi}}{4}}^{h_0 + \frac{R\theta\sqrt{\pi}}{4}} (V_0 \cos(\beta) \cos(\gamma_0 + \Omega h - \varphi))^2 \frac{2}{R\theta\sqrt{\pi}} dh = \\ &= \frac{V_0^2 \cos^2(\beta)}{2} + \frac{V_0^2 \cos^2(\beta)}{\Omega R\theta\sqrt{\pi}} \sin\left(\frac{\Omega R\theta\sqrt{\pi}}{2}\right) \cos(2(\gamma_0 + \Omega h_0 - \varphi)) \end{aligned} \quad (3.26)$$

При помощи полученных выражений получаем квадрат ширины спектра радиальных скоростей частиц

$$\begin{aligned} \sigma_v^2 &= E(v_r^2) - V_r^2 = V_0^2 \cos^2(\beta) \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{\Omega R\theta\sqrt{\pi}} \sin\left(\frac{\Omega R\theta\sqrt{\pi}}{2}\right) \times \right. \\ &\quad \left. \times \cos(2(\gamma_0 + \Omega h_0 - \varphi)) - \frac{16}{R^2\theta^2\pi\Omega^2} \sin^2\left(\frac{\Omega R\theta\sqrt{\pi}}{2}\right) \cos^2(\gamma_0 + \Omega h_0 - \varphi) \right] \end{aligned} \quad (3.27)$$

Приравнивая нулю производную $\frac{d\sigma_v^2}{d\varphi}$, получаем формулу возникающих на карте ширины спектра радиальных скоростей частиц спиралей минимальных значений параметра

$$\sin[2(\gamma_0 + \Omega h - \varphi)] = 0. \quad (3.28)$$

Учитываем, что $h = \beta R$, и находим аналогичное (3.23) выражение для оценки скорости поворота ветра с высотой

$$\tilde{\Omega} = \frac{1}{\beta} \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{R_2 - R_1}, \quad (3.29)$$

где (R_1, φ_1) и (R_2, φ_2) – координаты точек на спирали малых значений σ_V , получаемые по разработанной выше методике, за исключением того, что выбирать точки можно на всей длине спирали, а не на начальном ее участке.

Как следует из 3.29, скорость вращения спирали в данном случае совпадает со скоростью вращения вектора скорости (без учета множителя $1/\beta$), что делает данный вариант определения профиля направления ветра более точным по сравнению со случаем, описанным в предыдущем разделе.

Физика процесса может быть объяснена при помощи Рисунка 3.3. На нем представлен график изменения с высотой радиальной скорости частиц, два

варианта расположения разрешаемого объема радиолокатора и интервалы значений, попадающие внутрь этого объема. Хорошо видно, что в точках экстремумов синусоиды интервал радиальных скоростей частиц резко сужается. Именно здесь и формируется зона малых значений ширины спектра принимаемого сигнала. Поворот антенны в горизонтальной плоскости ведет к смещению синусоиды вверх или вниз по оси в зависимости от того, в ту же сторону что и антенна или в другую поворачивается вектор скорости частиц. Соответственно смещаются по высоте и точки экстремумов. Теперь для получения минимального значения ширины спектра элемент разрешения должен сместиться точно на ту же величину, что и синусоида, что и обеспечивает упомянутое равенство скоростей вращения.

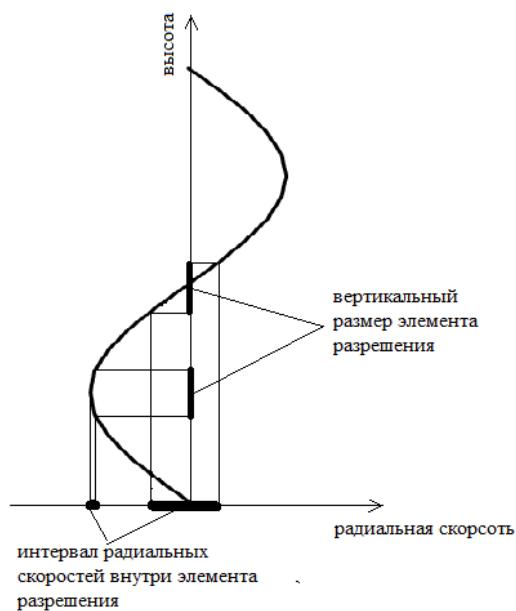


Рисунок 3.3 - Схема образования спирали малых значений ширины спектра отражений при однослойной модели окружающего пространства

Очевидно, что дополнительное изменение вектора скорости ветра по величине приведет только к увеличению экстремумов с высотой, но никак не повлияет на формирование спирали малых значений.

Метод распознавания сдвига ветра по оценкам ширины спектра принимаемого сигнала

Полученные выше результаты позволяют сделать следующие выводы:

- Основным следует признать трехслойный вариант модели, т.к. при любой из рассматриваемых метеорологических ситуаций при малых углах места антенны с увеличением дальности внутрь элемента разрешения обязательно попадут все три слоя гидрометеоров. Полученные для него формулы позволяют определить суммарный (вызванный изменениями по величине и по направлению) сдвиг ветра, что в принципе достаточно для обнаружения данного опасного явления;

- Остальные два варианта носят вспомогательный характер и позволяют путем измерения скорости «завития» спирали определить сдвиг ветра по направлению [32], т.е. уточнить характеристики наблюдаемого явления. Для каждого из вариантов получена формула расчета указанного параметра. Выбор одной из них обусловлен структурой получаемой при подъеме антенны карты. В зависимости от высоты расположения и толщины слоя с изменяющимися параметрами ветра формируются либо неконцентрические дуги аномально больших значений ширины спектра, либо спирали малых его значений, т.е. характерные признаки двух- или однослоистого варианта модели.

Практически становится возможным восстановление профиля ветра, т.к. зная величину разности векторов скорости ветра ΔV , угол ψ , на который изменилось направление ветра

$$\psi = \Omega H \quad (3.30)$$

и скорость частиц в нижнем слое V_1 (например, по данным наземных измерений), не составляет труда найти по формуле косинусов скорость частиц в верхнем слое

$$V_2 = \sqrt{V_1^2 - (\Delta V)^2 + 2V_1\Delta V \cos\psi}. \quad (3.31)$$

В итоге разработан следующий метод обнаружения опасного сдвига ветра и восстановления профиля ветра по оценкам ширины спектра отражений:

1. Распознавание на карте ширины спектра радиальных скоростей гидрометеоров областей аномально больших (6 м/с и более) значений параметра либо в виде полуколец или спиралей, либо спиралей его малых (не более 1 м/с) значений;

2. На малых углах места (около половины ширины диаграммы направленности антенны) нахождение участков аномально широких спектров, расположенных симметрично относительно радиолокатора;

3. Отыскание в найденной области наибольшего значения параметра и фиксирование значений ширины спектра в ближайших к месту его нахождения областях, относящихся к нижнему и верхнему слоям;

4. Оценивание величины разности векторов скорости ветра в верхнем и нижнем слоях по формуле (3.4);

5. Оценивание ширины промежуточного слоя, в котором наблюдается сдвиг ветра. Ищется она как разница высот верхней границы ДН антенны в начале зоны повышенных значений ширины спектра и нижней границы ДН в конце этой зоны;

6. Получение оценки сдвига ветра по формуле (3.5);

Если задача ограничена обнаружением сдвига ветра, то на этом этапе ее можно считать решенной. Если же требуется восстановление профиля ветра, следует выполнить еще два пункта [35; 30; 31].

7. Анализ карт конических разрезов ширины спектра радиальных скоростей частиц на более высоких углах места с целью выявления на них чередующихся зон максимальных и минимальных значений параметра в виде спиралей или спиралевидных зон одних только минимальных значений. В зависимости от вида карты рассчитывается скорость поворота ветра с высотой по формуле (3.23) или (3.29) соответственно.

8. Восстановление профиля ветра путем вычисления величины скорости ветра на интересующих высотах по формуле (3.31).

3.2 РАЗРАБОТКА МЕТОДА РАСПОЗНАВАНИЯ ЗОНЫ ВЕРТИКАЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ЧАСТИЦ

При наблюдении микропорыва или любого другого вертикального воздушного потока применение стандартных процедур спектрального анализа сигнала невозможно из-за малой величины радиальной скорости движущихся в

них частиц. Это обусловлено тем, что эти потоки требуется обнаруживать на малых высотах, где они представляют реальную опасность для авиации, а, следовательно, наблюдаются они при малых значениях угла места антенны. Влияние имеющего при этом место доплеровского сдвига частоты на характеристики энергетического спектра суммарного сигнала слишком незначительно для использования в алгоритмах обнаружения данного опасного явления. Однако расчеты показывают, что в случае нестандартной обработки принимаемого сигнала появляется возможность его идентификации по ширине спектра амплитуды отражений. Для подтверждения этого найдем аналитическое решение модели, разработанной в предыдущей главе.

Решение обратной задачи распознавания микропорыва по ширине спектра амплитуды принимаемого сигнала

Известно выражение для корреляционной функции случайного процесса, каковым является принятый сигнал, после линейного детектирования [96]

$$R(t) \approx \frac{\pi\sigma^2}{2} R_0^2(t), \quad (3.32)$$

где $R_0(\tau)$ - корреляционная функция низкочастотной части входного узкополосного случайного процесса;

σ^2 - дисперсия этого процесса.

Формула для определения ширины спектра имеет вид

$$\sigma = \sqrt{\frac{\int_0^\infty R_0^2(t)dt}{\int_0^\infty t^2 R_0^2(t)dt}}. \quad (3.33)$$

Рассмотрим случай, когда в разрешаемый элемент радиолокатора попадают две метеоцели с разными значениями вектора скорости составляющих их частиц [12]. Тогда исходная корреляционная функция равна сумме корреляционных функций каждой из составляющих суммарного сигнала. Полагая их гауссовыми, как это обычно делается в радиометеорологии, получаем

$$R_\Sigma(\tau) = A_{\text{фон}} \exp\left(-\frac{\sigma_{f_\Gamma}^2 \tau^2}{2}\right) \cos(2\pi(f_0 - f_\Gamma)) + \\ + A_{\text{пот}} \exp\left(-\frac{\sigma_{f_{\text{пот}}}^2 \tau^2}{2}\right) \cos(2\pi(f_0 - f_B)), \quad (3.34)$$

где $A_{\text{фон}}, \sigma_{f_\Gamma}, f_\Gamma, A_{\text{пот}}, \sigma_{f_{\text{пот}}}, f_{\text{пот}}$ - мощность, ширина энергетического спектра и доплеровский сдвиг частоты отражений фона и потока соответственно;

f_0 - средняя частота суммарного сигнала, определяемая выражением [29]

$$f_0 = \frac{A_{\text{фон}}}{A_{\text{фон}} + A_{\text{пот}}} f_\Gamma + \frac{A_{\text{пот}}}{A_{\text{фон}} + A_{\text{пот}}} f_{\text{пот}}. \quad (3.35)$$

Подставляем (3.34) в (3.33) и вводим относительные параметры $\varepsilon = P_1/P_2$, $\eta = A_{\text{фон}}/A_{\text{пот}}$, $\nu = (f_\Gamma - f_{\text{пот}})/\sigma_{f_\Gamma}$. Тогда формула для отношения ширины спектра выходного сигнала линейного детектора к ширине спектра отражения от фона σ_1 приобретает вид

$$\frac{\sigma_{\text{мод}}}{\sigma_{f_{\text{пот}}}} = \frac{A_1 + A_2 + A_3 + A_4}{B_1 + B_2 + B_3 + B_4 + B_5}, \quad (3.36)$$

где

$$A_1 = \frac{1 + \frac{1}{\eta}}{4}; \quad (3.37)$$

$$A_2 = \frac{1}{4} \exp\left(-\frac{4\pi^2 \nu^2}{(\varepsilon + 1)^2}\right); \quad (3.38)$$

$$A_3 = \frac{1}{4\eta} \exp\left(-\frac{4\pi^2 \nu^2}{\eta^2 \left(1 + \frac{1}{\varepsilon}\right)^2}\right), \quad (3.37)$$

$$A_4 = \frac{\sqrt{2}}{2\sqrt{\eta^2 + 1}} \left[\exp\left(-\frac{2\pi^2 (\varepsilon - 1)^2 \nu^2}{(\varepsilon - 1)^2 (\eta^2 + 1)}\right) + \exp\left(-\frac{2\pi^2 \nu^2}{(\eta^2 + 1)}\right) \right]; \quad (3.38)$$

$$B_1 = \frac{1 + \frac{1}{\eta^3}}{8}; \quad (3.39)$$

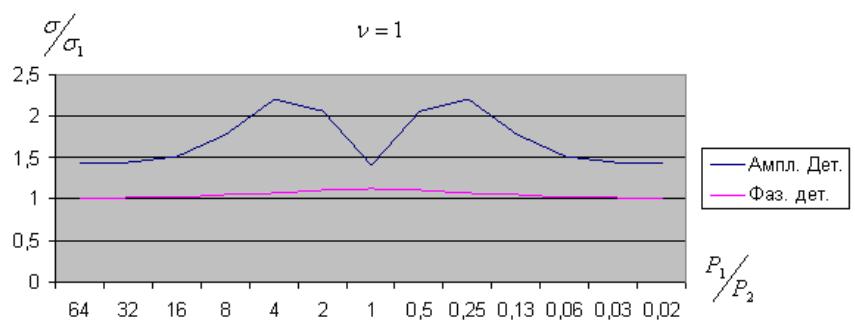
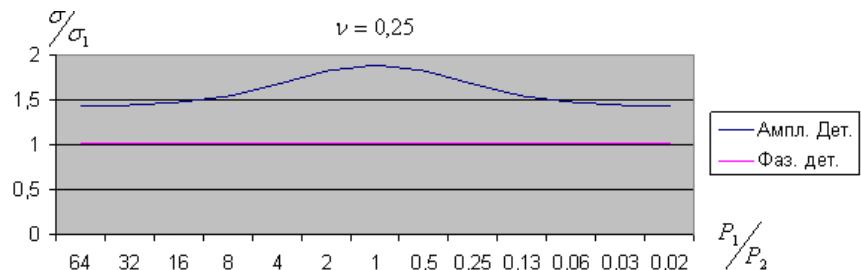
$$B_2 = 0,125 \left[1 - \frac{8\pi^2 \nu^2}{(1 + \varepsilon)^2} \right] \exp\left(-\frac{4\pi^2 \nu^2}{(\varepsilon + 1)^2}\right); \quad (3.40)$$

$$B_3 = \frac{1}{8\eta^3} \left[1 - \frac{8\pi^2\nu^2}{\eta^2 \left(1 + \frac{1}{\varepsilon}\right)^2} \right] \exp \left(-\frac{4\pi^2\nu^2}{\eta^2 \left(1 + \frac{1}{\varepsilon}\right)^2} \right), \quad (3.41)$$

$$B_4 = 0,25 \left[\left(\frac{2}{\eta^2 + 1} \right)^{\frac{3}{2}} - \left(\frac{2}{\eta^2 + 1} \right)^{\frac{5}{2}} \frac{2\pi^2(\varepsilon - 1)^2}{(\varepsilon + 1)^2} \right] \exp \left(-\frac{2\pi^2(\varepsilon - 1)^2\nu^2}{(\varepsilon + 1)^2(\eta^2 + 1)} \right), \quad (3.42)$$

$$B_5 = 0,25 \left[\left(\frac{2}{\eta^2 + 1} \right)^{\frac{3}{2}} - \left(\frac{2}{\eta^2 + 1} \right)^{\frac{5}{2}} 2\pi^2\nu^2 \right] \exp \left(-\frac{2\pi^2\nu^2}{\eta^2 + 1} \right). \quad (3.43)$$

Очевидно, что получить аналитическое решение выведенного уравнения невозможно. Поэтому применялись численные методы. В частности, была исследована зависимость ширины спектра выходного сигнала от соотношения мощностей $A_{\text{фон}}/A_{\text{пот}}$ при различных значениях параметров η и ν . При этом сравнивалась реакции линейного амплитудного и фазового детекторов на одно и тот же входное воздействие. Некоторые результаты приведены на Рисунках 3.4 и 3.5.



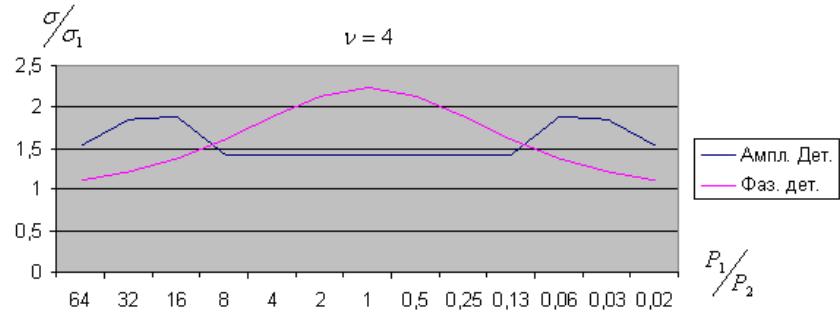


Рисунок 3.4 - Зависимость ширины спектра сигнала на выходе амплитудного и фазового детекторов от отношения мощностей отражений при различных слоев при $\sigma_1 = \sigma_2$ и различных

$$\text{значениях величины } \nu = \frac{F_1 - F_2}{\sigma_1}$$

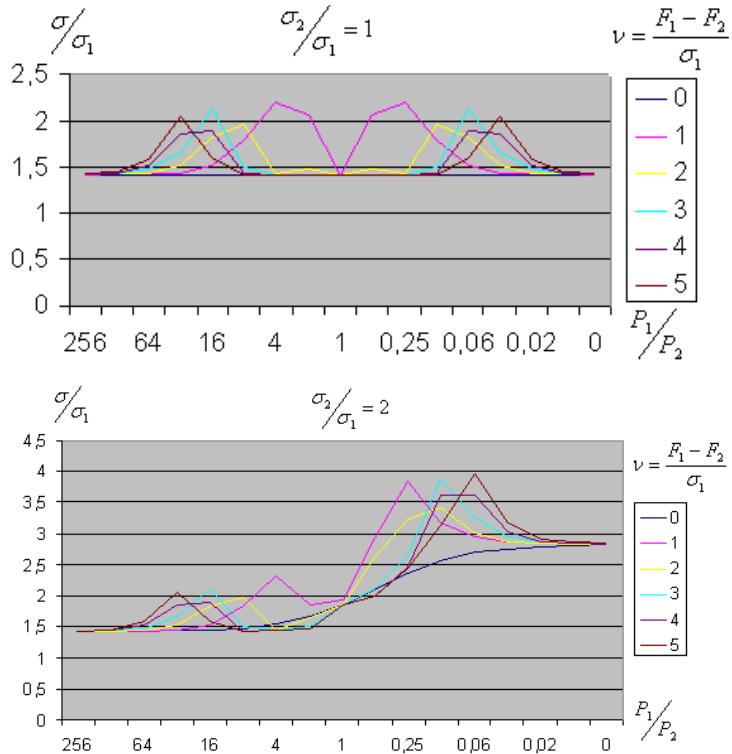


Рисунок 3.5 - Зависимость ширины спектра сигнала на выходе амплитудного детектора от отношения мощностей отражений при различных слоев при различных значениях разности доплеровских сдвигов частоты этих отражений и соотношениях σ_2/σ_1

Из приведенных зависимостей можно сделать вывод о том, что сигнал на выходе линейного амплитудного детектора очень чутко реагирует на наличие разницы средних частот спектров сигналов от различных отражающих слоев в случае их одновременного попадания в разрешаемый объем радиолокатора. При

этом его реакция в виде расширения спектра при малых значениях указанной разницы значительно превосходит ту, что можно наблюдать на выходе фазового детектора. При увеличении разности средних частот сигналов реакция фазового детектора начинает преобладать, а у амплитудного она смещается в область малых соотношений мощностей рассматриваемых сигналов, тем самым как бы «окантовывая» границы области со сдвигом ветра.

Метод распознавания зоны вертикального движения частиц с помощью ширины спектра сигнала на выходе амплитудного детектора

Полученные результаты позволяют надеяться на то, что применение амплитудного детектора способно оказать существенную помощь в решении задачи обнаружения микропорыва. Именно при наблюдении последнего складываются те условия, в которых проявляются достоинства данной обработки, — малая разница доплеровских сдвигов частоты отражений от вертикального потока и соседних участков цели и примерное равенство их мощностей.

Практическое применение метода представляется в следующем виде:

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 с 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.

Очевидно, что метод может применяться не только для обнаружения микрошквалов, но и любых вертикальных потоков воздуха (например, термиков или промышленных выбросов).

3.3 МЕТОДЫ РАСПОЗНАВАНИЯ ШКВАЛА И СИЛЬНОГО ВЕТРА В МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ РАДИОЛОКАЦИИ

Обнаружение больших значений среднего значения ветра в каком-либо слое атмосферы в радиусе более 100 км, строго говоря, не является задачей метеорологического радиолокатора. Правильнее будет отнести ее к задачам синоптической метеорологии [67], хотя данная ситуация может быть им распознана при помощи метода VAD, рассмотренного ранее в главе 1. Более актуально для радиолокатора, как средства получения краткосрочного и сверхкраткосрочного прогнозов, идентифицировать локальные области сильного ветра или, иначе, области порывистости. Обнаруживаться они могут только путем получения оценок средней радиальной скорости частиц, т.е. только доплеровским радиолокатором. Ее значение определяется известным [155] выражением

$$V_R = V_B \sin \alpha + W \cos(\varphi - \gamma), \quad (3.44)$$

где V_R, W - вертикальная и горизонтальная составляющие средней скорости частиц соответственно;

α - угол места антенны радиолокатора;

φ - азимут луча антенны;

γ - направление движения гидрометеоров.

Пример наблюдения зоны сильного ветра приведен на Рисунке 2.1 [200]. На данной карте хорошо видна зона повышенных значений ветра, расположенная на 20 км южнее и на 20 км западнее центра, и выделенная красным цветом. Значение параметра здесь равно 26 км/час. Однако это дает только качественную оценку, т.к. определяется только радиальная составляющая скорости ветра. Истинная же его скорость может быть значительно больше.

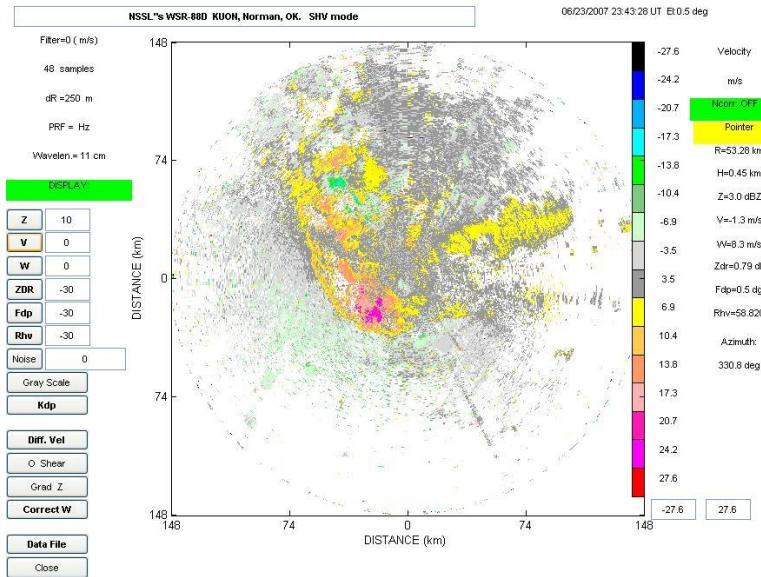


Рисунок 3.6 - Карта радиальных скоростей ветра, полученная радиолокатором WSR-88D, установленным в г. Норман, США 23 июня 2007 года

Задача системы вторичной обработки информации состоит в этом случае в определении именно полной скорости ветра, характеризующейся вертикальной V_B и горизонтальной W составляющими, и сравнении полученных значений с пороговым. Очевидно, что оценить их путем одиночного измерения величины V_R , зависящей, как это следует из формулы (3.42), еще от трех параметров, два из которых неизвестны, не представляется возможным.

Для преодоления указанной трудности разработано несколько методов, которые можно разбить на две группы:

- 1) использующие закономерности изменения радиальной скорости V_R при сканировании антенны в горизонтальной плоскости;
- 2) основанные на принципах многопозиционной радиолокации.

В любом случае сначала восстанавливается пространственное распределение вектора скорости ветра в интересующем слое атмосферы, и далее ищутся координаты точек, в которых его величина превысила пороговое значение. Остается отметить, что восстановление рассматриваемого пространственного распределения рассматриваемого вектора имеет еще и

самостоятельное значение для решения различных задач. Например, оно очень важно при обеспечении артиллерийских стрельб.

Рассмотрим подробнее каждый из упомянутых методов.

Метод восстановления скорости ветра путем сканирования антенны в горизонтальной плоскости

В предыдущей главе уже был рассмотрен метод VAD нахождения среднего по горизонтальному слою пространства значения вектора скорости ветра. Его можно рассматривать как частный самый грубый случай более общей процедуры нахождения пространственного распределения скорости ветра в рассматриваемом слое. Разница заключается только в горизонтальных размерах пространства, по которому производится осреднение получаемых оценок. Наличие самого осреднения здесь принципиально, ибо, как уже было показано, измерение в одной точке пространства не может дать однозначной информации.

Алгоритм обработки оценок средней радиальной скорости частиц

Для определения алгоритма восстановления поля скорости ветра в некотором слое пространства рассмотрим случай, когда локатор находится в одной горизонтальной плоскости с объектами отражения радиосигнала – гидрометеорами. Задача заключается в получении оценки скорости фактического ветра $\left(\tilde{\vec{W}} = \langle \tilde{U}, \tilde{V} \rangle\right)$ по известным (измеренным с помощью доплеровского радиолокатора) оценкам значениям радиальных скоростей \vec{K}_i в точках с координатами $\langle x_i, y_i \rangle$ (Рисунок 3.7). Число измерений считается равным n ($i \in 1, 2, \dots, n$).

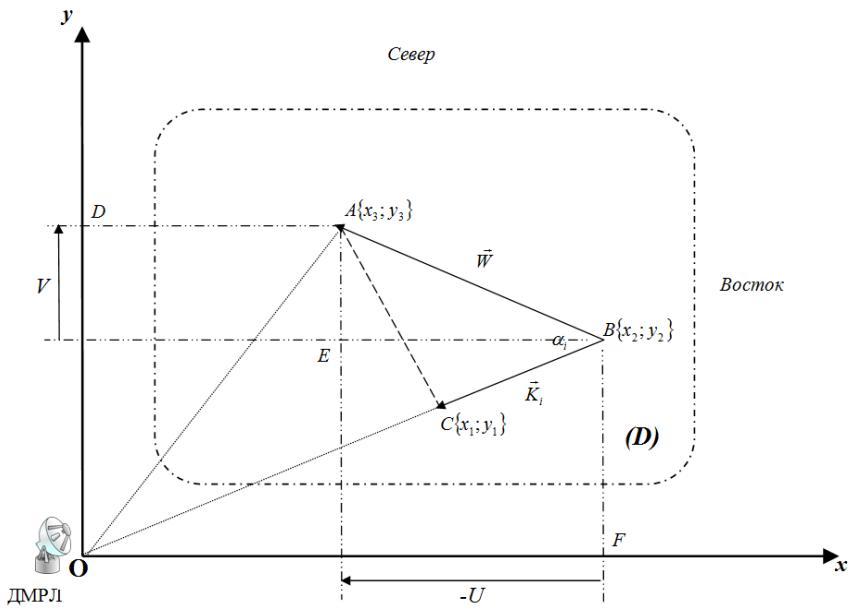


Рисунок 3.7 – Двумерный случай взаимного расположения вектора радиальной скорости ветра \vec{K}_i и вектора скорости фактического ветра \vec{W}

Для решения сформулированной задачи используем допущение о том, что в достаточно малой (с горизонтальными размерами порядка нескольких километров) области (D) атмосфера вектор скорости фактического ветра \vec{W} постоянен. Выразим вектор скорости фактического ветра \vec{W} через составляющие U и V

$$W = \sqrt{(-U)^2 + V^2}. \quad (3.45)$$

Рассмотрим функцию, связывающую проекции $\langle U, V \rangle$ вектора \vec{W} со значением K_i в i -ой точке области (D) . Она имеет вид:

$$f(U, V, i) = K_i = \sqrt{(-U)^2 + V^2} \cdot \cos \alpha_i, \quad (3.46)$$

где K_i – модуль вектора \vec{K}_i ;

α_i – угол между векторами \vec{W} и \vec{K}_i .

В выражении (3.46) неизвестным остается множитель $\cos \alpha_i$. Получим выражение для его нахождения.

Систему координат (Рисунок 3.7) расположим таким образом, чтобы ДМРЛ находился в начале координат. Применив теорему косинусов к треугольнику OAB , выразим $\cos \alpha_i$:

$$\cos \alpha_i = \frac{OB^2 + AB^2 - OA^2}{2 \cdot OB \cdot AB}. \quad (3.47)$$

Учитывая, что

$$OB^2 = x_i^2 + y_i^2, AB^2 = U^2 + V^2, OA^2 = (x_i - U)^2 + (y_i + V)^2, \quad (3.46)$$

получим новый вид выражения (3.47)

$$\cos \alpha_i = \frac{U \cdot x_i - V \cdot y_i}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2} \cdot \sqrt{U^2 + V^2}}. \quad (3.49)$$

Очевидно, что вид выражения (3.49) будет меняться в зависимости от взаимного расположения векторов \vec{W} и \vec{K}_i , но в данном случае расчеты производятся для ситуации, изображенной на Рисунке 3.7.

Подставив выражение (3.49) в (3.46), получим

$$f(U, V, i) = K_i = \frac{U \cdot x_i - V \cdot y_i}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}}. \quad (3.50)$$

Целью решения задачи является получение оценок составляющих вектора скорости ветра $\langle \tilde{U}, \tilde{V} \rangle$ по известным координатам точек измерений радиальных скоростей ветра и известным значениям этих скоростей, т.е. минимизация функции

$$F = \sum_{i=1}^n (f(\tilde{U}, \tilde{V}, i) - \tilde{K}_i)^2. \quad (3.51)$$

Математически данная задача определяется выражением [37]:

$$\langle \tilde{U}, \tilde{V} \rangle = \arg \min_{\langle \tilde{U}, \tilde{V} \rangle \in \{\langle \tilde{U}, \tilde{V} \rangle_{(D)}\}} \sum_{i=1}^n (f(\tilde{U}, \tilde{V}, i) - \tilde{K}_i)^2. \quad (3.52)$$

Для достижения цели используем метод наименьших квадратов. Для этого от функции (3.51) необходимо взять производные по U и V , а результат дифференцирования приравнять нулю.

Опуская промежуточные преобразования, получим систему линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} \tilde{U} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{x_i^2}{x_i^2 + y_i^2} - \tilde{V} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{x_i y_i}{x_i^2 + y_i^2} = \sum_{i=1}^n \tilde{K}_i \frac{x_i}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}} \\ \tilde{U} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{x_i y_i}{x_i^2 + y_i^2} - \tilde{V} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{y_i^2}{x_i^2 + y_i^2} = \sum_{i=1}^n \tilde{K}_i \frac{y_i}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}} \end{cases}. \quad (3.53)$$

Решая систему (3.53), получим выражения для оценок составляющих вектора скорости ветра

$$\tilde{U} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{x_i y_i}{x_i^2 + y_i^2} \cdot \sum_{i=1}^n \tilde{K}_i \frac{y_i}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}} - \sum_{i=1}^n \frac{y_i^2}{x_i^2 + y_i^2} \cdot \sum_{i=1}^n \tilde{K}_i \frac{x_i}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}}}{\left(\sum_{i=1}^n \frac{x_i y_i}{x_i^2 + y_i^2} \right)^2 - \sum_{i=1}^n \frac{x_i^2}{x_i^2 + y_i^2} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{y_i^2}{x_i^2 + y_i^2}}; \quad (3.54)$$

$$\tilde{V} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{x_i^2}{x_i^2 + y_i^2} \cdot \sum_{i=1}^n \tilde{K}_i \frac{y_i}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}} - \sum_{i=1}^n \frac{x_i y_i}{x_i^2 + y_i^2} \cdot \sum_{i=1}^n \tilde{K}_i \frac{x_i}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}}}{\left(\sum_{i=1}^n \frac{x_i y_i}{x_i^2 + y_i^2} \right)^2 - \sum_{i=1}^n \frac{x_i^2}{x_i^2 + y_i^2} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{y_i^2}{x_i^2 + y_i^2}}. \quad (3.55)$$

Выражения (3.54) и (3.55) представляют собой решение задачи определения параметров фактического ветра, сформулированной выше, на основе использования метода наименьших квадратов.

Пример получения поля ветра рассмотренным методом для области D 8*8 км приведен на Рисунке 3.8.

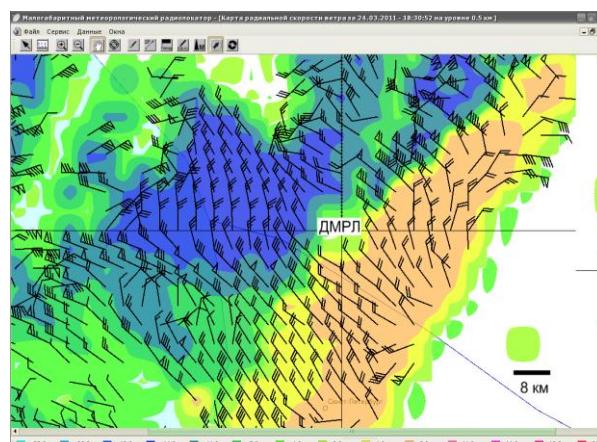


Рисунок 3.8 - Рассчитанное по результатам доплеровских измерений поле ветра на высоте 0,5 км, цветом показаны значения доплеровских скоростей гидрометеоров

Мы получили алгоритм обработки данных. Однако открытым остается вопрос о том, при каких условиях он применим, и какой объем выборки надо задать для достижения требуемой точности измерений. Или наоборот – какая точность достигается при заданном объеме выборки или заданном времени наблюдения.

Оценка точности и условий применения метода восстановления ветра.

Для решения поставленной задачи найдем оценку одной из составляющих скорости ветра. Например, ее проекцию на ось x [19]

$$\tilde{U} = \frac{\sum_i^n \sum_j^n \tilde{K}_i \left(\frac{x_i y_j^2}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2} (x_j^2 + y_j^2)} - \frac{y_i x_j y_j}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2} (x_j^2 + y_j^2)} \right)}{\sum_i^n \sum_j^n \left(\frac{x_i^2 y_j^2}{(x_i^2 + y_i^2) (x_j^2 + y_j^2)} - \frac{x_i y_i x_j y_j}{(x_i^2 + y_i^2) (x_j^2 + y_j^2)} \right)}. \quad (3.56)$$

Перейдем к полярным координатам дальности (r_i) и азимута (φ_i) цели.

Тогда

$$\tilde{U} = \frac{\sum_i^n \sum_j^n \tilde{K}_i \frac{r_i r_j^2 (\cos \varphi_i \sin^2 \varphi_j - \sin \varphi_i \cos \varphi_j \sin \varphi_j)}{r_i r_j^2}}{\sum_i^n \sum_j^n \frac{r_i^2 r_j^2 (\cos^2 \varphi_i \sin^2 \varphi_j - \cos \varphi_i \sin \varphi_i \cos \varphi_j \sin \varphi_j)}{r_i^2 r_j^2}}. \quad (3.57)$$

Получаем независимость оценки от дальности (без учета данной зависимости для \tilde{K}). После тригонометрических преобразований имеем

$$\tilde{U} = \frac{\sum_i^n \sum_j^n \tilde{K}_i \sin \varphi_j \sin(\varphi_j - \varphi_i)}{\sum_i^n \sum_j^n \cos \varphi_i \sin \varphi_j \sin(\varphi_j - \varphi_i)}. \quad (3.58)$$

Найдем моменты распределения вероятности случайной величины \tilde{U} .

Математическое ожидание данного распределения определяется следующей формулой:

$$E(\tilde{U}) = \left(\frac{\sum_i^n \sum_j^n E(\tilde{K}_i) \sin \varphi_j \sin(\varphi_j - \varphi_i)}{\sum_i^n \sum_j^n \sin \varphi_j \cos \varphi_i \sin(\varphi_j - \varphi_i)} \right). \quad (3.59)$$

Дисперсию ищем в соответствии с известным выражением

$$D(\tilde{U}) = E(\tilde{U}^2) - E^2(\tilde{U}), \quad (3.60)$$

Для чего сначала находим математическое ожидание квадрата оценки

$$E(\tilde{U}^2) = E \left(\frac{\sum_i^n \sum_j^n \sum_k^n \sum_l^n \tilde{K}_i \tilde{K}_k \sin \varphi_j \sin(\varphi_j - \varphi_i) \sin \varphi_l \sin(\varphi_l - \varphi_k)}{\left(\sum_i^n \sum_j^n \sin \varphi_j \cos \varphi_i \sin(\varphi_j - \varphi_i) \right)^2} \right). \quad (3.61)$$

Используя (3.59), переходим к дисперсии и учитываем независимость оценок, получаемых в разных точках пространства (при $i \neq k$ $E(\tilde{K}_i \tilde{K}_k) = E(\tilde{K}_i)E(\tilde{K}_k)$),

$$D(\tilde{U}) = \frac{\sum_i^n \sum_j^n \sum_l^n D(\tilde{K}_i) \sin \varphi_j \sin \varphi_l \sin(\varphi_j - \varphi_i) \sin(\varphi_l - \varphi_i)}{\left(\sum_i^n \sum_j^n \sin \varphi_j \cos \varphi_i \sin(\varphi_j - \varphi_i) \right)^2}. \quad (3.62)$$

Перейдем от суммы по количеству измерений к сумме по числу углов m , под которыми эти измерения проводились. Если под i -м углом проведено n_i измерений на различных дальностях, приходим к выражению

$$D(\tilde{U}) = \frac{\sum_i^m \sum_j^m \sum_l^m n_i n_j n_l D(\tilde{K}_i) \sin \varphi_j \sin \varphi_l \sin(\varphi_j - \varphi_i) \sin(\varphi_l - \varphi_i)}{\left(\sum_i^m \sum_j^m n_i n_j \sin \varphi_j \cos \varphi_i \sin(\varphi_j - \varphi_i) \right)^2}. \quad (3.63)$$

Считаем, что под каждым из углов производится одинаковое количество измерений p . Тогда

$$D(\tilde{U}) = \frac{\sum_i^m D(\tilde{K}_i) \left(\sum_j^m \sin \varphi_j \sin(\varphi_j - \varphi_i) \right)^2}{p \left(\sum_i^m \sum_j^m \sin \varphi_j \cos \varphi_i \sin(\varphi_j - \varphi_i) \right)^2}. \quad (3.64)$$

Очевидно, что наиболее слабое место метода – случай, когда на участок, для которого ветер считается неизменным, приходятся всего два азимутальных угла и обработке подвергается наименьшее количество данных радиолокатора. Оценим дисперсию оценки составляющей ветра в указанных условиях. При $m = 2$ имеем

$$D(\tilde{U}) = \frac{D(\tilde{K}_1) \sin^2 \varphi_2 + D(\tilde{K}_2) \sin^2 \varphi_1}{p \sin^2(\varphi_2 - \varphi_1)}. \quad (3.65)$$

Дисперсии отдельных оценок, получаемых в смежных разрешаемых объемах, можно считать одинаковыми. В итоге получаем

$$D(\tilde{U}) = D(\tilde{K}) \frac{\sin^2 \varphi_1 + \sin^2 \varphi_2}{p \sin^2(\varphi_2 - \varphi_1)}. \quad (3.66)$$

Экстремальных значений рассматриваемая величина достигает при азимуте φ , кратном $n\pi$ и $\pi/2 + n\pi$.

При $\varphi_1 = 0$ имеем минимальное значение дисперсии

$$D(\tilde{U}) = \frac{D(\tilde{K})}{p}. \quad (3.67)$$

При $\varphi_1 = \pi/2$ она максимальна

$$D(\tilde{U}) \approx \frac{2D(\tilde{K})}{p \sin^2(\varphi_1 - \varphi_2)}. \quad (3.68)$$

Аналогично находим формулу для дисперсии проекции скорости на ось у

$$D(\tilde{V}) = \frac{\sum_i^m D(\tilde{K}_i) \left(\sum_j^m \cos \varphi_j \sin(\varphi_j - \varphi_i) \right)^2}{p \left(\sum_i^m \sum_j^m \cos \varphi_i \sin \varphi_j \sin(\varphi_i - \varphi_j) \right)^2}, \quad (3.69)$$

преобразующуюся в случае двух азимутальных углов в выражение

$$D(\tilde{V}) = D(\tilde{K}) \frac{\cos^2 \varphi_1 + \cos^2 \varphi_2}{p \sin^2(\varphi_2 - \varphi_1)}. \quad (3.70)$$

Экстремальные значения данной дисперсии полностью совпадают со значениями, указанными в формулах (3.67) и (3.68), с той лишь разницей, что

минимум достигается при азимутальных углах $\pi/2 + n\pi$, а максимум – при углах, кратных π .

Первый вывод, который можно сделать из полученных результатов, состоит в том, что применение метода имеет ограничение по дальности. Рассмотрим этот вопрос подробнее. Прежде всего, примем во внимание тот факт, что минимальное угловое расстояние, на котором возможно получение независимых оценок спектральных характеристик эхо-сигнала метеообразования, равно половине ширины диаграммы направленности антенны радиолокатора. Следовательно, для получения двух отсчетов по дальности необходимо, чтобы угловой размер области, внутри которой параметры ветра полагаются неизменными (область D), не был меньше ширины этой диаграммы. Максимальная дальность, для которой это условие выполняется, и есть граница применения метода.

Определим ее для двух существующих на данный момент отечественных доплеровских радиолокаторов МРМЛ и ДМРЛ-С. В [43] установлен минимальный размер упомянутой области $2*2$ км. При ширине диаграммы направленности 1,5 градуса, что имеет место в малогабаритном метеорологическом радиолокаторе (МРМЛ) [153], данная граница проходит на расстоянии 80 км от локатора. Дальность действия данного радара в режиме «Скорость», при котором измеряются спектральные характеристики сигнала, составляет 100 км. Следовательно, ограничение, накладываемое методом на радиус действия локатора, незначительно и относится только к минимальному принятому размеру области D.

При сужении диаграммы направленности до одного градуса, что имеет место в радиолокаторе ДМРЛ-С [42], граница применимости метода фактически совпадает с дальностью его действия в режиме «Скорость» (125 км), а при увеличении размеров области D какие-либо ограничения по дальности вообще отсутствуют.

Далее оценим, какие еще требования к локатору предъявляет рассматриваемый метод восстановления поля ветра для получения результатов с

приемлемой точностью. Прежде всего, отметим, что для получения количественных характеристик точности необходимо знать величину дисперсии получаемых радиолокатором оценок радиальной скорости гидрометеоров. Последняя же зависит от параметров радара, применяемого метода оценки и внешних условий. Поэтому будем считать, что измерения в каждом разрешаемом объеме проводятся с удовлетворяющей нас точностью, а оценивать будем отношение дисперсий составляющей скорости ветра и радиальной скорости. Указанное отношение определим для вертикальной составляющей в зоне ее максимального значения вблизи азимута, равного нулю.

При перечисленных условиях дисперсия оценки проекции вектора скорости на ось u определяется по формуле (3.66). Например, у МРМЛ шаг измерений по углу $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = 0,75^\circ$. Следовательно, для того, чтобы компенсировать «ухудшение» одной дисперсии относительно другой, необходимо иметь количество независимых измерений на каждом направлении не менее $\frac{2}{\sin^2 0,75^\circ} \approx 11700$. При продольном размере разрешаемого объема 150 м, что соответствует обычно используемой в режиме «Скорость» длительности (или эквивалентной длительности для ДМРЛ-С) зондирующего импульса 1 мкс, имеем на рассматриваемой нами дистанции 2 км 13 независимых отсчетов для каждого положения азимута антенны. Оставшееся после их учета уменьшение дисперсии в 900 раз можно компенсировать только за счет увеличения времени наблюдения на каждом направлении, что требует соответствующего снижения скорости сканирования в горизонтальной плоскости.

Обычная скорость вращения антенны – 6 оборотов в минуту. Теперь же один оборот займет 2,5 часа, что сделает получаемые данные, во-первых, неоперативными и, во-вторых, некорректными, т.к. за это время пространственное распределение ветра может измениться коренным образом. Выход из сложившейся ситуации один – при необходимости сужения области D до минимальных размеров переходить к восстановлению поля ветра не во всем

окружающем радар пространстве, а в узком представляющем интерес секторе. Например, сканирование сектора размером 5 градусов на одной высоте займет около 20 минут.

Рассмотрим далее, как влияет на точность измерений увеличение размеров области D. При принятых нами ограничениях формулу (3.68) можно переписать в виде

$$D(\tilde{V}) = \frac{D(\tilde{K})}{p(\Delta\varphi)^2} \frac{\sum_{i=0}^{m-1} \left(\sum_{j=0}^{m-1} (j-i)^2 \right)}{\left(\sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{m-1} j(i-j) \right)^2} = \frac{6D(\tilde{K})}{p(\Delta\varphi)^2 (m-1)(2m-1)}. \quad (3.71)$$

Учтем увеличение независимых отсчетов по дальности $p = p_2(m/2)$, где p_2 - число данных отсчетов при $m = 2$. Тогда

$$D(\tilde{V}) = \frac{12D(\tilde{K})}{p_2(\Delta\varphi)^2 m(m-1)(2m-1)}. \quad (3.72)$$

Очевидно, что исследуемая величина уменьшается пропорционально третьей степени числа отсчетов по азимуту m . Нетрудно подсчитать, что уже при увеличении области D относительно минимальной в 7 раз, требуемое уменьшение скорости сканирования антенны составляет всего 1,1 раза.

На основании проведенных расчетов можно сделать следующие выводы:

- для МРМЛ при выборе размеров области пространства, в котором вектор скорости ветра считается постоянным (область D), более 14*14 км восстановление поля ветра по предлагаемой методике с заданной нами точностью может вестись во всем рабочем пространстве радиолокатора синхронно со штатными наблюдениями без каких-либо изменений темпа обзора. Если же решаемая задача требует более тонкой детализации наблюдаемого процесса, необходимо введение особого режима работы радиолокатора с уменьшением скорости сканирования антенны в азимутальной плоскости и/или сокращением зоны обзора;

- то же относится и к радиолокатору ДМРЛ-С с той лишь разницей, что за счет сужения луча антенны до 1° требуемая точность измерений достигается либо на той же дальности при в 1,5 раза меньшей скорости сканирования, либо при той же скорости сканирования на в $\sqrt{1,5}$ раза большем радиусе действия.

Обязательным для рассматриваемого метода является усреднение оценок, получаемых в некотором объеме пространства, минимальный размер которого считается равным 2×2 км. Для некоторых задач, как, например, обеспечение безопасности полетов авиации такая разрешающая способность недопустимо велика. Это вызывает потребность в поиске других, дающих более подробную информацию о пространственном распределении скорости воздуха методов, каковыми являются методы многопозиционной радиолокации.

Использование принципов многопозиционной радиолокации для восстановления скорости ветра

Известны только два метода, использующих заявленный принцип:

1. синхронная работа двух и более радиолокаторов;
2. использование системы «один радиолокатор – несколько приемников».

Рассмотрим каждый из них в отдельности.

Синхронная работа двух и более радиолокаторов

Первым предложением по применению методов многопозиционной радиолокации было использование синхронно работающих двух (для восстановления вектора горизонтальной скорости ветра) или трех (для восстановления вектора полной скорости перемещения частиц) радиолокаторов. Схема их работы для первого упомянутого случая представлена на Рисунке 3.9.

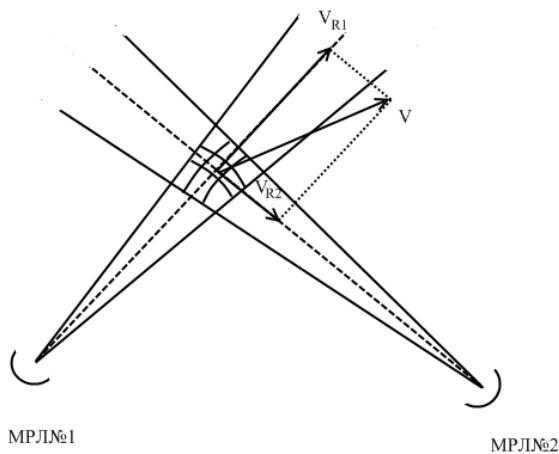


Рисунок 3.9 - Схема измерения вектора горизонтальной скорости ветра при помощи двух радиолокаторов

На ней хорошо просматривается главный недостаток предлагаемой схемы – несовпадение разрешаемых объемов. Фактически каждый из радиолокаторов измеряет скорость частиц, усредненную по своему элементу разрешения, имеющему лишь небольшую общую часть с объемом, внутри которого измеряет скорость частиц другой радиолокатор. Разрешающая способность ДМРЛ-С по дальности составляет 150 м [42]. Линейные размеры элемента разрешения в плоскости, перпендикулярной оси антенны, зависят от дальности. При ширине луча 1 градус они уже на расстоянии 20 км более чем в три раза превосходят разрешение вдоль оси антенны, и доля общей части объема становится меньше 50%.

В этих условиях особую важность обретает точность совмещения центров элементов разрешения обоих радиолокаторов, что составляет трудную техническую проблему. На расстоянии 50 км угол, под которым один радар видит разрешаемый элемент другого, равный при пересечении антенных лучей под углом 90 градусов 150 м, составляет $\theta = \frac{0,15}{50} = 0,003 \text{ rad} = 0,17 \text{ grad}$.

Следовательно, точность, с которой должна позиционироваться антенна, получается менее 0,1 градуса, т.е. меньше технических возможностей системы привода ДМРЛ-С [42]. Кроме того, очень малой оказывается площадь

пересечения рабочих зон радиолокаторов, в которой могут вестись подобные измерения. Так, для восстановления полного вектора скорости частиц при помощи трех синхронно работающих радиолокаторов, она составляет менее 25% всей зоны обзора каждого из них (Рисунок 3.10).

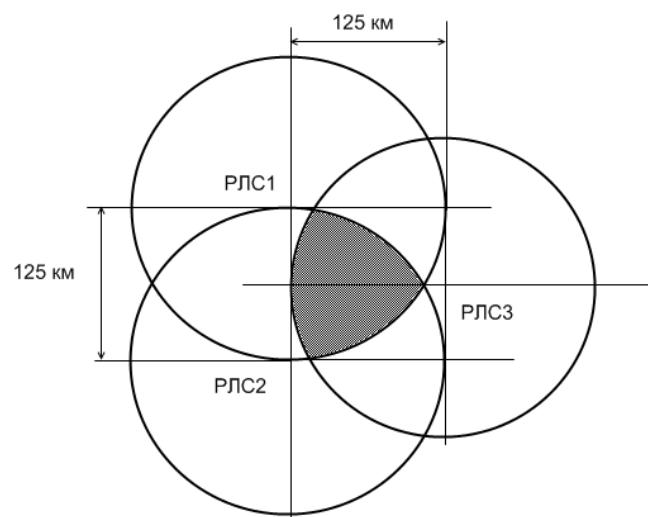


Рисунок 3.10 - Схема пересечения рабочих зон радиолокаторов для восстановления полного вектора скорости частиц

Перечисленных трудностей достаточно, чтобы зачислить данный метод в разряд малопригодных для практического применения. Более перспективным представляется использование многопозиционной системы типа «один радиолокатор – несколько приемников», принципы работы которой были определены еще в прошлом веке [132].

Система «один радиолокатор – несколько приемников»

В ее основе лежит известный принцип работы бистатической системы [162; 163; 164] (Рисунок 3.11)

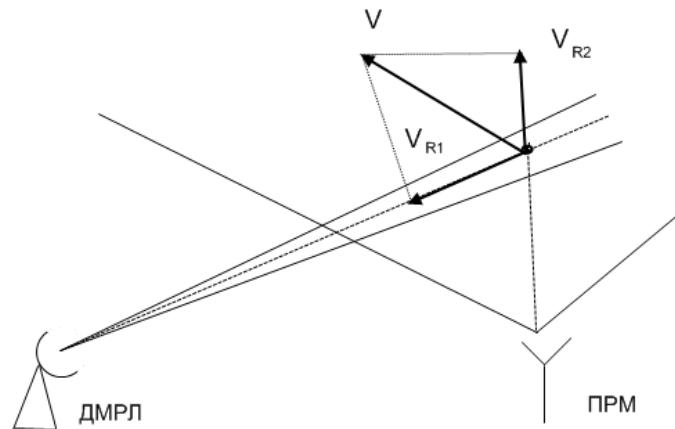


Рисунок 3.11 - Схема работы бистатической системы «радиолокатор – приемник»

На входе приемника будет действовать сигнал

$$u_{BX} = F(t - t_0, \varphi, \theta) \cos\left(\omega(t - t_0) + \frac{2\pi(r_1 + r_2)}{\lambda}\right), \quad (3.73)$$

где $F(t, \varphi, \theta)$ - функция, описывающая диаграмму направленности антенны и форму зондирующего импульса;

r_1 и r_2 - расстояния от центра разрешаемого объема до радиолокатора и выносного приемника соответственно;

t_0 - момент излучения зондирующего импульса.

Через интервал времени T_{II} , равный периоду следования сигналов радиолокатора, выражение для входного сигнала приемника принимает вид

$$u_{BX} = F(t - t_0 - T_{II}, \varphi, \theta) \cos\left(\omega(t - t_0 - T_{II}) + \frac{2\pi(r_1 + r_2)}{\lambda} + \frac{2\pi(V_{r1} + V_{r2})T_{II}}{\lambda}\right), \quad (3.74)$$

где V_{r1} и V_{r2} - радиальные скорости цели относительно радиолокатора и приемника соответственно.

Очевидно, что имеющий место доплеровский сдвиг частоты пропорционален сумме проекций скорости ветра на две различные оси. Поскольку в радиолокаторе оценивается одна из этих величин (проекция на ось «ДМРЛ-С – цель»), нетрудно получить оценку проекции на вторую ось «приемник – цель».

Схема формирования сигнала, поступающего на вход выносного приемника, представлена на Рисунке 3.12.

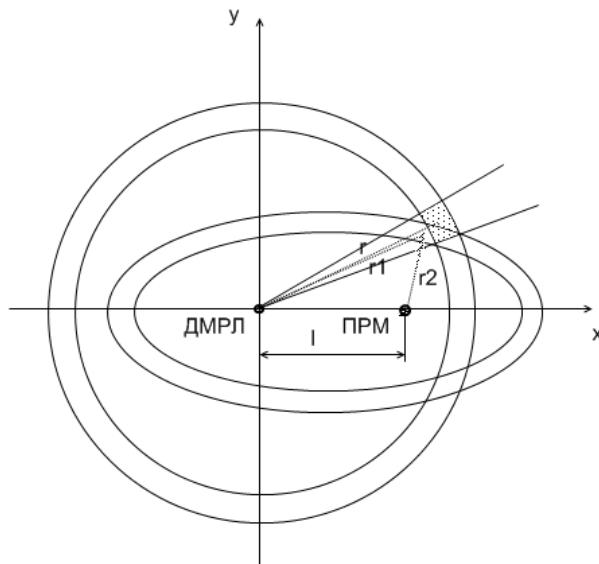


Рисунок 3.12 - Схема формирования сигнала, поступающего на вход выносного приемника

Очевидно, что угол разворота одного разрешаемого объема относительно другого значительно меньше того, что имел место в ранее рассматриваемом случае синхронной работы двух радиолокаторов, и никогда не достигает 90 градусов. В результате значительно увеличивается доля общего объема элементов разрешения.

Если приемников будет два, мы имеем возможность восстановить полный вектор скорости частиц наблюданной метеоцели. Главное условие при этом заключается в том, чтобы оси, на которые проецируется данный вектор, образовывали систему координат, обеспечивающую требуемую точность измерений. Если ограничить угол пересечения указанных осей интервалом 30-120 градусов, получаем схему расположения рабочей зоны системы, представленную на Рисунке 3.13 в виде заштрихованного участка [54].

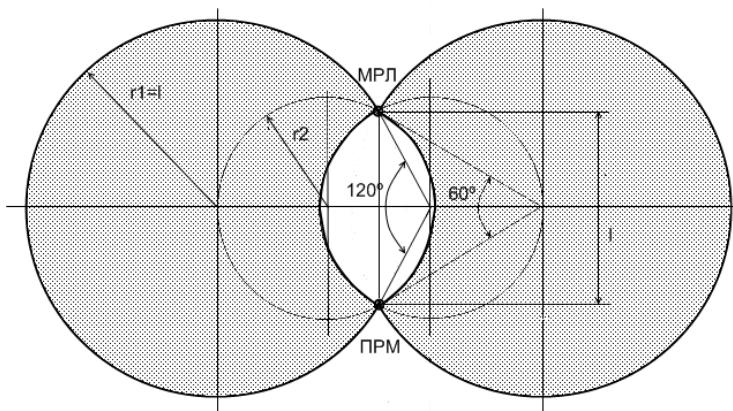


Рисунок 3.13 - Схема расположения рабочей зоны бистатической системы «Радиолокатор (МРЛ) – приемник (ПРМ)»

Как видно из данного рисунка, между радиолокатором и приемником существует «слепая» зона, внутри которой измерения невозможны. Обойти эту трудность можно установкой еще одного приемника таким образом, чтобы две образующиеся при этом «слепые» зоны не пересекались. Другой способ – «правильное» расположение радиолокатора и приемника относительно контролируемой зоны. Так, для авиации, для которой рассматриваемые измерения наиболее актуальны, она представляет собой узкую полосу длиной около 20 км. Это тот участок полета, где самолет снижается при посадке до высоты менее 500 м. Пример расположения радиолокатора и приемника относительно контролируемой зоны для обеспечения полетов авиации представлен на Рисунке 3.14.

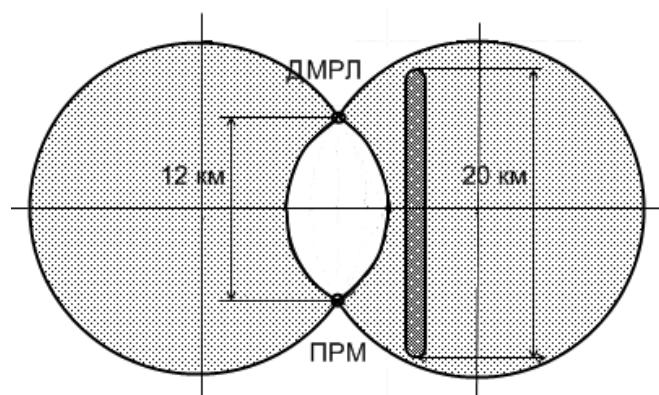


Рисунок 3.14 - Пример взаимного расположения радиолокатора (ДМРЛ), приемника (ПРМ) и контролируемой зоны

Поскольку извлечение полезной информации из данных, поставляемых приемниками, возможно только после их совместной обработки с данными радиолокатора, указанные радиотехнические средства необходимо объединить в единую систему. При этом нормально функционировать она будет при выполнении целого ряда условий, основными из которых являются:

1. Работа всей системы должна быть синхронизирована относительно зондирующих импульсов радиолокатора. Данная задача может иметь много вариантов решения от передачи синхроимпульса по кабелю до использования самого зондирующего импульса. В любом случае каких-либо существенных трудностей на пути ее решения не предвидится;

2. Поскольку оценивается средняя радиальная скорость частиц, требуется обеспечить когерентность всей системы. При этом синхронизации работы гетеродинов приемника и радиолокатора в случае построения последнего по схеме «истинной когерентности», что имеет место в ДМРЛ-С, не требуется. Достаточно, чтобы стабильность гетеродинов приемника была не хуже тех, что установлены в радиолокаторе, что также не является сложной технической задачей;

3. Из-за того, что антенна приемника должна обеспечивать прием отраженного сигнала со всех направлений, под которыми ей виден излученный импульс, ее приходится делать слабонаправленной. Следовательно, метеорологический потенциал системы «радиолокатор – приемник» становится значительно меньше, чем у радиолокатора, что ограничивает область ее применения только целями с хорошей радиолокационной отражаемостью. Именно это, надо полагать, являлось основным препятствием на пути внедрения в жизнь рассматриваемого метода. Для преодоления данного затруднения предлагалась, например, применять «погоню за импульсом» [162], т.е. слежение лучом приемной антенны за излученным сигналом. Такое возможно только при электронном сканировании, т.е. с помощью очень сложной, а, главное, очень дорогостоящей системы.

Однако теперь эта трудность легко преодолевается за счет большой эквивалентной мощности сложного сигнала, излучаемого радиолокатором ДМРЛ-С. Например, для случая, представленного на Рисунке 3.14, ширину луча антенны приемника в горизонтальной плоскости Θ_Γ для охвата всей контролируемой зоны следует считать равной примерно 100 градусам. Ее ширину в вертикальной плоскости оценим, исходя из условия обеспечения наблюдений на высоте 500 м, являющейся граничной для слоя, в котором данные о структуре ветра интересуют авиацию. Минимальная дальность, на которой должен наблюдаваться весь указанный слой атмосферы равен в нашем случае 5 км. Следовательно, ширина луча антенны в угломестной плоскости должна быть равна

$$\Theta_B = \frac{500}{5000} = 0,1 \text{ рад} \approx 6 \text{ град.} \quad (3.75)$$

В качестве второго приемника логично использовать то же устройство, что используется в радиолокаторе. Тогда, за счет ухудшения характеристик антенны приемника (у ДМРЛ-С ширина луча равна 1 градусу в обеих плоскостях) метеорологический потенциала системы «радиолокатор – приемник» будет снижен относительно потенциала радиолокатора в $\Theta_\Gamma \Theta_B = 600$ раз. Если метеорологический потенциал ДМРЛ-С, работающего в основном режиме, равен 307 дБ/м, то для системы «радиолокатор – приемник» он уменьшается на $10\lg 600 = 28$ дБ. Оценим минимальное значение радиолокационной отражаемости Z_{\min} метеоцелей, которые будет способна видеть рассматриваемая система. На ослабление сигнала в данном случае влияет только расстояние от цели до приемника. Максимальное ее значение R_{\max} равно, как следует из Рисунка 3.14, расстоянию от приемника до верхнего края контролируемой зоны. Примем его равным 20 км. Тогда, при условии превышения мощностью сигнала на входе приемника $P_{\text{пр}}$, как минимум, вдвое мощности шума $P_{\text{ш}}$, получаем

$$Z_{\min} = 10\lg \left(\frac{R_{\max}^2}{\Pi_M} \left(\frac{P_{\text{пр}}}{P_{\text{ш}}} \right)_{\min} \right) \cong -20 \text{ дБ.} \quad (3.76)$$

Величина элемента разрешения, по объему которого усредняются данные о радиальной скорости частиц, в рассматриваемом случае полностью определяется

параметрами радиолокатора – длительностью импульса на выходе системы обработки и шириной луча антенны. Максимального значения она достигается на предельной дальности наблюдений, которая уже была определена равной 20 км.

3.4 РАСПОЗНАВАНИЕ ОПАСНЫХ ЯВЛЕНИЙ, СВЯЗАННЫХ С ОСАДКАМИ

Осадки сами по себе не являются опасными явлениями. Однако могут возникать случаи, когда один из параметров, их характеризующих, превышает некоторое критическое значение, провоцируя тем самым возникновение опасной ситуации. К упомянутым параметрам относятся:

1. Интенсивность осадков. Осадки повышенной интенсивности препятствуют полетам авиации, ухудшают видимость и могут приводить к таким опасным явлениям как сель, сход лавин и т.д.
2. Сумма осадков за выбранный промежуток времени. По их величине прогнозируют наступление засухи или избыточного увлажнения почвы, увеличение уровня воды в водоемах выше критической отметки и т.п. опасные явления.

В обоих случаях необходимо оценивать интенсивность осадков, которую метеорологический радиолокатор способен измерять непосредственно. Далее рассмотрим, как влияет на данные измерения наличие у радиолокатора когерентного и поляризационного режимов работы.

Измерение интенсивности осадков в когерентных радиолокаторах

Главное достоинство доплеровского радиолокатора – способность измерять величину радиальной составляющей скорости наблюдаемой цели – может быть использовано для оценивания интенсивности осадков. Такую возможность обеспечивает зависимость скорости падения капли от ее размера [102]. Необходимым условием проведения подобных измерений является строго вертикальное положение антенны радиолокатора – только в этом случае гравитационная оставляющая скорость частиц становится для него радиальной, а

ее горизонтальные составляющие никак не влияют на получаемый результат (Рисунок 3.15).

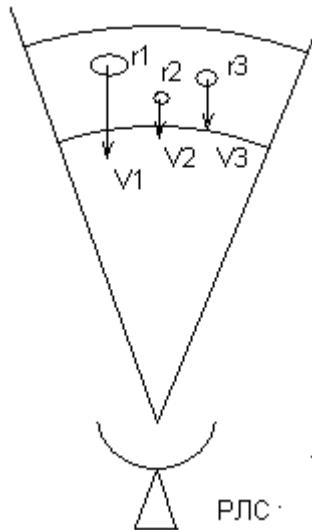


Рисунок 3.15 - Схема измерения интенсивности осадков когерентными РЛС.

Алгоритм оценивания сводится к следующему [118]:

1. по полученной реализации сигнала, отраженного от исследуемого объема пространства, рассчитывается (например, методом дискретного преобразования Фурье) энергетический спектр принимаемого сигнала $p(\omega)$, где $\omega = 2\pi f$, f - частота гармоники;
2. энергетический спектр пересчитывается в распределение капель по размерам $n(r)$ в единице объема, где r - радиус капли;
3. вычисляется интенсивность осадков в соответствии с формулой

$$I = \frac{4}{3} \pi \int_0^{\infty} v(r) n(r) r^3 dr, \quad (3.77)$$

где $v(r)$ - скорость падения капли радиусом r .

По точности данный метод превосходит все другие радиолокационные методы и сравним с точностью традиционных приборов измерения осадков – осадкометров и плювиографов. Главный его недостаток – невозможность оценивать параметры осадков на большой территории. Поэтому использовать большие и дорогостоящие радиолокаторы в таком режиме экономически невыгодно. Однако эти измерения могут быть полезны для набора статистических

данных о структуре осадков в месте установки радиолокатора. По результатам их обработки в дальнейшем возможна корректировка применяемых алгоритмов.

Обобщая сказанное, можно заключить, что при оперативной работе метеорологического радиолокатора, которая, как правило, производится на углах места антенны от 0 до 30 градусов, когерентный режим при измерении осадков не дает каких-либо значительных преимуществ. Однако сейчас разработаны специальные, основанные на рассмотренном методе измерения, гораздо менее габаритные и более дешевые радиолокаторы, работающие в соответствии с приведенным алгоритмом. Пример тому – автоматический бесконтактный осадкометр «Капля».

Измерение интенсивности осадков в поляриметрических радиолокаторах

Возможно двоякое использование информации о поляризационных параметрах отражений от осадков для измерения их интенсивности:

1. Коррекция по их значениям традиционных алгоритмов, основанных на измерении мощности принимаемого сигнала.
2. Применение новых алгоритмов.

Рассмотрим оба направления.

Коррекция традиционных алгоритмов по оценкам поляризационных параметров принятого сигнала

В основе традиционного метода измерения интенсивности осадков лежит взаимосвязь мощности принимаемых отражений от количества и размера составляющих цель частиц, выражаясь формулой

$$P = \frac{\Pi_M}{R^2} Z \eta, \quad (3.78)$$

где Π_M - метеорологический потенциал радиолокатора, полностью определяемый его техническими характеристиками;

R - расстояние до цели;

η - коэффициент, учитывающий ослабление радиоволн;

Z - радиолокационная отражаемость осадков.

В соответствии с ней мощность принятого сигнала пересчитывается в радиолокационную отражаемость. Далее используется известная [141] формула, устанавливающая зависимость радиолокационной отражаемости и интенсивности осадков I

$$Z = AI^b, \quad (3.79)$$

где Z измеряется в $\text{мм}^6/\text{м}^3$, I в $\text{мм}/\text{час}$;

A и b - коэффициенты.

Авторами формулы предложены следующие значения последних: $A = 200$, $b = 1,6$ при наблюдении жидких осадков; $A = 1780$, $b = 2,21$ при наблюдении снегопада; $A = 398$, $b = 2,21$ для тающего снега [141].

Таким образом, точность рассматриваемых измерений оказывается существенно зависящей от наших знаний об агрегатном состоянии частиц, составляющих наблюданную метеоцель и может достигать величины 300% [8]. Неполяриметрический радиолокатор не способен выдать требуемую информацию. В этом случае решение о виде осадков приходится принимать на основании времени года и температуры воздуха у поверхности земли.

Поляризационные измерения являются надежным средством решения поставленной проблемы. В основе поляриметрических методов селекции осадков лежит эффект сжатия капли воды в вертикальной плоскости при ее свободном падении в атмосфере [143]. Это приводит к тому, что ее отражательные способности для волн с горизонтальной поляризацией больше, чем для вертикально поляризованных. Следовательно, дифференциальная отражаемость данной цели положительна и тем больше, чем больше отношение полуосей эллипса вращения, в который она превращается. Поскольку степень деформации капли прямо пропорциональна ее размерам, по величине дифференциальной отражаемости можно судить о среднем размере частиц, составляющих осадки.

Твердые же частицы либо имеют форму, близкую к сферической (например, град.) либо вытянутую форму, но хаотично ориентированы в пространстве

(снежная крупа). И в том и в другом случае ни одна из поляризованных волн не получает преимущества. В итоге дифференциальная отражаемость созданных такими целями отражений близка к нулю дБ.

Сказанное хорошо иллюстрируется Рисунком 3.16, на котором просматривается зона таяния, пересекаемая лучом радиолокатора на дальности 50 км. Она имеет вид кольца с повышенным относительно окружающего фона значением рассматриваемого параметра. Такое поведение сигнала обусловлено наличием в этой области градин, которые в результате таяния покрылись слоем воды достаточной толщины, чтобы проявила себя его деформация при падении. Выше этой зоны гидрометеоры находятся в твердом состоянии, а ниже растаявшие частицы распадаются на мелкие капли. И в том и в другом случаях создаваемые ими эхо имеют дифференциальную отражаемость, близкую к нулю дБ.

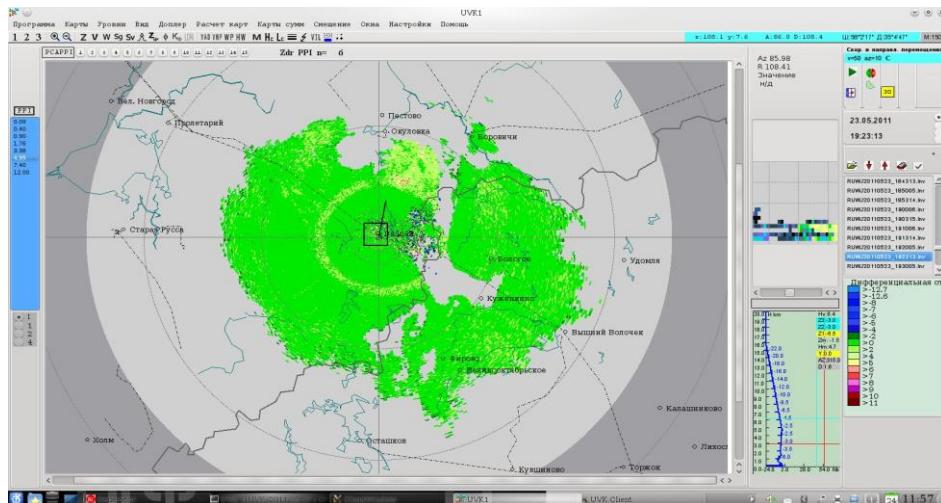


Рисунок 3.16 - Карта распределения дифференциальной отражаемости принимаемого сигнала в коническом разрезе, сделанном радиолокатором ДМРЛ-С в г. Валдай 23.05.2011 в 19 час 23 мин при угле места антенны 5 градусов

Наиболее хорошие результаты дает использование сразу нескольких параметров. Так, еще на заре применения поляризационных измерений в метеорологической радиолокации было установлено, что совместное

рассмотрение радиолокационной и дифференциальной отражаемостей [64] позволяет идентифицировать следующие метеоцели:

- сухой град, снег, которым соответствуют малое значение отражаемости Z и близкое к нулю значение дифференциальной отражаемости Z_{DR} ;
- мокрый град – большое значение Z и повышенное значение Z_{DR} ;
- слабый или средний дождь – средние значения обоих параметров;
- сильный дождь, ливень – большие значения обоих параметров.

Повысить надежность правильной идентификации осадков позволяет привлечение еще одного поляризационного параметра – модуля коэффициента взаимной корреляции поляризационных составляющих сигнала. На Рисунке 3.17 приведена карта его распределения для того же объекта и в тот же момент времени, что и карта на исунке 3.16.

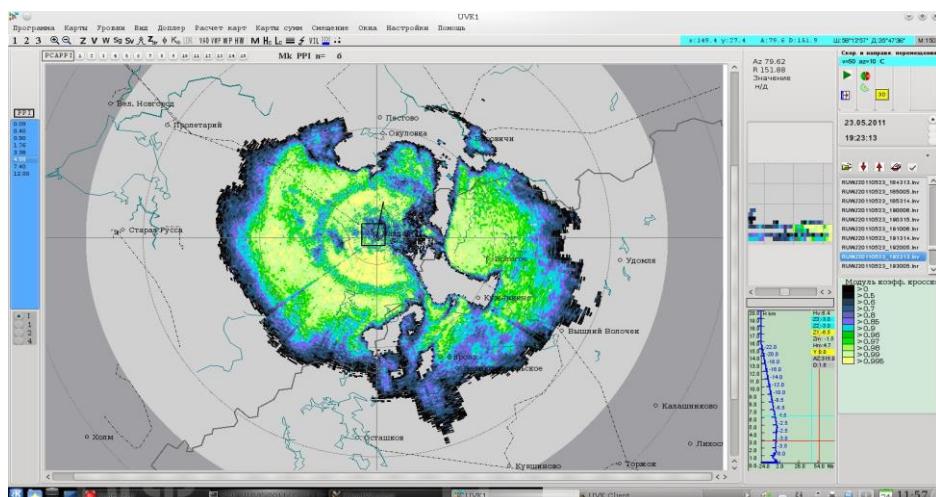


Рисунок 3.17 - Карта распределения модуля коэффициента взаимной корреляции поляризационных составляющих принимаемого сигнала в коническом разрезе, сделанном радиолокатором ДМРЛ-С в г. Валдай 23.05.2011 в 19 час 23 мин при угле места антенны 5 градусов

Одно из свойств данного параметра – иметь меньшее значение для тающих гидрометеоров (0,85-0,97), чем для частиц, находящихся в твердом или жидким агрегатном состоянии (0,98-1). На приведенном рисунке оно проявляется в виде кольца, аналогичного тому, что на Рисунке 3.16, но только более широкого.

Разница в ширине колец объясняется тем, что изменение модуля коэффициента взаимной корреляции происходит во всей зоне таяния частиц, а дифференциальной отражаемости только в той ее части, где слой водной пленки достигает определенной толщины.

К сожалению, в отечественных программах вторичной обработки информации не предполагается идентификации жидких, твердых и смешанных осадков. Поэтому иллюстрировать возможности поляриметрического радиолокатора в этом плане приходится чужими примерами [208]. На Рисунке 3.18 представлены карты радиолокационной отражаемости (а), дифференциальной отражаемости (б), модуля коэффициента взаимной корреляции (в) и природных явлений (г) одного итого же облачного массива.

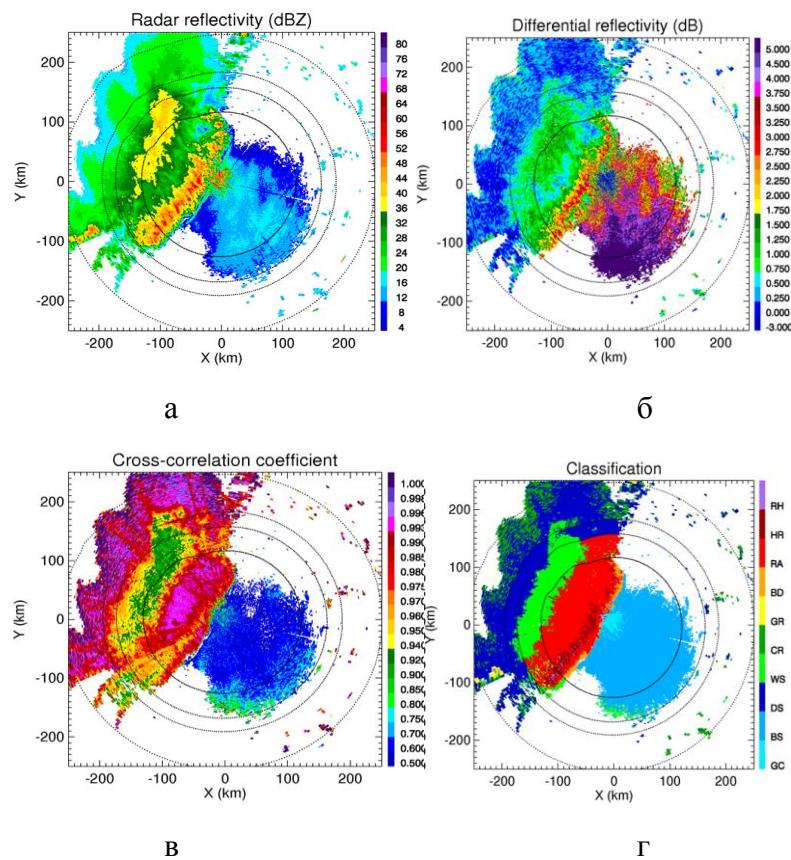


Рисунок 3.18 - Карты радиолокационной отражаемости (а), дифференциальной отражаемости (б), модуля коэффициента взаимной корреляции (в) и природных явлений (г)

В его передней части наблюдается узкая полоса с большими (до 52 дБ) значениями радиолокационной отражаемости и большой (до 3 дБ) дифференциальной отражаемостью. Это позволяет трактовать данный участок как ливневые осадки (HR на карте явлений). Далее следует область, характеризующаяся средними значениями обеих отражаемостей (24-28 дБ для радиолокационной и около 0,5 для дифференциальной). Следовательно, это умеренный дождь, обозначаемый символом RA на Рисунке 3.18г.

Наибольший интерес представляет третья зона на расстоянии примерно 120 км от радиолокатора. Соответствующая ей радиолокационная и дифференциальная отражаемости возрастают до величин 40-44 дБ и 1-1.5 дБ соответственно. Можно предположить, что в этом месте имеет место дождь большой интенсивности, но на Рисунке 3.18г явно видно уменьшение модуля коэффициента взаимной корреляции в этой области до величин 0,85, что однозначно идентифицирует ее как мокрый снег (WS).

И, наконец, в тылу облачной системы просматривается зона с пониженней радиолокационной отражаемостью (около 20 дБ), нулевыми значениями дифференциальной отражаемости и большими значениями модуля коэффициента взаимной корреляции. Это сухой снег (DS).

Таким образом, поляризационные измерения помогают в наблюдаемом метеообразовании выделить зоны жидких, смешанных и твердых осадков, для каждой из которых должны применяться свои коэффициенты в формуле (3.79).

Кроме того, Рисунок 3.18 демонстрирует еще одну способность поляриметрического радиолокатора – различать цели неметеорологического происхождения. В частности, на карте погодных явлений имеются еще две зоны: GC - местных предметов (местников) и BS – биологических рассеивателей. В данном случае они идентифицированы по низкому, 0,7 и меньше, значению модуля коэффициента взаимной корреляции и специфическим значениям дифференциальной отражаемости. В зоне биологических рассеивателей она

принимает очень большие значения выше 5 дБ, а местники характеризуются ее отрицательным значением.

В радиолокаторах, не измеряющих поляризационные характеристики принимаемого сигнала, за осадки принимаются все цели, расположенные ниже уровня 1 км над землей. В соответствии с этим, указанные области были бы им распознаны как осадки. Следующим шагом была бы попытка измерить их интенсивность, что привело бы к дополнительным ошибкам в получаемых результатах.

Методы измерения интенсивности осадков, использующие поляризационные характеристики отраженного сигнала

На данный момент существуют два метода измерения интенсивности осадков с помощью поляризационных характеристик принимаемого сигнала [53]:

1. по дифференциальной фазе;
2. по уровню ослабления сигнала, когда коэффициент ослабления определяется по дифференциальной фазе и дифференциальной отражаемости.

Главное достоинство обоих методов – измерение неэнергетических параметров сигналов, из чего следует:

1. получаемые оценки нечувствительны к частичному блокированию луча. Такая ситуация часто возникает при попадании в диаграмму направленности антенны малоразмерного местного предмета (например, заводской трубы или вышки электропередач). При этом полностью антенный луч не перекрывается, но область за мешающим предметом частично затеняется, что приводит к значительным ошибкам при расчетах по формуле (3.79);

2. на точность измерений не влияет слой воды, льда или снега, образующийся на поверхности радиопрозрачного укрытия, которым, как правило, защищаются антенны метеорологических радиолокаторов;
3. отпадает необходимость в проведении такой трудоемкой и сложной процедуры как калибровка приемного тракта радиолокатора.

Метод измерения интенсивности осадков по дифференциальной фазе отражений

Метод основан на том, что в силу эллиптичности капель дождя среда распространения радиоволн становится анизотропной и постоянные распространения вертикальной и горизонтальной составляющих сигнала оказываются различными. Это приводит к тому, что появляется разность набегов фазы этих волн, зависящая от размера и концентрации элементарных отражателей, т.е. от интенсивности осадков.

Сама разность фаз поляризационных составляющих сигнала несет информацию об условиях распространения по всему пути следования волны, т.е. носит интегральный характер. Поэтому для расчетов применяют не само ее значение Φ_{DR} , а удельный дифференциальный фазовый сдвиг

$$K_{DR} = \frac{d\Phi_{DR}(R)}{dR}, \quad (3.80)$$

где R – расстояние до цели.

По полученным оценкам данной величины рассчитывают интенсивность осадков по формуле [143]

$$I = C_1(K_{DR})^\beta, \quad (3.81)$$

где I измеряется в мм/час;

K_{DR} – в град/км;

C_1 и β – коэффициенты, равные при длине волны радиолокатора 11 см 20,35 и 0,866 соответственно.

Аналогично формуле (3.79) коэффициенты в выражении (3.81) могут корректироваться с целью адаптации программы обработки к месту установки радиолокатора и к сложившейся на момент наблюдений метеорологической обстановке [198].

Точность данного метода выше, чем при расчете по мощности отражений, но область его применения существенно ограничена осадками большой интенсивности, частицы которых достаточно велики, чтобы заметно

деформироваться при падении. В слабых и средних ливнях он практически не работает.

Метод измерения интенсивности осадков по уровню ослабления волны

Суть метода состоит в том, чтобы использовать зависимость затухания отраженной частицами волны A от интенсивности осадков I на пути ее распространения [198]. Данная зависимость имеет вид

$$I = c_1(t)c_2(\lambda)A^{1,03}, \quad (3.82)$$

где $c_1(t)$ и $c_2(\lambda)$ - коэффициенты, зависящие от температуры частиц t и длины волны несущего колебания локатора λ .

Величину ослабления на дальности r находят из профиля радиолокационной отражаемости $Z(r)$ в соответствии с выражением

$$A(r) = \frac{[Z(r)]^b C(b, PIA)}{J(r_1, r_2) + C(b, PIA)J(r, r_2)}, \quad (3.83)$$

где

$$J(r_1, r_2) = 0,46b \int_{r_1}^{r_2} [Z(x)]^b dx; \quad (3.84)$$

$$J(r, r_2) = 0,46b \int_r^{r_2} [Z(x)]^b dx; \quad (3.86)$$

$$C(b, PIA) = \exp(0,23bPIA) - 1; \quad (3.87)$$

r_1 и r_2 - начальная и конечная дальности участка с наблюдаемыми осадками;

b - постоянный коэффициент, величина которого лежит в пределах 0,6-0,9 и зависит от длины волны радиолокатора;

PIA - интегральное ослабление на участке, занятом осадками.

Величина PIA нам заранее неизвестна. Она вычисляется, исходя из следующей зависимости от дифференциальной фазы

$$PIA(r_1, r_2) = \alpha [\Phi_{DP}(r_1) - \Phi_{DP}(r_2)], \quad (3.88)$$

где величина постоянной α определяется частотой несущего колебания и может корректироваться в процессе измерений по получаемым оценкам дифференциальной отражаемости Z_{DP} на участке луча от r_1 до r_2 . [51].

Точность метода при наблюдении осадков в радиусе до 100 км в два раза выше, чем при измерении по величине радиолокационной отражаемости [198]. В связи с этим велико желание внедрить его на сети штормооповещения РФ. Препятствием тому может служить сложный зондирующий НЧМ импульс, применяемый в радиолокаторе ДМРЛ-С, влияние которого на точность получаемых оценок еще не исследовалось.

В следующей главе будут приведены некоторые результаты, полученные в этой области.

3.5 РАСПОЗНАВАНИЕ ГРАДА

Методы распознавания града некогерентными радиолокаторами

В основу методик обнаружения града в радиолокаторах МРЛ-1, МРЛ-2 и МРЛ-5 была положена взаимосвязь между водосодержанием наблюданного облака и мощностью создаваемых им отражений. В частности, измерялась величина отражаемости Z_3 слоя метеоцели, расположенного на высоте 2-2,5 км выше нулевой изотермы. Совместно с высотой верхней границы метеообразования это позволяло, аналогично случаю обнаружения гроз, сформировать Y-параметр

$$Y = H_{max} \lg Z_3 , \quad (3.89)$$

по превышению которым некоторого порогового значения судили об уровне градоопасности облака. Был разработан еще целый ряд критериев, основанных на оценивании уже упомянутых параметров сигнала. Подробно и полностью они изложены в известном руководящем документе [141]. На их основе были созданы следующие методы обнаружения града, предназначенные для практического применения [0]:

- оценки вероятности выпадения града по значению максимальной отражаемости облака Z_m и верхней границы зоны с отражаемостью более 45 дБ ΔH_{45} ;

- разделения ливневых, градоопасных, градовых и сверхмощных градовых облаков по значениям Z_m и ΔH_{45} , с помощью специального графика;
- разделения градовых и градоопасных облаков с использованием произведения Z_m и ΔH_{45} ;
- карт горизонтального сечения на высоте 3 км над уровнем изотермы 0°C;
- карт верхней границы изолиний Z_{45} и Z_{50} ;
- карт двухуровневого сечения;
- оценка градоопасности облаков по водосодержанию.

Все перечисленные методы используют для идентификации града косвенные характеристики, из-за чего не обеспечивали достаточную надежность правильного обнаружения. Это привело к созданию двухволнового метода, в котором в качестве критериев выбраны:

1. разность ΔZ отражаемостей участка облака, фиксируемых на длинах волн 3,2 см ($Z_{3,2}$) и 10 см (Z_{10}) не должна превышать 3 дБZ;
2. максимальная отражаемость облака на длине волны 10 см Z_{10m} должна быть не менее 45 дБZ.

Главным недостатком такого метода следует признать необходимость иметь для его реализации специальный радиолокатор, способный вести одновременные наблюдения на двух несущих частотах. Единственным известным образцом такого оборудования является радиолокатор МРЛ-5 [107]. Современные метеорологические радиолокаторы, включая отечественный ДМРЛ-С, подобными свойствами не обладают. Поэтому на современном этапе замены устаревших МРЛ-5 на новую технику особенно актуален вопрос разработки новых методов прогнозирования и обнаружения града, для чего поляризационные измерения открывают широчайшие перспективы.

Кроме идентификации градовых и градоопасных облаков радиолокация при проведении активных воздействий решает еще одну важную задачу – определение области засева реагентом. По правилам, разработанным для некогерентной аппаратуры, это область определяется относительно навеса радиоэха [113], четкое

определение контуров которого не всегда возможно. В решении данной задачи поляризационные измерения также могут оказать существенную помощь.

Распознавание града поляриметрическим радиолокатором

Для своевременного распознавания градовой опасности радиолокатор должен вовремя обнаружить, что в некоторой области облака, расположенной выше нулевой изотермы в районе восходящего потока воздуха сформировались градины достаточно большого размера, чтобы не растаять полностью во время падения. Следовательно, поставленная задача распадается на более мелкие:

1. определить область восходящего потока;
2. идентифицировать твердое агрегатное состояние гидрометеоров в верхней части этой области;
3. оценить средний диаметр градин в указанной области для сравнения его с некоторым пороговым значением.

Все они могут быть решены с помощью поляризационных измерений.

Область восходящего потока легко определяется на карте модуля коэффициента кросс-корреляции поляризационных составляющих сигнала. Указанный параметр имеет свойство иметь значения 0,99-1,0 для гидрометеоров, находящихся в жидком или твердом агрегатном состоянии, и 0,9-0,98 для тающих твердых частиц. Это делает его хорошим идентификатором зоны таяния. Пример ее наблюдения приведен на Рисунке 3.19а. Одновременно на Рисунке 3.19б показано, как данная зона у этого же объекта наблюдается на карте радиолокационной отражаемости. Очевидно, что сравнение не в пользу последнего.

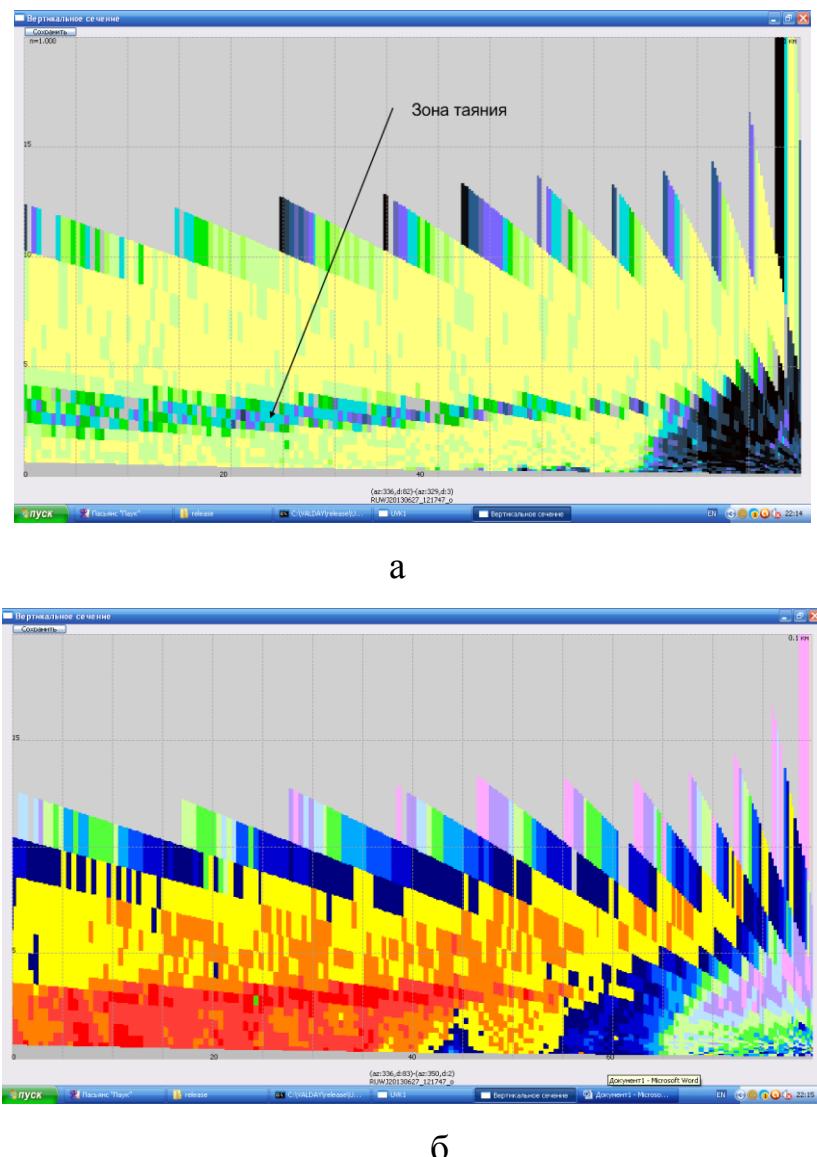


Рисунок 3.19 - Пример наблюдения зоны таяния на картах модуля коэффициента кросс-корреляции (а) и радиолокационной отражаемости (б)

Восходящий поток на таких картах виден в виде разрыва в полосе таяния. Такой разрыв означает, что гидрометеоры при прохождении нулевой изотермы не тают, что возможно только в одном случае – они движутся снизу вверх и переходят из жидкого агрегатного состояния в твердое. Для проверки данного утверждения достаточно сопоставить карты коэффициента кросс-корреляции и среднего значения спектра радиальных скоростей одного и того же объекта наблюдения в один момент времени. В случае правильности сделанного предположения зоны разрыва в полосе таяния на первой и вертикального

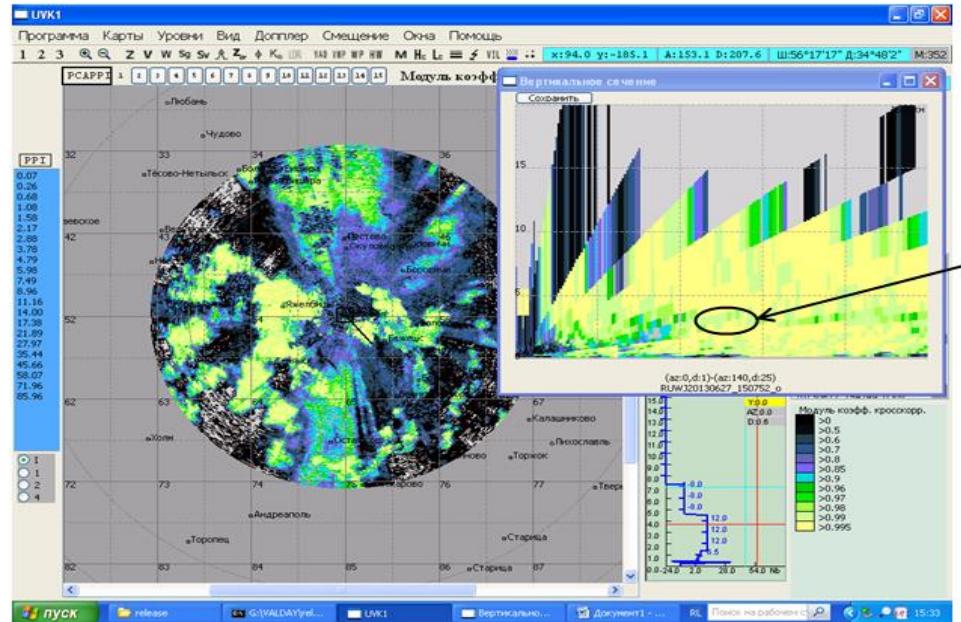
восходящего потока на второй совместятся. Сложность при этом состоит в идентификации восходящего потока спектральными методами, ибо надежное измерение вертикальных скоростей возможно только на небольших расстояниях при наблюдениях под углами места антенны не менее 15 градусов. Иначе говоря, нужно отыскать случай наблюдения грозового или градового облака на расстоянии около 20 км от радиолокатора.

Такой случай представился 27 июня 2013 года, когда грозовое облако наблюдалось на интервале дальностей от 3 до 20 км. Существование грозы в период времени 12-18 часов подтверждается данными метеостанции «Бологое», представленными на Рисунке 3.20 [83]

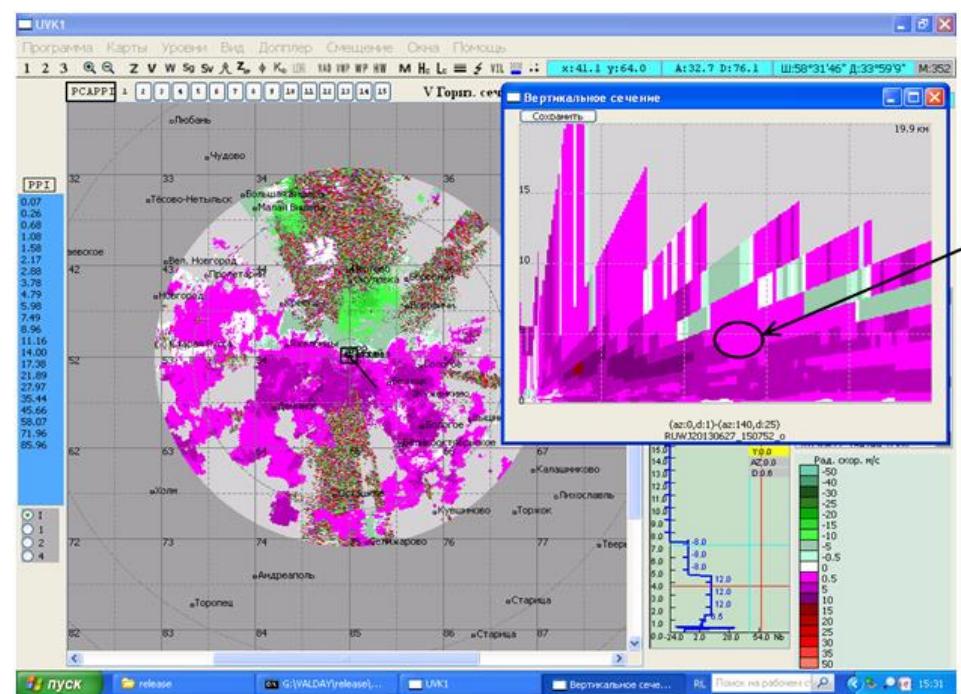
АРХИВ ПОГОДЫ в Бологое																
Время (UTC), дата	Ветер (напр., м/ с)	Видим.	Явления	Облачность	T (C)	Td (C)	f (%)	Te (C)	Tes (C)	Комфортность	P (rPa)	Po (rPa)	Tmin (C)	Tmax (C)	R (мм)	S (см)
00 27.06	Ю	2	10 км {гроза}	8/0 [Ac cast]	+19.5	+16.7	84	+22	+22	комфорт	1017.6	995.8				
03 27.06	В	1	4000 м дымка	4/0 [Ci fib]	+19.7	+17.2	85	+23	+25	комфорт	1018.4	996.6	+17,5			
06 27.06	Ю	1	10 км	4/0 [Ci fib]	+25.4	+18.1	64	+30	+39	душно	1018.2	996.8	+17,5			
09 27.06	ЮВ	2	10 км слабый линейной дождь	9/9 600 м [Cb cap]	+24.4	+19.4	74	+30	+31	очень душно	1018.5	997.0				
12 27.06	В	2	20 км в посл. час гроза [линейные осадки]	8/5 600 м [Cb cap Ci fib]	+25.8	+16.4	56	+29	+35	душно	1018.1	996.7				
15 27.06	ЮВ	2	10 км гроза без осадков	8/8 600 м [Cb cap]	+25.1	+17.1	61	+29	+30	душно	1017.6	996.2		0.3		
18 27.06	С	1 (11)	4000 м в посл. час гроза [линейные осадки]	9/8 600 м [Sc Ac cast]	+17.9	+17.3	96	+19	+19		1018.8	996.8		+27.9	11	
21 27.06	В	1	4000 м дымка	3/3 600 м [Sc]	+16.8	+16.3	97	+18	+18		1019.7	997.6				

Рисунок 3.20 - Данные метеостанции «Бологое» за 27.06.2013 г.

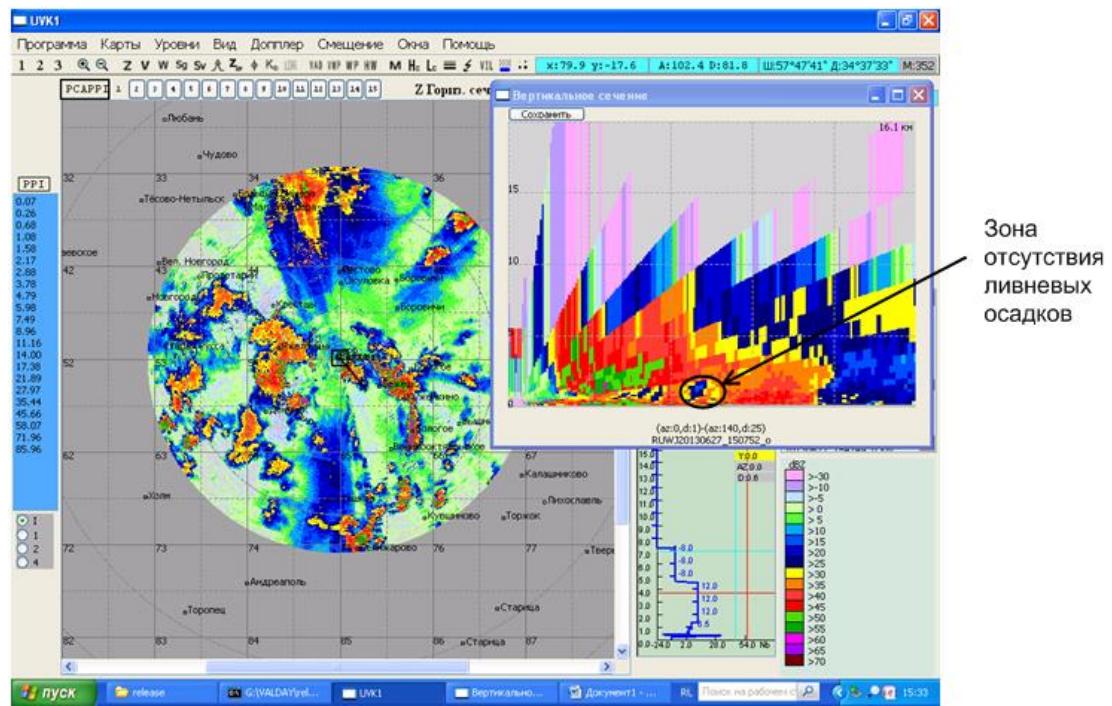
Карты, полученные радиолокатором ДМРЛ-С, установленным в г. Валдай, в 15 часов 07 минут представлены на Рисунке 3.21.



а



б



в

Рисунок 3.21 - Карты коэффициента кросс-корреляции (а), среднего значения спектра радиальных скоростей частиц (б) и радиолокационной отражаемости (в), полученные 27.06.2013 г. в 15-07 радиолокатором ДМРЛ-С в г. Валдай

На вертикальном разрезе, сделанном на карте коэффициента кросс-корреляции (Рисунок 3.21а), хорошо видна полоса таяния, расположенная на высоте 3 км, и разрыв в ней на интервале дальностей 11-14 км. Наличие в этой области восходящего потока воздуха подтверждается измерениями среднего значения спектра радиальных скоростей частиц (Рисунок 3.21б). На указанной дальности на высотах, соответствующих углу места антенны примерно 15 градусов и более, наблюдается локальное уменьшение оцениваемого параметра. Единственное объяснение такому явлению – наличие вертикальной составляющей скорости ветра, направленной вверх и уменьшающей в этой области суммарное положительное значение радиальной скорости.

Косвенное подтверждение существованию восходящего движения воздуха имеется на карте радиолокационной отражаемости (Рисунок 3.21в), на которой в рассматриваемом интервале дальностей видна область резкого снижения интенсивности осадков. Скорее всего, осадков там вообще нет, а наличествующие

отражения вызваны скоплением листьев, пыли и мусора, поднятых ветром. На это указывает и значения коэффициента кросс-корреляции, полученные в этой области на малых углах места – они лежат в пределах 0,5-0,7, что соответствует целям, имеющим неметеорологическое происхождение.

Следующий шаг – идентификация крупного града в верхней части восходящего потока. То, что градины в интересующей нас области пространства достигли больших размеров, показывает обычная радиолокационная отражаемость. Обычно ее значение в этом случае переваливает за 40 дБ. Однако подобную и даже большую мощность отражений способны создать и жидкие капли больших размеров. Получить информацию об агрегатном состоянии гидрометеоров в наблюдаемом нами участке пространства позволяют оценки дифференциальной отражаемости Z_{DR} . Поскольку форма градин близка к сферической, ее значения в данном случае лежат в пределах от -1 до 1 дБ [143]. Правда, дифференциальную отражаемость такой же величины могут создавать жидкие капли малого размера. Однако при этом их радиолокационная отражаемость Z будет значительно меньше 40 дБ. Крупные же капли, способные создать эхо подобной мощности имеют ярко выраженную эллиптическую форму, что обуславливает дифференциальную отражаемость, значительно превышающую указанные выше пределы.

Таким образом, сочетание малых значений Z_{DR} и больших Z однозначно показывает наличие в исследуемом объеме градин. Остается сделать третий шаг – оценить их диаметр. Эта информация может быть получена при помощи той же самой радиолокационной отражаемости через известную формулу [141]

$$Z = \sum_{i,\nu} d_i^6 \left| \frac{m_i^2 - 1}{m_i^2 + 2} \right|^2 \quad (3.90)$$

где d_i – диаметр частиц, m – показатель преломления вещества частицы, суммирование ведется по единице объема. Единственное условие применения выражения (3.84) для рассматриваемых целей – надо точно знать, что наблюдаемые градины сухие. Тогда в нее подставляется показатель преломления

льда, и оценка диаметра частиц получается однозначной. Если же мы наблюдаем тающие частицы, то надо применять показатель преломления воды, т.к. именно тонкий поверхностный слой участвует в формировании отраженной волны. Мощность создаваемого эха в этом случае оказывается в несколько раз выше, чем при наблюдении сухого града. Можно было бы попытаться учесть влияние поверхностной водяной пленки при помощи корректировочных коэффициентов, но последние будут зависеть от соотношения растаявшей и твердой частей наблюдаемых частиц. Поскольку априорная информация о данном соотношении отсутствует, получаемые оценки диаметра градин будут неоднозначными.

Убедиться в том, что наблюдаемый град сухой, дает возможность оценка коэффициента кросс-корреляции. Известно его свойство находиться в пределах 0,98-1 для частиц в жидким или твердом агрегатном состоянии и уменьшаться до величин 0,95-0,97 для тающих частиц.

При наблюдении града следует иметь в виду одну характерную особенность – в условиях мощных массивов кучевой облачности возможно появление эффекта деполяризационного ослабления [202]. Он состоит в том, что при выпадении крупного града на этапе таяния создаются отражения большой мощности и большой дифференциальной отражаемости. Это приводит к тому, что в электромагнитной волне, прошедшей через такую область пространства, нарушается равенство амплитуд между горизонтально и вертикально поляризованными составляющими излученного сигнала. В итоге, метеоцели, расположенные за данной областью создают эхо со смещенной в сторону отрицательных значений дифференциальной отражаемостью. Как правило, эффект проявляется в виде образования на карте рассматриваемого параметра «спиц» его отрицательных значений. При этом располагаться данные «спицы» могут на достаточно больших высотах, где помехи от местных предметов, единственного вида целей, способных создать отражения с отрицательной дифференциальной отражаемостью, исключены. Пример наблюдения таких зон представлен на Рисунке 3.22.

В этом случае приведенные выше рассуждения об обнаружении града при помощи поляризационных характеристик принимаемого сигнала оказываются бесполезными. Выручает здесь то, что наличие деполяризационного ослабления само по себе служит хорошим предиктором существования града. Признаком его обнаружения служит появление протяженных зон с отрицательным значением дифференциальной отражаемости на высотах более 300 м над землей.

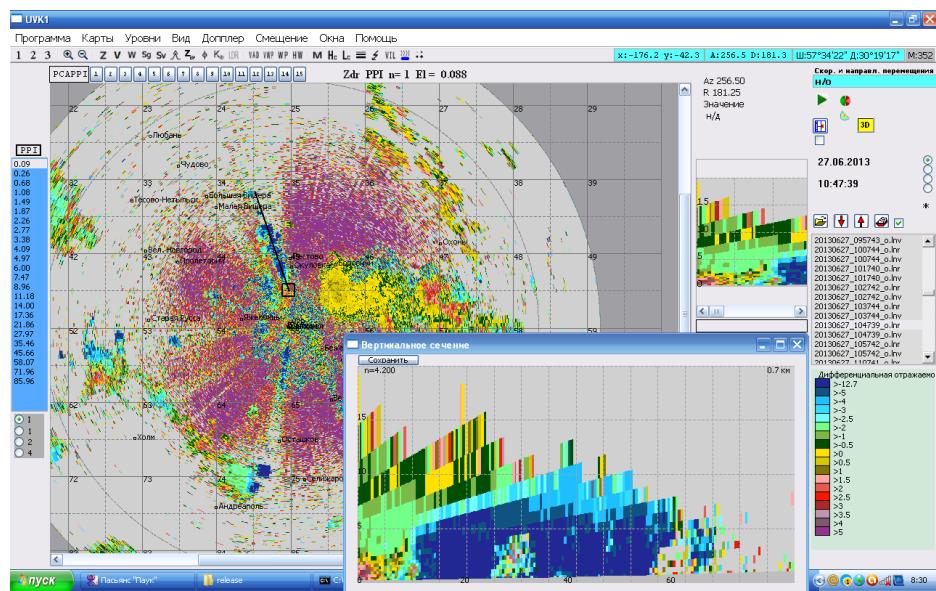


Рисунок 3.22 - Карты горизонтального и вертикального разрезов распределения дифференциальной отражаемости с наблюдаемыми на них эффектами деполяризационного ослабления

Таким образом, приходим к следующему алгоритму идентификации градоопасного облака:

1. проверяются карты дифференциальной отражаемости на наличие деполяризационного 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;

2. На карте коэффициента кросс-корреляции делаются вертикальные разрезы наблюдаемой цели. В наблюдаемых на указанных разрезах зонах таяния частиц, имеющих вид горизонтальных полос пониженного значения данного

параметра, находятся «разрывы», однозначно указывающие на наличие в этой области восходящих потоков воздуха.

3. В области, находящейся над «разрывом», т.е. выше нулевой изотермы, оценивается радиолокационная отражаемость. Если она оказывается больше 30 дБ, переходят к оценке дифференциальной отражаемости. Нахождение последней в пределах -1 - +1 дБ, указывает на существование здесь крупных градин.

4. Оценивается величина коэффициента кросс-корреляции отражений из 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.

5. По величине радиолокационной отражаемости рассчитывается диаметр сформировавшихся градин и сравнивается 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.

3.6 РАСПОЗНАВАНИЕ СМЕРЧА

Смерч – одно из опаснейших природных явлений, способное нанести большой материальный ущерб и привести к человеческим жертвам. Поэтому вопросу его своевременного распознавания и прогнозирования развития уделялось и уделяется много внимания. При этом время существования смерча относительно невелико. Это делает особенно актуальным привлечение технических средств краткосрочного и сверхкраткосрочного прогнозирования, к каковым, в первую очередь, относится метеорологический радиолокатор.

Однако до недавнего времени каких-либо эффективных инструментов распознавания смерча в распоряжении радиолокации не имелось. Руководство по производству наблюдений и применению информации с неавтоматизированных радиолокаторов [141] предлагает использовать для этого ряд косвенных признаков (циклоническое вращение, наличие «крюка» и т.д.), сообщая при этом,

что смерчи наблюдались и в отсутствии хотя бы одного из них. Внедрение в практику радиолокационных наблюдений спектральных и поляризационных наблюдений позволило изменить сложившуюся ситуацию.

Распознавание смерча при помощи оценок спектральных характеристик отраженного сигнала

Отличительной особенностью смерча является круговое вращение воздуха со скоростью 50-100 м/с размером в несколько сотен метров [141]. Это приводит к появлению в спектре отраженного им сигнала составляющих с большим доплеровским сдвигом частоты. Форма образуемого ими спектра зависит от того, как соотносятся размеры смерча с размерами разрешаемого объема радиолокатора. Если первые в несколько раз больше вторых, он идентифицируется по резкому скачку средней радиальной скорости, возникающему при сканировании антенны в горизонтальной плоскости. Схема его образования приведена на Рисунке 3.23.

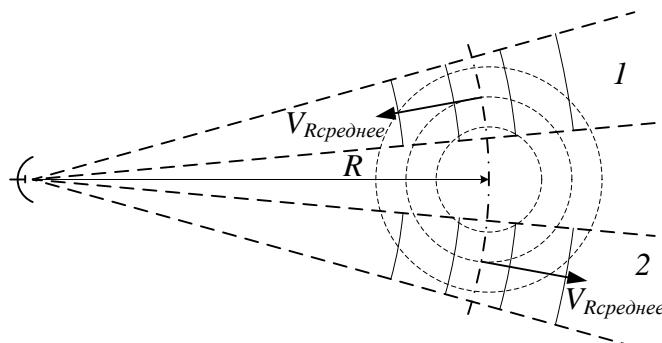


Рисунок 3.23 - Схема образования скачка средней радиальной скорости отражений от смерча при перемещении луча антенны в горизонтальной плоскости из положения 1 в положение 2

Случай подобного наблюдения смерча представлен на Рисунке 3.24 [200].

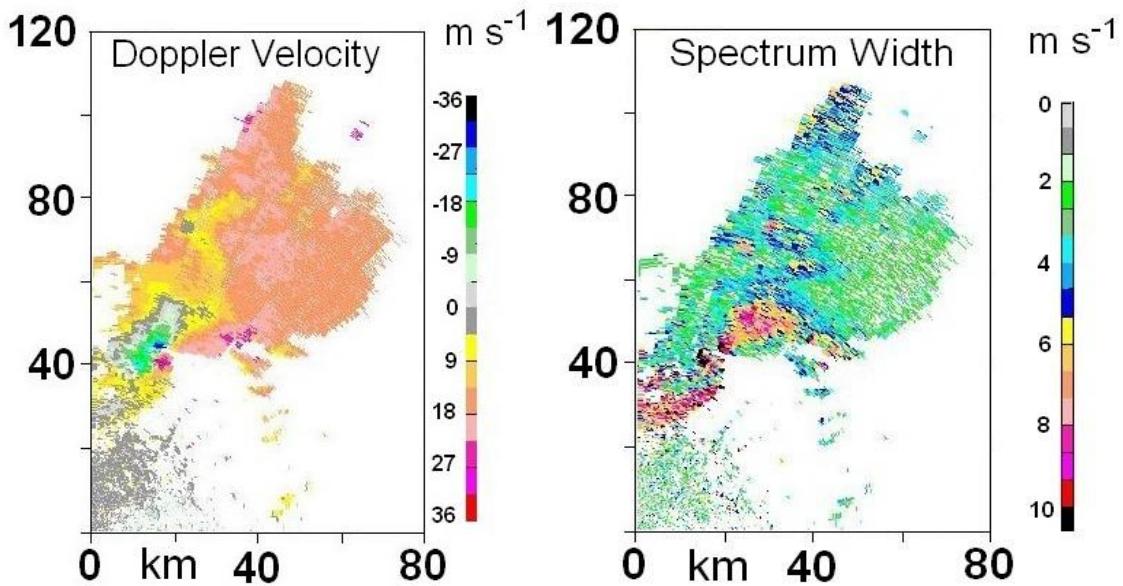


Рисунок 3.24 - Случай наблюдения смерча метеорологическим радиолокатором WSR-88D. Карта средних радиальных скоростей (слева) и ширины спектра скоростей (справа)

На карте средних радиальных скоростей отчетливо видна локальная смена знака в области с координатами 18 км к востоку и 42 км к северу от начала координат. Эта же область отмечена на карте ширины спектра скоростей резким увеличением ее значения.

В случае же примерного равенства размеров смерча и разрешаемого объема радиолокатора зафиксировать скачек средней радиальной скорости практически невозможно и единственный способ обнаружить смерч – зафиксировать область повышенного значения ширины спектра скоростей. Однако к такому же эффекту приводят и другие природные явления (например, повышенная турбулентность и сдвиг ветра). Поэтому однозначно идентифицировать смерч по одному этому симптуму невозможно.

Поскольку размер смерча составляет сотни метров, выполнение условия о том, чтобы разрешаемый объем радиолокатора был значительно его меньше, выполняется лишь на малом расстоянии от антенны. При ширине ДН 1 градус (что соответствует характеристикам ДМРЛ-С) это расстояние не превосходит 15 км. Учитывая, что дальность действия радиолокаторов в режиме «скорость» равна

125 км, можно констатировать, что обнаружение смерча с помощью спектральных характеристик принимаемого сигнала также малоэффективно.

Поднять эффективность 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.

3.7 РАСПОЗНАВАНИЕ ПЫЛЬНОЙ БУРИ

Частицы земли, поднятые в воздух ветром, способны создавать отражения, фиксируемые метеорологическим радиолокатором. При этом радиолокационная отражаемость такой цели, как показывает практика, может достигать 30 дБ, а высота верхней границы отражений достигать 6 км [161]. Таким образом, пыльные бури могут создать на экране радиолокатора изображения, подобные тем, что создаются облаками и осадками. Поэтому распознавание данного явления актуально по двум причинам:

- Во-первых, оно само по себе несет опасность людям и экономике;
- Во-вторых, вследствие ложной идентификации его как осадки, вносит ошибки в оценку количества последних за выбранный промежуток времени.

Ни некогерентный, ни доплеровский радиолокаторы неспособны отличить отражения пыльной бури от отражений других метеоцелей. Эффективными здесь могут быть только поляризационные измерения и, прежде всего, оценка модуля коэффициента взаимной корреляции поляризационных составляющих принимаемого сигнала. Из-за того, что элементарные отражатели в рассматриваемом случае имеют неправильную форму, флуктуации принимаемых отражений вызываются не только их взаимным перемещением, но еще и их вращением. Последнее приводит к нарушению синхронности изменений

амплитуды горизонтально и вертикально поляризованных волн и соответствующему падению корреляции между ними. Как известно, уменьшение указанного выше параметра ниже уровня 0,8 говорит о том, что наблюдается неметеорологическая цель.

Вторым параметром, который необходимо принимать во внимание в рассматриваемом случае, является дифференциальная отражаемость. Вследствие хаотической ориентации частиц пыльной бури, его значение будет ограничено значениями от -1 до 1 дБ.

И, наконец, третьим характерным признаком данного опасного явления следует считать большую его протяженность в горизонтальной плоскости в сочетании с непрерывным распределением радиолокационной отражаемости по высоте от нуля до максимального значения. Очевидно, что минимальное значение линейных размеров цели, при которых она может быть принята за пыльную бурю, в большой степени зависит от конкретных условий, сложившихся в месте установки радиолокатора.

Таким образом, можно констатировать, что одновременное выполнение трех условий:

- значение модуля коэффициента взаимной корреляции меньше 0,8;
- нахождение оценки дифференциальной отражаемости в пределах -1-+1 дБ;
- занятие целью достаточно большой площади, превышающей некое минимальное значение, в горизонтальной плоскости, начиная от самых нижних слоев,

однозначно указывают на то, в зоне обзора радиолокатора находится пыльная буря.

3.8. РАСПОЗНАВАНИЕ СКОПЛЕНИЯ ПТИЦ И НАСЕКОМЫХ

Птицы и насекомые могут представлять собой большую опасность для воздушных судов. Поэтому с самого начала развития метеорологической радиолокации как самостоятельной области знаний идентификации мест их

скопления уделялось много внимания. С течением времени эта проблема становится все более актуальной. Международной организацией гражданской авиации [139] и Министерством гражданской авиации [140] разработаны руководства по орнитологическому обеспечению безопасности полетов. Постоянно проводятся исследования орнитологической обстановки на аэродроме [109] ищаются новые пути решения данной проблемы [114].

Особая роль в этой области отводится радиолокационной технике [117] ввиду того, что она позволяет вести непрерывные наблюдения за большими площадями пространства независимо от времени суток и сложившейся метеорологической обстановки. Особенно большой опыт по радиолокационному наблюдению за птицами накоплен в Израиле, где для этих целей выделен радиолокатор МРЛ-5, на базе которого в течение многих лет ведутся научные исследования [38; 39]. При этом наиболее полно разработаны алгоритмы распознавания рассматриваемых целей для некогерентного метеорологического радиолокатора, основанные на результатах межобзорной обработки сигнала – радиоэхо птиц распознается по прямолинейной траектории, направление которой, как правило, не совпадает с направлением ветра. Кроме того, для радиолокатора МРЛ-5 в силу его двухканальности существует уникальная возможность распознавать птиц по признаку превышения отражений на длине волны 10 см над отражениями, получаемыми на трехсантиметровой волне.

Введение когерентного режима работы дает еще один признак идентификации наблюданной цели как птиц – наличие в спектре принимаемого сигнала низкочастотной составляющей, обусловленной взмахами их крыльев. Однако возможность надежного выделения данных частот в общем спектре сигнала представляется трудно реализуемой на практике задачей. Частота указанных флюктуаций составляет 2-24 Гц [38]. Следовательно, для того, чтобы выделить их в спектре отражений, надо обеспечить разрешающую способность по частоте не хуже 2 Гц. Примерно оценить указанный параметр можно по формуле

$$\Delta f = \frac{F_{\Pi}}{N}, \quad (3.91)$$

где F_{Π} – частота повторения зондирующих импульсов;

N – число импульсов в пачке, получаемой от точечной цели.

Минимальная частота повторения импульсов у радиолокатора ДМРЛ-С в режиме «скорость», в котором оцениваются спектральные параметры принимаемого сигнала, равна 1 кГц. Следовательно, для достижения заданной разрешающей способности по частоте требуется набирать пачку величиной не менее 500 импульсов. Обеспечить это можно только при скорости вращения антенны 1 оборот в 3 минуты, т.к. ширина ДН антенны у рассматриваемого радиолокатора равна 1° . При требовании обновления информации каждые 10 минут, такой режим невозможен. Следовательно, он годится только для исследовательской работы, но никак не для оперативной.

Кроме того, рассмотренные выше методы годятся для распознавания птиц. Распознавать же отражения от насекомых некогерентные и доплеровские радиолокаторы практически неспособны [160].

Гораздо более надежный критерий распознавания дает использование поляризационных характеристик принимаемого сигнала. Прежде всего, это модуль коэффициента взаимной корреляции его поляризационных составляющих. Как показывает опыт наблюдений, его значение меньше 0,5 – это хороший идентификатор того, что наблюданная цель имеет неметеорологическое происхождение. Пример наблюдения подобной цели приведен на Рисунке 3.25.

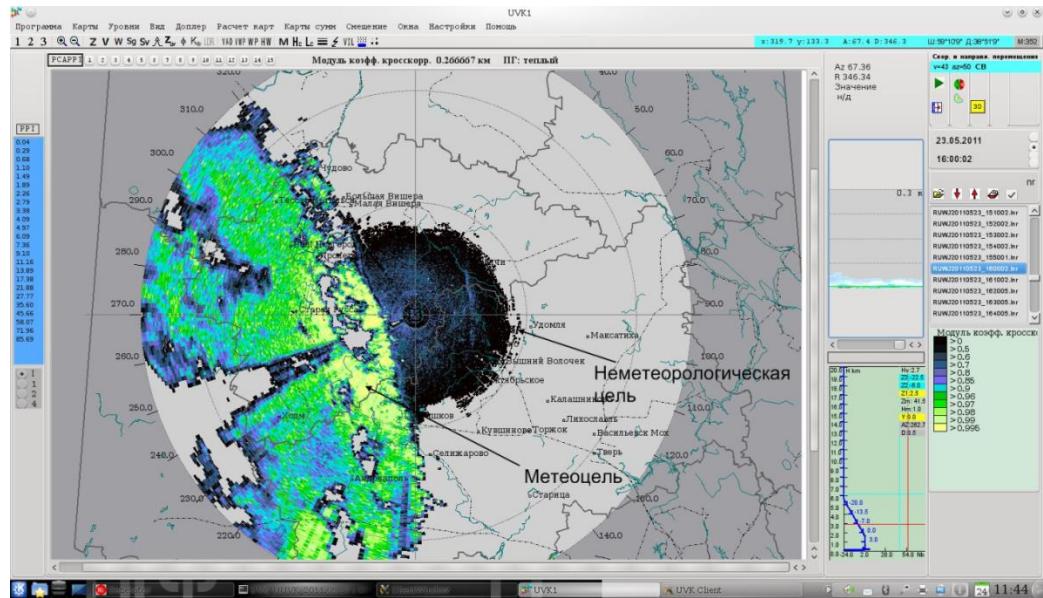


Рисунок 3.25 - Карта распределения модуля коэффициента взаимной корреляции поляризационных составляющих принимаемого сигнала по горизонтальному разрезу на высоте 0,3 км

Следующий параметр, на который следует обратить внимание, – дифференциальная отражаемость. Отличительная особенность птиц и насекомых – большое отношение их горизонтального размера к вертикальному. Это приводит к тому, что величина рассматриваемого параметра у отраженного от них сигнала значительно превосходит значение 5 дБ, максимально возможное для водяных капель. Тот же разрез, что и на Рисунке 3.25, но теперь для дифференциальной отражаемости, можно видеть на Рисунке 3.26. Значение параметра на приведенной карте достигает 15 дБ.

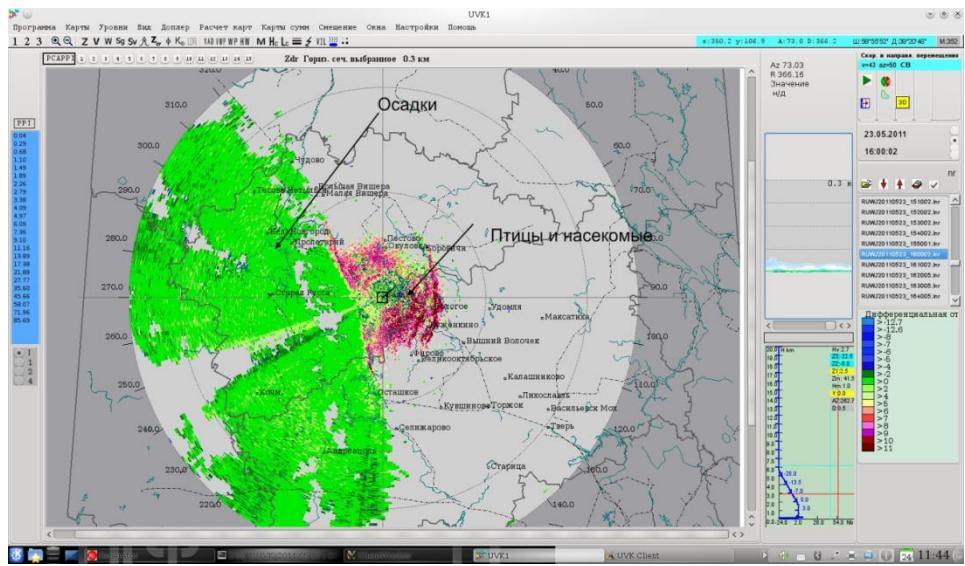


Рисунок 3.26 - Карта распределения дифференциальной отражаемости принимаемого сигнала по горизонтальному разрезу на высоте 0,3 км

Обращает на себя внимание то, что использование двух рассмотренных параметров позволяют однозначно трактовать наблюданную цель как птиц или насекомых. Иными словами, потребность в дополнительной информации типа данных межобзорной обработки отпадает. Остается только нерешенным вопрос об отдельной идентификации этих двух групп целей, но с точки зрения безопасности полетов это не имеет большого значения. Остается надеяться, что дальнейшие исследования в этой области позволят выявить характерные признаки, отличающие их друг от друга.

Подвести итог текущему подразделу можно следующим утверждением – одновременное выполнение двух условий для отражений, полученных от элемента разрешения радиолокатора, а именно:

- значение модуля коэффициента взаимной корреляции поляризационных составляющих сигнала менее 0,5;
 - значение дифференциальной отражаемости более 5 дБ,
- идентифицирует наблюданную в этом элементе разрешения цель как скопление насекомых или птиц.

ВЫВОДЫ

1. Применяемый в радиолокаторе ДМРЛ-С метод VAD позволяет определять только среднее значение вектора скорости ветра в некотором слое окружающего пространства. Осреднение получаемых оценок проводится при этом по всей площади зоны обзора. Для краткосрочного и сверхкраткосрочного прогнозов, средством получения которых служит метеорологический радиолокатор, данной оценки недостаточно. Гораздо больший интерес в этом смысле представляет пространственное распределение в этом слое значений скорости ветра, усредненных по гораздо меньшим площадям. Предлагаемый метод позволяет получить такие оценки. Выведена формула, устанавливающая взаимосвязь их точности с размерами области осреднения, параметрами обзора и характеристиками радиолокатора.

2. Более перспективным представляется применение для целей восстановления пространственной структуры скорости ветра метода многопозиционной радиолокации. В частности, система «радиолокатор – приемник» может обеспечить данной информацией зону взлета – посадки самолетов с разрешающей способностью не хуже 300×150 м. Расчеты показывают, что при применении радиолокатора ДМРЛ-С совместно с приемником, идентичным тому, что установлен в самом радиолокаторе, работа системы остается эффективной даже при наличии отражателей в виде среднего тумана.

3 Использование поляризационных характеристик принимаемых отражений способно значительно повысить точность определения интенсивности осадков. Правда, данное утверждение ограничено рядом условий:

применение новых методов эффективно только в теплый период года, когда осадки в основном жидкие.

метод, основанный на оценках дифференциальной фазы, работоспособен только в условиях осадков большой интенсивности.

Следовательно, в холодный период года, что существенно для условий России, остается только традиционный метод Маршалла-Пальмера. Однако и в этом случае поляризационные измерения способны увеличить точность получаемых результатов за счет определения агрегатного состояния частиц наблюданной метеоцели, что позволяет правильно выбрать коэффициенты в формуле пересчета радиолокационной отражаемости в интенсивность осадков.

4. Привлечение оценок поляризационных параметров принимаемых отражений позволяет перейти от косвенных характеристик градоопасности облаков к непосредственным – выявлению зон формирования града; определению среднего размера его частиц; нахождению области восходящего потока на больших расстояниях. В сочетании с прежними критериями, разработанными для некогерентных радиолокаторов, это улучшает вероятностные характеристики правильного обнаружения рассматриваемого опасного явления.

3. Спектральные измерения оказываются полезными при наблюдении смерчей. Его распознавание при помощи оценок среднего значения спектра дает хорошие результаты на небольших расстояниях, когда размер элемента разрешения радиолокатора не превосходит размера смерча. На больших расстояниях применимы оценки ширины спектра, но эффективность их оказывается очень малой. Поднять эффективность могут поляризационные параметры, а именно модуль коэффициента взаимной корреляции поляризационных 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.

4. Применение дифференциальной отражаемости и модуля коэффициента взаимной корреляции поляризационных составляющих принимаемого сигнала

расширяет список обнаруживаемых явлений еще двумя наименованиями – пыльная буря и скопление птиц и насекомых.

4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА НЕКОТОРЫХ МЕТОДОВ РАСПОЗНАВАНИЯ ОПАСНЫХ ЯВЛЕНИЙ В МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ РАДИОЛОКАЦИИ

Выводы теоретических исследований, сделанные в предыдущих главах, требуют экспериментального подтверждения. Однако далеко не для всех рассмотренных опасных явлений оно возможно. Яркий пример тому – смерч. Появление его на территории России настолько редко, что за время, прошедшее с момента установки первого радиолокатора ДМРЛ-С в 2011 году, автору известен только один случай фиксации смерча – 22 мая 2013 года. В 14 часов 00 минут по Московскому времени он был зафиксирован в г. Ефремов Тульской области, которому нанес значительные разрушения. Одновременно радиолокатор ДМРЛ-С, установленный в г. Брянск, наблюдал процесс образования смерча, но за 2 минуты до его обрушения на г. Ефремов не идентифицировал наблюдаемое явление как смерч (Рисунок 8.1) [149].

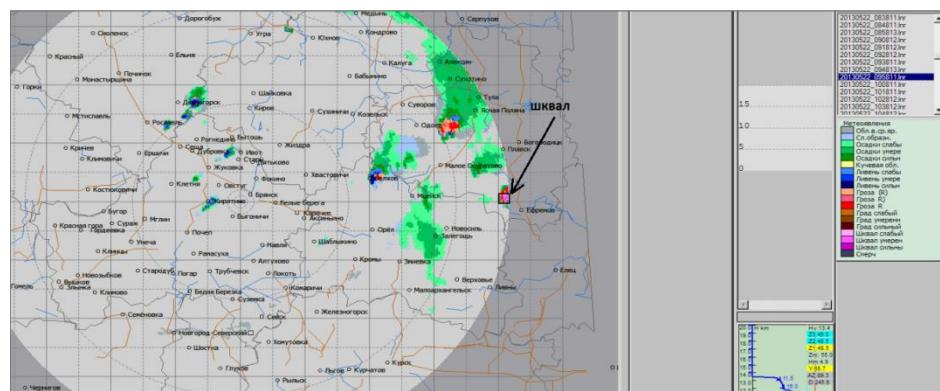


Рисунок 4.1 - Карта явлений погоды, полученная радиолокатором ДМРЛ-С в г. Брянск в 13-58 МСК

С другой стороны, при исследовании радиолокационного изображения конвективной суперячейки, имевшей место 27 июня 2013 года [55], был обнаружен резкий перепад значений радиальной скорости частиц, свидетельствующий о существовании в этом месте смерча (Рисунок 4.2). Однако

никаких подтверждений этому в данных наземных метеорологических станций отыскать не удалось.

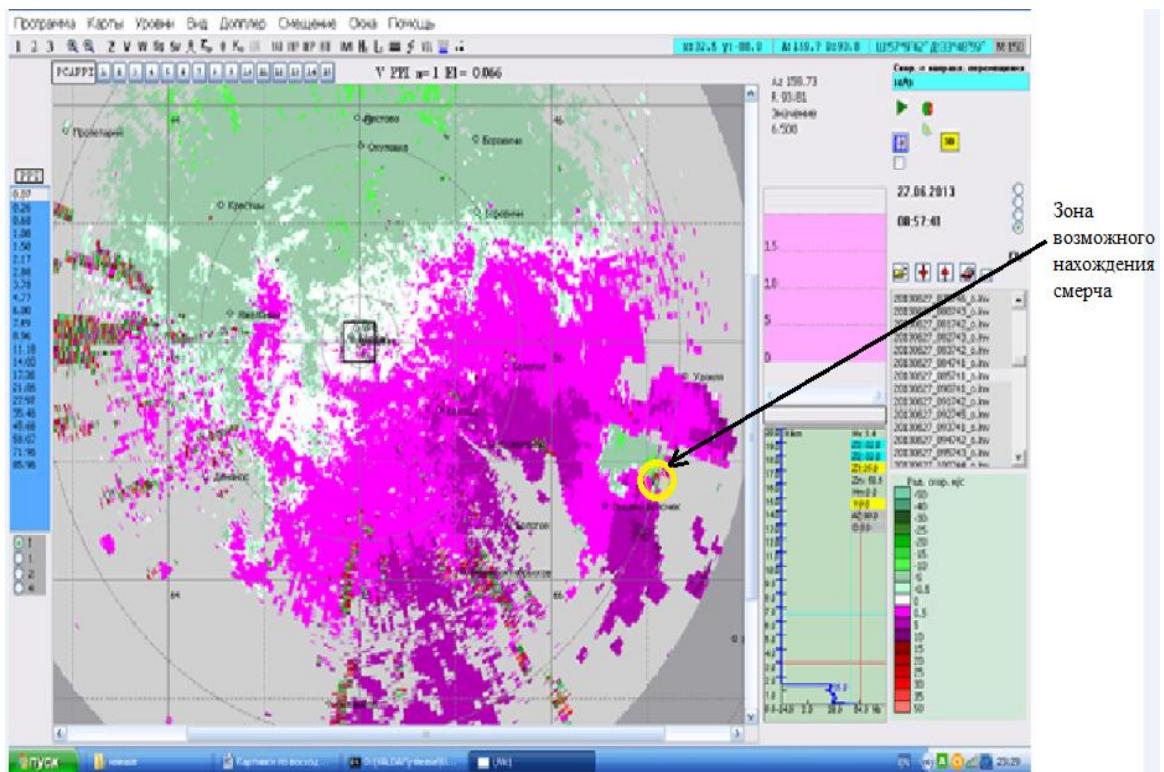


Рисунок 4.2 - Карта средних значений спектра радиальных скоростей частиц, полученная радиолокатором ДМРЛ-С в г. Валдай Новгородской области 27.06.2013 г. в 08-57 GMT

Все это говорит о том, что, во-первых, надеяться на радиолокационное обнаружение смерчей при существующей системе вторичной обработки информации не приходится, и, во-вторых, смерч настолько локальное явление, что при имеющей место плотности расположения метеостанций может быть легко оставлен незамеченным.

Еще хуже обстоит дело с пыльными бурями, микропорывами и скоплениями птиц и насекомых. Для постановки эксперимента по эффективности новых методов их обнаружения требуется проведение специальных научно-исследовательских работ. Поэтому в распоряжении автора остаются только сдвиг ветра [16; 167; 73], осадки [61] и град [56], проверке распознавания которых посвящены следующие разделы.

4.1 ПРОВЕРКА МЕТОДА РАСПОЗНАВАНИЯ ОПАСНОГО СДИГА ВЕТРА

Первый вопрос, который возникает при постановке проблемы о проверке новой методики – с чем сравнивать получаемые данные? В случае сдвига ветра в качестве эталона применима информация аэрологического зондирования. Достаточно полную информацию о данных измерениях удалось найти на сайте Масачусетского университета (США) [27].

Поскольку в распоряжении автора имелись только данные радиолокатора ДМРЛ-С, установленного в г. Валдай Новгородской области, аэрологическая информация бралась со станции «Бологое», отстоящей от него на расстояние 45 км (Рисунок 4.3). Так как радиус пространственной корреляции параметров ветра составляет не менее 60 км [4], сравнение данных следует считать корректным.

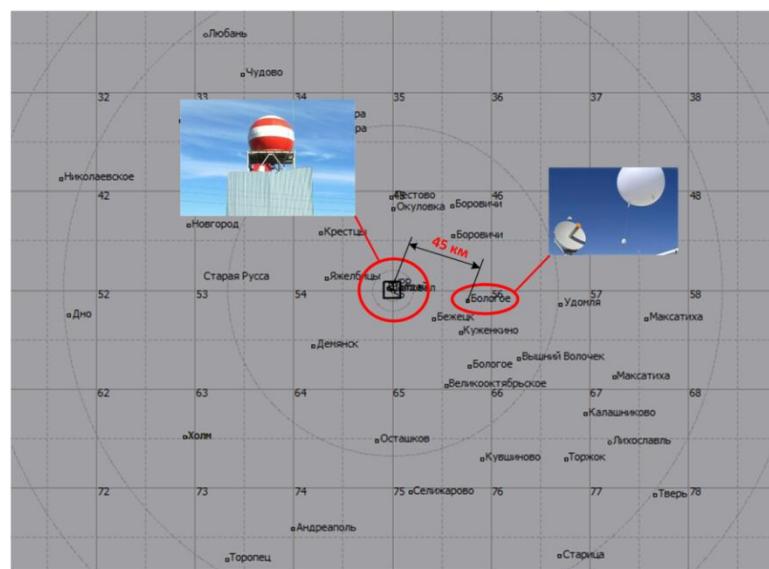


Рисунок 4.3 - Взаимное расположение радиолокатора ДМРЛ-С в г. Валдай и аэрологической станции «Бологое»

Второй вопрос – насколько корректны данные, получаемые в специфических условиях, при которых спектр отражений становится двухмодальным? Он вызван тем, что в радиолокаторах для оценивания спектральных параметров сигнала применяются определенные процедуры, разработанные в предположении выполнения некоторых условий. Очевидно, что

появление второго максимума сюда не включалось. Поэтому для проведения дальнейших исследований необходимо убедиться в том, что радиолокатор выдает неискаженную информацию.

Исследование применимости стандартных процедур оценки спектральных параметров сигнала при сдвиге ветра

В метеорологических радиолокаторах для оценивания спектральных характеристик сигнала в подавляющем числе случаев и, в частности, в ДМРЛ-С применяется метод парных импульсов (МПИ) [178]. Метод основывается на том, что спектр отраженного метеоцелью сигнала имеет Гауссову форму. Считается, что именно эта функция наилучшим образом описывает реальную форму спектра рассматриваемых отражений. Поведение получаемых при помощи данного метода оценок для случаев, не соответствующих принятому допущению, уже исследовалось [62]. Результаты показали хорошую устойчивость метода к данным отклонениям. Однако исследования ограничивались спектрами только с одним максимумом. Двухмодальные же спектры не рассматривались. Поэтому, прежде всего, определим, как на работу МПИ влияет появление второго максимума [50; 52].

Считаем, что энергетические спектры каждой из составляющих имеют Гауссову форму

$$S_i(\omega) = A_i s_i(\omega) = \frac{A_i}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} \exp\left(-\frac{(\omega-\omega_{0i})^2}{2\sigma_i^2}\right), \quad (4.1)$$

где A_i – мощность;

ω_{0i} и σ_i – среднее значение и ширина спектра i -ой составляющей сигнала;

$s_i(\omega)$ – ее нормированный по мощности энергетический спектр.

Оценим приблизительно результаты расчета параметров спектра путем подстановки в соответствующие формулы значений математического ожидания оценок корреляционной функции [193]. Для математического ожидания оценки средней частоты спектра получаем

$$E(\tilde{\omega}) \cong \frac{1}{T_{\Pi}} \operatorname{arctg} \frac{A_1 \exp(-\sigma_1^2 T_{\Pi}^2/2) \sin \omega_1 T_{\Pi} + A_2 \exp(-\sigma_2^2 T_{\Pi}^2/2) \sin(\omega_2 T_{\Pi})}{A_1 \exp(-\sigma_1^2 T_{\Pi}^2/2) \cos \omega_1 T_{\Pi} + A_2 \exp(-\sigma_2^2 T_{\Pi}^2/2) \cos(\omega_2 T_{\Pi})}, \quad (4.2)$$

где ω_1 и ω_2 - средние частоты;

σ_1 и σ_2 - ширины спектра каждой из составляющих суммарного сигнала.

Очевидно, что она в данном случае зависит от мощности сигналов и ширины спектра (это кроме средних частот составляющих), что неизбежно ведет к смещению получаемых оценок. В качестве примера рассмотрим следующий случай. Предположим, мы оцениваем доплеровский сдвиг частоты сигнала, формируемого элементом разрешения, расположенного так, как представлено на Рисунке 4.4. Центр элемента разрешения равно удален от границ двух слоев гидрометеоров, имеющих разные радиальные скорости и, следовательно, формирующие сигналы с разными смещениями частоты, которые положим равными $\omega_1 = 0$ Гц и $\omega_2 = \pi/2T_{\Pi}$.

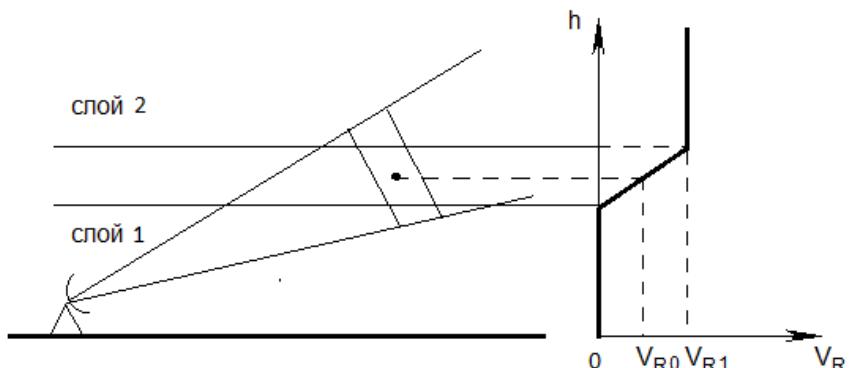


Рисунок 4.4 - Схема наблюдения радиолокатором двух потоков частиц и график распределения по высоте радиальных скоростей гидрометеоров

При линейном изменении радиальной скорости воздуха с высотой правильное значение искомой величины (обозначим ее ω_0), соответствующее представленной на графике радиальной скорости V_0 , должно быть равно $\pi/4T_{\Pi}$ или $0,79T_{\Pi}$. Если параметры составляющих сигнала (мощность и ширина спектра) находятся в соотношении

$$\frac{A_1 \exp(-\sigma_1^2 T_n / 2)}{A_2 \exp(-\sigma_2^2 T_n / 2)} = 2, \quad (4.3)$$

из (4.2) получаем ее значение равным $0,46T_n$, т.е. имеем ошибку в 42%.

Математическое ожидание оценки ширины спектра суммарного сигнала методом МПИ можно примерно определить следующей функцией

$$\begin{aligned} E(\tilde{\sigma}^2) &\approx -\frac{1}{T_n^2} \ln \left(\frac{(A_1 \exp(-\sigma_1^2 T_n^2 / 2) \sin \omega_1 T_n + A_2 \exp(-\sigma_2^2 T_n^2 / 2) \sin \omega_2 T_n)^2}{(A_1 + A_2)^2} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{(A_1 \exp(-\sigma_1^2 T_n^2 / 2) \cos \omega_1 T_n + A_2 \exp(-\sigma_2^2 T_n^2 / 2) \cos \omega_2 T_n)^2}{(A_1 + A_2)^2} \right) = \\ &= -\frac{1}{T_n^2} \ln \left(\frac{A_1 \exp(-\sigma_1^2 T_n^2) + A_2 \exp(-\sigma_2^2 T_n^2)}{(A_1 + A_2)^2} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{2A_1 A_2 \exp(-(\sigma_1^2 + \sigma_2^2) T_n^2 / 2) \cos(\omega_1 T_n - \omega_2 T_n)}{(A_1 + A_2)^2} \right) \end{aligned} \quad (4.4)$$

Опять получаем зависимость параметра от мощности и ширины спектра составляющих. Однако в отличие от предыдущего случая о смещении данной оценки пока ничего сказать нельзя. Для этого надо сначала определить действительное значение ширины энергетического спектра рассматриваемого сложного сигнала, т.е. вычислить его второй центральный момент. Аналогичным образом исследуем соответствие оценки среднего значения спектра, полученной методом парных импульсов, значению первого момента данного спектра.

Для того, чтобы не ограничиваться одним рассмотренным выше примером, было проведено численное моделирование определения средней частоты спектра методом парных импульсов. На Рисунке 4.5 приведены графики зависимости получаемой оценки от отношения мощностей составляющих спектра. Составляющие задавались в виде Гауссовых кривых с равной шириной $\sigma_f / f_{ep} = 0,6$ и со средними частотами $f_1 / f_{ep} = 0$, $f_2 / f_{ep} = 0,49$, где f_{ep} - граничная частота интервала Найквиста. Для сравнения здесь же нанесены данные зависимости, получаемые расчетом по формуле (4.2) и непосредственным

расчетом средневзвешенного значения средней частоты задаваемого спектра в соответствии с выражением (2.9).

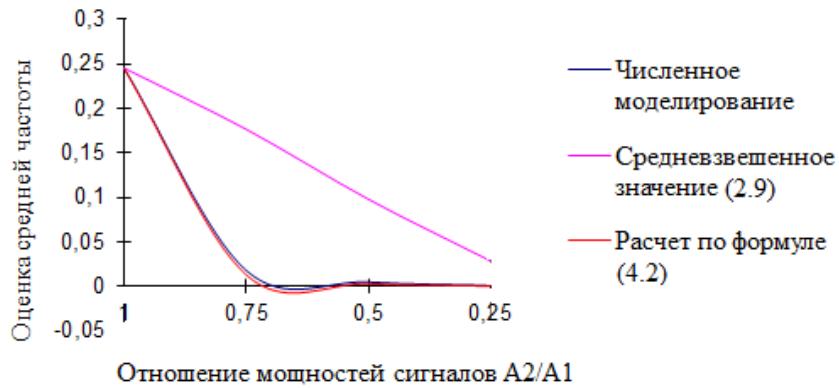


Рисунок 4.5 - Зависимость оценки средней частоты от отношения мощностей составляющих спектра при равной ширине спектров составляющих и средних значениях $f_1 = 0$

$$\text{и } f_2 = 0,49 f_{ep}$$

За правильное значение оценки радиальной скорости ветра в этом случае опять принимаем величину, создающую доплеровский сдвиг частоты $f_3 = \frac{f_1 + f_2}{2} = 0,245 f_{ep}$. Из приведенного графика видно, что при любом методе расчета правильное значение средней частоты получается лишь при равенстве мощностей составляющих спектра. Во всех остальных случаях имеет место ошибка, величина которой тем больше, чем больше упомянутое отношение. При этом метод парных импульсов фактически перестает реагировать на существование второй моды при снижении мощности соответствующей ей составляющей спектра до значения 0,75 от первой.

Рисунок 4.6 иллюстрирует, как искажается информация о средней частоте спектра при увеличении разности между частотами составляющих для различных соотношений их мощностей. Частота первой составляющей принималась равной нулю. Следовательно, за правильное значение оценки средней частоты результирующего спектра считаем величину $f_3 = \frac{f_2}{2}$. Очевидно, что несмещенную

оценку методом парных импульсов дает только в случае $f_2 = 0$, т.е. когда составляющие сливаются в один унимодальный спектр. В остальных случаях ошибка нарастает по мере увеличения разности средних частот составляющих, уменьшения отношения их мощностей и уширения спектра второй составляющей относительно первой.

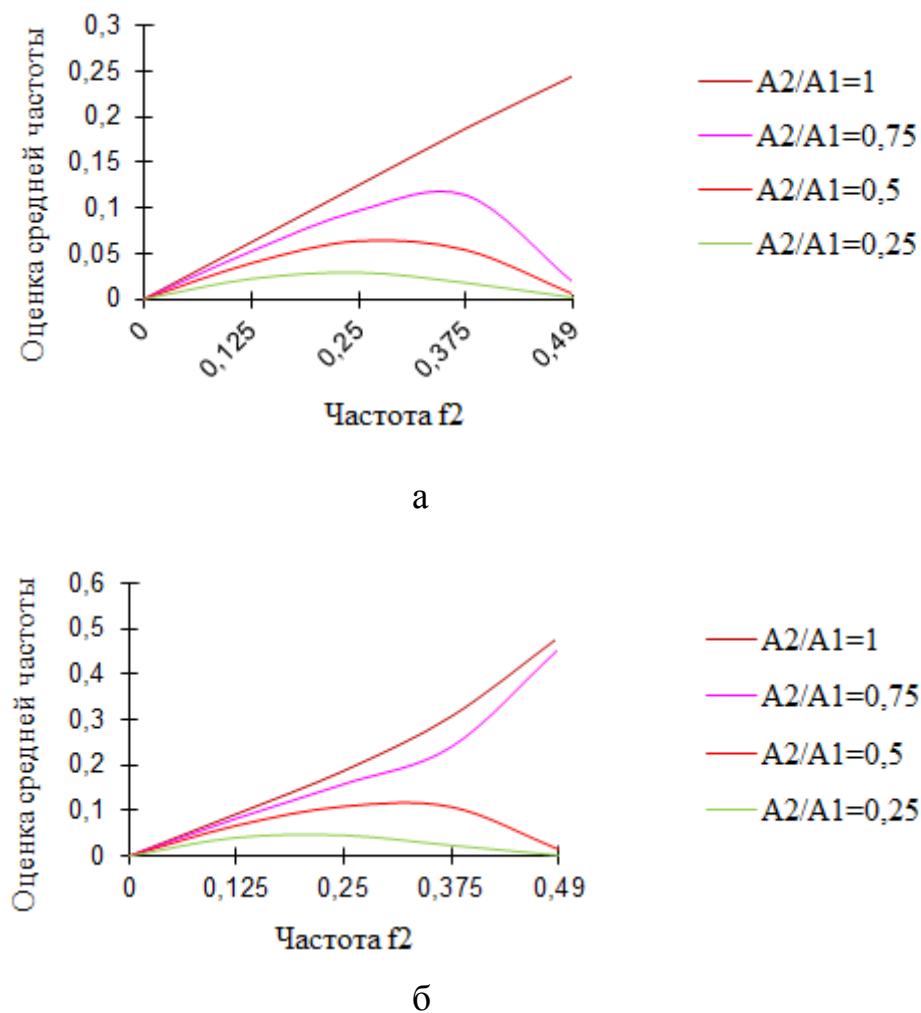


Рисунок 4.6 - Зависимость оценки среднего значения частоты от величины f_2 для различных отношений амплитуды сигналов и отношения ширин спектра 1/1 (а) и 1/2 (б) при

$$f_1 = 0$$

Для ширины спектра сравнивались математическое ожидание оценки, получаемой методом парных импульсов (формула (4.4)) и результат непосредственного расчета по формуле (2.10). На Рисунке 4.7 представлены

графики изменения указанных величин от величины разности средних значений частоты спектра, составляющих сигнала для различных отношений ширин спектра составляющих $K = \sigma_1/\sigma_2$ и их мощностей A_2/A_1 равных 1 (Рисунок 4.7а), 2 (Рисунок 4.7 б), 4 (Рисунок 4.7в) и 8 (Рисунок 4.7г). Значение средней частоты первой составляющей сигнала принималась равной 100 Гц.

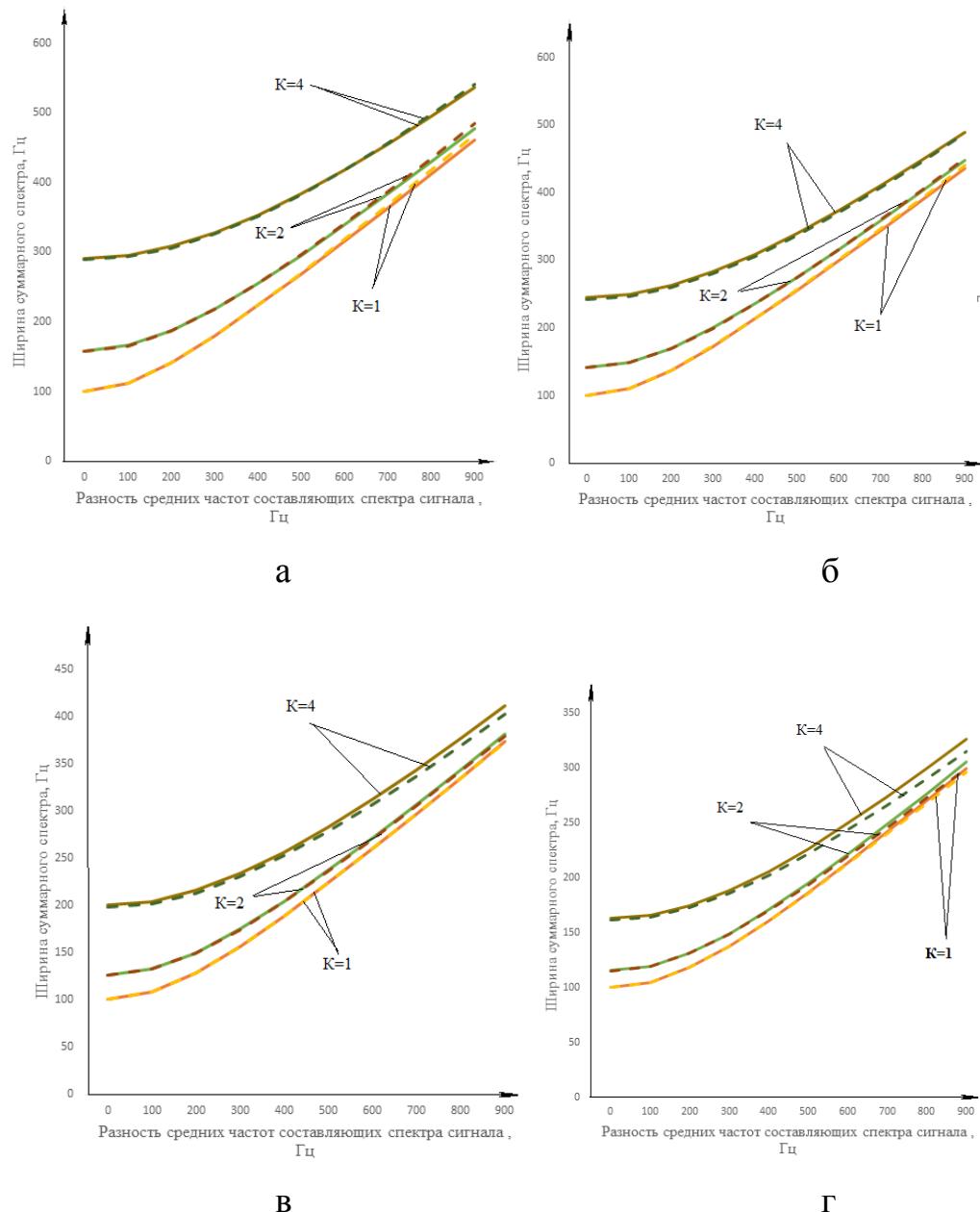


Рисунок 4.7 - Зависимость оценок ширины спектра сигнала от разности средних частот спектра его составляющих при различных отношениях ширин их спектра К и их мощностей ($A_2/A_1 = 1$ (а), $A_2/A_1 = 2$ (б), $A_2/A_1 = 4$ (в), $A_2/A_1 = 8$ (г)). Сплошная линия – результаты расчета по формуле (4.4.), пунктирная – по формуле (2.10)

Очевидно, что результаты расчетов по обеим формулам практически полностью совпадают. Это говорит о том, что оценки ширины спектра сигнала, получаемые радиолокатором ДМРЛ-С методом парных импульсов, полностью соответствуют значению второго центрального момента спектра этого сигнала.

Из приведенных выше вычислений можно сделать следующие выводы:

1. оценки ширины спектра сигнала, получаемые методом парных импульсов, полностью соответствуют второму центральному моменту этого спектра;
2. при наличии сдвига ветра в слое, высота которого меньше вертикального размера элемента разрешения радиолокатора, метод парных импульсов неприменим для восстановления профиля ветра из-за значительного смещения получаемых им оценок спектральных характеристик сигнала;

Методика проведения эксперимента.

То, что зонды запускаются только два раза в сутки, накладывает ограничение на выбор экспериментальных данных – анализировались результаты лишь тех обзоров радиолокатора, которые ближе всего по времени к моменту запуска. Кроме того, даже из этих обзоров нельзя выбирать все подряд. Специфика радиолокатора состоит в том, что он работает только при наличии в окружающем пространстве элементарных отражателей. Поэтому отбирались те из них, в которых наблюдалась достаточно плотная облачность (из практического опыта было выбрано предельное значение 6 баллов) и достаточная радиолокационная отражаемость метеоцелей (не менее 10 дБ).

Отобранные карты исследовались на наличие областей повышенного (6 м/с и более) значения ширины спектра радиальных скоростей отражателей в виде симметрично расположенных дуг окружности на коническом разрезе и горизонтального слоя повышенных значений на вертикальном разрезе типа тех, что наблюдаются на Рисунке 4.8.

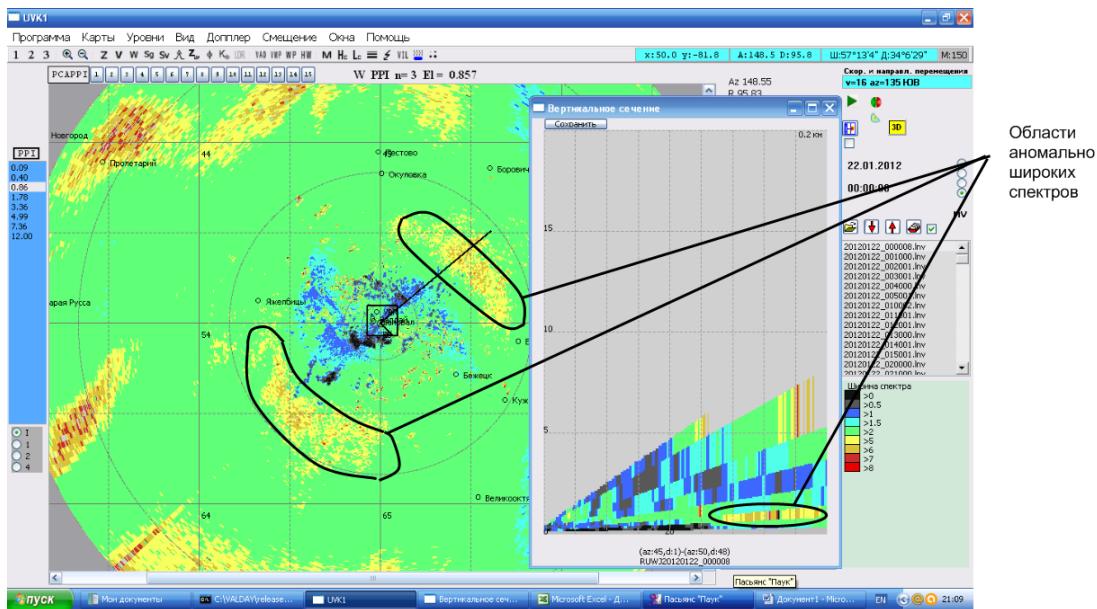


Рисунок 4.8 - Пример наблюдения зон повышенных значений параметра на коническом и вертикальном разрезах ширины спектра радиальных скоростей частиц

Для каждой из них оценивалась величина изменения радиальной скорости частиц в соответствии с формулой, полученной в главе 3,

$$\tilde{\Delta V} = \sqrt{4\tilde{\sigma}^2 - 2\tilde{\sigma}_1^2 - 2\tilde{\sigma}_2^2}, \quad (4.5)$$

где $\tilde{\sigma}_1$, $\tilde{\sigma}_2$ – оценки ширины спектра радиальных скоростей гидрометеоров в элементах разрешения радиолокатора, расположенных выше и ниже слоя со сдвигом ветра;

$\tilde{\sigma}$ максимальная величина оценки упомянутого параметра в элементе разрешения, расположенном внутри слоя со сдвигом ветра.

При этом сначала находилась величина $\tilde{\sigma}$, которая искалась как максимум от всех значений в исследуемой зоне повышенных значений рассматриваемого параметра. Оговорка «исследуемой» относится к случаю, когда на карте наблюдается сочетание двух- и трехслойного вариантов взаимного расположения разрешаемого объема радиолокатора и слоя со сдвигом ветра (см. гл. 3). Тогда зона повышенных значений на карте конического разреза ширины спектра радиальных скоростей частиц приобретает сложную форму – сочетание спиралей и секторов окружности, расположенных симметрично относительно центра карты. Подобный пример приведен на Рисунке 4.9.

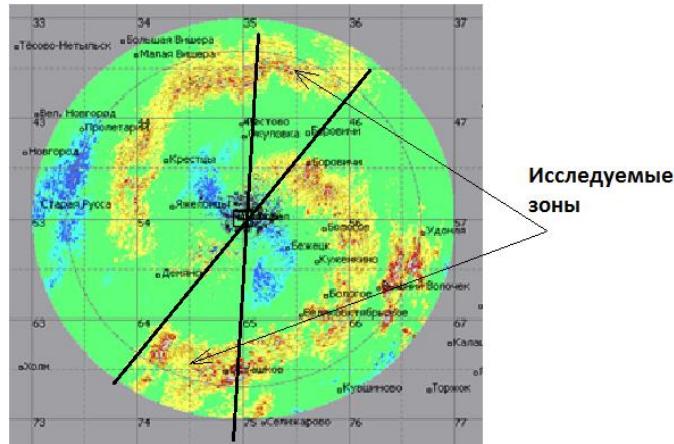


Рисунок 4.9 - Пример карты ширины спектра радиальных скоростей частиц с зоной повышенных значений в виде сочетания спиралей и секторов окружности

За исследуемую зону в данном случае принималась та часть области повышенных значений, которая относилась к дугам окружности, т.к. именно в этой части выполняются условия трехслойного варианта и, соответственно, применима формула (4.5).

Два других аргумента этой формулы находились как значения параметра в слоях, лежащих выше и ниже слоя со сдвигом ветра. При этом они должны располагаться на той же или почти той же дальности, что и элемент разрешения, в котором обнаружено максимальное значение $\tilde{\sigma}$. Этим исключается влияние на результат расчетов расстояния до выбранных элементов разрешения радиолокатора. Сказанное иллюстрируется Рисунком 4.10.

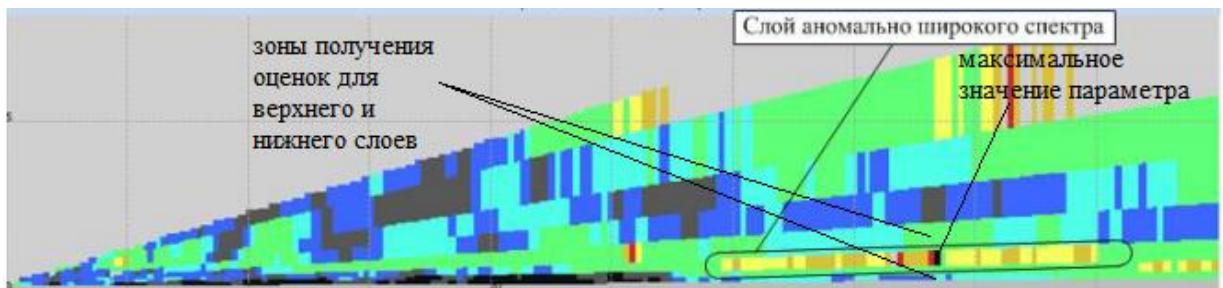


Рис. 4.10 - Вертикальный разрез карты ширины спектра радиальных скоростей частиц

Для оценивания величины сдвига необходимо еще измерить толщину слоя, в котором он существует. Казалось бы, наиболее легкий способ – воспользоваться картой средних значений спектра радиальных скоростей частиц,

на которой, как правило, хорошо просматривается сдвиг ветра в виде зигзага, который делает линия, соответствующая нулевым значениям скорости (Рисунок 4.11).

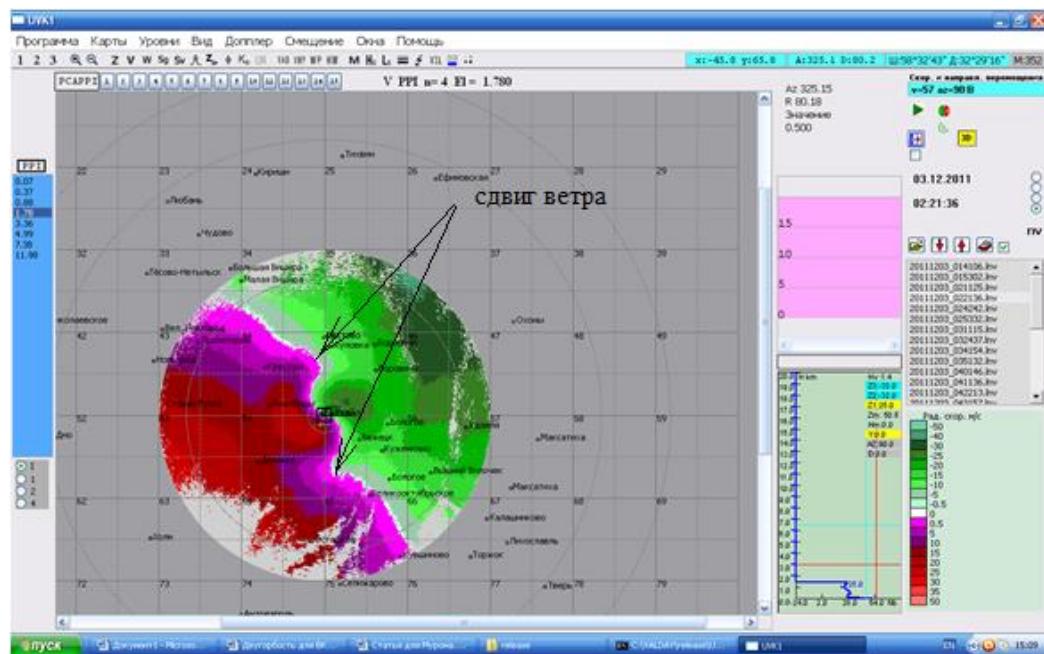


Рисунок 4.11 - Карта средних значений спектра радиальных скоростей частиц (конический разрез) с хорошо просматриваемым слоем сдвига ветра

Однако, как было показано, применяемые в радиолокаторе ДМРЛ-С процедуры нахождения данного параметра при наличии у спектра сигнала двух максимумов, дают смещенные оценки. В результате, картинка на карте средних значений спектра имеет чисто качественное значение и непригодна для получения количественных результатов.

Оценки же ширина спектра оказывается несмещенной. Поэтому толщина слоя определялась в соответствии со следующим алгоритмом:

- Находилась карта конического разреза ширины спектра радиальных скоростей частиц, на которой наиболее четко просматриваются границы зоны повышенного значения параметра;
- Выделялась зона, где области повышенного значения имеют вид дуги окружности (то, что выше было названо «исследуемой» зоной). Это гарантирует

соотношение размеров элемента разрешения и рассматриваемого слоя, характерное для трехслойного варианта (Рисунок 4.12);

- В выделенной области пространства выбирался элемент, наименее удаленный от центра карты. В этом месте разрешаемый объем радиолокатора расположен таким образом, что внутрь его, кроме слоя со сдвигом ветра, попадают части нижнего и верхнего слоев. Их величина становится достаточной для того, чтобы спектр отраженного сигнала стал аномально широким. Именно в этом месте разрешаемый объем пересекает верхнюю границу слоя со сдвигом ветра. Следовательно, высоту верхней границы элемента разрешения, предшествующего выбранному, можно считать равной высоте верхней границы рассматриваемого слоя h_B ;

- Аналогичным образом определяется нижняя граница h_H – ее принимали равной координате нижней границы элемента разрешения, следующего за максимально удаленным элементом, в котором спектр остается аномально широким;

- Толщина слоя оценивалась как разница найденных оценок его верхней и нижней границ

$$\tilde{\Delta h} = \tilde{h}_B - \tilde{h}_H. \quad (4.6)$$

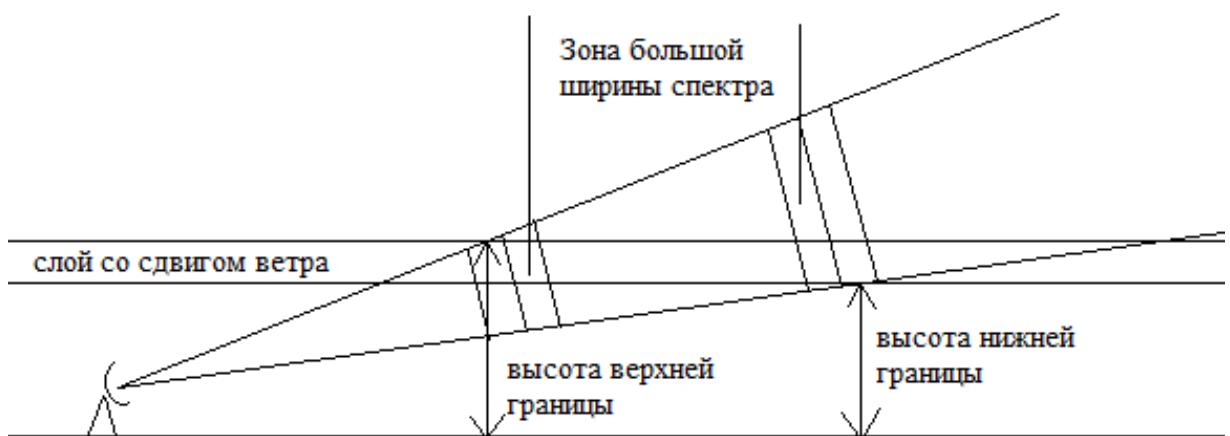


Рисунок 4.12 - Схема определения толщины слоя со сдвигом ветра с использованием оценок ширины спектра принимаемого сигнала

После этого находилась оценка величины сдвига ветра

$$\tilde{W} = \frac{\Delta V}{\Delta h}. \quad (4.7)$$

Для создания параллельного ряда данных отбирались результаты аэрологического зондирования, пример которых приведен на Рисунке 4.13, за те дни, которые были отобраны при анализе радиолокационных данных по критерию достаточной облачности и величине радиолокационной отражаемости.

26298 Bologoe Observations at 12Z 01 Dec 2012

PRES hPa	HGHT m	TEMP C	DWPT C	RELH %	MIXR g/kg	DRCT deg	SKNT knot	THTA K	THTE K	THTV K
1000.0	82									
986.0	188	-4.9	-6.0	92	2.49	220	2	269.3	276.2	269.7
979.0	244	-4.9	-8.9	74	2.00	226	5	269.9	275.5	270.2
940.0	562	-5.5	-9.5	73	1.99	260	23	272.4	278.0	272.7
929.0	654	-5.7	-9.7	73	1.98	264	23	273.1	278.8	273.5
925.0	688	-5.9	-9.7	75	1.99	265	23	273.3	278.9	273.6
863.0	1225	-10.2	-14.2	72	1.48	275	29	274.3	278.6	274.5
850.0	1343	-11.1	-15.2	72	1.39	275	29	274.5	278.6	274.7
841.0	1425	-11.9	-16.6	68	1.25	272	29	274.5	278.2	274.7
805.0	1761	-9.7	-13.6	73	1.67	260	29	280.3	285.3	280.6
739.0	2421	-10.3	-14.8	70	1.65	238	29	286.6	291.6	286.9
705.0	2781	-12.9	-17.8	67	1.34	225	29	287.6	291.7	287.8
700.0	2836	-13.3	-18.3	66	1.30	225	31	287.7	291.8	287.9
557.0	4546	-21.5	-27.5	58	0.72	225	47	297.4	299.9	297.6
500.0	5330	-28.7	-34.7	56	0.40	225	54	298.0	299.4	298.1
480.0	5621	-31.7	-37.7	55	0.31	224	56	297.8	298.9	297.8
412.0	6687	-39.7	-45.7	53	0.16	221	63	300.8	301.3	300.8
400.0	6890	-39.5	-45.5	53	0.16	220	64	303.6	304.2	303.6
383.0	7186	-40.5	-46.5	52	0.15	218	65	306.1	306.6	306.1
379.0	7257	-41.9	-47.9	52	0.13	217	65	305.1	305.6	305.1
346.0	7868	-45.1	-51.1	51	0.10	213	66	308.8	309.2	308.9
336.0	8062	-48.3	-54.3	50	0.07	211	66	307.1	307.3	307.1
327.0	8240	-48.9	-55.3	47	0.06	210	66	308.6	308.8	308.6
314.0	8505	-49.9	-56.9	43	0.06	210	64	310.8	311.1	310.8
310.0	8589	-51.9	-58.9	43	0.04	210	63	309.2	309.4	309.2

Рисунок 4.13 - Пример аэрологических данных аэрологической станции «Бологое» за 01 декабря 2012 года, получаемые на сайте Вайомингского университета

Для каждого шага измерений вычислялась величина сдвига ветра в соответствии с формулой

$$W_i = \frac{V_i - V_{i+1} * \cos(\Theta_{i+1} - \Theta_i)}{h_{i+1} - h_i}, \quad (4.8)$$

где V_i , Θ_i , h_i – скорость ветра, его направление и высота, на которой произведены измерения, представленные в i -й строке таблицы. Фиксировались только те

параметры, для которых значение сдвига ветра превышает некий порог $W_{\text{пр}}$. Величину этого порога правильно было бы установить равной 5 м/с на 100 футов, при которой согласно правилам полетов над территорией стран СНГ запрещаются взлет и посадка самолетов [169]. Однако, ввиду редкости появления сдвигов ветра такой величины в условиях России, а также небольшого количества экспериментальных данных, доступных для исследований, принимали его равным 1 м/с на 100 футов.

Максимальная высота расположения сдвига ветра, которая составляет опасность для самолетов – 500 м. Однако, для увеличения размера выборки установили предельную высоту 1500 м. Все допущения о возможности пренебречь влиянием угла места антенны и т.п., действующие для высот до 500 м, выполняются и для 1500 м. Поэтому получаемые результаты остаются корректными.

Два ряда полученных данных далее обрабатывались с целью получения следующих характеристик:

- Оправдываемость - статистическая величина, характеризующая в нашем случае степень соответствия сдвигов ветра, зафиксированных радиолокатором, фактически наблюдавшимся. Рассчитывается как отношение числа случаев сдвига ветра, зафиксированных радиолокатором и подтвержденных аэрологией $N_{X/\text{аэро}}$, к общему числу случаев сдвига ветра по данным аэрологического зондирования $N_{\text{аэро}}$, выраженное в процентах,

$$P_{\text{опр}} = \frac{N_{X/\text{аэро}}}{N_{\text{аэро}}} \cdot 100\%; \quad (4.9)$$

- Достоверность - статистическая величина, характеризующая в нашем случае степень соответствия сдвигов ветра, обнаруженных радиолокатором и подтвержденных аэрологическим методом $N_{X/\text{аэро}}$, к общему числу сдвигов ветра, обнаруженных радиолокатором N_X

$$P_{\text{опр}} = \frac{N_{X/\text{аэро}}}{N_X} \cdot 100\%. \quad (4.10)$$

Результаты обработки данных

Были обработаны данные радиолокатора ДМРЛ-С, установленного в г. Валдай, за период с декабря 2011 по февраль 2012 г. В каждый день наблюдений учитывались два обзора, ближайшие по времени к 0 и к 12 часам ГМТ. Получилось, что в распоряжении имелось 180 обзоров. Поскольку в ряде случаев радиолокатор не работал или информировал об ошибках в результатах наблюдения, к рассмотрению был оставлен 71 обзор. Из них по критерию достаточности облачности и величины радиолокационной отражаемости метеоцелей было отобрано 19 обзоров. Последние исследованы на наличие признаков существования сдвига ветра на картах ширины спектра радиальных скоростей частиц. Таковых было выявлено 9. Для каждого из них рассчитывалась величина сдвига ветра. Результаты сведены в Таблицу 4.1.

Соответственно 71 отобранному обзору была обработана 71 таблица аэрометеорологических наблюдений. Результаты сведены в Таблицу 4.2, в которой выделены ячейки, в которых обнаружено превышение сдвигом ветра установленного порога 1 м/с на 100 футов.

Таблица 4.1 – Расчет сдвига ветра по методу, основанному на анализе ширины спектра радиолокационного сигнала

Месяц, год	Дата	Время (UTC), ч	Анамально широкий спектр / вид	Данные				Расчет		
				Ширина спектра			$r_a, \text{км}$	$h, \text{км}$	$\Delta h, \text{м}$	$\Delta V, \text{м/с}$
Декабрь, 2011	3 00	Есть	3,25	8	3	13	0,4	225	14,61	1,96
	5 00	Есть	2	7	2,5	18	0,4	315	13,25	1,3
	10 00	Есть	2,5	7,25	3,5	42,5	0,45	250	13,2	1,5
	16 12	Нет	–	–	–	–	–	–	–	0
	18 12	Есть	1,5	7	2,25	9	0,6	160	13,47	2,6
Январь, 2012	3 12	Нет	–	–	–	–	–	–	–	0
	4 12	Есть	2,5	7	1,5	9	0,6	300	13,38	1,4
	5 00	Есть	1,75	7,75	2	10	0,5	175	15,04	2,6
	7 00	Нет	–	–	–	–	–	–	–	0
	12 00	Нет	–	–	–	–	–	–	–	0
	13 00	Есть	1	7,25	2	10	0,4	175	14,15	2,46
	15 12	Нет	–	–	–	–	–	–	–	0
	21 12	Нет	–	–	–	–	–	–	–	0
	22 00	Есть	2,25	7	1,75	37	1	650	13,41	0,6
	23 00	Есть	1,25	7	1	17	0,6	300	13,82	1,41
Январь, 2012	5 12	Нет	–	–	–	–	–	–	–	0
	8 00	Нет	–	–	–	–	–	–	–	0
	22 00	Нет	–	–	–	–	–	–	–	0
	23 00	Есть	1,25	7	1	17	0,6	300	13,82	1,41
	24 00	нет	–	–	–	–	–	–	–	0

Таблица 4.2 – Расчет сдвиг ветра по данным аэрологического зондирования

Дата, время		3.12.2011, 00 (UTC)								
$h, \text{м}$		188	639	927	963	1181	1256	1274	1312	1331
$\theta, \text{град}$		200	200	204	205	240	230	230	230	225
$V, \text{м/с}$		6	18	24	25	25	26	26	25	25
Сдвиг ветра, м/с на 100 футов		0,79	0,66	0,93	2,09	1,84	0,86	0,41	3,47	0,29
Дата, время		5.12.2011, 00 (UTC)								
$h, \text{м}$		188	554	897	1227	1337				
$\theta, \text{град}$		180	195	200	210	220				
$V, \text{м/с}$		4	14	22	20	21				
Сдвиг ветра, м/с на 100 футов		0,82	0,73	0,38	1,02	0,08				

Продолжение таблицы 4.2

Дата, время	10.12.2011, 00 (UTC)							
h , м	188	704	1039	1110	1163	1289	1362	
θ , град	140	170	187	190	200	203	205	
V , м/с	4	16	17	17	18	16	15	
Сдвиг ветра, м/с на 100 футов	0,73	0,45	0,38	1,82	0,53	0,48	0,15	
Дата, время	16.12.2011, 12 (UTC)							
h , м	188	488	694	797	981	1107	1344	1363
θ , град	135	130	145	150	145	130	135	110
V , м/с	3	9	13	10	6	6	7	7
Сдвиг ветра, м/с на 100 футов	0,57	0,72	0,94	0,60	0,38	0,15	0,00	0,42
Дата, время	18.12.2011, 12 (UTC)							
h , м	188	632	692	997	1015	1068	1222	1296
θ , град	135	130	135	155	159	170	195	173
V , м/с	5	17	18	24	24	25	23	14
Сдвиг ветра, м/с на 100 футов	0,80	0,92	0,94	2,81	2,74	2,08	0,42	0,81
Дата, время	3.01.2012, 12 (UTC)							
h , м	106	227	390	651	685	711	876	1283
θ , град	180	225	258	310	310	310	310	314
V , м/с	1	4	6	8	9	9	12	12
Сдвиг ветра, м/с на 100 футов	0,86	0,58	0,75	0,45	0,59	0,47	0,06	0,08
Дата, время	4.01.2012, 12 (UTC)							
h , м	106	229	413	602	855	1071	1274	1377
θ , град	180	200	220	225	245	255	250	250
V , м/с	4	12	15	17	19	17	18	18
Сдвиг ветра, м/с на 100 футов	1,97	0,91	0,39	0,78	0,52	0,27	0,00	0,09
Дата, время	5.01.2012, 00 (UTC)							
h , м	106	213	254	575	635	828	1080	1245
θ , град	190	225	226	230	225	250	259	265
V , м/с	6	11	12	18	19	23	23	22
Сдвиг ветра, м/с на 100 футов	1,89	0,77	0,58	0,96	1,55	0,43	0,44	0,00
Дата, время	7.01.2012, 00 (UTC)							
h , м	106	211	604	664	1272			
θ , град	220	215	255	260	255			
V , м/с	1	4	10	11	10			
Сдвиг ветра, м/с на 100 футов	0,88	0,54	0,68	0,07	0,03			
Дата, время	12.01.2012, 00 (UTC)							
h , м	106	212	436	606	657	864	1285	1322
θ , град	170	270	295	307	310	315	315	314
V , м/с	3	9	15	16	16	18	18	18

Продолжение таблицы 4.2

Сдвиг ветра, м/с на 100 футов	2,76	1,06	0,60	0,49	0,37	0,00	0,00	0,04	0,13
Дата, время	13.01.2012, 00 (UTC)								
h , м	106	231	444	496	698	1127	1174	1306	
θ , град	180	25	235	230	205	250	250	251	
V , м/с	5	12	41	38	26	25	24	24	
Сдвиг ветра, м/с на 100 футов	3,99	7,29	2,67	2,69	1,38	0,66	0,10	0,07	
Дата, время	15.01.2012, 12 (UTC)								
h , м	106	425	623	698	1352	1497			
θ , град	300	0	10	15	45	55			
V , м/с	2	8	11	10	11	10			
Сдвиг ветра, м/с на 100 футов	0,70	0,46	0,55	,25	0,43	0,45			
Дата, время	21.01.2012, 12 (UTC)								
h , м	106	216	714	789	857	1011	1054	1071	1159
θ , град	170	195	190	190	190	212	218	220	222
V , м/с	2	2	7	7	7	9	10	10	9
Сдвиг ветра, м/с на 100 футов	0,24	0,31	0,00	0,00	0,73	0,78	0,60	0,12	0,17
Дата, время	22.01.2012, 00 (UTC)								
h , м	106	645	670	1067	1328	1492			
θ , град	120	155	155	185	175	165			
V , м/с	3	20	20	15	11	9			
Сдвиг ветра, м/с на 100 футов	0,98	0,00	0,78	0,54	0,49	0,57			
Дата, время	5.02.2012, 12 (UTC)								
h , м	188	315	785	793	896	1034	1208	1527	
θ , град	125	140	184	185	195	210	210	210	
V , м/с	1	1	3	3	3	6	7	9	
Сдвиг ветра, м/с на 100 футов	0,06	0,13	0,17	0,21	0,72	0,18	0,19	0,22	
Дата, время	8.02.2012, 00 (UTC)								
h , м	188	338	852	925	1016	1091	1192	1269	1452
θ , град	160	170	205	210	215	210	230	218	200
V , м/с	2	3	6	6	7	5	4	4	7
Сдвиг ветра, м/с на 100 футов	0,22	0,21	0,30	0,39	0,85	0,56	0,34	0,33	0,84
Дата, время	22.02.2012, 00 (UTC)								
h , км	188	578	689	1059	1345	1463			
θ , град	210	210	220	245	260	260			
V , м/с	4	14	16	18	17	16			

Продолжение таблицы 4.2

Сдвиг ветра, м/с на 100 футов	0,75	0,89	0,62	0,49	0,26	0,48		
Дата, время	23.02.2012, 00 (UTC)							
h , км	188	656	673	906	993	1336	1363	1577
θ , град	190	204	205	220	217	205	205	230
V , м/с	4	16	17	23	23	22	23	23
Сдвиг ветра, м/с на 100 футов	0,80	1,04	1,04	0,45	0,41	1,14	1,40	0,69
Дата, время	24.02.2012, 00 (UTC)							
h , км	188	486	538	860	1040	1206		
θ , град	220	250	255	280	245	240		
V , м/с	1	5	6	4	3	4		
Сдвиг ветра, м/с на 100 футов	0,43	0,66	0,28	0,40	0,19	0,25		

В таблице 4.3 представлены результаты расчетов, проведенных обоими методами.

Таблица 4.3. – Сводная таблица расчетов сдвига ветра.

Месяц, год	Дата	Время (UTC), ч	Метод на основе анализа ширины спектра сигнала		Метод на основе аэрометрического зондирования	
			Высота h , км	Величина сдвига, м/с на 100 футов	Высота h , км	Величина сдвига, м/с на 100 футов
Декабрь, 2011	00	00	0,4	1,96	0,95÷1,2	2,09
	00	00	0,4	1,3	1,23	1,02
	10	00	0,45	1,5	1,11	1,82
	16	12	–	0	–	0
	18	12	0,6	2,6	1÷1,1	2,8
Январь, 2012	3	12	–	0	–	0
	4	12	0,6	1,4	0,1	1,97
	5	00	0,5	2,6	0,635	1,55
	7	00	–	0	–	0
	12	00	–	0	0,1÷0,21	2,76
	13	00	0,4	2,5	0,1÷0,7	4
	15	12	–	0	–	0
	21	12	–	0	–	0
Февраль, 2012	22	0	–	0	–	0
	5	12	–	0	–	0
	8	00	–	0	–	0
	22	00	–	0	–	0
	23	00	0,6	1,4	0,66	1,04
	24	00	–	0	–	0

После статистической обработки получены следующие результаты:

- Оправдываемость – 89%;
- Достоверность – 100%.

Единственный случай пропуска радиолокатором сдвига ветра величиной более 1 м/с на 100 футов имел место 12.01.2012 в 00 часов. Соответствующая этому времени карта приведена на Рисунке 4.14.

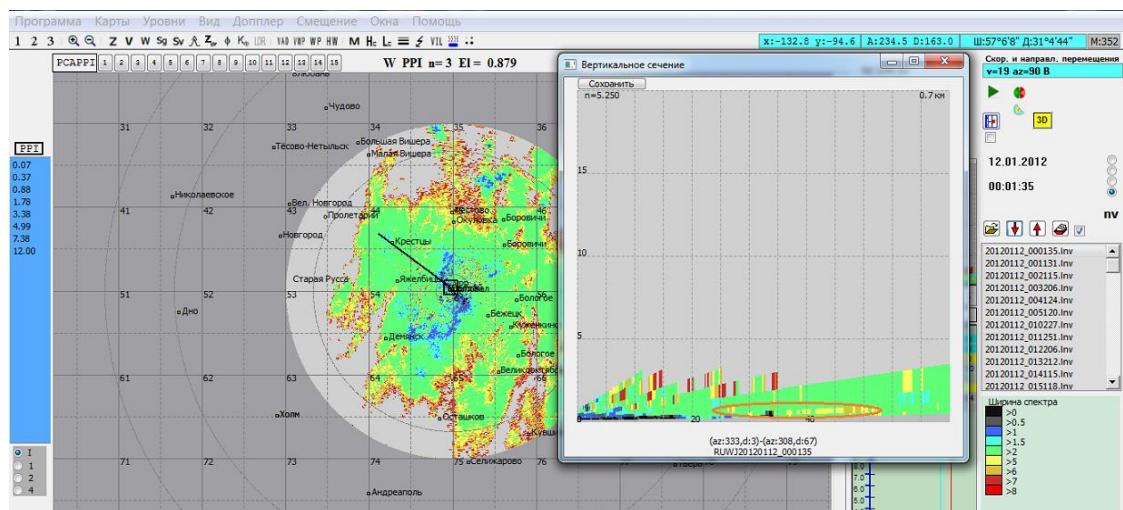


Рисунок 4.14 - Карта ширины спектра радиальных скоростей частиц (конический и вертикальный разрезы), полученные ДМРЛ-С в г. Валдай 12.01.2012 г. в 00 час

Из нее следует, что характерной картины распределения параметра на ней не наблюдается ввиду сильной неоднородности цели. Если же сделать вертикальный разрез, то слой аномально больших спектров хорошо просматривается на дальностях от 25 до 53 км. Расчеты сдвига ветра для этого случая дали результат 0,99 м/с на 100 футов. Формально по отсутствию четких зон широких спектров в виде дуг окружности и по недостаточному расчетному значению сдвига ветра результат данного наблюдения признан отрицательным. Однако, уширение спектра отражений наблюдалось. Это дает надежду на то, что дальнейшее совершенствование предлагаемой методики (в частности, применение автоматических методов распознавания характерных распределений параметра) приведет к повышению параметра «оправдываемость».

4.2 ПРОВЕРКА МЕТОДА РАСПОЗНАВАНИЯ СДВИГА ВЕТРА ПО НАПРАВЛЕНИЮ

Как было показано в главе 2, сдвиг ветра по направлению проявляется на картах ширины спектра радиальных скоростей частиц в виде одного из двух характерных распределений:

1. Чередующихся спиралей больших и малых значений ширины спектра;
2. Спиралей одних только малых значений ширины спектра.

Первый случай может иметь место только одновременно с существованием на упомянутой карте дуг окружности, т.е. на тех же картах, что были рассмотрены в предыдущем разделе. При этом спираль возникает не в каждом из этих обзоров. Следовательно, размер полученной выборки, и так небольшой, уменьшится более чем в два раза. Этого явно недостаточно для получения сколько-нибудь значащих результатов.

Поэтому проверке подвергался второй вариант. К тому же, как было показано в главе 3, точность оценок в данном случае оценок выше, в результате чего именно он представляет интерес для практического использования.

Методика эксперимента

Идти уже проторенным путем сравнения получаемой по новому методу информации с данными аэрологического зондирования – значит резко уменьшать размер выборки. Из всех обзоров, получаемых в течение суток, общим числом 144 анализируются только два, совпадающие по времени с моментом запуска зонда.

Гораздо более эффективно использовать предоставляемый природой шанс, состоящий в существовании в пограничном слое атмосферы слоя Экмана. Отличительной его особенностью является изменение скорости и направления ветра в соответствии с графиком, представленным на Рисунке 4.15 [142]. Особенno привлекателен то факт, что на интервале высот 100 – 400 м поворот вектора скорости происходит ровно на 36° по часовой стрелке (в северном полушарии), т.е. скорость поворота равна 0,12 град/м.

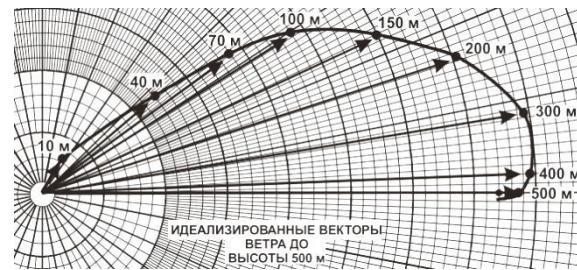


Рисунок 4.15 - Спираль Экмана

Это позволяет провести эксперимент без привлечения информации от других измерителей вертикального профиля ветра. Будем считать, что ветер в атмосфере слоисто однороден [78]. Данное предположение справедливо в большей части облачной атмосферы за исключением центральных областей интенсивных мощно-кучевых облаков [100]. Зададим такую модель атмосферы, в которой скорость V и направление ветра ϕ изменяются с высотой h по линейному закону.

$$\begin{cases} V(h) = V_0 + \alpha h \\ \gamma(h) = \gamma_0 + kh \end{cases} \quad (4.11)$$

где V_0 – скорость ветра на нулевой высоте;

α – градиент скорости ветра по высоте;

γ_0 – направление ветра на нулевой высоте;

k – градиент направления ветра по высоте.

Как было показано в главе 3, минимальная ширина спектра радиальных скоростей гидрометеоров на карте образуется при азимутах антенны, параллельных направлению ветра [34]. Следовательно, расположение малых значений параметра на карте ширины спектра совпадает с расположением максимума средней радиальной скорости V_R . Поэтому для расчета величины сдвига ветра по направлению при помощи спирали малых значений ширины спектра логично воспользоваться выражением для средней радиальной скорости гидрометеоров. Последняя рассчитывается по формуле:

$$V_R = V(h) \cos(\beta) \cos(\phi - \gamma(h)), \quad (4.12)$$

где ϕ – азимут антенны;

β – угол места антенны.

С учетом (4.11) выражение для V_R приобретает вид:

$$V_R = (V_0 + \alpha h) \cos(\beta) \cos(\varphi - \gamma_0 - kh). \quad (4.13)$$

Дифференцируем данное выражение по h и находим экстремум:

$$\operatorname{tg}(\varphi_0 + kh - \gamma) = \frac{\alpha}{k(V_0 + \alpha h)}. \quad (4.14)$$

Вводим обозначение

$$x = \varphi - \gamma_0 + kh. \quad (4.15)$$

С учетом того, что скорость ветра на поверхности земли V_0 равна нулю, выражение (4.14) принимает вид

$$\operatorname{tg}x = \frac{1}{x - (\varphi - \gamma_0)}. \quad (4.16)$$

Пример графического решения данного уравнения приведен на Рисунке 4.16.

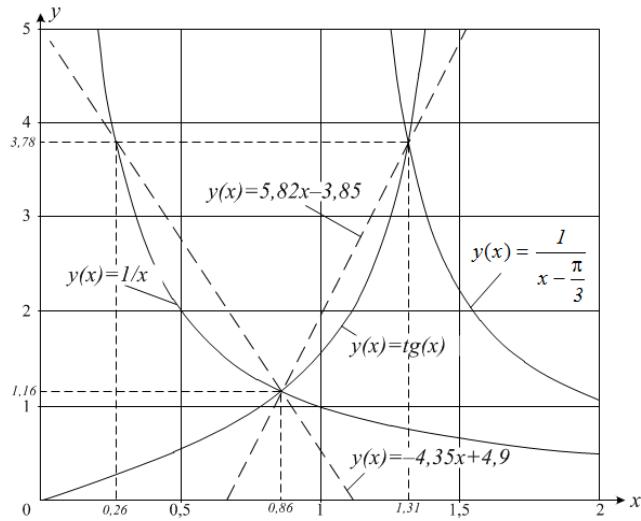


Рисунок 4.16 - Графическое решение уравнения (4.16)

Направление ветра в слое Экмана изменяется на угол не более $\pi/3$. На этом малом участке возможна линейная аппроксимация левой и правой частей уравнения (4.16):

$$y_1 = 5,82x - 3,85, \quad (4.17)$$

$$y_2 = -4,35[x - (\varphi - \gamma_0)] + 4,9, \quad (4.18)$$

после чего оно преобразуется к виду

$$10,17kh = -5,82\varphi + 8,75 - 5,82\gamma_0. \quad (4.19)$$

В результате была определена следующая методика эксперимента:

- на карте распределения ширины спектра радиальных скоростей частиц по коническому разрезу, полученной с ДМРЛ-С, выбираются две точки на спирали малых значений параметра (Рисунок 4.17). Одна на высоте 100 м., другая на высоте 400 м;
- координаты этих точек (азимут φ и высота h) подставляются в выражение (8.15) и вычисляется средняя величина сдвига ветра по направлению

$$k = 0,57 \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{h_1 - h_2}, \quad (4.20)$$

где φ_1, φ_2 – азимут первой и второй точек на спирали малых значений ширины спектра;

h_1, h_2 – высота первой и второй точек на спирали малых значений ширины спектра.

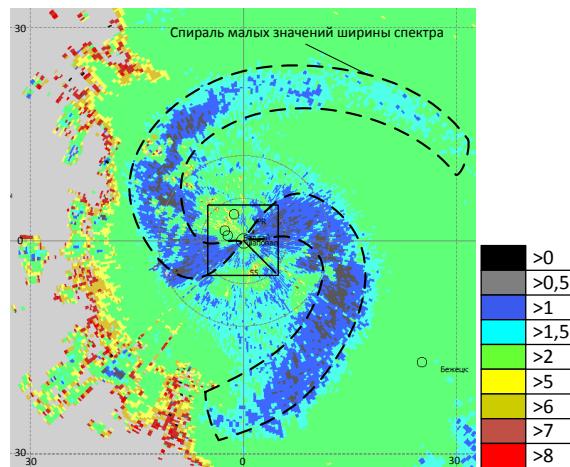


Рисунок 4.17 - Пример спирали малых значений параметра на карте ширины спектра радиальных скоростей гидрометеоров

Результаты обработки данных

Анализировались данные, полученные с радиолокатора ДМРЛ-С, установленного в г. Валдай (Новгородская область) за период с 1 декабря 2011 г. по 28 февраля 2012 г. Из всей выборки были выбраны 60 карт, на которых четко прослеживалась спираль малых значений ширины спектра. Для каждой производился расчет величины сдвига ветра по направлению по формуле (4.20). В

результате получено среднее значение измеряемой величины $k_{\text{ср}}=0,12$ град/м с СКО=0,06 град./м. Данная величина хорошо согласуется с теоретически рассчитанной по спирали Экмана.

4.3 ПРОВЕРКА МЕТОДА РАСПОЗНАВАНИЯ ГРАДА

Проверку эффективности поляриметрического метода определения градоопасности облаков удобно проводить по данным наземных метеорологических станций. Методика подобных сравнений хорошо отработана [119]. В нашем случае задача усложняется тем, что программы распознавания града при помощи поляризационных измерений на данный момент у нас не существует. Реализовать же эту методику «вручную» практически невозможно. Поэтому проверку можно провести только следующим образом – зафиксировать случаи выпадения града по данным метеостанций и к ним применить описанную в главе 3 методику. Из этого следует, что единственная статистическая характеристика, которая может быть определена в данном случае – достоверность.

Методика эксперимента

Данные о выпадении града находятся на электронном ресурсе «Погода и климат» [83]. Пример того, как представлена информация на этом источнике, приведен на Рисунке 4.18.

Для тех дат, в которые имело место выпадение града, отбираются данные обзоров радиолокатора, в чью зону обзора попадает метеостанция, его зафиксировавшая. Просматриваются обзоры, проведенные за 30 минут до срока, зафиксированного метеостанцией, и те участки карты, которые находятся в непосредственной близости от нее. В первую очередь исследуется карта дифференциальной отражаемости на предмет наличия деполяризационного ослабления. Оно обнаруживается по присутствию на карте зон с отрицательными значениями данного параметра, расположенных на углах места антенны, больших

ширины ее диаграммы направленности и имеющих форму усеченных секторов круга. Пример данного явления представлен на Рисунке 3.22.

АРХИВ ПОГОДЫ в Великом Новгороде																	
Время (UTC), дата	Ветер (напр., м/с)		Видим.	Явления	Облачность	T (C)	Td (C)	f (%)	Te (C)	Tes (C)	Комфортность	P (hPa)	Po (hPa)	Tmin (C)	Tmax (C)	R (мм)	S (см)
00 2.06	штиль	0	10 км	туман позвемный	3/0 [Ac trans Ci fib]	+16.9	+15.9	94	+17	+17	тепло	1022.5	1019.4				
03 2.06	ЮВ	2	10 км		3/3 300 м [Cu med, cong]	+19.6	+17.7	89	+23	+23	комфорт	1022.4	1019.3				
06 2.06	Ю	1	20 км		3/3 600 м [Cb cap]	+22.3	+16.5	70	+27	+33	душно	1021.9	1018.9	+16.2			
09 2.06	ЮВ	3	20 км		4/3 600 м [Cu med, cong Ci fib]	+24.0	+18.3	70	+28	+36	душно	1021.7	1018.7				
12 2.06	Ю	1 (17)	10 км	в посл. час гроза (ливен осадки) [макс. длина градин 2 мм]	9/6 1200 м [Cb cap Ac trans Ci fib]	+24.2	+18.7	71	+29	+32	душно	1020.8	1017.8				
15 2.06	3	3	10 км	гроза без осадков	9/6 900 м [Cb cap Ac trans Ci fib]	+24.5	+17.4	65	+28	+29	душно	1020.7	1017.7				
18 2.06	СЗ	5	10 км	{гроза}	6/3 600 м [Cb cap Ci fib]	+20.3	+11.7	58	+22	+22	комфорт	1020.7	1017.6		+27.6	5	
21 2.06	нст	1	10 км		4/0 [Ci fib]	+13.5	+7.4	67	+14	+14	по сезону	1021.4	1018.3				

Рисунок 4.18 - Пример представления информации

Его обнаружение означает, что отношения поляризационных составляющих отражений нарушены и применять основанный на них метод распознавания градоопасности облака бесполезно. Однако, самого наличия данного явления достаточно, чтобы объект, его создавший, считать опасным с рассматриваемой точки зрения.

Если деполяризационного ослабления не обнаружено, следует перейти к рассмотрению карт радиолокационной отражаемости, на которой при помощи вертикальных разрезов определяются конвективные ячейки. Последние характеризуются вертикально организованной структурой с расположенными в середине нее областью с большой отражаемостью [77; 2]. Пример такой структуры изображен на Рисунке 4.19.

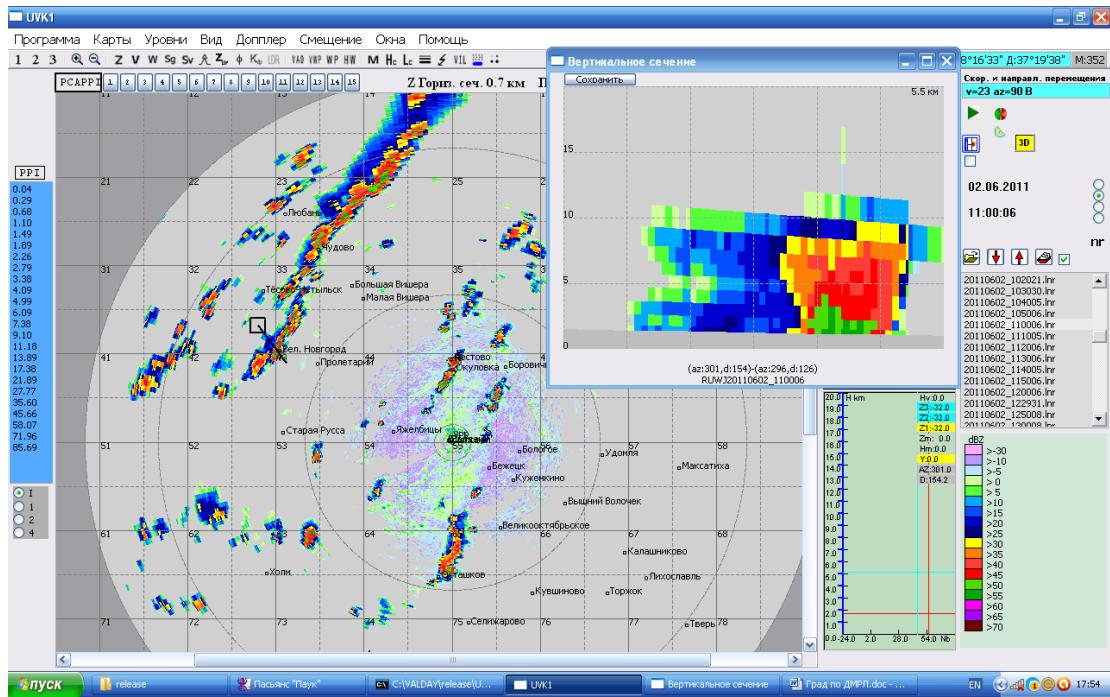


Рисунок 4.19 - Пример наблюдения конвективной ячейки на карте радиолокационной отражаемости (горизонтальный и вертикальный разрезы)

Далее переходим к распределению модуля коэффициента взаимной корреляции поляризационных составляющих сигнала. Делая вертикальные разрезы, ищем разрыв в полосе таяния градовых частиц, свидетельствующий о присутствии в этом месте восходящего потока воздуха. В случае его нахождения, следующим шагом будет исследование области, расположенной непосредственно над ним на высоте выше нулевой изотермы. Если же восходящий поток не обнаружен, что может быть вызвано, например, большой удаленностью объекта наблюдения, следует исследовать область с наибольшей отражаемостью, расположенную на указанной высоте.

Исследуемую область наблюдаем на карте дифференциальной отражаемости. Показателем того, что она заполнена градом, является нахождение величины параметра в пределах от -1 дБ до 1 дБ.

После этого возвращаемся к карте модуля взаимной корреляции поляризационных составляющих отраженного сигнала. Его значение в исследуемой области показывает какой град наблюдается – сухой (0.98-1) или влажный (0.8-0.97). Интерес представляет первый случай, т.к. наличие сухого

града говорит об идущем здесь процессе замерзания и, следовательно, росте ледяных частиц.

Последний этап – расчет предельного значения радиолокационной отражаемости, соответствующего минимальному размеру градин, способных долететь до земли, не растаяв, и сравнение его с величиной этого параметра в исследуемой области. Указанный расчет производится, исходя из следующих соображений.

Таяние частицы происходит при падении ледяных частиц через теплую часть облака и под облаком [75; 76]. Приток тепла к частице осуществляется:

- благодаря теплопроводности воздуха;
- при конденсации влаги на тающей ледяной частице;
- за счет теплопередачи от капель, с которыми коагулирует ледяная частица в теплой части облака;
- путем лучистого теплообмена.

Основное значение имеют первых два эффекта.

Сначала рассчитываем таяние частиц, падающих через теплую часть облака ледяных частиц. При этом полагаем, что частицы имеют сферическую форму. Для того чтобы произошло таяние сферической ледяной частицы, должно выполняться уравнение баланса тепла (лучистым теплообменом пренебрегаем):

$$\frac{4}{3}\pi\rho_2R_0^3L = 2\pi R \left(k \frac{f}{v} + \alpha \frac{f}{v} q D \rho_1 + \frac{R}{4} c_1 q_w \right) \Delta X^2, \quad (4.21)$$

где $\rho_2 = 917 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ - плотность льда;

R_0 - радиус градины на уровне нулевой изотермы в мм;

$L = 335 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ - скрытая теплота плавления;

R - средний радиус градины в мм;

$k = 0.022 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \times \text{К}}$ - коэффициент теплопроводности воздуха;

$f = 1 + 0.22\sqrt{\text{Re}}$ - средний ветровой множитель;

- v - средняя скорость падения капли в м/с;
 $\alpha = 3.56 \times 10^{-7} \text{ град}^{-1}$
 $q = 2500 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ - скрытая теплота испарения;
 $D = 0.198 \times 10^{-4} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$ - средний коэффициент диффузии водяного пара в воздухе;
 $\rho_1 = 1000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ - плотность воды;
 $c_1 = 4.187 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$ - теплоёмкость воды;
 $q_w = 1 \frac{\text{г}}{\text{м}^3}$ - средняя водность в тёплой части облака;
 $\gamma = 0.6 \frac{\text{°C}}{100 \text{ м}}$ - вертикальный градиент температуры;
 X - толщина тёплой части облака в м;

Из этого уравнения находим толщину теплой части облака, необходимую для таяния градины радиусом R_0 :

$$X = \sqrt{\frac{\frac{4}{3}\pi\rho_2R_0^3L}{2\pi\alpha R(\frac{kf}{v} + \frac{\alpha f}{v}qD\rho_1 + \frac{R}{4}c_1q_w)}} \quad (4.22)$$

Для случая, когда приращение радиуса частицы в теплой части облака мало (т. е. предполагая $R=R_0$), последний член в знаменателе можно отбросить, что приводит к формуле

$$X = \sqrt{\frac{2\rho_2Lv}{3\alpha f(k+\alpha qD\rho_1)}} R_0. \quad (4.23)$$

Данные расчёта приведены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Толщина теплой части облака, необходимая для таяния сферических ледяных частиц радиусом R_0 .

$R_0, \text{мм}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,9	1,0
$Z, \text{м}$	3,7	26	73	150	250	370	530	950	1200

В облаке с температурой основания $+6 \text{ °C}$ при влажноадиабатическом градиенте температуры толщина теплой части облака составляет 1000 м. Из

таблицы следует, что в облаке могут растаять частицы, имевшие на уровне нулевой изотермы радиус 0.9 мм.

Если в облаке имеется восходящий поток со скоростью u , то в формуле нужно заменить v на $(v - u)$.

Далее рассматриваем случай падения ледяной частицы от основания облака до земли. Абсолютную влажность воздуха от основания облака до земли в дни с конвективной облачностью можно при расчетах, не претендующих на точность, считать постоянной. При этом пересыщение ε для тающей частицы будет величиной постоянной, равной его значению на уровне основания облака.

Условие таяния частицы радиусом R_0 при температуре основания облака T_0 и вертикальном градиенте температуры под облаком γ_l принимает вид

$$\frac{4}{3}\pi\rho_2LR_0^3 = 4\pi Rfk \left(T_0 + \frac{\gamma_l X_1}{2} \right) \frac{Z_1}{v} + 4\pi RfqD\rho_1\varepsilon \frac{X_1}{v}, \quad (4.24)$$

где $\rho_2 = 917 \text{ кг}/\text{м}^3$ - плотность льда;

$L = 335 \text{ кДж}/\text{кг}$ - скрытая теплота плавления;

R_0 - радиус градины на уровне нулевой изотермы, мм;

R - средний радиус градины, мм;

f - средний ветровой множитель;

$k = 0.022 \text{ Вт}/(\text{м} \times \text{К})$ - коэффициент теплопроводности воздуха;

T_0 - температура на нижней границе облачности;

$\gamma_l = 0.6 \text{ }^{\circ}\text{C}/100 \text{ м}$ - вертикальный градиент температуры;

X_1 - путь полного таяния сферических ледяных частиц при падении от основания облака, м;

v - средняя скорость падения капли, м/с;

$q = 2500 \text{ кДж}/\text{кг}$ - скрытая теплота испарения;

$D = 0.198 \times 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ - средний коэффициент диффузии водяного

пара в воздухе;

$\rho_1 = 1000 \text{ кг}/\text{м}^3$ - плотность воды;

$\varepsilon = 2.4 \times 10^{-6}$ - постоянное пересыщение по отношению к ледяной частице.

Для случая, когда изменением радиуса частицы можно пренебречь, получаем

$$\frac{kT}{2} X_1^2 + (kT_0 + q\rho_1 D\varepsilon)X_1 - \frac{\rho_2 L}{3f} v R_0^2 = 0, \quad (4.25)$$

Результат расчета пути таяния ледяных частиц разных размеров при, $T_0 = +6^\circ\text{C}$ и постоянном пересыщении по отношению к ледяной частице $\varepsilon = 2.4 \times 10^{-6}$ представлен в Таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Путь полного таяния сферических ледяных частиц при падении от основания облака, имеющего температуру $+6^\circ\text{C}$, в воздухе с суходиабатическим вертикальным градиентом температуры

$R_0, \text{мм}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$Z, \text{м}$	1,7	10	26	54	91	130	184	270	320	390

Коэффициент диффузии водяного пара в воздухе принят равным $D = 0.198 \times 10^{-4} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$, что соответствует температуре 0°C [165].

Для дальнейших расчетов надо знать высоту нулевой изотермы и высоту нижней границы облачности. Получить эти значения можно из результатов аэрологических измерений либо примерно оценить при помощи радиолокационных данных. Толщину тёплой части облака определяем как разность высоты нулевой изотермы и высоты нижней границы облачности. Зная ее, рассчитываем минимальный радиус ледяной частицы, которая не растает при падении от нулевой изотермы до основания облака.

Просуммировав радиусы, получаем размер градины на нужной нам высоте 0 С, по которой находим искомое предельное значение радиолокационной отражаемости.

Результаты обработки данных

Возможности получения радиолокационных данных были ограничены только одним радиолокатором ДМРЛ-С, установленным в г. Валдай. Поэтому анализировалась информация со всех метеостанций, расположенных в зоне обзора указанного радиолокатора. Таких было найдено 20: Боровичи, Великий Новгород, Кириши, Любань, Охоны, Торжок, Старая Русса, Белый, Максатиха, Тверь, Бологое, Холм, Демянск, Дно, Крестцы, Тихвин, Малая Вишера, Осташков, Старица, Вышний Волочек. Всего было просмотрено 9180 дней, относящихся к теплому периоду с 2011 по 2013 гг. В результате выявлено 13 случаев выпадения града.

Зафиксированные явления в форме града представлены в Таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Данные из архива погоды наземных станций

Дата	Явление	Срок	Станция
02.06	в посл. час гроза {ливн. осадки} [макс. диам. градин 2 мм]	12 ч	Великий Новгород
08.08	в посл. час ливневой дождь {гроза} [макс. диам. градин 3 мм]	15 ч	Кириши
09.08	в посл. час ливневой дождь {гроза} [макс. диам. градин 4 мм]	18 ч	Любань
11.08	гроза, ливневой дождь [макс. диам. градин 3 мм]	15 ч	Любань

Продолжение таблицы 4.6

Дата	Явление	Срок	Станция
23.09	ливневые осадки [макс. диам. градин 4 мм]	15 ч	Боровичи
23.09	слабый ливневый дождь, в посл. час гроза [макс. диам. градин 3 мм]	15 ч	Кириши
23.09	слабый ливневой дождь, в посл. час гроза [макс. диам. градин 2 мм]	15 ч	Любань
28.09	слабый град {ливн. осадки} [макс. диам. градин 5 мм]	15 ч	Боровичи
30.05	гроза, ливневые осадки [макс. диам. градин 5 мм]	12 ч	Охоны
21.07	в посл. час ливневой дождь [макс. диам. градин 2 мм]	12 ч	Любань
08.06	гроза без осадков {ливневые осадки} [макс. диам. градин 4 мм]	12 ч	Торжок
27.06	{гроза, ливневые осадки} [макс. диам. градин 5 мм]	15 ч	Охоны
06.07	{гроза, ливневые осадки} [макс. диам. градин 5 мм]	12 ч	Любань

Для каждого из данных случаев были рассчитаны предельные значения радиолокационной отражаемости, сведенные в Таблицу 4.7.

Таблица 4.7 – Расчётная предельная радиолокационная отражаемость

Город	Число	Расчётная минимальная радиолокационная отражаемость, dBZ
Великий Новгород	02.06.2011	54,5
Кириши	08.08.2011	50,8
Любань	09.08.2011	48,4
Любань	11.08.2011	45,8
Боровичи	23.09.2011	38,8
Кириши	23.09.2011	31,6
Любань	23.09.2011	34,9
Боровичи	28.09.2011	40,5
Охоны	30.05.2012	54,0
Любань	21.07.2012	52,4
Торжок	08.06.2013	44,4
Охоны	27.06.2013	54,0
Любань	06.07.2013	52,9

Далее разберем каждый из этих случаев отдельно.

1. Нижний Новгород, 02.06.2011.

Данные представлены на Рисунках 4.20-4.22. На этой станции град зафиксирован в срок 12 ч, а предиктор найден в 10 ч 50 мин. Это явно восходящий поток, т.к. есть участок, нависший над меньшей отражаемостью. О наличии в нём града говорит область с отражаемостью более 55 dBZ. Это область тёмно-зелёного цвета. Расчитанная минимальная радиолокационная отражаемость составляет 54,5 dBZ, а реальная равна 57,5 dBZ. Имеет место превышение реальной отражаемости над расчётной. Карты дифференциальной отражаемости и коэффициента взаимной корреляции показывают, что гидрометеоры в этой

области находятся в твёрдом агрегатном состоянии. Дифференциальная отражаемость показывает значения близкие к нулю, коэффициент взаимной корреляции больше 0,98.

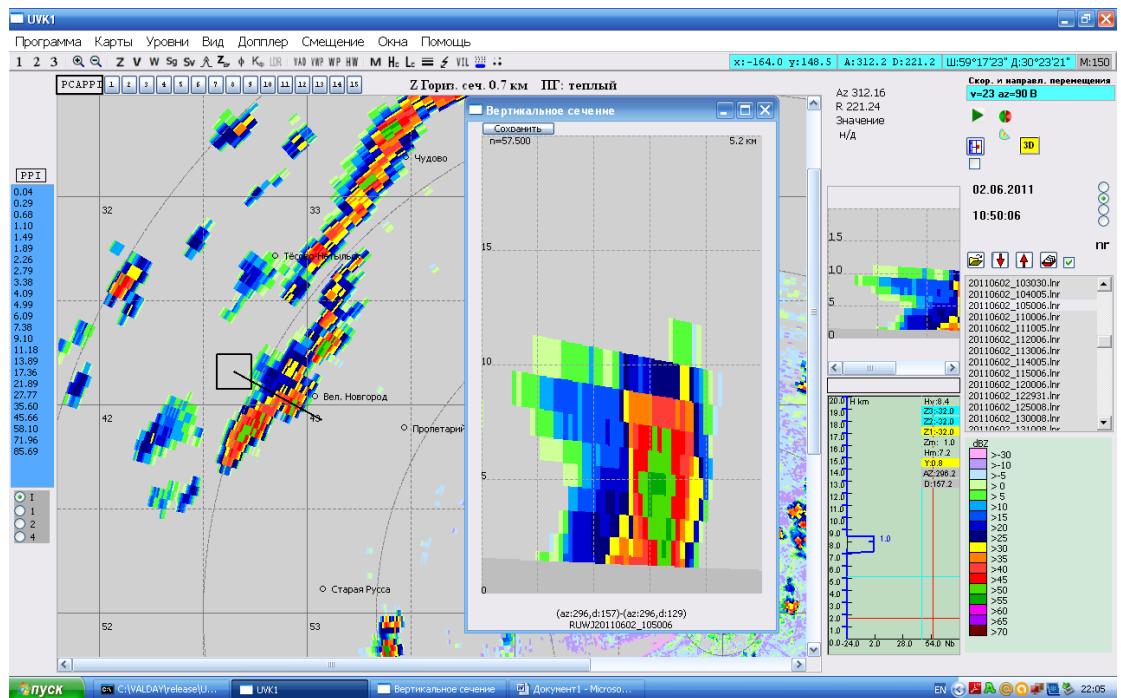


Рисунок 4.20 – Карта вертикального разреза радиолокационной отражаемости

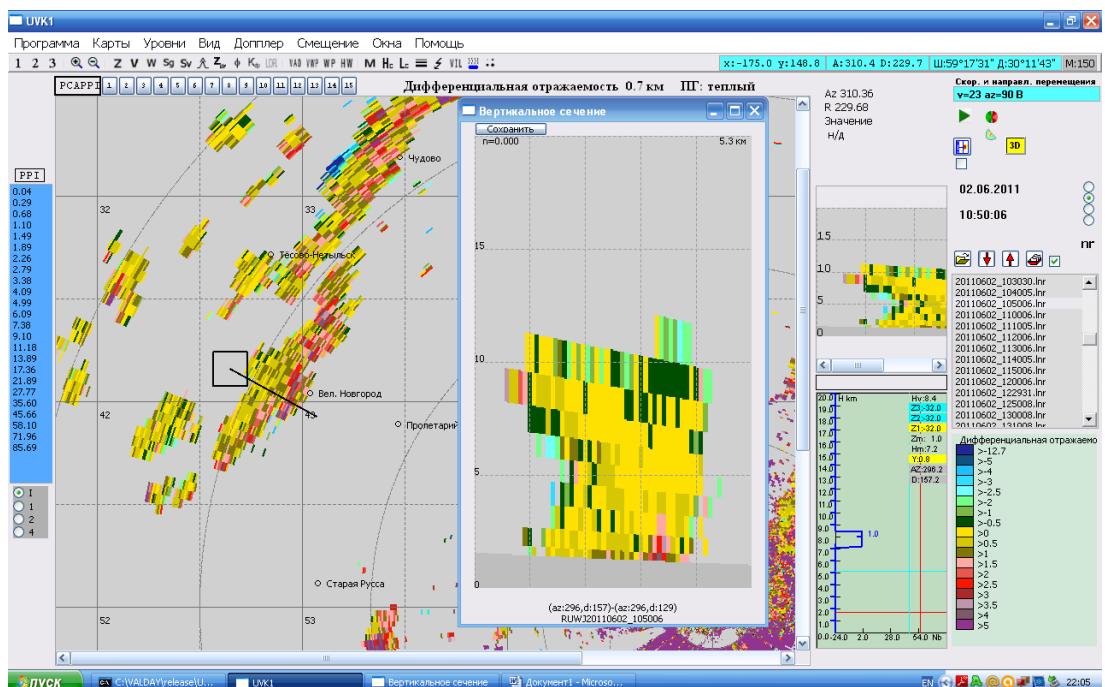


Рисунок 4.21 – Карта вертикального разреза дифференциальной отражаемости

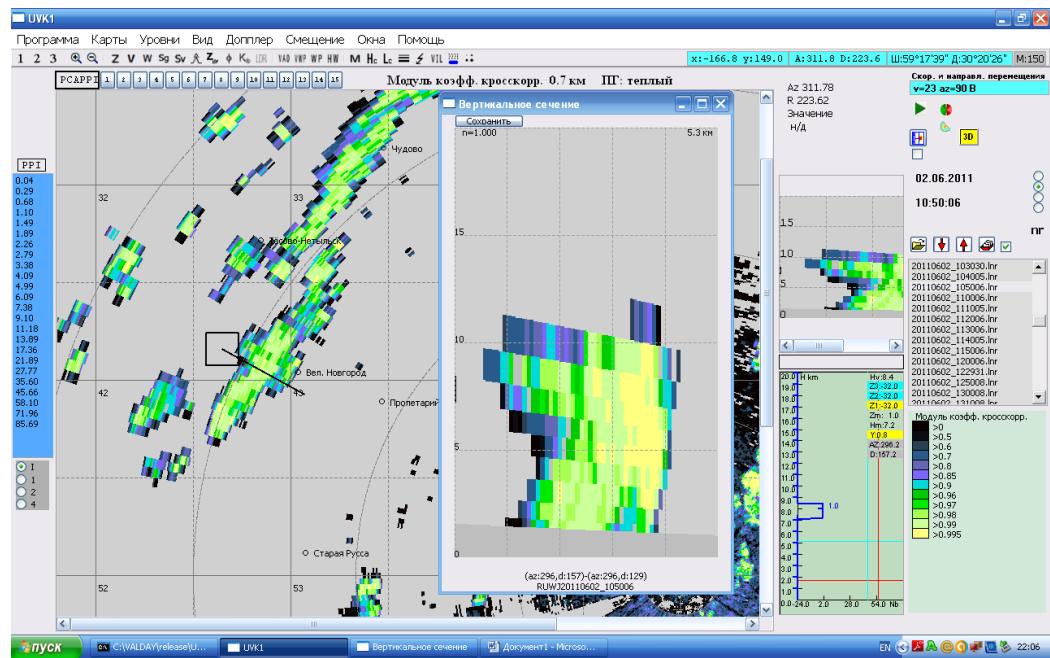


Рисунок 4.22 – Карта вертикального разреза коэффициента взаимной корреляции

2. Кириши, 08.08.2011.

Это единственный случай, когда было обнаружено деполяризационное ослабление, являющееся надежным признаком градоопасности. Соответствующие карты приведены на Рисунках 4.23, 4.24.

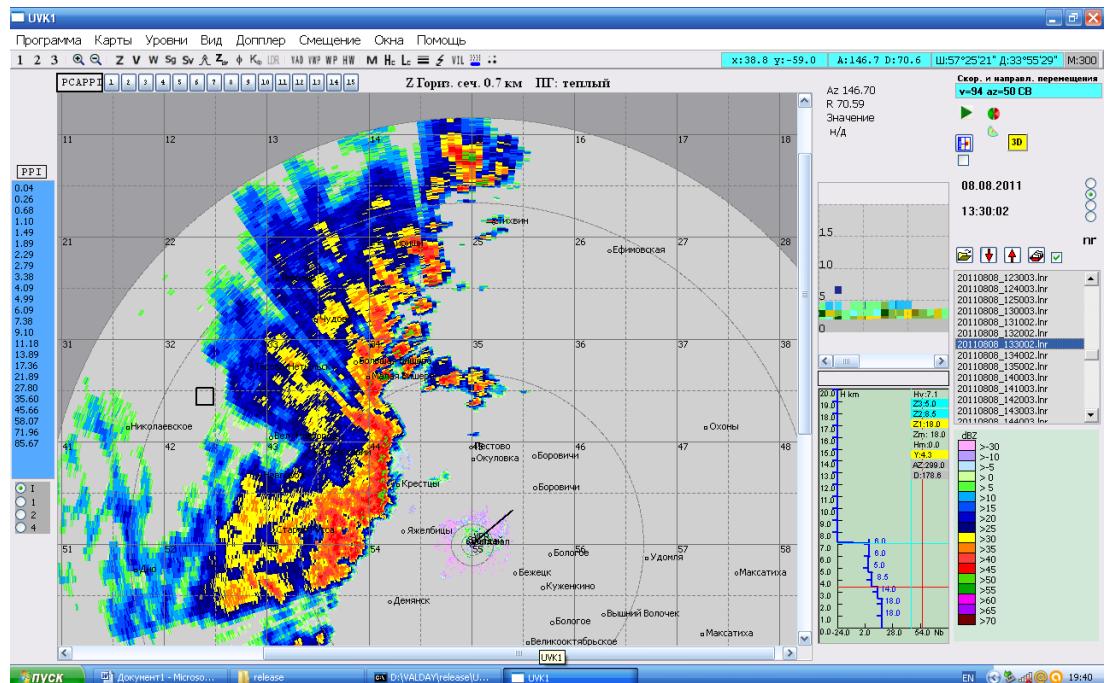


Рисунок 4.23 – Карта горизонтального разреза радиолокационной отражаемости

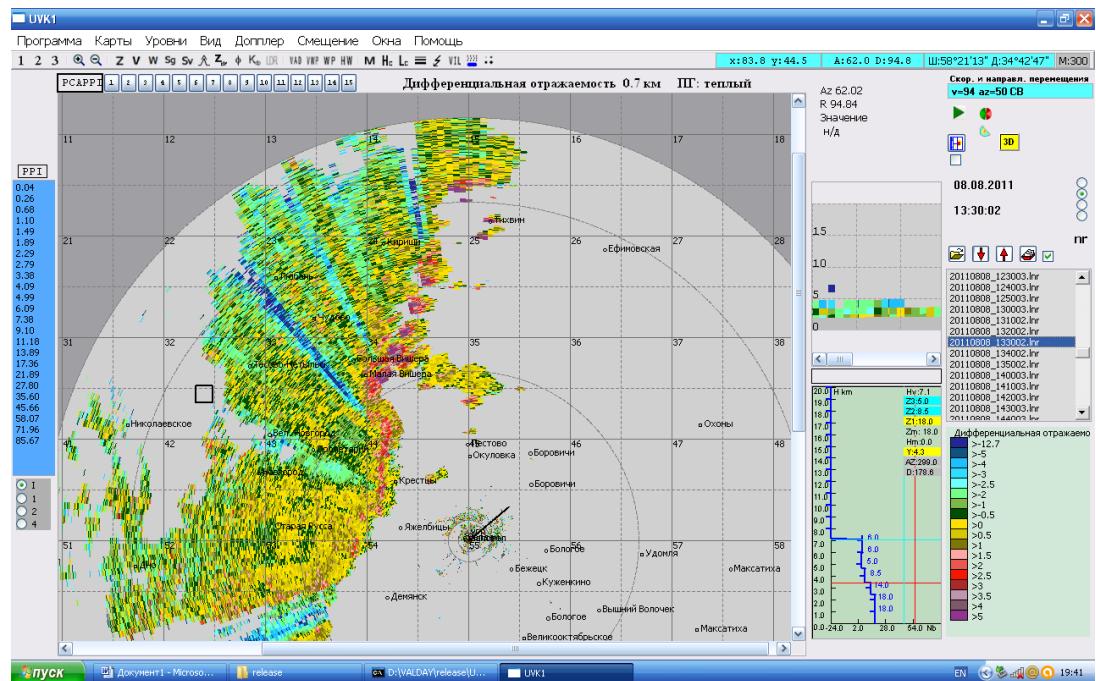


Рисунок 4.24 – Карта горизонтального разреза дифференциальной отражаемости

3. Любань, 09.08.2011.

Данные представлены на Рисунках 4.25-4.27. На этой станции град зафиксирован в срок 18 ч, а предиктор найден в 14 ч 30 мин. Очевидно, после 15 ч область образования града подошла к Любани и град выпал между сроками 15-18 ч. На рисунке 8.18 хорошо виден столб высокой отражаемости высотой 4 км. О наличии в нём града говорит область с отражаемостью более 50 dBZ. Это область ярко зелёного цвета. Это восходящий поток, в котором образовался град. Рассчитанная минимальная радиолокационная отражаемость составляет 48,4 dBZ, а реальная равна 53,5 dBZ. Имеет место превышение реальной отражаемости над рассчётной. Карты дифференциальной отражаемости и коэффициента взаимной корреляции показывают, что гидрометеоры в этой области находятся в твёрдом агрегатном состоянии - дифференциальная отражаемость показывает значения близкие к нулю ($Z_{DR}=0,5$). Коэффициент взаимной корреляции больше 0.98 ($|\rho_{HV}|=0,99$).

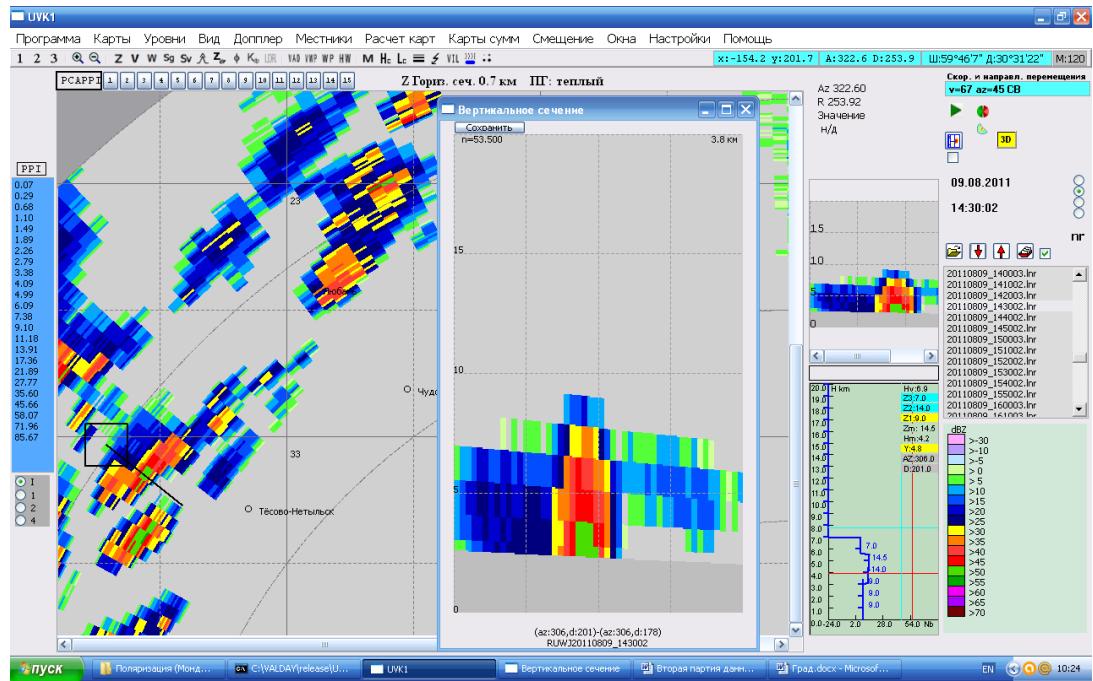


Рисунок 4.25 – Карта вертикального разреза радиолокационной отражаемости

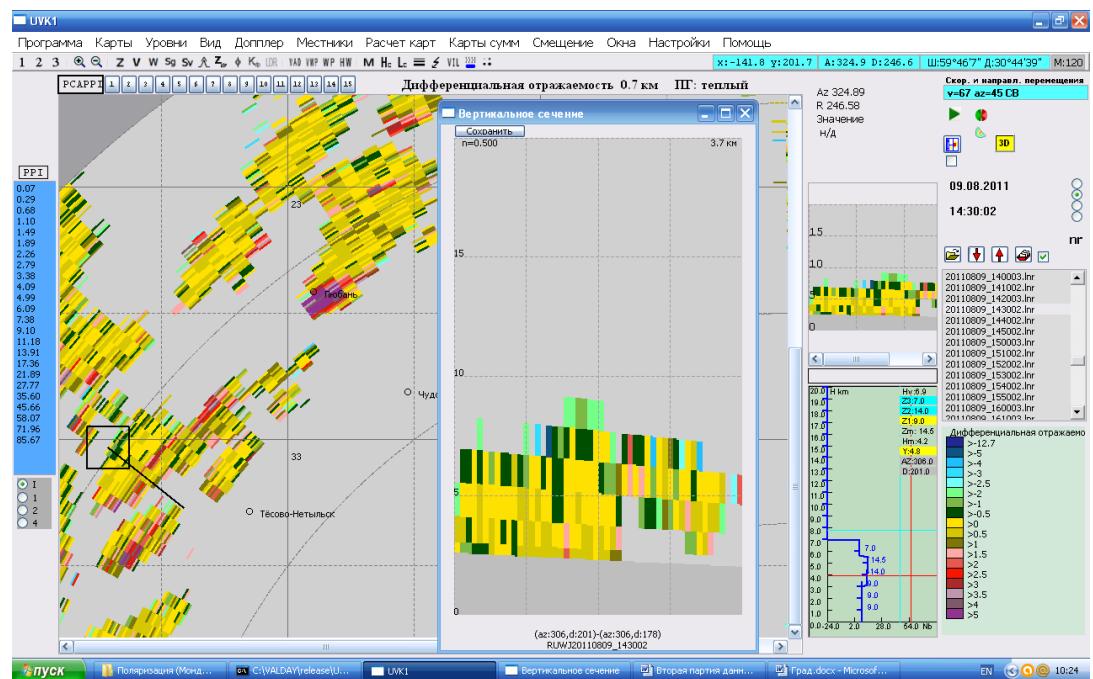


Рисунок 4.26 – Карта вертикального разреза дифференциальной отражаемости

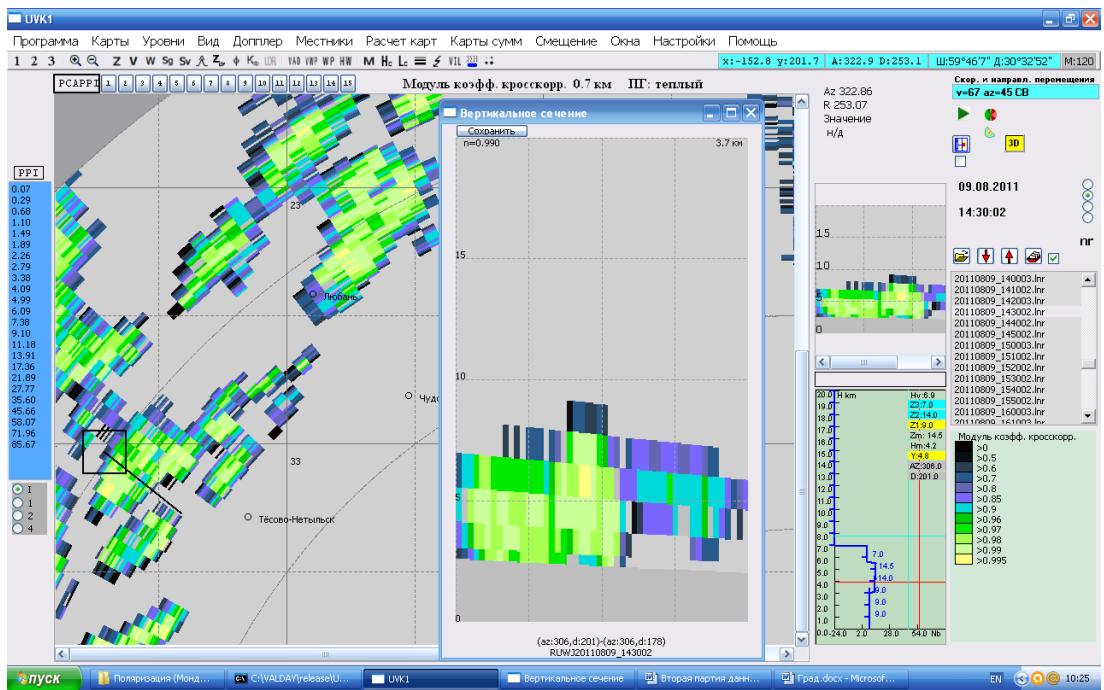


Рисунок 4.27 – Карта вертикального разреза коэффициента взаимной корреляции

4. Любань, 11.08.2011.

Данные представлены на Рисунках 4.28-4.30. На этой станции град зафиксирован в срок 15 ч, а предиктор найден в 14 ч 20 мин. О наличии града говорит область с отражаемостью более 45 dBZ. Это область красного цвета. Это восходящий поток, в котором образовался град. Расчитанная минимальная радиолокационная отражаемость составляет 45,8 dBZ, а реальная равна 48,5 dBZ. Карты дифференциальной отражаемости и коэффициента взаимной корреляции показывают, что гидрометеоры в этой области находятся в твёрдом агрегатном состоянии - дифференциальная отражаемость показывает значения близкие к нулю ($Z_{DR}=0,0$). Коэффициент взаимной корреляции больше 0.98 ($|\rho_{HV}|=1,00$).

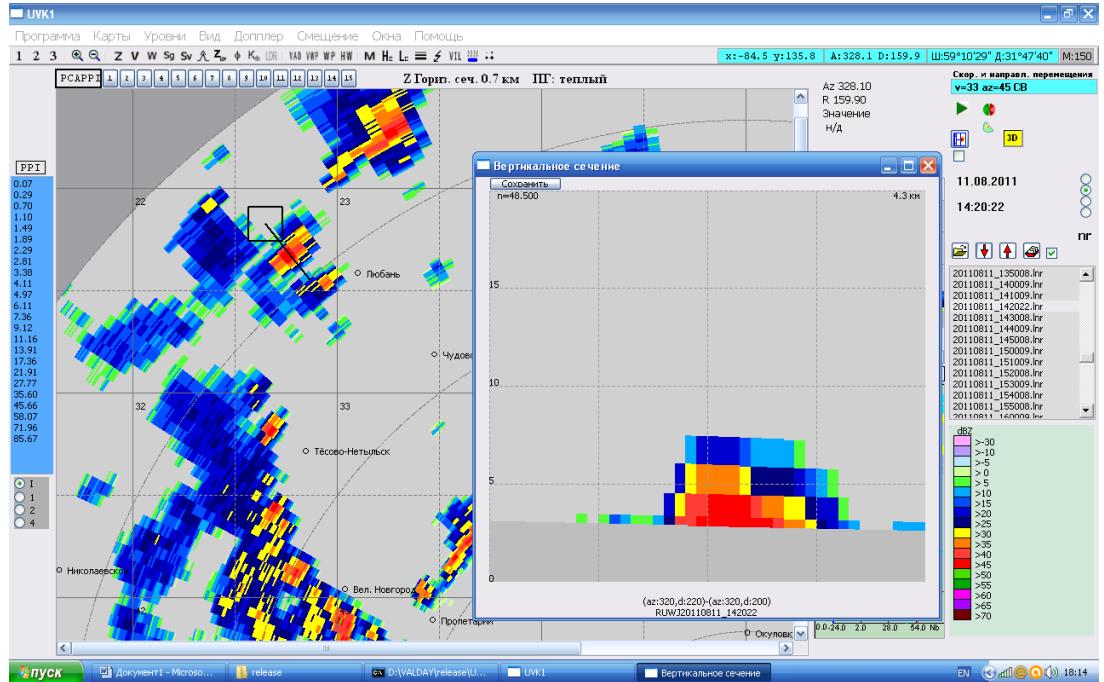


Рисунок 4.28 – Карта вертикального разреза радиолокационной отражаемости

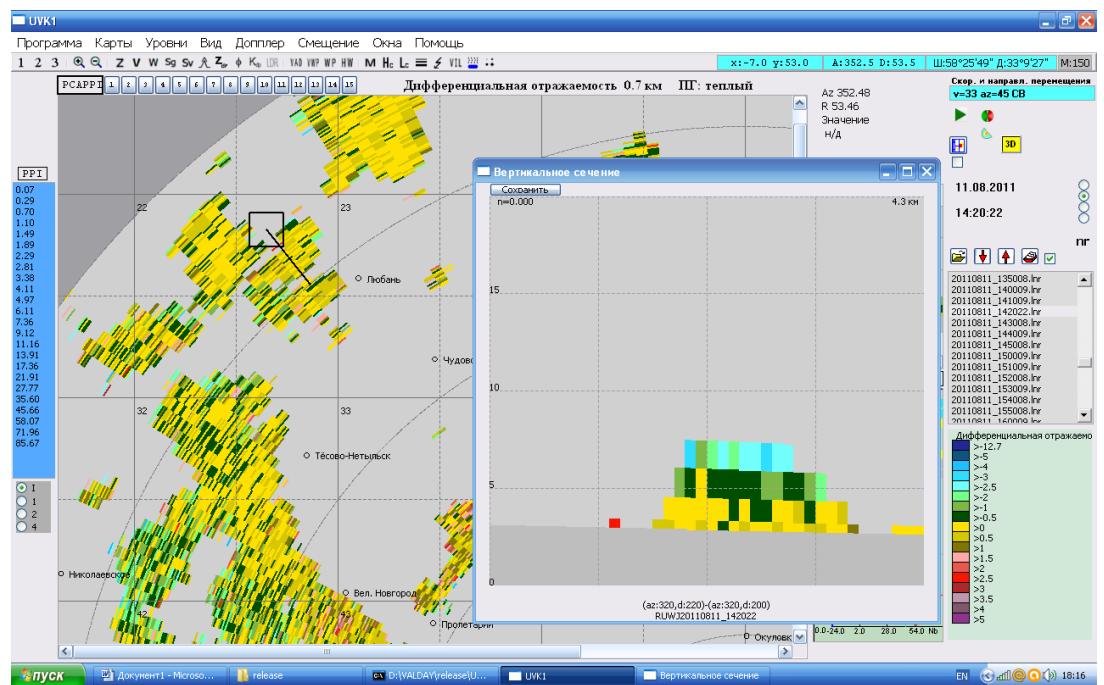


Рисунок 4.29 – Карта вертикального разреза дифференциальной отражаемости

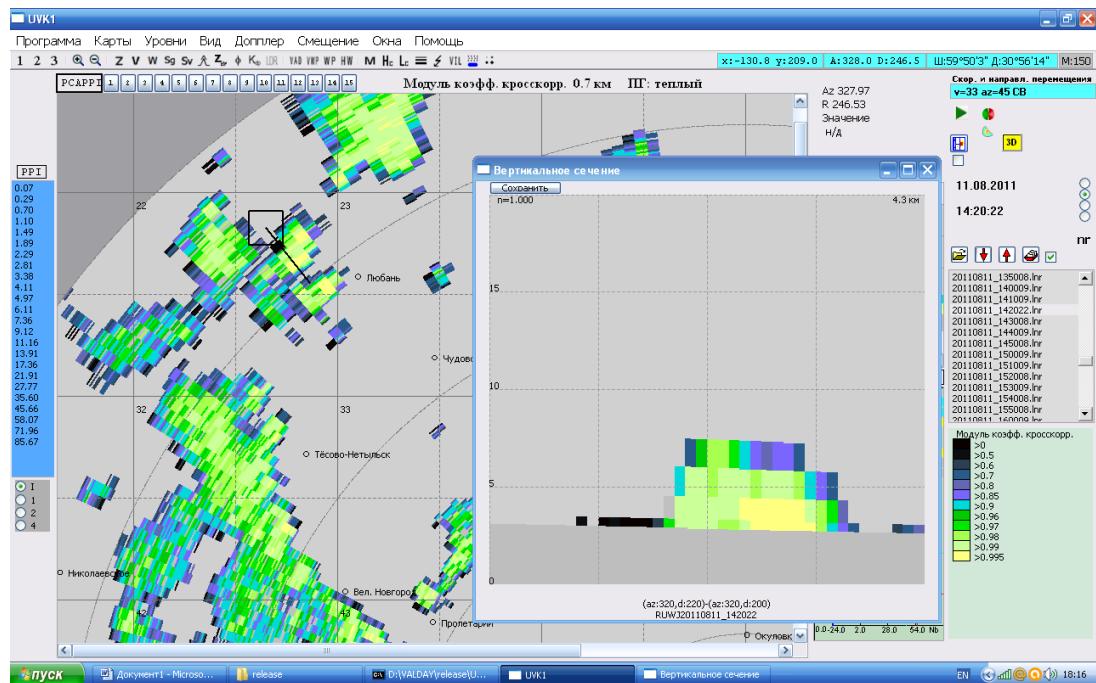


Рисунок 4.30 – Карта вертикального разреза коэффициента взаимной корреляции

5. Любань, 23.09.2011.

Данные представлены на рисунках 4.31-4.33. На этой станции град зафиксирован в срок 15 ч, а предиктор найден за 20 мин до него. На рисунке 8.24 хорошо виден столб высокой отражаемости высотой 5 км. О наличии в нём града говорит область с отражаемостью более 35 dBZ. Это область оранжевого цвета. Это восходящий поток, в котором образовался град. Рассчитанная минимальная радиолокационная отражаемость составляет 34,9 dBZ, а реальная равна 35,5 dBZ. Карты дифференциальной отражаемости и коэффициента взаимной корреляции показывают, что гидрометеоры в этой области находятся в твёрдом агрегатном состоянии. Дифференциальная отражаемость показывает значения близкие к нулю ($Z_{DR}=-0,2$). Коэффициент взаимной корреляции больше 0.98 ($|\rho_{HV}|=1,00$).

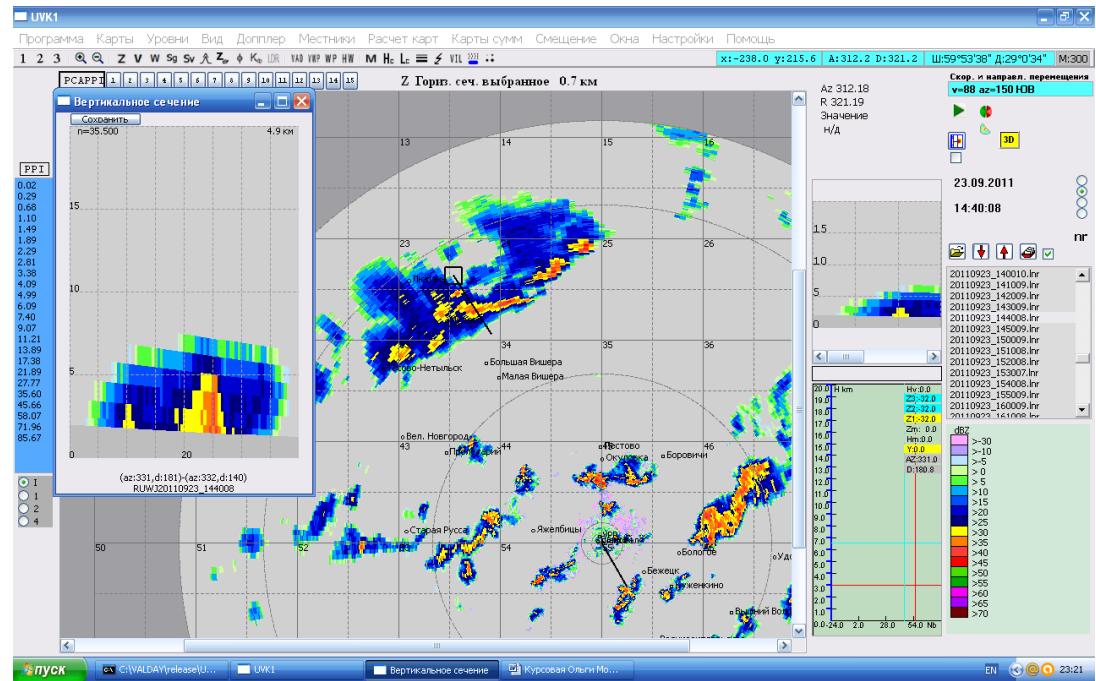


Рисунок 4.31 – Карта вертикального разреза радиолокационной отражаемости

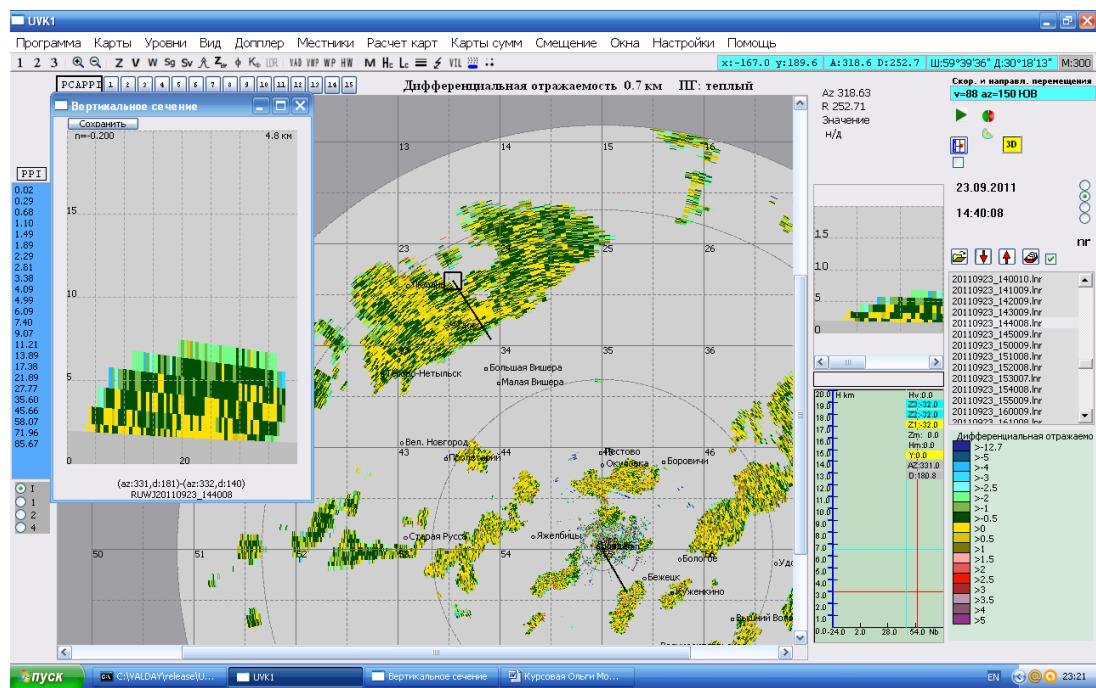


Рисунок 4.32 – Карта вертикального разреза дифференциальной отражаемости

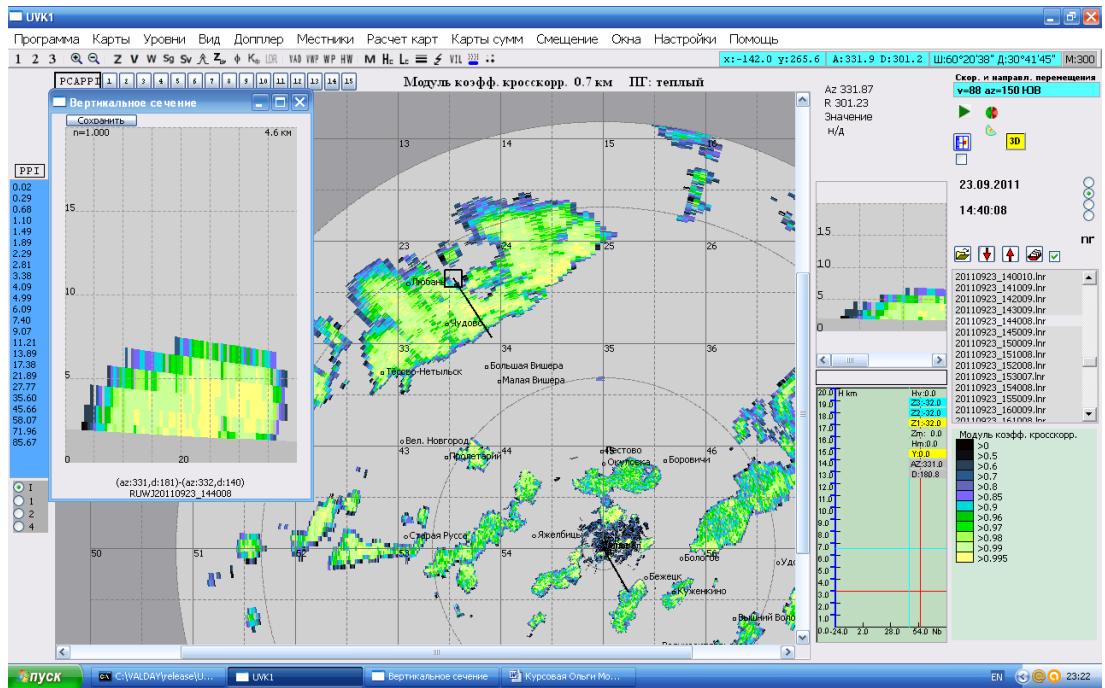


Рисунок 4.33 – Карта вертикального разреза коэффициента взаимной корреляции

6. Боровичи, 23.09.2011.

Данные представлены на Рисунках 4.34-4.36. На этой станции град зафиксирован в срок 15 ч, а предиктор найден в 12 ч. Это говорит о том, что град выпал между сроками 12-15 ч. На Рисунке 8.34 хорошо виден столб высокой отражаемости высотой 5 км. О наличии в нём града говорит область с отражаемостью более 50 dBZ. Это область ярко зелёного цвета. Это восходящий поток, в котором образовался град. Рассчитанная минимальная радиолокационная отражаемость составляет 38,8 dBZ, а реальная равна 51,0 dBZ. Карты дифференциальной отражаемости и коэффициента взаимной корреляции показывают, что гидрометеоры в этой области находятся в твёрдом агрегатном состоянии - дифференциальная отражаемость показывает значения близкие к нулю ($Z_{DR}=-0,5$). Коэффициент взаимной корреляции больше 0.98 ($|\rho_{HV}|=1,00$).

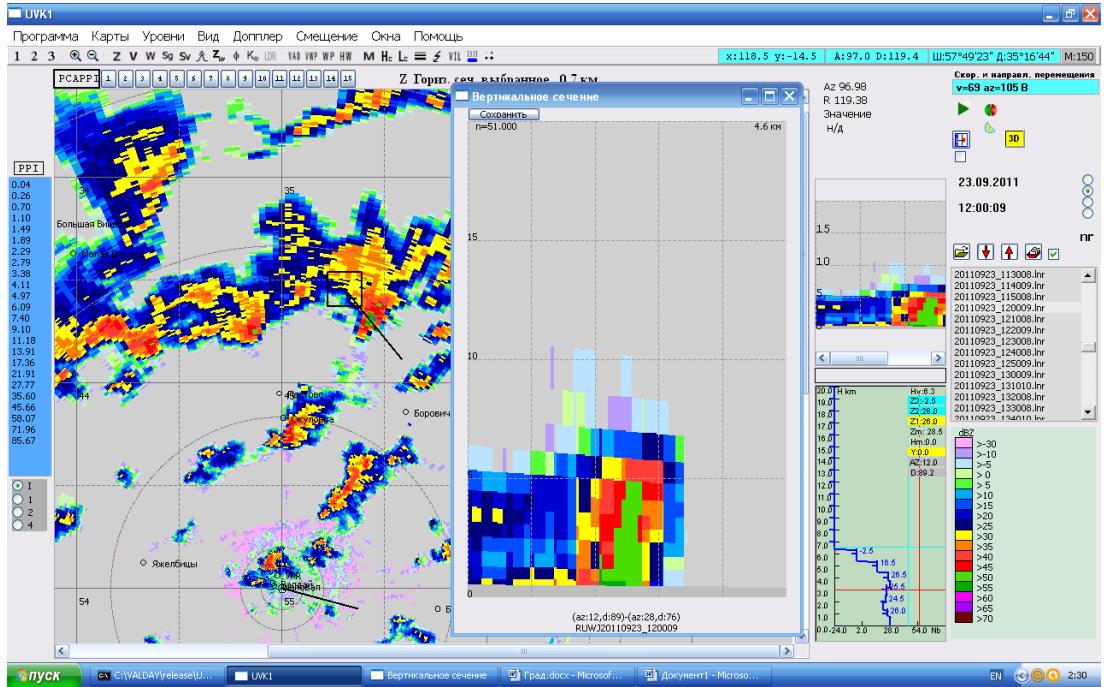


Рисунок 4.34 – Карта вертикального разреза радиолокационной отражаемости

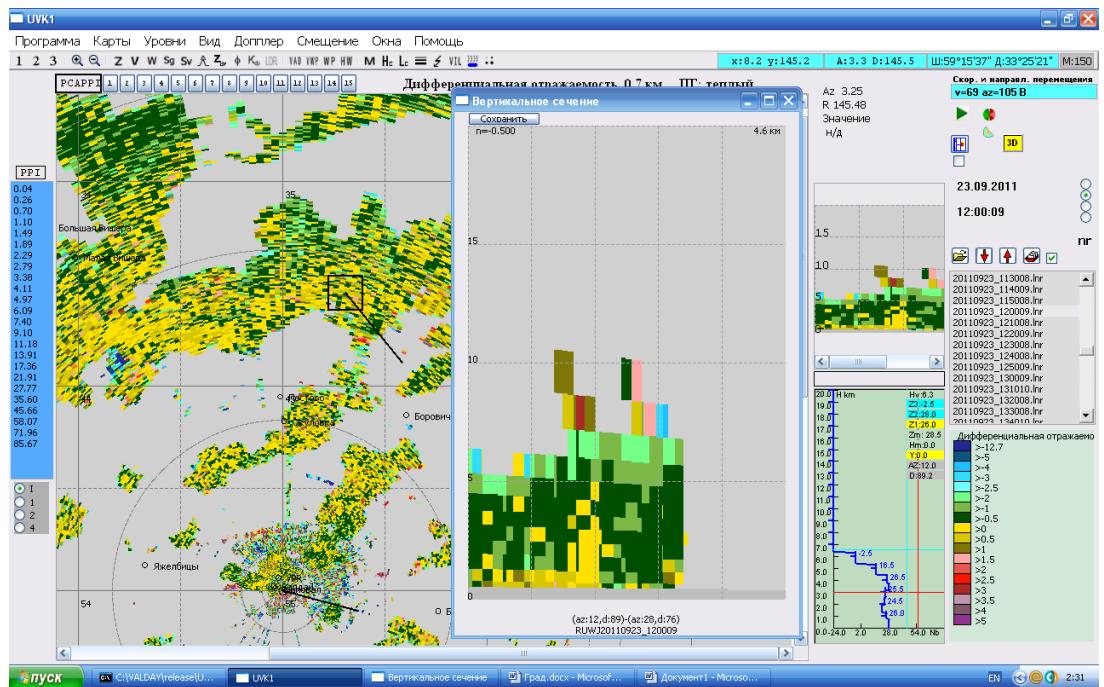


Рисунок 4.35 – Карта вертикального разреза дифференциальной отражаемости

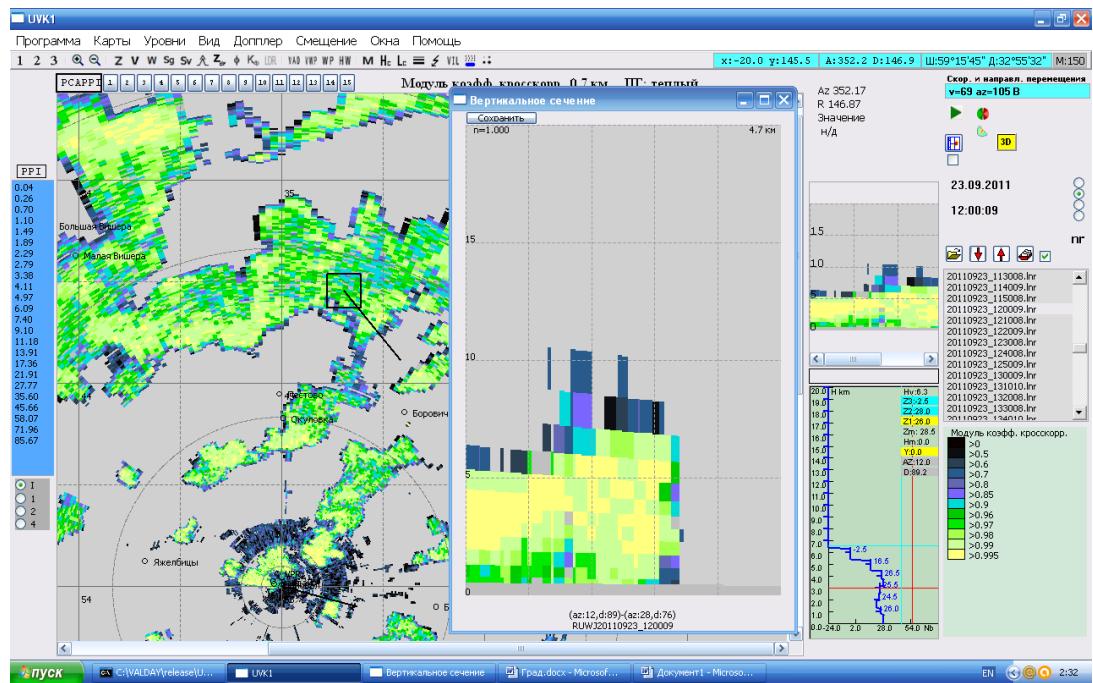


Рисунок 4.36 – Карта вертикального разреза коэффициента взаимной корреляции

7. Кириши, 23.09.2011.

Данные представлены на Рисунках 4.37-4.39. На этой станции град зафиксирован в срок 15 ч, а предиктор найден в 14 ч. О наличии града говорит область с отражаемостью более 40 dBZ. Это область красно-оранжевого цвета. Это восходящий поток, в котором образовался град. Рассчитанная минимальная радиолокационная отражаемость составляет 31,6 dBZ, а реальная равна 43,0 dBZ. Карты дифференциальной отражаемости и коэффициента взаимной корреляции показывают, что гидрометеоры в этой области находятся в твёрдом агрегатном состоянии - дифференциальная отражаемость показывает значения близкие к нулю ($Z_{DR}=0,0$). Коэффициент взаимной корреляции больше 0.98 ($|\rho_{HV}|=1,00$).

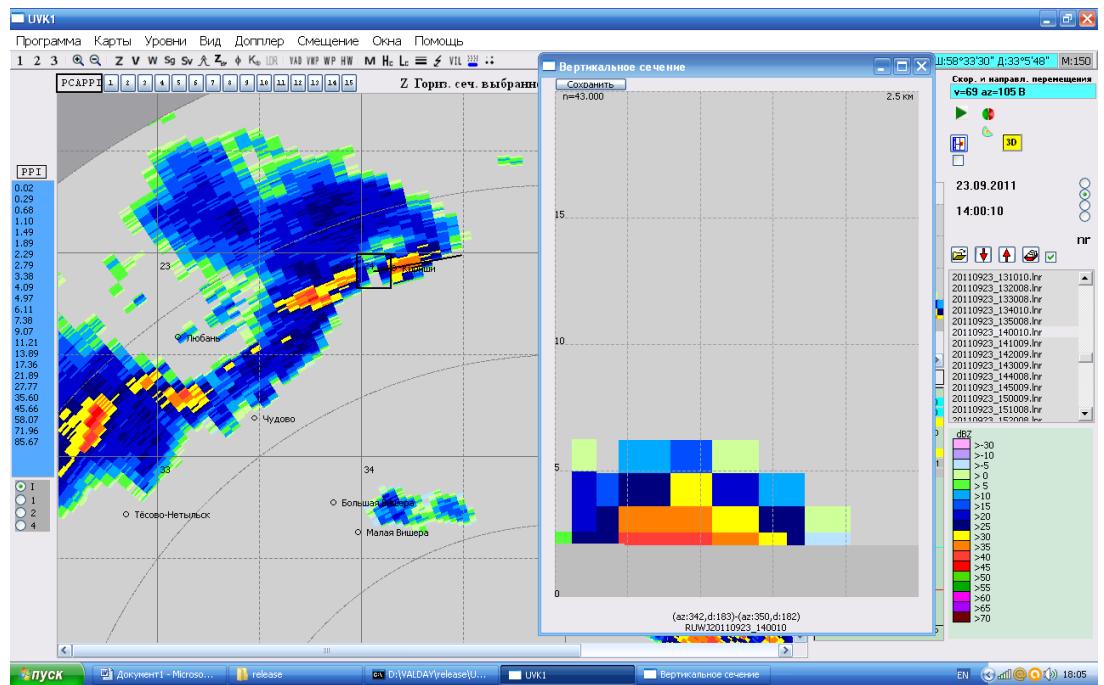


Рисунок 4.37 – Карта вертикального разреза радиолокационной отражаемости

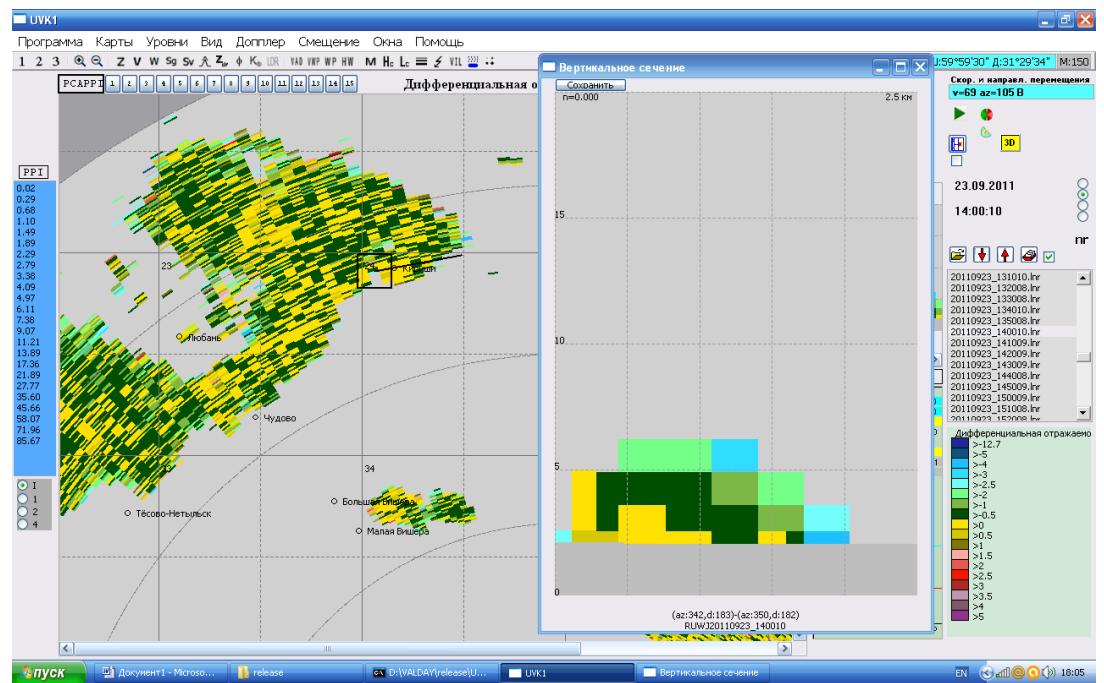


Рисунок 4.38 – Карта вертикального разреза дифференциальной отражаемости

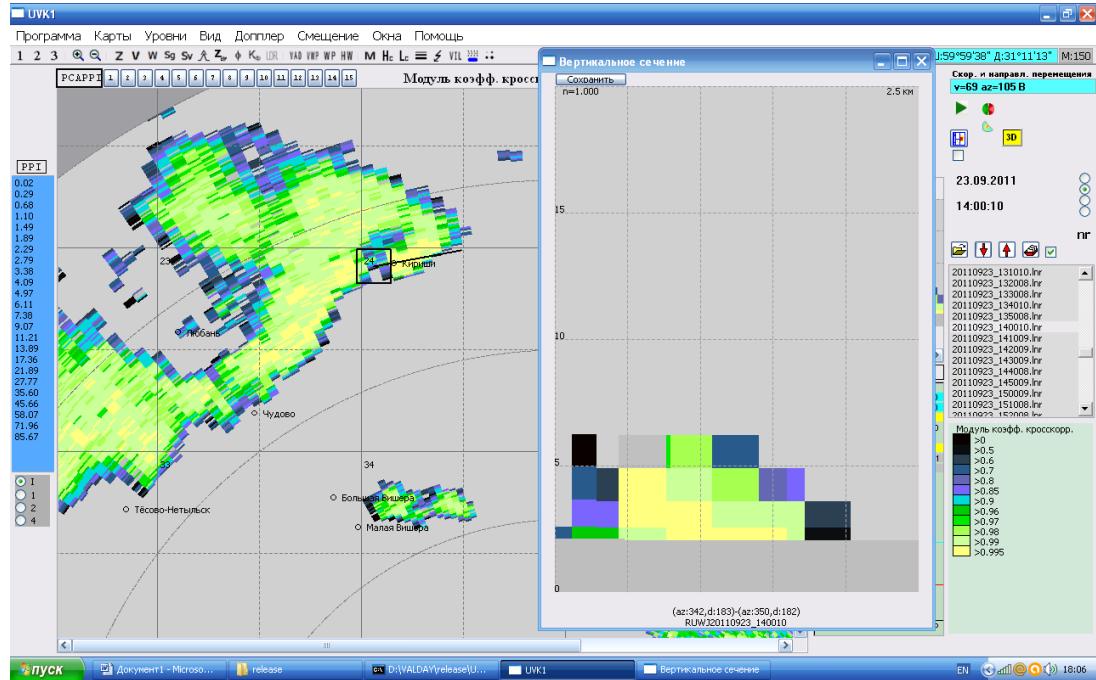


Рисунок 4.39 – Карта вертикального разреза коэффициента взаимной корреляции

8. Боровичи, 28.09.2011.

Данные представлены на Рисунках 4.40-4.42. На этой станции град зафиксирован в срок 15 ч, а предиктор найден за 10 мин до этого. Это явно восходящий поток, т.к. есть участок, нависший над меньшей отражаемостью. О наличии в нём града говорит область с отражаемостью более 50 dBZ. Это область ярко зелёного цвета. Рассчитанная минимальная радиолокационная отражаемость составляет 40,5 dBZ, а реальная равна 53,0 dBZ. Карты дифференциальной отражаемости и коэффициента взаимной корреляции показывают, что гидрометеоры в этой области находятся в твёрдом и сухом состоянии - дифференциальная отражаемость показывает значения близкие к нулю ($Z_{DR}=-0,2$). Коэффициент взаимной корреляции больше 0,98 ($|\rho_{HV}|=1,00$).

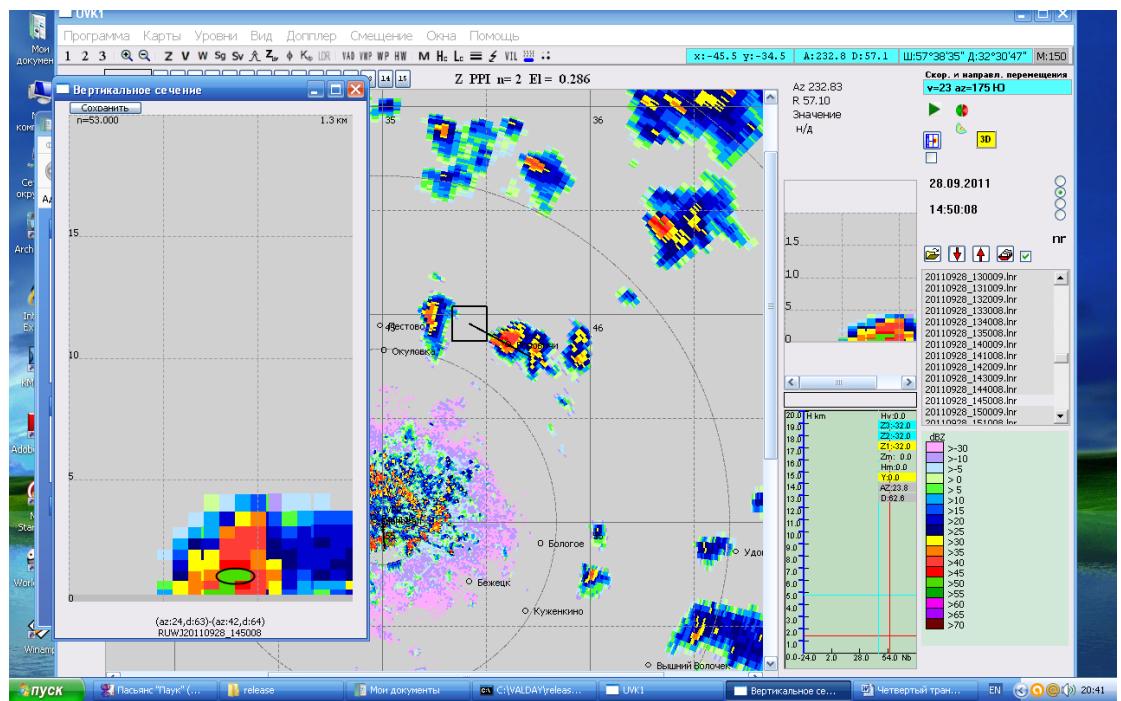


Рисунок 4.40 – Карта вертикального разреза радиолокационной отражаемости

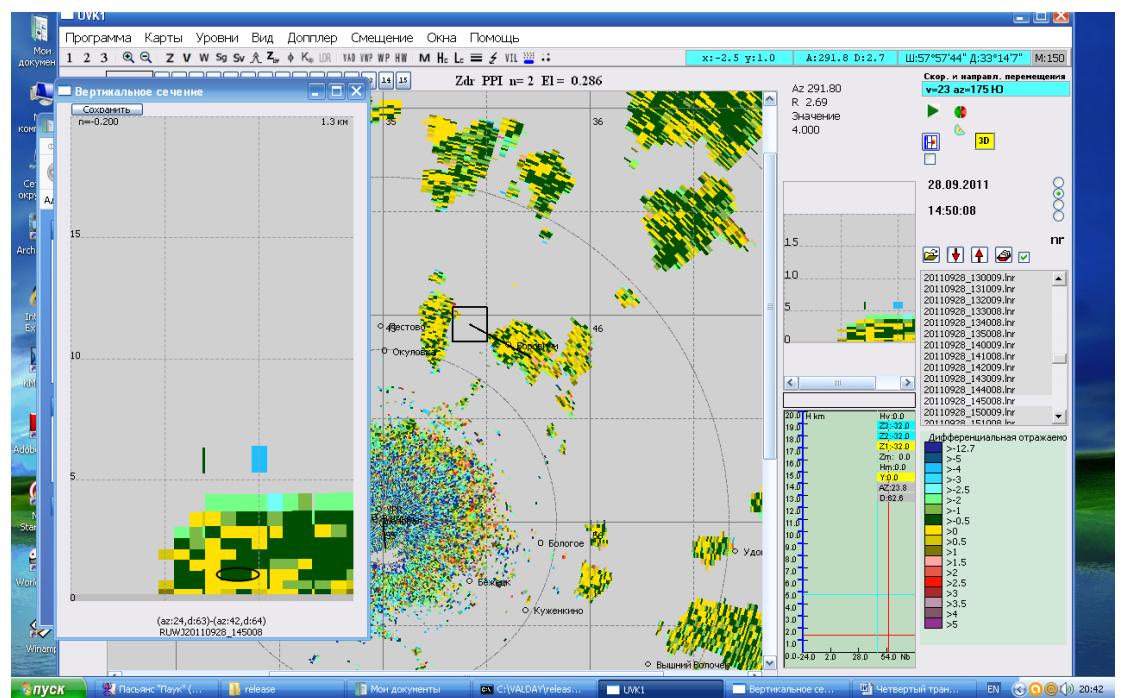


Рисунок 4.41 – Карта вертикального разреза дифференциальной отражаемости

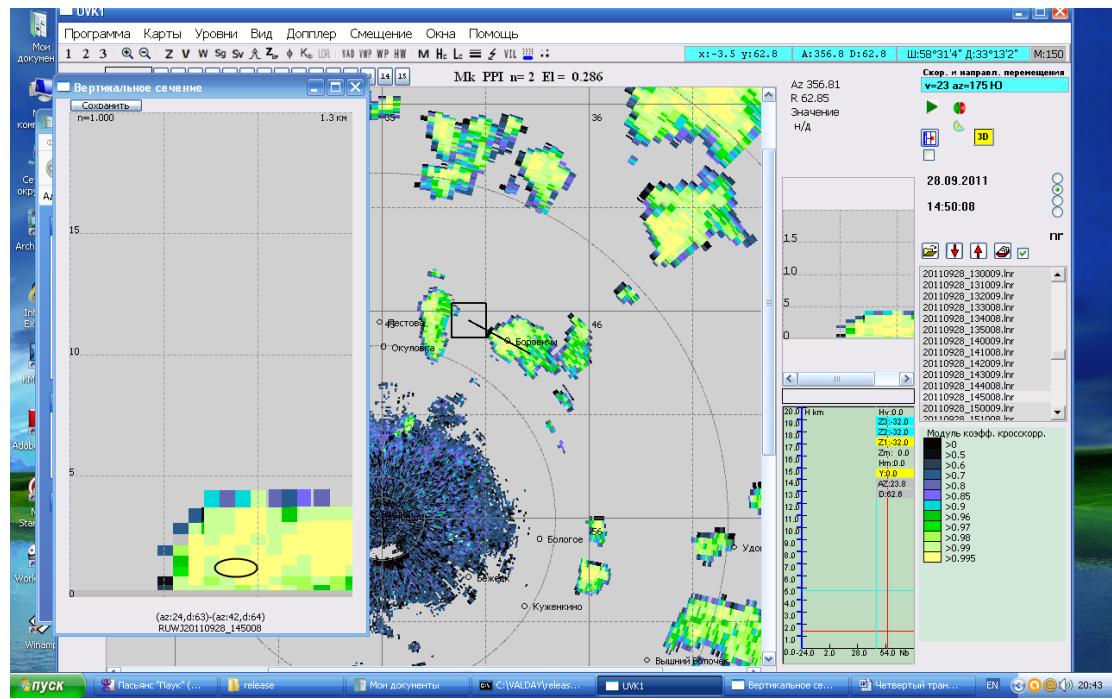


Рисунок 4.42 – Карта вертикального разреза коэффициента взаимной корреляции

9. Охоны, 30.05.2012.

Данные представлены на Рисунках 4.39-4.45. На этой станции град зафиксирован в срок 12 ч, а предиктор найден в 10 ч 47 ми. Это явно восходящий поток, т.к. есть участок, нависший над меньшей отражаемостью. О наличии в нём града говорит область с отражаемостью более 60 dBZ. Это область розового цвета. Рассчитанная минимальная радиолокационная отражаемость составляет 54,0 dBZ, а реальная равна 62,5 dBZ. Карты дифференциальной отражаемости и коэффициента взаимной корреляции показывают, что гидрометеоры в этой области находятся в твёрдом и сухом состоянии - дифференциальная отражаемость показывает значения близкие к нулю ($Z_{DR}=0,9$). Коэффициент взаимной корреляции больше 0.98 ($|\rho_{HV}|=0,99$).

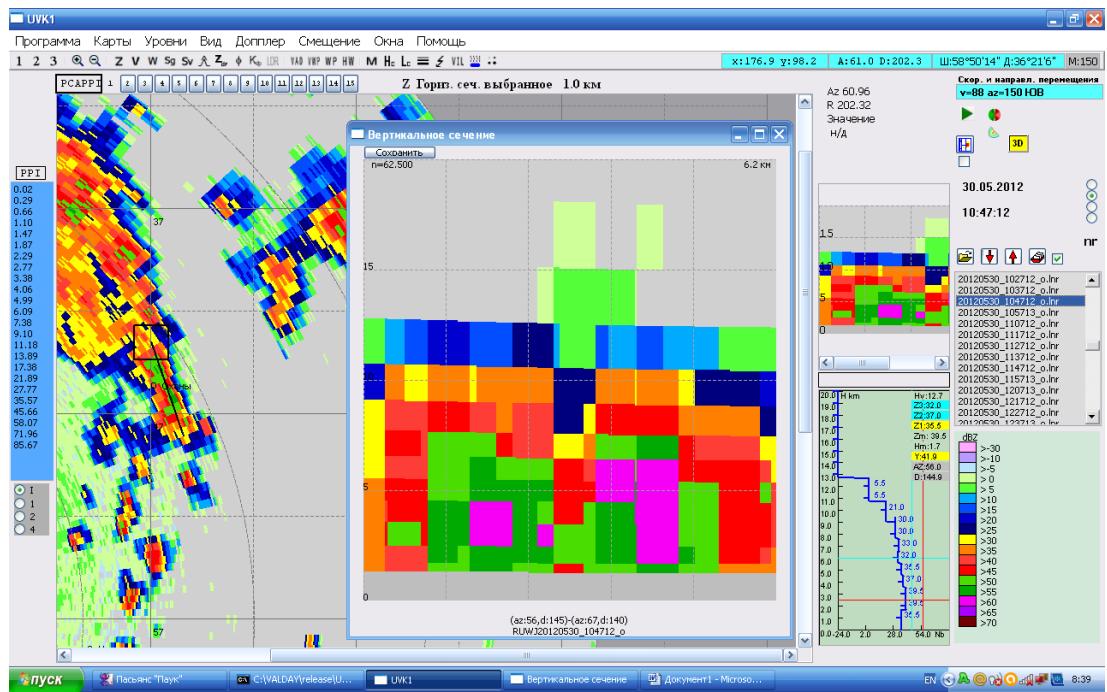


Рисунок 4.43 – Карта вертикального разреза радиолокационной отражаемости

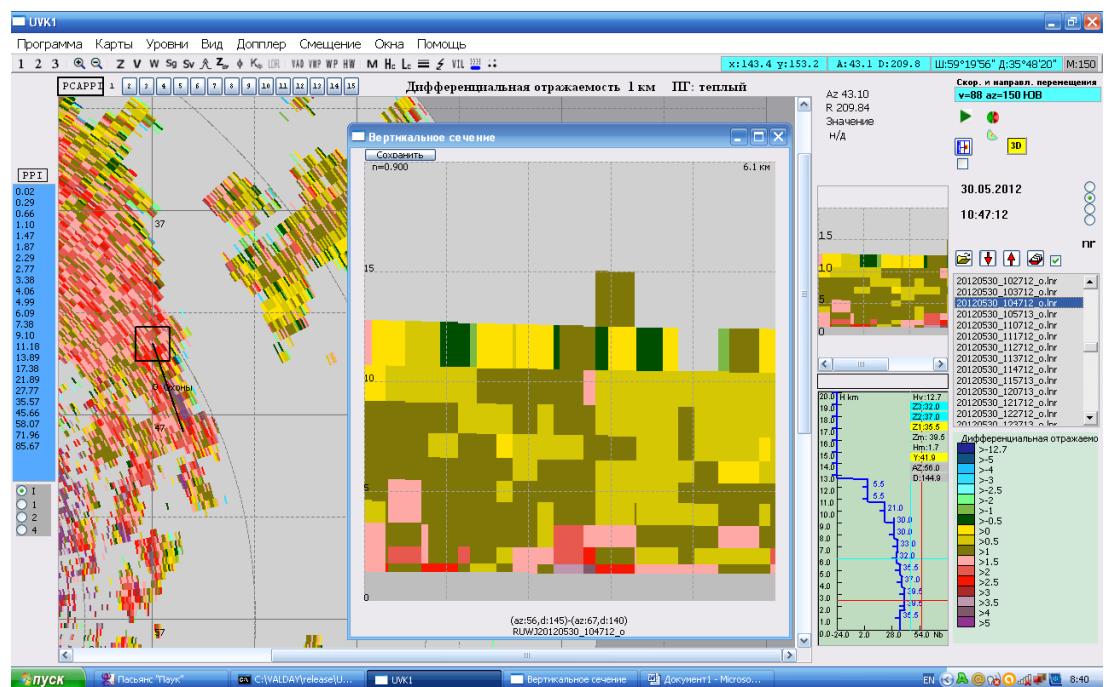


Рисунок 4.44 – Карта вертикального разреза дифференциальной отражаемости

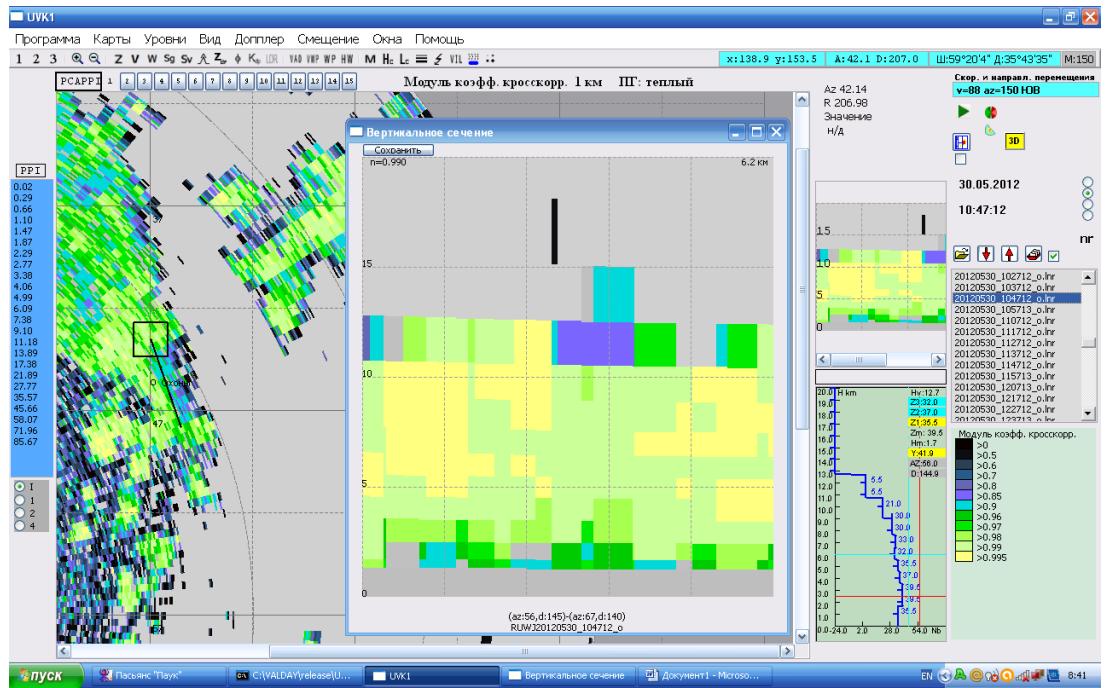


Рисунок 4.45 – Карта вертикального разреза коэффициента взаимной корреляции

10. Любань, 21.07.2012.

Данные представлены на рисунках 4.46-4.48. На этой станции град зафиксирован в срок 12 ч, а предиктор найден в 9 ч 47 мин. Это говорит о том, что град выпал между сроками 9-12 ч. На рисунке 8.46 хорошо виден столб высокой отражаемости высотой 5 км. О наличии в нём града говорит область с отражаемостью более 50 dBZ. Это область ярко зелёного цвета. Рассчитанная минимальная радиолокационная отражаемость составляет 52,4 dBZ, а реальная равна 52,5 dBZ. Карты дифференциальной отражаемости и коэффициента взаимной корреляции показывают, что гидрометеоры в этой области находятся в твёрдом и сухом состоянии - дифференциальная отражаемость показывает значения близкие к нулю ($Z_{DR}=-0,6$). Коэффициент взаимной корреляции больше 0.98 ($|\rho_{HV}|=1,00$).

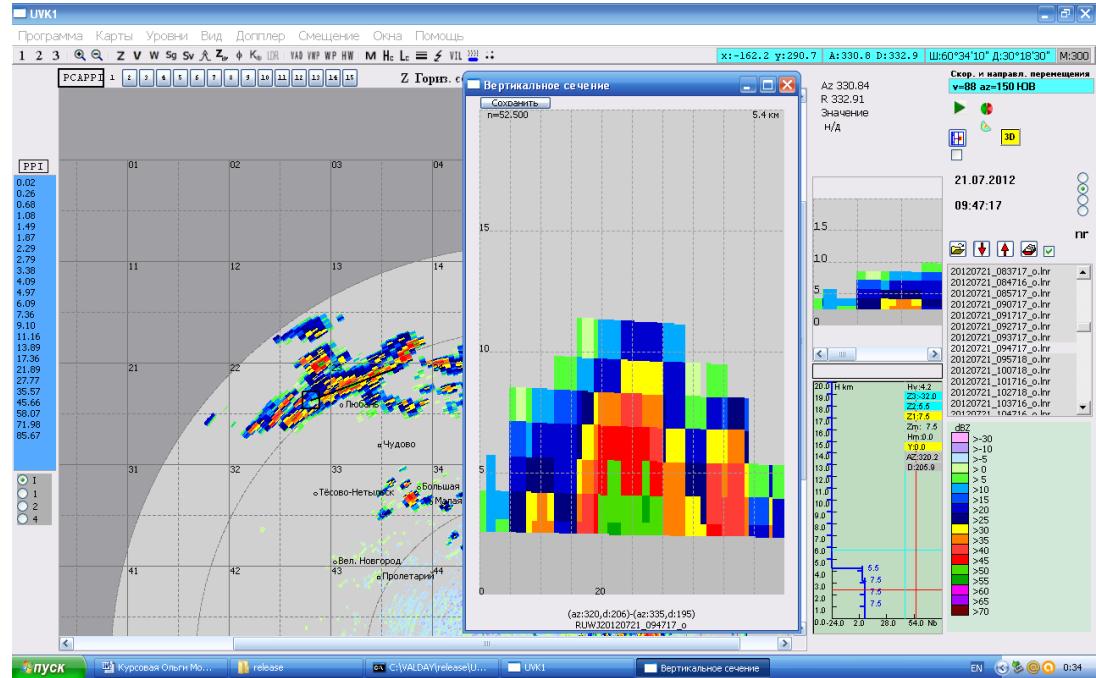


Рисунок 4.46 – Карта вертикального разреза радиолокационной отражаемости

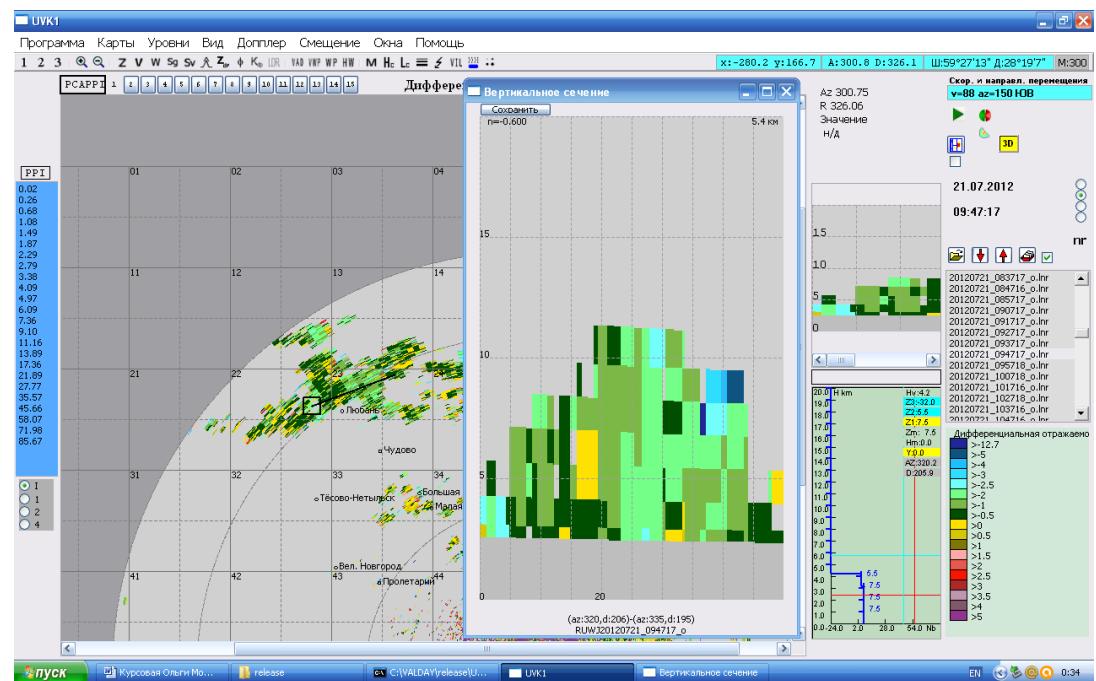


Рисунок 4.47 – Карта вертикального разреза дифференциальной отражаемости

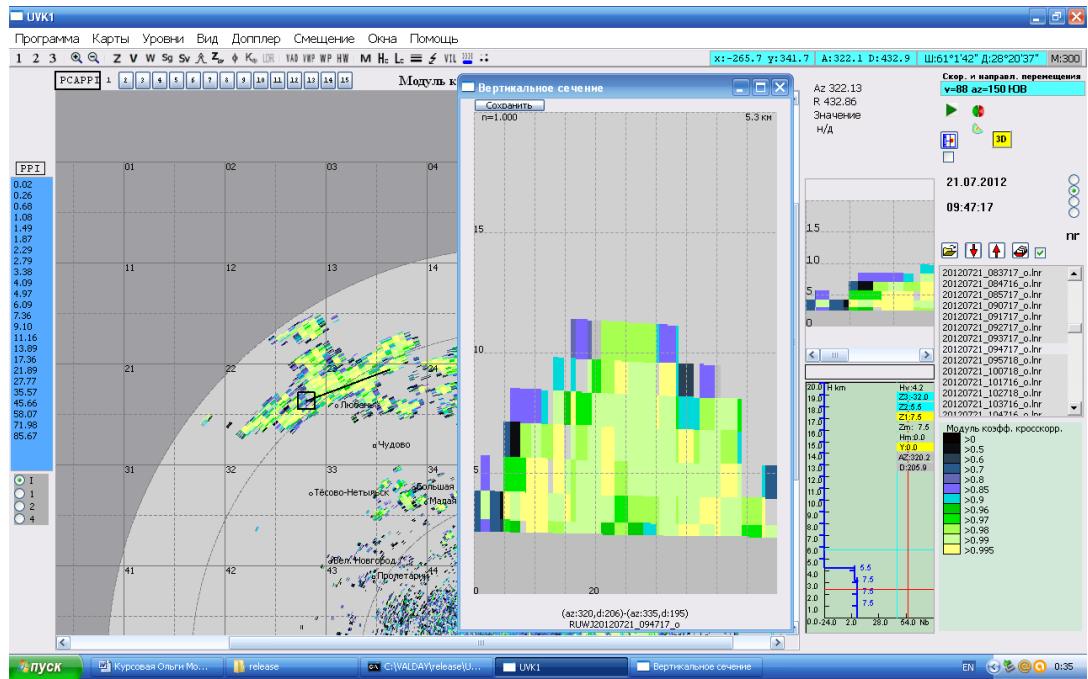


Рисунок 4.48 – Карта вертикального разреза коэффициента взаимной корреляции

11. Торжок, 08.06.2013.

Данные представлены на Рисунках 4.49-4.51. На этой станции град зафиксирован в срок 12 ч, а предиктор найден за 12 мин до этого. На рисунке 8.49 хорошо виден столб высокой отражаемости высотой 4 км. О наличии в нём града говорит область с отражаемостью более 50 dBZ. Это область ярко зелёного цвета. Рассчитанная минимальная радиолокационная отражаемость составляет 44,4 dBZ, а реальная равна 53,0 dBZ. Карты дифференциальной отражаемости и коэффициента взаимной корреляции показывают, что гидрометеоры в этой области находятся в твёрдом и сухом состоянии - дифференциальная отражаемость показывает значения близкие к нулю ($Z_{DR}=-0,3$). Коэффициент взаимной корреляции больше 0.98 ($|\rho_{HV}|=0,99$).

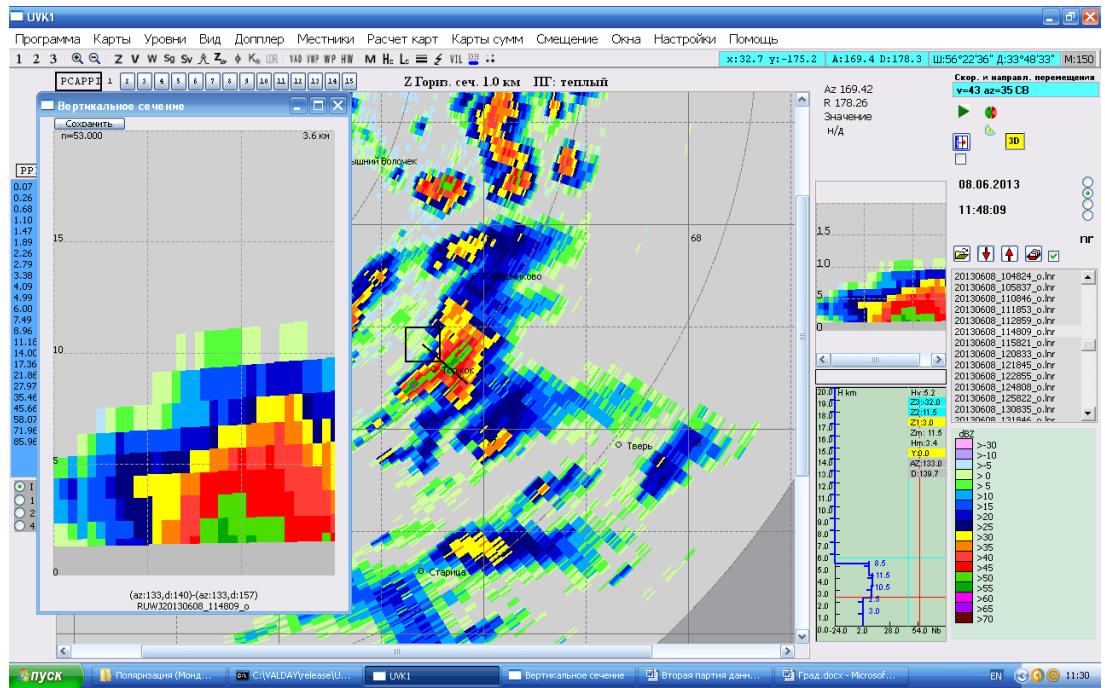


Рисунок 4.49 – Карта вертикального разреза радиолокационной отражаемости

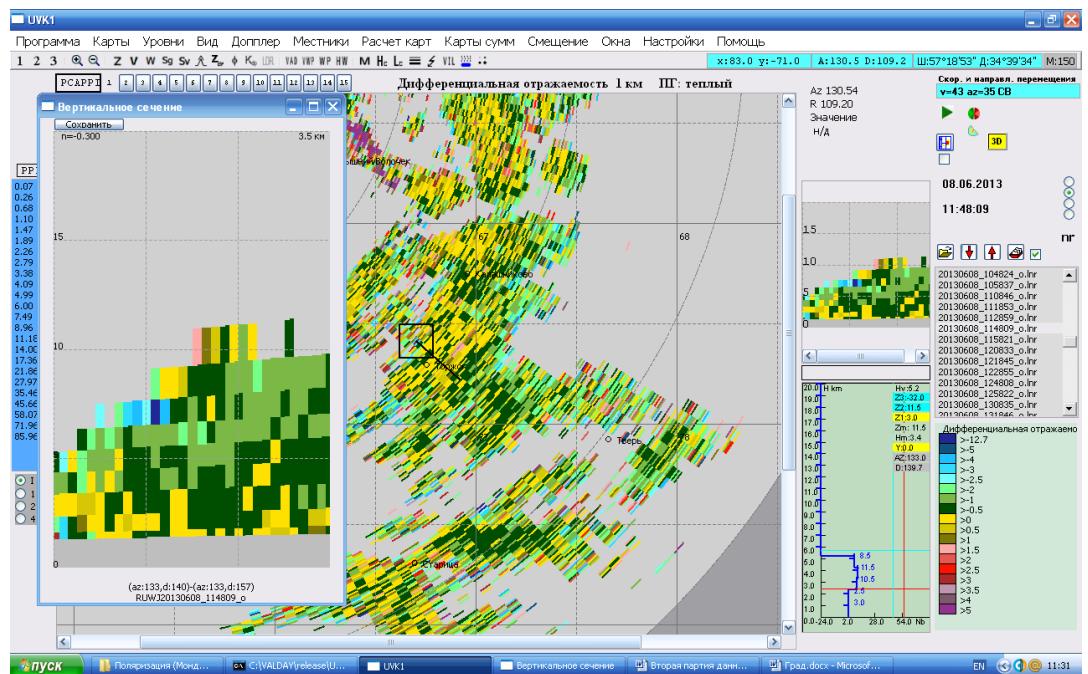


Рисунок 4.50 – Карта вертикального разреза дифференциальной отражаемости

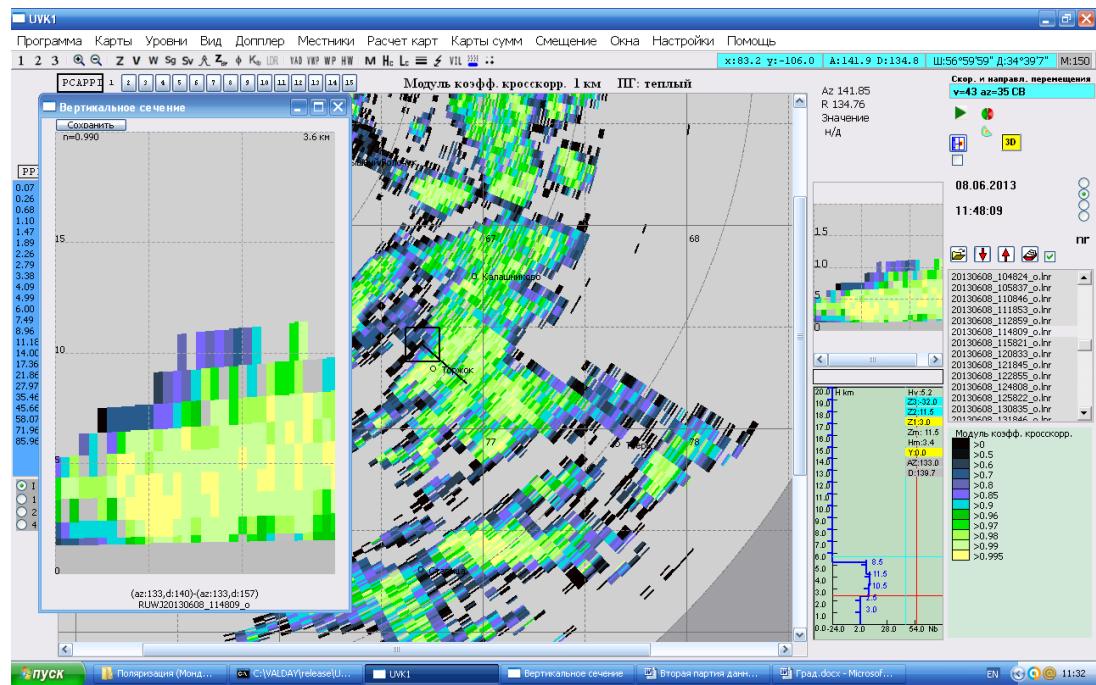


Рисунок 4.51 – Карта вертикального разреза коэффициента взаимной корреляции

12. Охоны, 27.06.2013.

Данные представлены на Рисунках 4.52-4.54. На этой станции град зафиксирован в срок 15 ч, а предиктор найден в 11ч 57 мин. Очевидно, после 12 ч область образования града подошла к Охонам и град выпал между сроками 12-15 ч. Это явно восходящий поток, т.к. есть участок, нависший над меньшей отражаемостью. О наличии в нём града говорит область с отражаемостью более 60 dBZ. Это область ярко розового цвета. Расчитанная минимальная радиолокационная отражаемость составляет 54,0 dBZ, а реальная равна 62,0 dBZ. Карты дифференциальной отражаемости и коэффициента взаимной корреляции показывают, что гидрометеоры в этой области находятся в твёрдом и сухом состоянии - дифференциальная отражаемость показывает значения близкие к нулю ($Z_{DR}=-0,2$). Коэффициент взаимной корреляции больше 0,98 ($|\rho_{HV}|=0,98$).

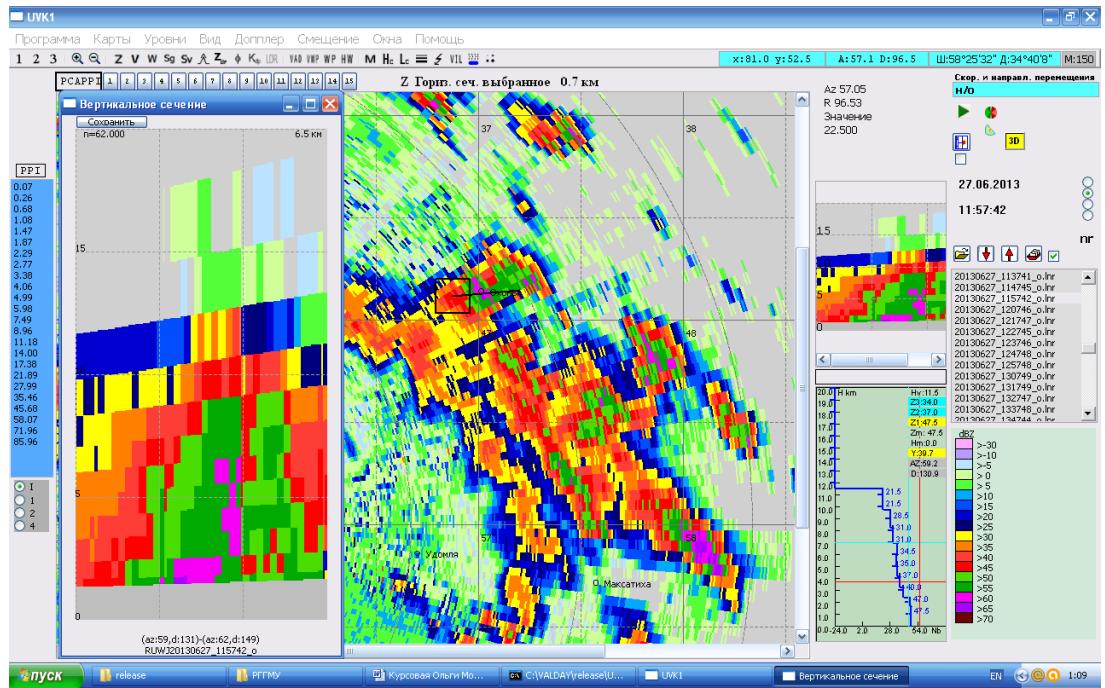


Рисунок 4.52 – Карта вертикального разреза радиолокационной отражаемости

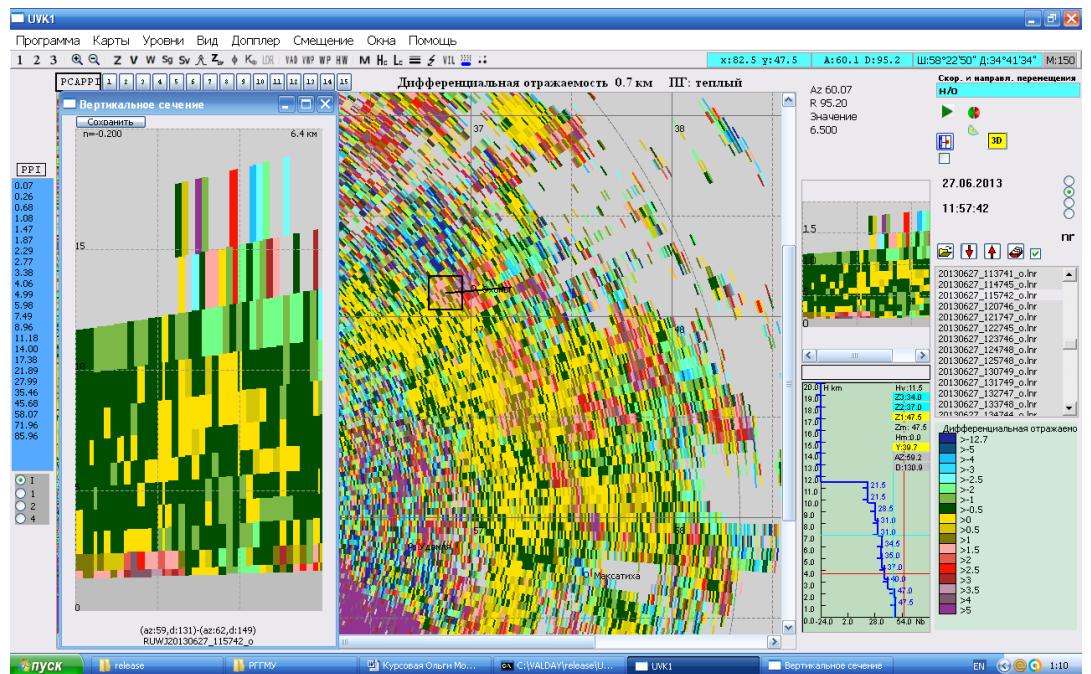


Рисунок 4.53 – Карта вертикального разреза дифференциальной отражаемости

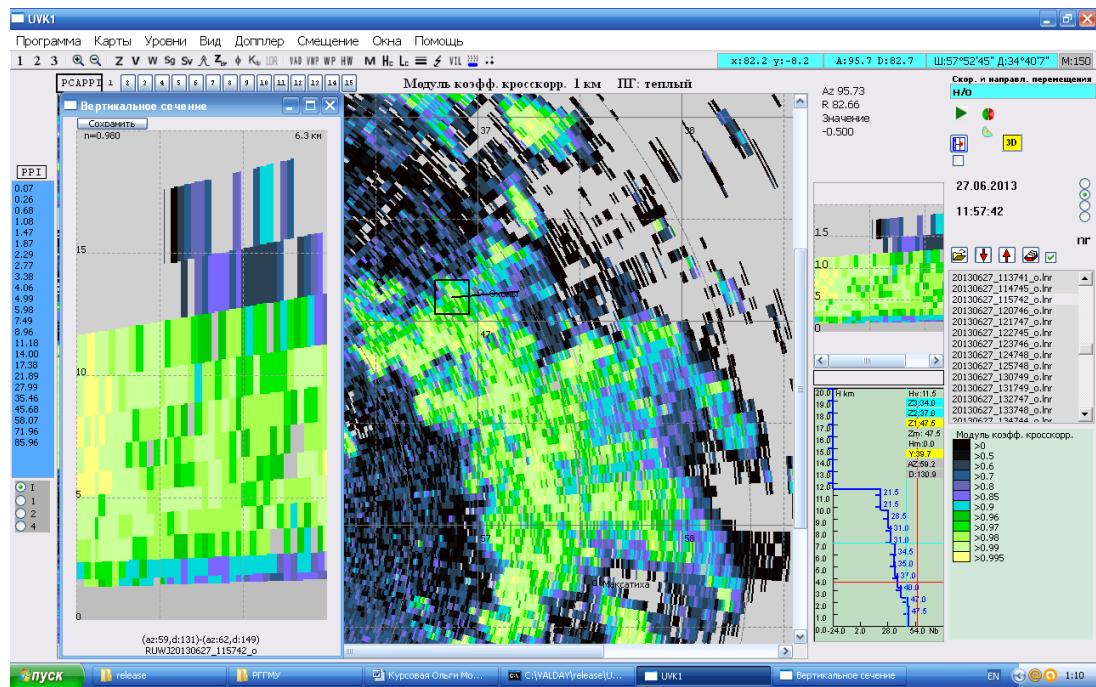


Рисунок 4.54 – Карта вертикального разреза коэффициента взаимной корреляции

13. Любань, 06.07.2013.

Данные представлены на Рисунках 4.55-4.58. На этой станции град зафиксирован в срок 12 ч, а предиктор найден в 8 ч 37 мин. Очевидно, после 9 ч область образования града подошла к Любани и град выпал между сроками 9-12 ч. На рисунке 8.55 хорошо виден столб высокой отражаемости высотой 6 км. О наличии в нём града говорит область с отражаемостью более 50 dBZ. Это область ярко зелёного цвета. Рассчитанная минимальная радиолокационная отражаемость составляет 52,9 dBZ, а реальная равна 53,0 dBZ. Карты дифференциальной отражаемости и коэффициента взаимной корреляции показывают, что гидрометеоры в этой области находятся в твёрдом и сухом состоянии - дифференциальная отражаемость показывает значения близкие к нулю ($Z_{DR}=-0.2$). Коэффициент взаимной корреляции больше 0,98 ($|\rho_{HV}|=0.98$).

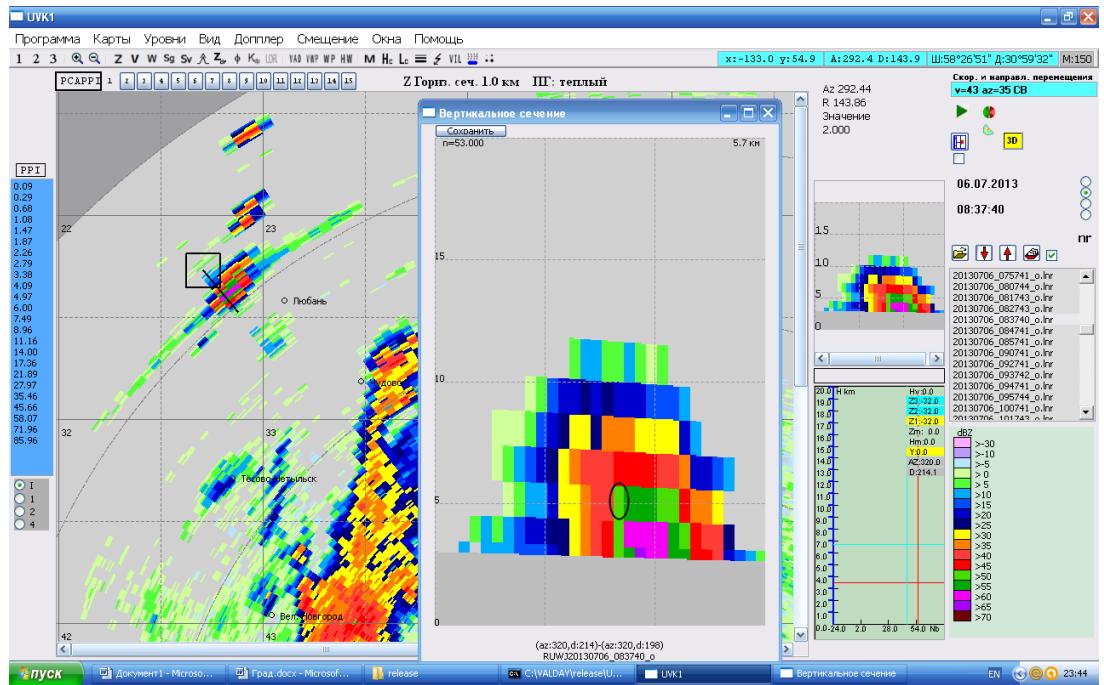


Рисунок 4.55 – Карта вертикального разреза радиолокационной отражаемости

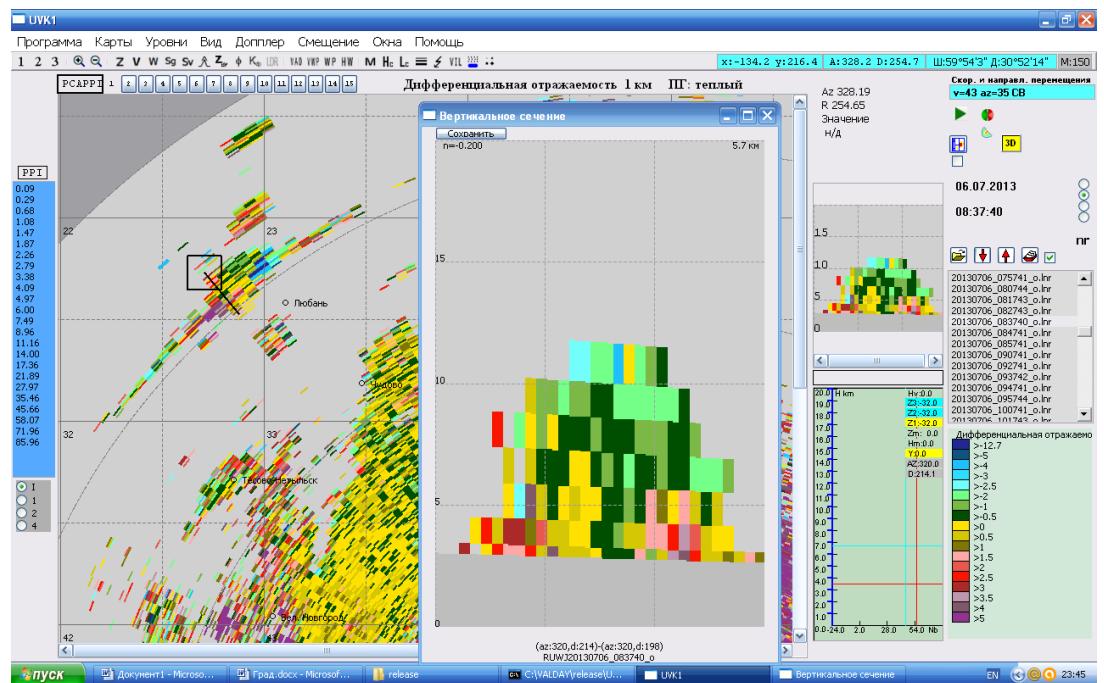


Рисунок 4.56 – Карта вертикального разреза дифференциальной отражаемости

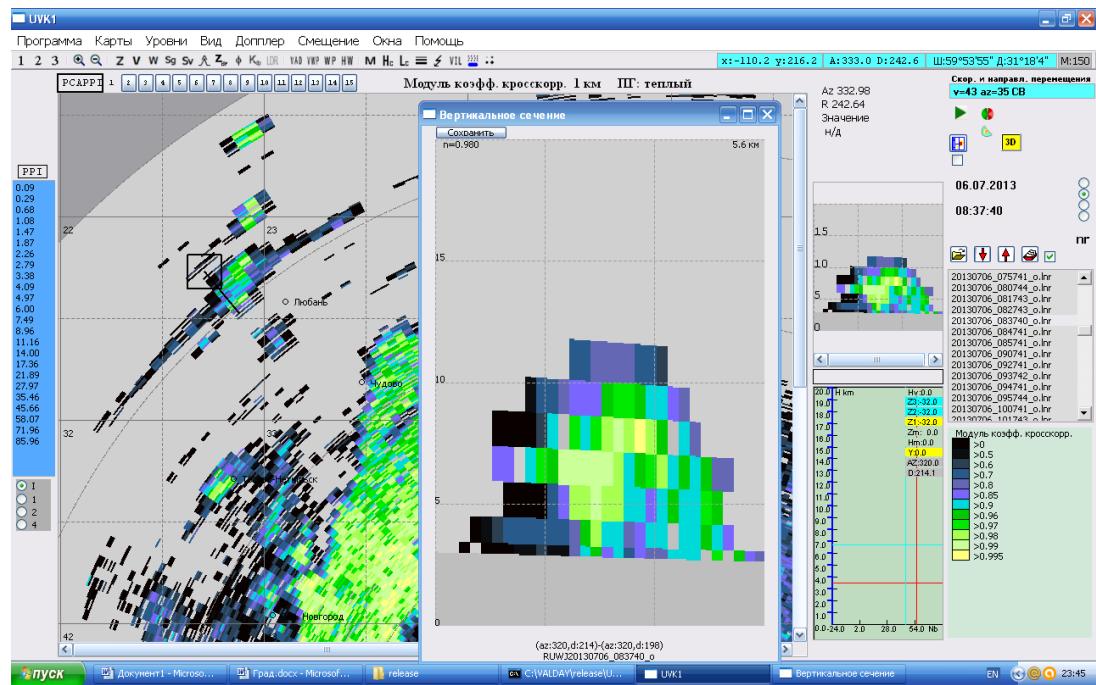


Рисунок 4.57 – Карта вертикального разреза коэффициента взаимной корреляции

Во всех двенадцати случаях применение поляризационного метода имело положительный результат. Следовательно, искомая достоверность равна 100%.

4.4 ПРОВЕРКА МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ОСАДКОВ

Экспериментальная проверка методики определения интенсивности осадков при помощи оценок поляризационных параметров принимаемого сигнала является гораздо более сложной задачей по сравнению с двумя предыдущими. Это вызвано отсутствием (или недоступностью) архивных сайтов с данными о количестве выпавших осадков. Поэтому сравнение пришлось проводить чисто качественное.

Работы по сравнению нового метода определения интенсивности осадков с традиционным методом, основанном на распределении Маршалла-Пальмера, уже проводились [198]. В них было доказано как минимум двукратное превосходство первого над вторым по точности. Для нас больший интерес представляет проверка того, что использование сложного зондирующего импульса, примененного в радиолокаторе ДМРЛ-С, не оказывает существенного влияния на

получаемые оценки. Для этого качественного сравнения двух методов представляется вполне достаточным.

Сравнение карт проводилось по следующей методике:

1. в качестве исходных данных брались объемные файлы данных, поступающие из системы первичной обработки информации радиолокатора;

2. информация о радиолокационной отражаемости целей обрабатывалась традиционным методом Маршалла-Пальмера. Формировалась первая карта интенсивности осадков;

3. данные об отражаемости и поляризационных характеристиках принятого сигнала использовались для расчета интенсивности осадков по новому методу, изложенному в главе 3. При этом были решены следующие задачи:

- Сегментация. Суть ее заключается в том, чтобы определить в каждом луче участки, где наблюдается изменение значений дифференциальной фазы. Таким образом, в отдельно взятом луче может находиться несколько таких участков. Это позволяет уменьшить ошибки определения интенсивности осадков, связанные с возможным завышением интенсивности к концу луча, если сегмент имеет большую протяженность, и присутствуют высокие значения отражаемости ($Z>50$). Примеры карт интенсивности осадков, полученные с сегментацией луча и без нее, представлены на Рисунке 4.58. На нем хорошо видно, что применение сегментации улучшает качество расчета интенсивности осадков в каждом сегменте луча.

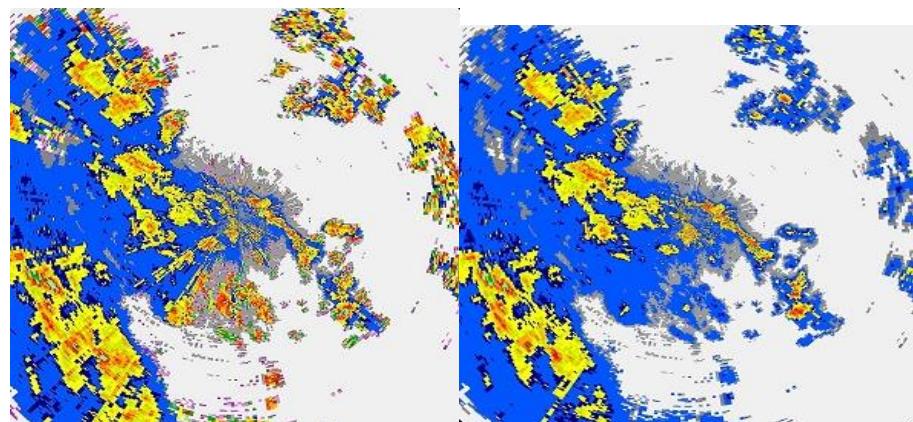


Рисунок 4.58 - Карты интенсивности осадков, рассчитанные новым методом без применения сегментации луча (слева) и с его применением (справа)

- Исключения влияния местных объектов. Для этого используется модуль коэффициента взаимной корреляции. Если его значению больше 0,8, цель классифицируется как метеорологическая. В противном случае данные соответствующей ячейки исключаются из дальнейших расчетов. Благодаря такому подходу достигнуто почти полное исключение влияния местных объектов на оценку интенсивности осадков. Карты, приведенные на Рисунках 4.59 и 4.60, иллюстрируют влияние, оказываемое на принимаемый сигнал местными предметами.

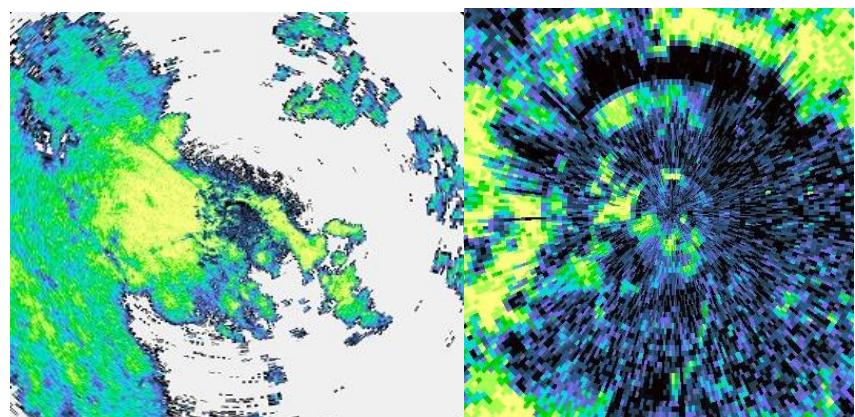


Рисунок 4.59 - Карты коэффициента взаимной корреляции с фильтрацией отражений от местных предметов (слева) и без фильтрации (справа)

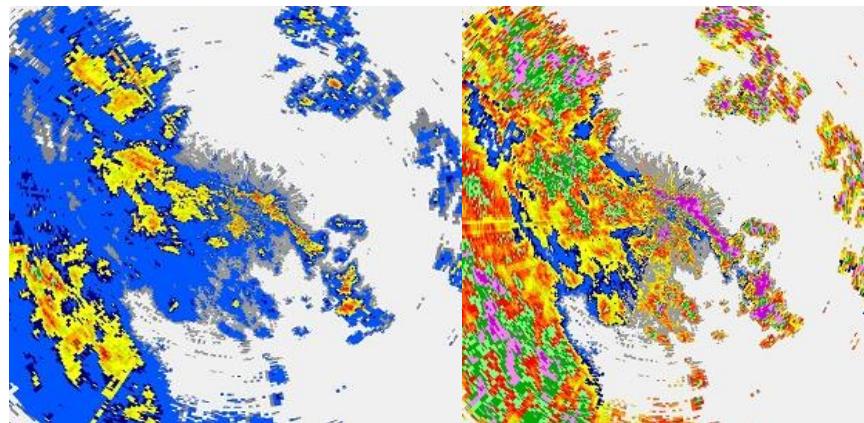


Рисунок 4.60 - Карты интенсивности осадков, рассчитанные новым методом с учетом коэффициента взаимной корреляции (слева) и без (справа)

- Определение разности значений дифференциальной фазы в начале и конце выбранного участка. Проблема состоит в том, что указанный параметр есть величина случайная. Поэтому нередко получается так, что ее значение в конце сегмента оказывается меньше, чем в его начале. Решена она аппроксимацией всех отсчетов на протяжении сегмента линейной зависимостью методом наименьших квадратов.

После решения перечисленных задач строилась вторая карта интенсивности осадков, которая сравнивалась с первой на предмет отсутствия грубых расхождений в получаемых результатах. Примеры пар карт приведены на Рисунке 4.61.

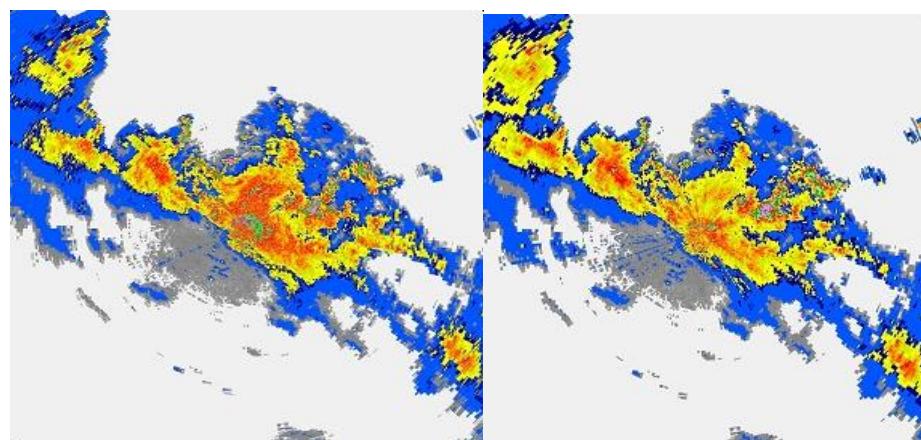


Рисунок 4.61 - Карта интенсивности осадков, рассчитанной по методу Маршалла-Пальмера (слева) и новым методом (справа)

В итоге можно констатировать, что карты в целом одинаково отражают распределение интенсивности осадков по просматриваемой площади, и не имеют серьезных отличий друг от друга.

ВЫВОДЫ

Результаты проведенных экспериментальных исследований позволяют заключить следующее:

1. Сравнение данных, полученных с помощью нового метода обнаружения сдвига ветра по оценкам ширины спектра принимаемого сигнала, с данными аэрометеорологического зондирования, показывает их хорошее совпадение с оправдываемостью 89% и достоверностью 100%;
2. Проверка методики для определения профиля направления ветра путем сравнения данных, получаемых в слое Экмана радиолокационным методом, с расчетными подтверждает правильность выводов, сделанных на основе разработанной модели сдвига ветра.
3. Сопоставление информации наземных метеорологических станций с результатами применения методики обнаружения градоопасных облаков при помощи поляризационных параметров принимаемого сигнала, позволяет утверждать, что достоверность данной методики равна 100%;
4. Обработка данных системы первичной обработки радиолокатора ДМРЛ-С с целью определения интенсивности осадков методом, основанным на распределении Маршалла-Пальмера, и новым методом с применением оценок поляризационных параметров принимаемого сигнала показывает хорошее совпадение получаемых при этом карт и отсутствие серьезных расхождений между ними.

5. ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ ТЕХНИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ СОВРЕМЕННЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ РАДИОЛОКАТОРОВ

В результате бурного развития, которое метеорологическая радиолокация переживает последние двадцать лет, применяемое в ней оборудование обогатилось новыми техническими решениями [48]. Появляясь на свет как результат решения какой-то конкретной задачи, они в качестве побочного эффекта порождают новые, недоступные прежней технике, возможности. Так, стремление повысить надежность и долговечность МРЛ привело к применению в метеорологической радиолокации сложного зондирующего импульса [122]. До этого данная идея считалась бесперспективной из-за высокого уровня боковых лепестков на выходе фильтра сжатия такого сигнала. Указанное препятствие было преодолено путем создания специального нелинейно частотно модулированного (НЧМ) зондирующего импульса [113], который был впервые успешно применен в отечественном метеорологическом радиолокаторе ДМРЛ-С [42]. Дополнительными эффектами данного технического решения стали увеличение метеорологического потенциала МРЛ и возможность расширения интервала однозначного измерения радиальной скорости наблюдаемых объектов.

Аналогичную эволюцию пережило использование поляризационных характеристик отражений метеообразования. Первоначальным толчком к их применению в метеорологической радиолокации стала возможность при помощи данных измерений идентифицировать фазовое состояние наблюдаемых гидрометеоров. Однако предоставляемые при этом дополнительные возможности открывают широкие перспективы для расширения интервала однозначного измерения скорости цели и борьбы с отражениями от местных предметов. Ниже рассмотрим некоторые из подобных применений технических новшеств.

5.1 СЛОЖНЫЙ СИГНАЛ

Как уже говорилось, толчком к применению сложного зондирующего импульса явилось стремление заказчиков (в данном случае Росгидромета) получить радиолокатор с высокими характеристиками надежности. В частности, от ДМРЛ-С требовалось иметь среднюю наработку на отказ 3000 часов [157]. При этом импульсная мощность зондирующего импульса не должна быть меньше 250 кВт. Устройств, обеспечивающих одновременно такую мощность и такую наработку на отказ, по крайней мере, на момент проектирования указанного радиолокатора, не существовало. Единственным выходом из сложившейся ситуации явилось применение технологии сжатия при приеме излучаемого сложного импульса [93; 110], что позволило бы построить генератор на основе кластрона с импульсной мощностью 15 кВт, обладающего требуемой наработкой на отказ.

Опыта использования таких сигналов в радиометеорологии на тот момент времени фактически не было за исключением нескольких случаев пробных экспериментов [197; 72]. Поэтому пришлось выполнить специальную научно-исследовательскую работу по применению сложного сигнала в метеорологической радиолокации. Разработчиком ОАО «НПО «ЛЭМЗ» был спроектирован уникальный НЧМ импульс, отвечающий всем сформированным на тот момент требованиям, и прежде всего требованию величины боковых лепестков после сжатия не хуже -50 дБ от максимального значения. За основу был взят обычный ЛЧМ сигнал, в который были введены некоторые изменения. Осциллограмма данного сигнала на выходе фильтра сжатия представлена на Рисунке 5.1 [81]. Достигнутый уровень боковых лепестков составил -71,7 дБ, длительность на уровне -3 дБ равна 1 мкс, коэффициент сжатия равен 60.

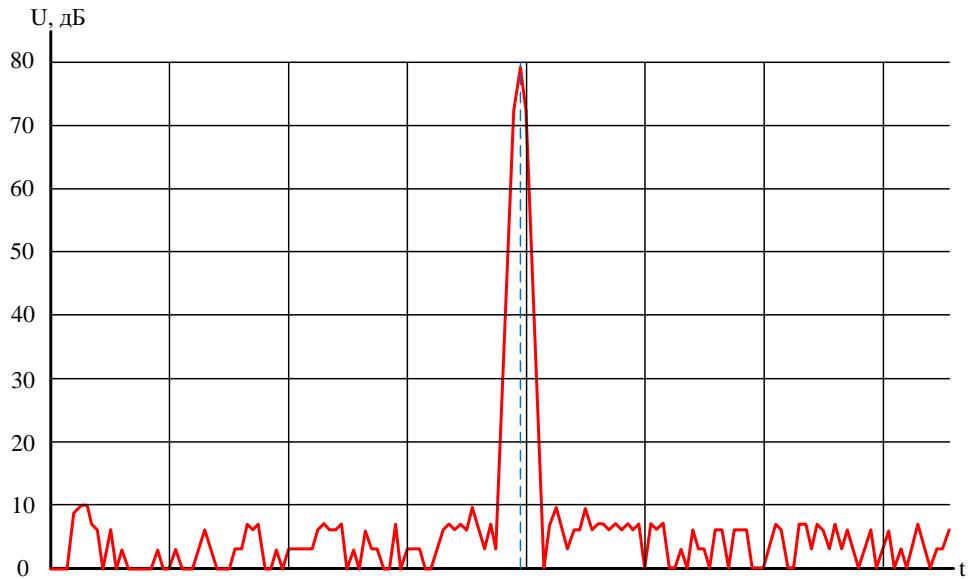


Рисунок 5.1 - Осциллографма НЧМ сигнала на выходе фильтра сжатия

Поскольку расчетным путем было доказано, что тело неопределенности НЧМ импульса практически не отличается от ЛЧМ сигнала с такими же параметрами, теоретически проверялись возможные искажения сигнала и его спектра именно для ЛЧМ импульса. Как известно [154], при гауссовой огибающей такого сигнала

$$U(t) = \exp\left(\left(-\frac{\pi}{\tau_I^2}\right)(1+jn)t^2\right), \quad (5.1)$$

где τ_I - длительность зондирующего импульса на уровне 0,46 от максимума;

n - коэффициент сжатия сигнала, равный произведению девиации частоты δf на τ_I , его тело неопределенности имеет форму двухмерной гауссовой функции

$$\rho(\tau, F) = \exp\left(\left(-\frac{\pi}{2}\right)\left((1+n^2)\frac{\tau^2}{\tau_I^2}2n\tau F + F^2\tau_I^2\right)\right), \quad (5.2)$$

где F – доплеровский сдвиг частоты.

Горизонтальными сечениями такого тела (диаграммы неопределенности) являются эллипсы, оси которых не совпадают с осями координат (Рисунок 5.2).

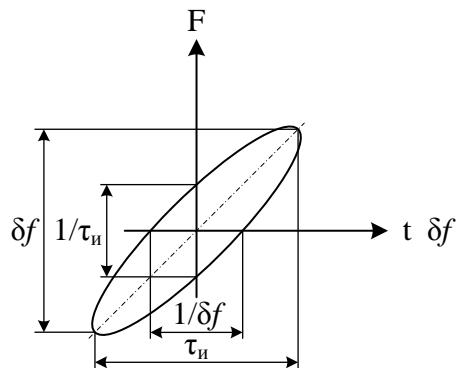


Рисунок 5.2 - Сечение тела неопределенности ЛЧМ импульса на уровне 0,46 от максимального значения

В результате были определены следующие особенности НЧМ импульса:

1. В классической радиолокации линейная частотная модуляция фактически не изменяет разрешающую способность сигнала, но меняет направление, вдоль которого оно максимально. Уменьшая разрешение по оси дальности, она одновременно увеличивается вдоль линии наклона эллипса. Иначе говоря, две цели могут восприниматься как одна, если они «неудачно» разнесены одновременно по координатам дальности и частоты. В случае же метеонаблюдений возможные значения доплеровских сдвигов частоты сигнала лежат в пределах нескольких килогерц, а девиация частоты δf в нашем случае равна 1МГц. Следовательно, при достаточно большом угле наклона представленного на Рисунке 5.2 эллипса, для чего достаточно выполнение неравенства $n \geq 10$, большая часть тела неопределенности при развороте попадает в область «пустоты» для метеоцелей, и происходит реальное улучшение разрешающей способности по дальности без его ухудшения по какому-либо другому направлению.

2. Наклон тела неопределенности ЛЧМ импульса относительно осей координат приводит к еще одной особенности последнего – скоростной ошибке, заключающейся в смещении по дальности сигнала, имеющего доплеровский сдвиг частоты. Для метеолокации это означает, что эхо некоторых элементарных отражателей, находящиеся в соседних разрешаемых по дальности объемах, но

имеющих соответствующую доплеровскую скорость, может восприниматься как «свое» для просматриваемого в данный момент элемента разрешения. И наоборот, часть «своих» отражателей из-за обладания ими радиальной скорости определенной величины может игнорироваться. Очевидно, что такое смешение сигналов от разных ячеек способно привести к значительным ошибкам измерений.

То, насколько серьезны эти ошибки, зависит от величины скоростного смещения [154]

$$\tau_{\text{см}} = \frac{\tau_{\text{И}}}{\delta f} F. \quad (5.3)$$

Очевидно, что при условии $\tau_{\text{И}}F \ll 1$, которое несомненно выполняется для рассматриваемых нами случаев, $\tau_{\text{см}}$ принимает значения, гораздо меньшие длительности сжатого импульса и, следовательно, может во внимание не приниматься.

3. Наличие в принимаемом сигнале доплеровского сдвига частоты ведет к увеличению уровня боковых лепестков сжатого импульса. Специальных методов борьбы с этим не существует, т.е. любой метод подавления боковых лепестков при нулевом частотном рассогласовании пропорционально уменьшает их величину и при наличии доплеровского сдвига. Единственное требуется следить, чтобы при максимально возможном значении доплеровской частоты их уровень не превышал критического значения. Для гидрометеоров максимальный доплеровский сдвиг частоты в 5 см диапазоне длин волн равен 2 кГц. Поэтому расчетным путем было восстановлено тело неопределенности НЧМ импульса в диапазоне доплеровских сдвигов от -2 кГц до 2 кГц. Превышения боковыми лепестками уровня -50 дБ от максимума нигде зафиксировано не было.

4. В силу разворота тела неопределенности имеет место различие спектральных характеристик фильтра для отражателей, расположенных на различных дальностях, что может привести к искажению спектра сигнала. Для понимания того, как могут искажаться спектральные характеристики сигнала при прохождении оптимального фильтра, находился спектр отклика последнего на

отражение от элемента разрешения, распределение элементарных отражателей в котором равномерно, а доплеровский сдвиг частоты имеет гауссово распределение с параметрами F_0 и σ ,

$$S(F) = C_1 \int_{-\infty}^{\infty} \rho(\tau, F) \exp(-(F - F_0)^2 / 2\sigma^2) d\tau. \quad (5.4)$$

После несложных математических преобразований получаем

$$S(F) = C_2 \exp\left(-\frac{\pi F^2}{2(\delta f)^2} - \frac{(F - F_0)^2}{\sigma^2}\right), \quad (5.5)$$

где C_1, C_2 – постоянные величины.

Таким образом, результирующий спектр есть произведение двух гауссовых функций и степень их взаимного влияния зависит от соотношения величин их параметров: F_0 , σ и девиации частоты δf . Значение последней – 1 МГц, максимальные доплеровские сдвиги частоты эхо-сигнала метеоцели – единицы килогерц, а его максимальная ширина спектра – сотни герц, т.е. выполняется неравенство

$$\frac{\pi F^2}{2(\delta f)^2} \ll \frac{(F - F_0)^2}{\sigma^2}. \quad (5.6)$$

Следовательно, в области существования спектра сигнала сомножитель, определяющий влияние фильтра, остается практически неизменным. Это дает право считать, что спектр отражений от метеорологической цели при прохождении оптимального для широкополосного импульса фильтра практически не изменяется.

Для подтверждения правильности сделанных теоретических заключений была проведена научно-исследовательская работа, заключавшаяся в сравнении выходных сигналов приемника после излучения «простого» длительностью 2 мкс и «сложного» импульсов [159]. Излучение велось пачками по 100 импульсов каждого типа с интервалом не более 1 мс между ними. Осреднение данных в обоих случаях проводилось по интервалам дальности 500 м. При этом для выравнивания потенциалов двух вариантов наблюдения простые импульсы не осреднялись, а накапливались на выходе амплитудного детектора. Поскольку расчетный уровень боковых лепестков НЧМ сигнала не превышает 50 дБ,

измерения необходимо было провести по метеоцели, отражаемость которой превышала бы указанную величину. Такая цель наблюдалась 18 июля 2008 года при прохождении холодного фронта. Примеры полученных в процессе эксперимента реализаций приведены на Рисунке 5.3.

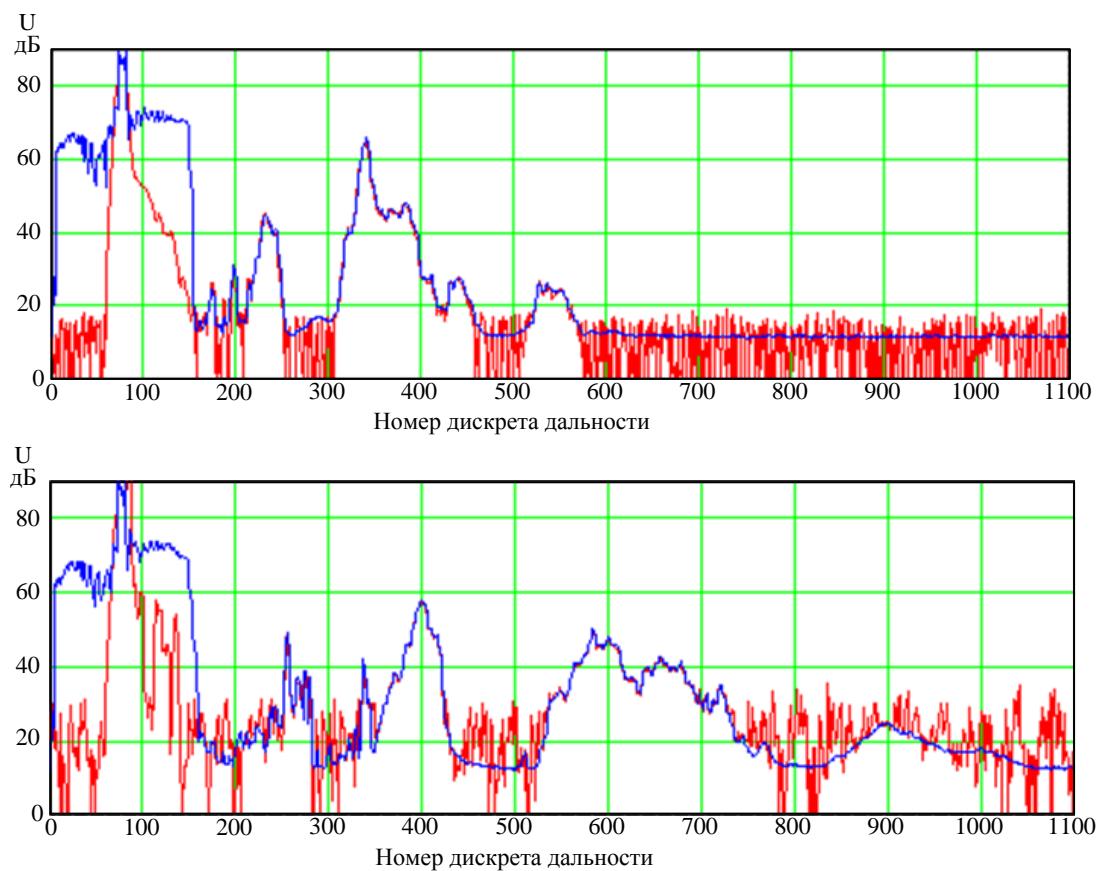


Рисунок 5.3 - Профили осредненных амплитуд отражений от метеообъектов, полученные 18.06.08 в 22:22 (вверху) и в 22:25 (внизу) при использовании:

- синий – НЧМ сигнал;
- красный – простой сигнал

Были обработаны 2000 пар реализаций. Результатом исследования явилось практически полное совпадение амплитуд принимаемых отражений, что позволило дать положительный ответ на вопрос о применимости сложного сигнала в радиометеорологии.

Отдельно проводилась НИР на предмет проверки доплеровской устойчивости импульса (его способности сохранять заданный уровень боковых лепестков на выходе фильтра при частотном рассогласовании сигнала и фильтра

до 2 кГц) и влиянии процедуры сжатия на спектр сигнала. Результатом также явилось положительное решение о применимости НЧМ сигнала [116].

Альтернативой примененному в ДМРЛ-С (а теперь и в новой разработке ДМРЛ-10) зондирующему НЧМ импульсу является импульс с фазовой кодовой модуляцией (ФКМ), широко используемый в настоящее время в выпускаемых многими зарубежными фирмами метеорологических радиолокаторах. Он применяется в изделиях Selex ES (ФРГ) [210], EEC (США) [211], Toshiba и Mitsubishi (Япония) [215; 212], Sun-create (Китай) [209], Furuno (Италия) [214]. Главное отличие от российского варианта состоит в том, что требуемое подавление боковых лепестков на выходе фильтра сжатия достигается за счет введения для принятой пачки импульсов перед их обработкой весовых окон. Таким образом, уменьшение уровня боковых лепестков достигается за счет снижения метеорологического потенциала радиолокатора минимум на 3 дБ.

Использование сложного сигнала для увеличения метеорологического потенциала радиолокатора

Первые метеорологические радиолокаторы, выпускаемые в прошлом веке, будучи некогерентными оснащались магнетронами в качестве СВЧ генераторов. Их импульсной мощности (до 250 кВт для длины волны 3,2 см) хватало для надежного наблюдения метеостановки в окружающем пространстве при условии, что измерению подлежит лишь радиолокационная отражаемость целей. Задача своевременного обнаружения опасных явлений, связанных с ветром, восходящими или нисходящими потоками воздуха в этом случае даже не ставилась ввиду принципиальной невозможности ее решения.

Появление первых когерентных МРЛ в корне изменило сложившуюся ситуацию. Теперь к обнаруживаемым метеорологическим радиолокатором опасным явлениям наряду с теми, что связаны с кучевой облачностью (гроза, град, смерч), добавились перечисленные выше явления, совершенно от последних независимые. Существовать они могут в «чистом небе» в отсутствии каких-либо

гидрометеоров. Ввиду этого остро встал вопрос повышения метеорологического потенциала радаров, вычисляемый по известной формуле [141]

$$\Pi_M = \frac{0,1\pi^6 P_I A_p h K_{AB}}{P_{\text{ш}} \lambda^4}, \quad (5.7)$$

где P_I - импульсная мощность передатчика;

A_p - площадь раскрыва антенны;

h - пространственная протяженность зондирующего импульса;

K_{AB} - коэффициент полезного действия антенно-волнового тракта при приеме и передаче;

$P_{\text{ш}}$ - уровень собственных шумов приемника;

λ – длина волны несущего колебания.

Именно эта важнейшая характеристика метеорологического радиолокатора связывает параметры наблюдаемого объекта: радиолокационную отражаемость (Z), расстояние от него до радиолокатора (r) и относительную мощность принимаемого сигнала

$$\frac{P_{\text{пр}}}{P_{\text{ш}}} = \frac{\Pi_M Z}{r^2}. \quad (5.8)$$

Из формулы (5.7) видно, что имеется несколько путей повышения метеорологического потенциала радиолокатора:

1. Увеличить импульсную мощность передатчика. Однако возможности электровакуумных СВЧ генераторов в этом плане уже практически исчерпаны. Кроме того, увеличение импульсной мощности ограничивается возможностями волноводов. Для того чтобы уменьшить вероятность их пробоя приходится применять системы наддува волноводного тракта сухим воздухом повышенного давления. Можно, конечно увеличить размеры волноводов, но это влечет за собой резкое увеличение массы и габаритов изделия в целом. Поэтому данный «экстенсивный» путь бесперспективен.

2. Увеличить длительность зондирующего импульса. Как следствие ухудшится разрешающая способность по дальности. Поскольку в настоящее время явно определена тенденция к получению более подробной информации о

распределении различных параметров по объему метеоцели, для чего разрабатываются специальные сверхширокополосные сигналы [158; 145; 168] данный путь также нежелателен.

3. Увеличить коэффициент полезного действия антенно-волноводного тракта. К началу ХХI века этот ресурс был фактически полностью выбран. Основные затухания сигнала происходят во вращающихся переходах и длинных волноводах, связывающих приемо-передатчик с антенной. Например, в МРЛ-5 суммарное затухание в тракте составляло 8 дБ. В настоящее же время новые технологии позволяют делать вращающиеся переходы, уменьшающие проходящий через них сигнал менее чем на 1 дБ. Однако и этих потерь удается избежать. Современная элементная база позволяет спроектировать настолько малогабаритные передатчики и приемники, что становится возможным располагать их непосредственно на антенне, как это сделано, например, в «Метеор 50DX» производства фирмы Gematronik [180]. Этим исключается потребность во вращающихся переходах и минимизируется длина соединительных волноводов.

4. Уменьшать уровень собственных шумов приемника или, иначе, увеличивать его чувствительность. Перспектив уменьшения этого параметра также на данный момент не существует, ибо малошумящие усилители высокой частоты, определяющие уровень шума всего устройства, уже работают на пределе возможного.

Таким образом, реальных путей для увеличения метеорологического потенциала практически не оставалось и внедрение в практику наблюдений сложного импульса явилось неожиданным прорывом. Эквивалентная мощность радиолокатора ДМРЛ-С при пиковой мощности 15 кВт и коэффициенте сжатия 60 составила 900 кВт – недостижимую величину для РЛС с простым импульсом. При этом коэффициент сжатия 60 – не предел. Уже разработан НЧМ импульс со сжатием в 90 раз, позволяющий при сохранении всех прочих характеристик изделия ДМРЛ-С поднять эквивалентную мощность почти до 1,5 МВт.

Кроме того, нет никаких резонов против того, чтобы в новых разработках вернуться к прежним показателям надежности и пиковой мощности клистрона более 100 кВт с одновременным применением сложного сигнала. Это позволит увеличить метеорологический потенциал радиолокаторов еще не менее чем на 10 дБ и реализовать давнишнюю мечту радиометеорологов о работе по «чистому небу», т.е. сделать радар всепогодным.

Использование сложного сигнала для расширения интервала однозначного измерения скорости цели

Одной из серьезнейших проблем при обработке данных радиолокатора является устранение неоднозначностей. Так, частота повторения зондирующих импульсов задается, как правило, требуемой максимальной дальностью действия изделия. При этом возникают проблемы с однозначностью измеряемых спектральных параметров.

ДМРЛ-С в режиме «скорость» имеет частоту повторения зондирующих импульсов 1 кГц. Она обусловлена требованием приема информации с дальности 125 км. При длине волны $\lambda = 5,3$ см имеем границу интервала однозначного измерения средней радиальной скорости частиц

$$V_{\text{гран.}} = \frac{\lambda}{4T_{\Pi}} = 13,25 \text{ м/с}, \quad (5.9)$$

что явно недостаточно для того, чтобы оценивать упомянутую скорость во всем возможном диапазоне, который был задан в ТЗ от -48 до 48 м/с [157]. Расширения границ добиваются вобуляцией частоты повторения, что усложняет радиолокатор и снижает точность получаемых оценок [128]. В ДМРЛ-С используются две частоты повторения: $F_{\Pi 1} = 1$ кГц и $F_{\Pi 2} = 1,2$ кГц.

Для уменьшения погрешностей желательно иметь одну и максимально возможную частоту повторения. Однако ее увеличение более некоторого предельного значения, определяемого максимальной дальностью наблюдений, ведет к неоднозначности измерения расстояния до целей. Чтобы этого не происходило, надо «окрасить» импульсы в каждом интервале зондирования. Это

даст возможность различать сигналы, пришедшие одновременно с разных дальностей.

«Окраска» означает приданье импульсам определенных свойств, делающих их ортогональными. В этом качестве может выступать знак линейной частотной модуляции сигнала [47]. Несущая частота внутри ЛЧМ импульса при сохранении всех его характеристик, влияющих на прохождение по приемному тракту, может меняться по одному из следующих законов

$$f = a + bt \quad (5.10)$$

или

$$f = (a + b\tau_u) - bt, \quad (5.11)$$

где τ_u - длительность зондирующего импульса. Каждый из этих сигналов детектируется фильтром, настроенным на «свои» параметры, и не распознается «чужим», т.е. импульсы являются взаимно ортогональными.

Однако при реализации данной идеи предвидится одна трудность – спектральному анализу подвергается последовательность импульсов, поочередно проходящих через различные фильтры. Фактически мы имеем дело с системой, параметры которой изменяются во времени, в результате чего возможны искажения спектра и, следовательно, смещения получаемых оценок. Попытаемся определить эти смещения.

Выражение для тела неопределенности ЛЧМ импульса с гауссовой огибающей имеет вид [154]

$$S(t) = \sum_i \left(\varepsilon_i^{1/2} \exp \left(\left(-\frac{\pi}{2} \right) \frac{n^2 r_i^2}{r_u^2} + 2n \frac{r}{c} F_i + \left(\frac{r_u F_i}{c} \right)^2 \right) + j \frac{2\pi r_i}{\lambda} \right), \quad (5.12))$$

где ε_i – мощность сигнала, отраженного от элементарного отражателя;

r_i – дальность отражателя;

r_u – пространственная протяженность излученного несжатого импульса;

n – коэффициент сжатия импульса;

F – доплеровская частота сигнала от элементарного отражателя;

λ – длина волны несущего колебания;

c – скорость света.

Отличие выражения (5.12) для сигнала с обратно направленным изменением функции несущей частоты состоит в знаке второго члена в показателе экспоненты. Учтем череспериодное изменение этого знака введением функции $\text{Cos}\left(\frac{\omega_n t}{2}\right)$. Тогда сигнал после фильтра сжатия

$$S(t) = \sum_i \left(\varepsilon_i^{\frac{1}{2}} \exp\left(\left(-\frac{\pi}{2} \right) \frac{n^2 r_i^2}{r_u^2} + 2n \text{Cos}\left(\frac{\omega_n t}{2}\right) \frac{r_i}{c} F_i + \left(\frac{r_u F_i}{c} \right)^2 \right) + j \frac{2\pi r_i}{\lambda} \right), \quad (5.13)$$

где ω_n – частота повторения зондирующих импульсов.

Ищем корреляционную функцию сигнала после фильтра сжатия

$$B(\tau) = E(S(0)S^*(\tau)). \quad (5.14)$$

Для этого вносим символ математического ожидания под знак суммы и учитываем независимость сигналов от элементарных отражателей.

$$B(\tau) = \sum_i \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \varepsilon_i \exp\left(\left(-\pi \right) \frac{n^2 r^2}{r_u^2} + n \left(1 + \text{Cos}\left(\frac{\omega_n \tau}{2}\right) \right) \frac{r}{c} F + \left(\frac{r_u F}{c} \right)^2 \right) - j2\pi F \tau \times p(\varepsilon) p(r) p(F) d\varepsilon dr dF \quad (5.15)$$

где $p(x)$ – закон распределения случайной величины x .

Сумма мощностей эхо от всех элементарных отражателей дает среднее значение мощности суммарного сигнала Z . В итоге имеем

$$B(\tau) = Z \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(\left(-\pi \right) \frac{n^2 r^2}{r_u^2} + n \left(1 + \text{Cos}\left(\frac{\omega_g \tau}{2}\right) \right) \frac{r}{c} F + \left(\frac{r_u F}{c} \right)^2 \right) - j2\pi F \tau \times p(r) p(F) dr dF. \quad (5.16)$$

Полагаем распределение частиц по координате r равномерным в пределах разрешаемого объема, размер которого по этой координате обозначим ΔR . Тогда после интегрирования по r , применяя известную формулу [26]

$$\int_{-\infty}^{\infty} \exp(-p^2 x^2 \pm qx) dx = \left(\frac{\pi}{p} \right)^{\frac{1}{2}} \exp\left(\frac{q^2}{p^2} \right), \quad (5.17)$$

имеем:

$$B(\tau) = \left(\frac{Z}{\Delta R} \right) \pi^{1/4} \left(\frac{r_u}{n} \right)^{1/2} \int_{-\infty}^{\infty} \exp \left(-\pi \left(\frac{r_u}{c} \right)^2 \left(1 - \frac{1}{4} \left(1 + \cos \left(\frac{\omega_g \tau}{2} \right) \right)^2 \right) F^2 - j2\pi F \tau \right) p(F) dF. \quad (5.18)$$

Распределение доплеровского сдвига частоты полагаем нормальным со средним значением F_0 и дисперсией σ^2 . Тогда, введя обозначение

$$K(\tau) = 2\sigma^2 \pi \left(\frac{r_u}{c} \right)^2 \left(1 - \frac{1}{4} \left(1 + \cos \left(\frac{\omega_g \tau}{2} \right) \right)^2 \right), \quad (5.19)$$

получаем:

$$B(\tau) = \left(\frac{Z}{\Delta R} \right) \left(\frac{\pi}{2} \right)^{1/4} \left(\frac{r_b}{\sigma n \sqrt{1+K(\tau)}} \right)^{1/2} \exp \left(-\frac{2\pi^2 \sigma^2 \tau^2}{1+K(\tau)} + \frac{F_0 K(\tau)}{2\sigma^2 (1+K(\tau))} - j \frac{2\pi F_0 \tau}{1+K(\tau)} \right). \quad (5.20)$$

Нормируем эту функцию на ее значение в точке $\tau=0$. Учитывая, что $K(0) = 0$, получаем:

$$R(\tau) = (1+K(\tau))^{-1/4} \exp \left(-\frac{2\pi^2 \sigma^2 \tau^2}{1+K(\tau)} + \frac{F_0 K(\tau)}{2\sigma^2 (1+K(\tau))} - j \frac{2\pi F_0 \tau}{1+K(\tau)} \right). \quad (5.21)$$

Ищем среднюю частоту спектра как значение производной от корреляционной функции в точке $\tau = 0$

$$\omega_0 = -jR'(0) = 2\pi F_0, \quad (5.22)$$

т.е. смещения оценки средней частоты спектра нет.

Ширину спектра, равную дисперсии гауссовой кривой, которой аппроксимируем спектр сигнала, находим по значениям первой и второй производных корреляционной функции в точке $\tau = 0$

$$\sigma_\omega^2 = R'(0) - (-jR'(0))^2 = 4\pi^2 \sigma^2 + \frac{2\pi^2 (\sigma^2 + 2F_0) r_u^2 F_\Pi^2}{8c^2}, \quad (5.23)$$

Это означает, что оценка ширины спектра смещается на величину, зависящую от средней частоты и ширины спектра. Оценим максимальное относительное смещение, имеющее место при максимальном заданном в ТЗ доплеровском сдвиге частоты $F_0 = 2$ кГц. Максимально возможное значение ширины спектра на порядок меньше указанного сдвига частоты, что дает возможность ее значением пренебречь. При $r_u/c = 60$ мкс и $F_\Pi = 1$ кГц получаем

$$\Delta = 2F_0^2 r_{\Pi}^2 F_{\Pi}^2 / (16c^2 \sigma^2) = 0,15. \quad (5.24)$$

При $F_0 = 0$ ее максимальное относительное значение, определяемое только шириной спектра, равно 0.015 и может не учитываться. Следовательно, данное смещение фактически определяется только величиной F_0 и может корректироваться по оценкам последней.

Отсюда следует вывод – череспериодное изменение знака ЛЧМ не приводит к смещению оценки средней частоты спектра сигнала. Оценка ширины спектра оказывается смещенной, но может быть уменьшена до пренебрежимо малых значений.

5.2 ВОЗМОЖНОСТЬ РАСШИРЕНИЯ ИНТЕРВАЛА ОДНОЗНАЧНОГО ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ЦЕЛИ В ПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКОМ РАДИОЛОКАТОРЕ

«Окрашивать» излучаемые импульсы можно и другим методом – различной поляризацией электромагнитной волны. Поскольку элементарные отражатели, с которыми имеет дело метеорологический радиолокатор - это тела вращения, оптимальным для него является линейный поляризационный базис [84]. Поэтому все без исключения метеорологические радиолокаторы с двойной поляризацией излучают вертикально и горизонтально поляризованные импульсы. При этом из двух возможных режимов излучения поляризованных волн – одновременное или попеременное – выбирается, как правило, первое.

Это связано с желанием получить максимальную точность измерений, которая, как доказано В.М. Мельниковым и Д.С. Зрнич [191; 192] больше именно при одновременном излучении. Однако эти выводы сделаны для случая, когда частота следования зондирующих импульсов остается в обоих режимах постоянной. Нас же интересуют изменения точности измерений различных параметров сигнала при условии, что частота повторения в режиме попеременного излучении горизонтально и вертикально поляризованных волн в

два раза больше той, что имеет место при одновременном их излучении. Временная диаграмма зондирующих импульсов в обоих рассматриваемых режимах представлена на Рисунке 5.4.

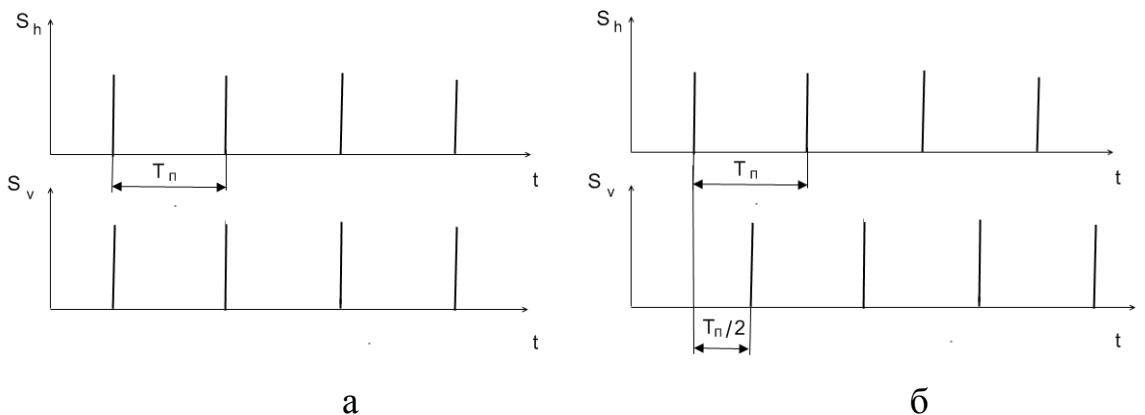


Рисунок 5.4 - Временные диаграммы излучения импульсов горизонтальной и вертикально поляризованных волн в одновременном (а) и попаременном (б) режимах

Согласно исследованиям упомянутых авторов среднеквадратические отклонения (СКО) параметров, измеряемых, поляриметрическим радиолокатором, имеют следующие значения:

- Для мощности принимаемого сигнала искомая величина в обоих случаях определяется по одной и той же формуле

$$\sigma_Z = \frac{10}{\ln(10)M^{1/2}} \left(\frac{2N_h+1}{N_h^2} + \frac{1}{m_0} \right)^{1/2}, \quad (5.25)$$

где M – количество импульсов в выборке;

N_h - отношение сигнал/шум в канале горизонтальной поляризации;

m_0 – величина, определяемая выражением

$$m_0 = \left(1 + 2 \sum_{i=1}^{M-1} \left(1 - \frac{i}{M} \right) |\rho(iT)|^2 \right)^{-1}; \quad (5.26)$$

ρ – коэффициент корреляции сигнала. При вычислении мощности сигнала по алгоритму, принятому во всех поляриметрических радиолокаторах, включая ДМРЛ-С,

$$\hat{P}_h = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M H_i H_i^*, \quad (5.27)$$

где H – мгновенное значение сигнала в канале горизонтальной поляризации, каких-либо различий между режимами в определении данного параметра вообще не существует.

- Для дифференциальной отражаемости среднеквадратическое отклонение вычисляется по-разному для каждого из режимов. Однако отличия вызваны тем, что в каждом из них частота следования импульсов с одинаковой поляризацией различна. В нашем же случае она остается постоянной. Все отличия сводятся к временному сдвигу пачки импульсов вертикальной поляризации на полпериода следования зондирующих импульсов. Поэтому очевидно, что при оценивании дифференциальной отражаемости в соответствии с алгоритмом

$$\tilde{Z}_{DR} = \frac{\sum_{i=1}^M (H_i H_i^*) - P_{sh}}{\sum_{i=1}^M (V_i V_i^*) - P_{sh}}, \quad (5.28)$$

где P_{sh}, P_{sv} - мощности шумов в канале горизонтальной и вертикальной поляризации соответственно, точности оценок в каждом из режимов будут одинаковы. Среднеквадратическое отклонение определяются выражением, полученным для одновременного излучения [192]

$$\sigma_{Z_{DR,o}} = \frac{10}{lg(10)M^{1/2}} \left(\frac{2N_h+1}{N_h^2} + \frac{2N_v+1}{N_v^2} + \frac{2(1-\rho_{hv}^2)}{m_0} \right), \quad (5.29)$$

где ρ_{hv} - коэффициент взаимной корреляции поляризационных составляющих принимаемого сигнала.

- Для дифференциальной фазы среднеквадратические отклонения оценок, получаемых при попеременном излучении, могут быть в несколько раз больше тех, что имеют место при одновременном режиме. Однако разность эта появляется при наблюдении целей, в которых ширина спектра радиальных скоростей частиц превосходит 6 м/с [192]. Это заключение сделано для радиолокатора WSR-88, имеющего длину волны 11 см и частоту повторения импульсов 320 Гц. Для рассматриваемого в данной работе радиолокатора ДМРЛ-С, имеющего в режиме работы «Отражаемость» длину волны 5,3 см и частоту повторения 300 Гц, указанная граница уменьшается до величины 3 м/с. Однако следует учитывать, что спектральные характеристики принимаемого сигнала

оцениваются в ДМРЛ-С только в режиме «Скорость». При этом зондирующие импульсы следуют с частотой 1–1,2 кГц. Кроме того, в нашем случае, в отличие от рассмотренного в работе В.М. Мельникова и Д.С. Зрнич [192], частота следования импульсов с одинаковой поляризацией волны не удваивается, а остается той же, что и в режиме одновременного излучения. Следовательно, за изначальное значение данной частоты мы должны взять 2 кГц, и указанная выше граница, после которой наблюдается относительное ухудшение точности режима попеременного излучения, отодвигается в область нереально широких спектров с $\sigma_v \geq 18$ м/с. Подобное значение параметра практически никогда не наблюдается. Это дает нам право утверждать, что в радиолокаторе ДМРЛ-С, работающем в режиме «Скорость», точность оценивания дифференциальной фазы отражений одинакова при одновременном и попеременном излучении зондирующих импульсов и определяется формулой [192]

$$\sigma_{\Phi_{DR}} = \frac{1}{(2M)^{1/2} \rho_{hv}} \left(\frac{N_h + N_v + 1}{N_h N_v} + \frac{1 - \rho_{hv}}{m_0} \right)^{1/2}. \quad (5.29)$$

- Для модуля коэффициента взаимной корреляции поляризационных составляющих принимаемого сигнала в рассматриваемой работе приводятся только окончательное заключение о том, что расхождения в точности получаемых оценок начинаются после того, как ширина его спектра превысит 4 м/с. Следовательно, аналогично тому, как это было сделано в отношении дифференциальной фазы, можно утверждать, что в радиолокаторе ДМРЛ-С, работающем в режиме «Скорость», предлагаемое попеременное излучение импульсов с различной поляризацией волны никоим образом не ухудшает точности оценивания данного поляризационного параметра.

5.3 МАЛОГАБАРИТНЫЕ РАДИОЛОКАТОРЫ И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЛЯ ЗАДАЧ ШТОРМООПОВЕЩЕНИЯ

Помимо стационарных метеорологических радиолокаторов, предназначенных для создания национальных сетей штормооповещения и

обслуживания крупных аэропортов, промышленностью выпускаются малогабаритные МРЛ, отличающиеся от первых, главным образом, меньшим размером антенны. Они предназначаются для установки на подвижных объектах (например, на яхтах), в небольших аэропортах, для обеспечения активных воздействий в районах, где нет стационарных метеорологических радиолокаторов. По сравнению с последними они обладают меньшей дальностью действия и худшой разрешающей способностью, но зато имеют меньшие габариты, вес, энергопотребление и стоимость.

Такие радиолокаторы выпускаются практически всеми ведущими в рассматриваемой нами области производители, подтверждением чему служит Таблица 5.1. Набор технических возможностей таких радиолокаторов частично или полностью соответствует тем, что имеются у крупногабаритных. Как правило, они также способны проводить спектральные и поляризационные измерения [115; 69].

Существует также отдельный вид малогабаритных метеорологических радиолокаторов, в которых когерентность и двойная поляризация приносятся в жертву габаритам и массе. Их главное достоинство – высокая мобильность, позволяющая оперативно перемещать их с места на место. Например, радар «Контур МЕТЕО-01» в готовом к использованию состоянии помещается в багажник джипа и для развертывания требует только подключения питания и компьютера [101]. Но возможности данных радиолокаторов ограничиваются измерением только мощности принимаемых отражений (Таблица 5.2).

Таблица 5.1 - Основные характеристики малогабаритных метеорологических радиолокаторов

Параметр	TWR-03D (Китай)	WR-25XP (Италия)	Ranger X5 (США)	Meteor50DX SELEX (Германия)	Зодиак (Россия)
Когерентность	+	+	+	+	+
Двойная поляризация	-	+	+	+	-
Сжатие импульса	-	-	+	-	-
Несущая частота, МГц	9410	9410±30	9200...9700	9300...9500	9345
Импульсная мощность, кВт	25	25	0.5	55; 75	50
Тип генератора	Нет данных	Магнетрон	Транзистор	Магнетрон	Магнетрон
Ширина ДН антенны, град.	1,8	3,2	0,95	1,30; 1,0	1,5
Дальность действия, км	120	45	120	100	100; 160
Габариты, м горизонтальный вертикальный	1000*1500 1950	Нет данных	Нет данных	2,8*2,55 3,9	Диаметр 2,5 2
Вес, кг	120	150	Нет данных	2930	450

Таблица 5.2. Основные характеристики малогабаритных некогерентных метеорологических радиолокаторов

Параметр	Контур МЕТЕО-01 (Россия)	RAINSCANNER (Германия)
Несущая частота, МГц	9345	9410
Импульсная мощность, кВт	5	25
Тип генератора	Магнетрон	Магнетрон
Ширина ДН, град		
горизонтальная	3	1
вертикальная	3	20
Длительность импульса, мкс	1...4	0.07...1.2
Чувствительность приемника, дБ/Вт	-147	-121
Дальность действия, км	160	100
Вес, кг	60	130
Габариты, м	Диаметр 1.2*1.1	Нет данных

Однако на современном этапе развития радиолокационных сетей штормооповещения для малогабаритных МРЛ открываются широкие возможности для применения [71]. Дело в том, что для надежного распознавания опасных явлений кроме добrotно сделанного радиолокатора и сети передачи информации очень важно расположение точек наблюдения по контролируемому пространству [60; 59]. Зоны обзора МРЛ должны пересекаться таким образом, чтобы опасное явление наблюдалось непрерывно. Если посмотреть на карту формируемой сети создается впечатление, что, по крайней мере, для Европейской части России, так оно и есть (Рисунок 5.5) - радиолокаторы расположены достаточно плотно с надежным перекрытием областей ответственности.

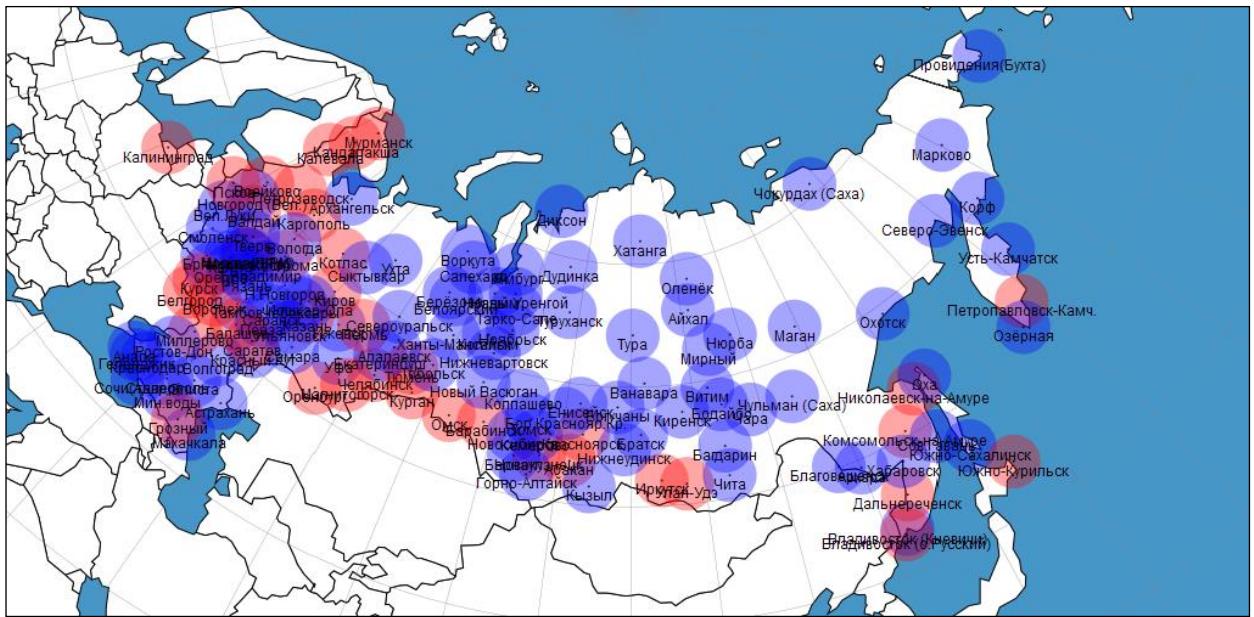


Рисунок 5.5 - Зоны ответственности радиолокаторов сети штормооповещения в режиме «отражаемость» (максимальный радиус действия 250 км)

Однако это относится, во-первых, только к режиму работы «отражаемость» с максимальным радиусом действия 250 км и, во-вторых, только к виду сверху. Если уменьшить диаметр окружностей до 125 км (максимальной дальности работы ДМРЛ-С в режиме «скорость»), картина покажется менее оптимистичной (Рисунок 5.6).

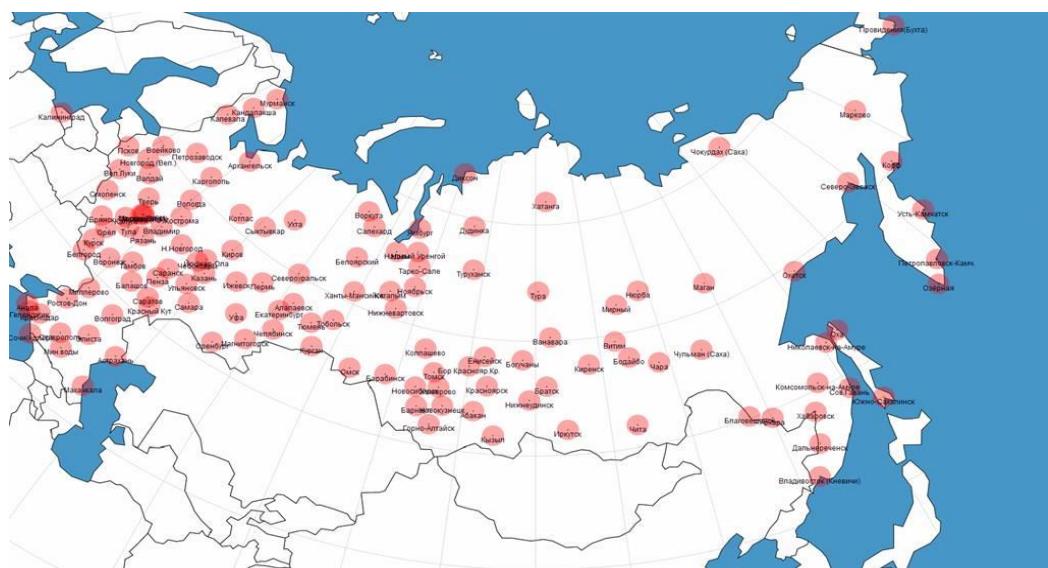


Рисунок 5.6 - Зоны ответственности радиолокаторов сети штормооповещения в режиме «скорость» (максимальный радиус действия 125 км)

При рассмотрении же проекции зон обзора двух радиолокаторов на вертикальную плоскость, проходящую через точки их установки (Рисунок 5.7), станет ясно, что обеспечить непрерывное наблюдение ряда опасных явлений они неспособны. К таковым относятся сдвиги ветра, микропорывы, области сильного ветра и т.д. Их дальность наблюдения ограничена 125 километрами.

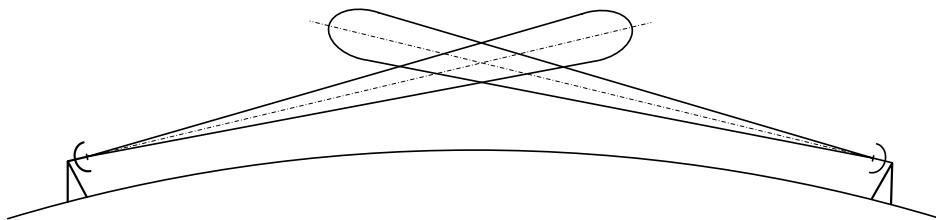


Рисунок 5.7 - Схема расположения диаграмм направленности радиолокаторов в вертикальной плоскости

Еще хуже обстоит дело с наблюдением осадков. Уже на расстоянии 100 км от радиолокатора его элемент разрешения даже при угле места антенны $0,5^\circ$ (половина ширины ДН антенны) располагается на высоте 1 км над поверхностью земли. Следовательно, именно 100 км и есть та граница, далее которой наблюдение осадков становится невозможным.

Выходом из сложившейся ситуации могло бы служить уплотнение сети, т.е. установка дополнительных радиолокаторов ДМРЛ-С, но этот путь чреват большими финансовыми расходами. Именно здесь на помощь могут прийти малогабаритные радары.

Для того, чтобы зоны обзора установленных на сети радиолокаторов пересекались, точки их установки выбирались отстоящими друг от друга в среднем на 400 км. Примером может служить план их размещения в Северо-Западном районе (Рисунок 5.8) [137].

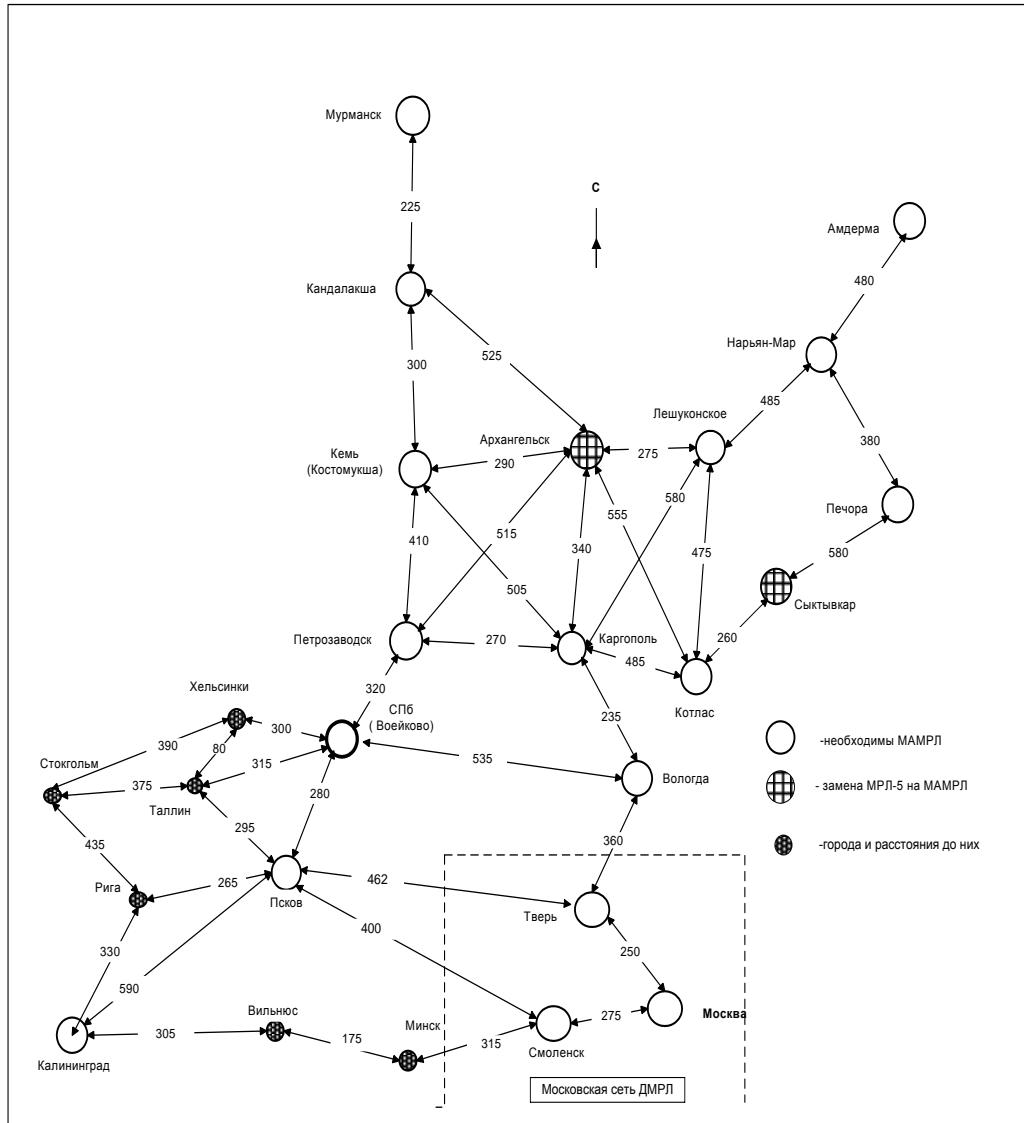


Рисунок 5.8 - План размещения радиолокаторов ДМРЛ-С в Северо-Западном регионе

Следовательно, между ними остается плохо просматриваемый участок длиной примерно 200 км. Именно его наблюдение с достаточным уровнем надежности может обеспечить малогабаритный радиолокатор (Рисунок 5.9).

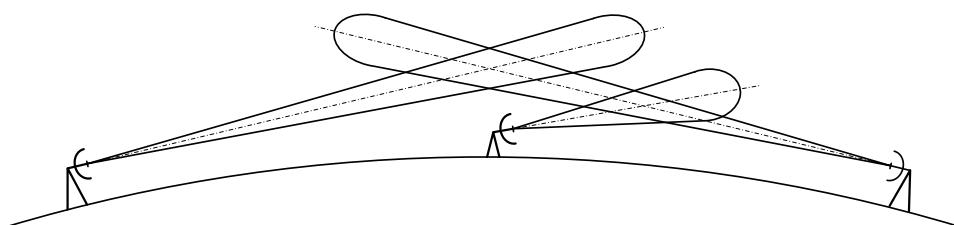


Рисунок 5.9 - Схема расположения диаграмм направленности радиолокаторов ДМРЛ-С и место возможной установки малогабаритного радиолокатора.

Кроме того, существуют районы, в которых использование малогабаритных МРЛ оправданно по всем параметрам. Так, устанавливать большой радиолокатор в горах совершенно бессмысленно. Главное его преимущество - большой радиус действия - в этом случае обесценивается, так как зона обзора ограничивается соседними высотами. Этого недостатка можно, конечно, избежать, расположив метеорадар на господствующей в районе вершине, но при этом теряется точность измерений. Оценивать интенсивность осадков в этом случае придется, глядя на них сверху через слои облачности. А именно эти наблюдения, как показывает опыт, например, наводнения в г. Крымск Краснодарского края в 2012 году, особенно важны в горах. Но и остальные характеристики сигналов желательно в этом случае измерять с максимальной точностью и разрешающей способностью, ибо прогнозировать развитие метеообразований в данных условиях сложно и делать какие-либо выводы о наступлении опасной ситуации можно только «по факту» наблюдений. На такое способен только радар, максимально приближенный к тому объекту, безопасность которого он обеспечивает.

Однако различия в характеристиках крупно- и малогабаритных радиолокаторов (в первую очередь в ширине диаграммы направленности и мощности излучения) делают необходимым подтвердить на практике совпадение получаемой ими информации [106].

Экспериментальная проверка достоверности информации, получаемой малогабаритным радиолокатором

Проверка проводилась путем сравнения данных, поступающих от малогабаритного и крупногабаритного радиолокаторов [45]. Малогабаритным радиолокатором, подвергвшимся исследованию, был «Контур МЕТЕО-01», характеристики которого приведены в Таблице 5.2. В 2013 году проводилась его опытная эксплуатация, для чего он был установлен на крыше здания, расположенного по адресу ул. Швецова, 6 в Санкт-Петербурге. В зоне его обзора находились 3 крупногабаритных радиолокатора:

- МРЛ-5 в пос. Воейково;

- МРЛ-5 на крыше здания Российского государственного гидрометеорологического университета (РГГМУ);
- Метеор – 500D на территории аэропорта Пулково.

После детального рассмотрения всех «за» и «против» выбор был сделан в пользу Метеора-500D. Неоспоримым доводом в его пользу был признан факт нахождения локатора на оперативном дежурстве с выдачей информации каждые 10 минут. Ввести подобный режим работы для двух упомянутых МРЛ-5 не представлялось возможным из-за связанных с этим организационных проблем. Однако первые измерения были проведены как с использованием «Метеора» так и МРЛ-5 РГГМУ. Полученные при этом качественные сравнения показали достаточно хорошее совпадение карт с учетом, конечно, разности в метеорологических потенциалах локаторов. Примеры такого сравнения приведены на Рисунках 5.10, 5.11.

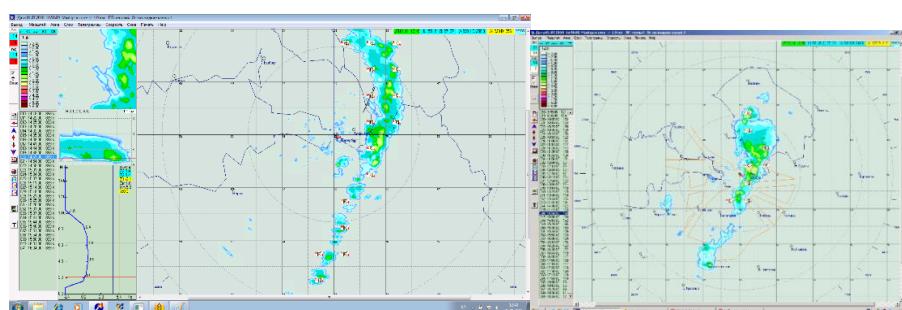


Рисунок 5.10 - Карты максимальной отражаемости, полученные «Контур-МЕТЕО-01» (слева) и МРЛ-5 (справа) при одновременном наблюдении. Смещение по горизонтали вызвано тем, что МРЛ-5 расположено на 40 км восточнее «Контура»

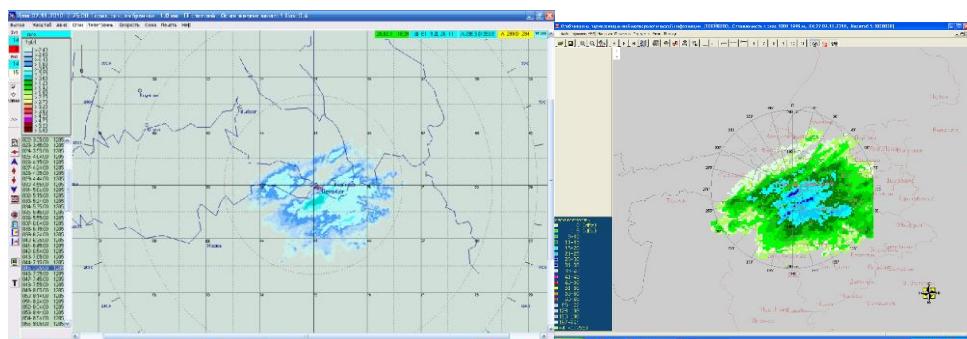


Рисунок 5.11 - Карты отражаемости в слое 0-1 км, полученные радарами «Контур МЕТЕО-01» (слева) и «Метеор – 500С» (справа) при одновременном наблюдении

Второй задачей, которую предстояло решить, был выбор методики сопоставления информации, которая позволила бы получить количественные оценки. Непосредственное сравнение принимаемых сигналов было бы методически неверно из-за различий в длине волны несущего колебания, ширине диаграммы направленности антенны и других характеристик, значения которых приведены в Таблице 5.3.

Таблица 5.3 - Характеристики метеорологических радиолокаторов, участвующих в эксперименте

Наименование параметра	Единица измерения	Значение параметра	
		Контур МЕТЕО-01	Метеор -500С
Чувствительность приемного тракта	дБ/Вт	147	143
Импульсная мощность передатчика	кВт	5,0	250,0
Длительность зондирующего импульса	мкс	4,0	2,0
Ширина ДН антенн	град.	3,0	1,0
Длина волны	см	3,2	5,3
Потери в волноводном тракте	дБ	2,0	8,0

Кроме того, это было невозможно и технически, т.к. информация из Пулково поступала в виде карт в коде BUFR, в котором значения радиолокационной отражаемости усредняются, как известно, по площади 4*4 км. Сравнивать непосредственно каждый элемент осреднения не представлялось возможным из-за разности в координатах рассматриваемых радаров – «Контур» располагался 8-ю километрами восточнее и 11-ю севернее «Метеора». Следовательно, координаты участков, по которым усреднялись данные, не

совпадали. Поэтому было принято решение разбить окружающее локатор пространство на 12 частей – на 4 сектора по азимуту (0-90, 90-180, 180-270 и 270-360 градусов) и на 3 сегмента по дальности (0-50, 50-100 и 100-150 км) – и в каждой из них фиксировать максимальное значение отражаемости. Показателем достоверности информации будет коэффициент корреляции между парами оценок, получаемых радарами одновременно.

Следующей задачей являлась теоретическая оценка того значения искомой величины, которое мы ожидаем получить после статистической обработки данных. При полной идентичности параметров радиолокаторов и равенстве координат их расположения и моментов времени наблюдения следовало бы ожидать равенства коэффициента корреляции единице. Обозначим совместное распределение вероятности пар рассматриваемых нами оценок при выполнении перечисленных условий $p_y(x, y)$, где x и y – оценки максимальной отражаемости, получаемые радарами. Тогда реальное распределение оценок

$$p_p = p_D p_y(x, y), \quad (5.30)$$

где p_D – вероятность того, что «дестабилизирующие» факторы не влияют на результаты исследований. Искомый нами коэффициент корреляции [15]

$$r = \int_{-\infty}^{+\infty} x y p_D p_y(x, y) dx dy = p_D. \quad (5.31)$$

Таким образом, для определения ожидаемого значения коэффициента корреляции достаточно оценить вероятность p_D . Прежде всего, перечислим те факторы, влияние которых на измерения необходимо учитывать. К ним следует отнести:

- смещение сегментов, внутри которых оценивается максимум отражаемости, из-за расположения локаторов в разных точках пространства;
- разница во времени между получением каждым из радиолокаторов, сравниваемых между собой оценок;

- разница метеорологических потенциалов локаторов из-за чего один может обнаруживать метеоцели меньшей отражаемости, чем другой;
- разница в ширине диаграмм направленности антенны, приводящая к тому, что оценивание отражаемости происходит в разных по величине импульсных объемах, по-разному влияет экранирующий эффект от земли и т.д.

Таким образом,

$$P_{\text{д}} = P_{\text{СМ}} P_{\text{ВР}} P_{\text{Пот}} P_{\text{ДН}}, \quad (5.32)$$

где $P_{\text{СМ}}$, $P_{\text{ВР}}$, $P_{\text{Пот}}$, $P_{\text{ДН}}$ - вероятности того, что факторы смещения мест расположения локаторов, разницы в моментах наблюдения цели, разницы в потенциалах локаторов и разницы в ширине диаграммы направленности соответственно не повлияют на точность вычисления искомого коэффициента корреляции.

Рассмотрим каждый из перечисленных факторов в отдельности.

Как уже упоминалось, разница в координатах радаров составляла 8 км по широте и 11 км по долготе, что приводило к смещению сегментов, представленному на Рисунке 5.12.

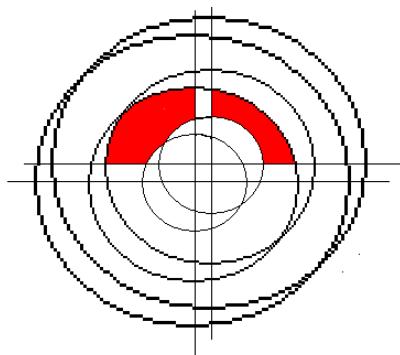


Рисунок 5.12 - Иллюстрация к расчету общих зон обзора радиолокаторов при смещении в точках их расположения. Красным выделены общие зоны обзора для дальностей 50-100 м в 1-м и 4-м квадрантах

При равномерном распределении вероятности нахождения целей на всей площади зоны обзора радиолокатора вероятность $p_{\text{СМ}}$ будет равна отношению

общей для обоих локаторов площади обзора в рассматриваемом секторе при смещении мест расположения $S_{\text{общ}}$ к общей площади этого сектора S_0 . Как следует из приведенного рисунка, общие площади обзора надо рассчитывать по-разному для 1, 3 и 2, 4 квадрантов. В первом случае

$$S_{\text{общ}} = \int_0^{\pi/2} \int_{R_{\min}}^{R_{\max} - R_0 \cos(\varphi - \varphi_0)} r d\varphi dr, \quad (5.33)$$

где R_{\min} , R_{\max} - границы области, для которой рассчитывается коэффициент корреляции, по дальности;

R_0 , φ_0 - сферические координаты точки расположения одного радиолокатора относительно другого.

Для 2 и 4 квадрантов рассчитать общую площадь гораздо труднее. Поэтому оценим ее приблизительно в соответствии со следующей формулой –

$$S_{\text{общ}} = \frac{\pi(R_{\max}^2 - R_{m[n]}^2)}{2} - R_{\max}^2 \left(y_0 - \frac{x_0}{2} \right), \quad (5.34)$$

где x_0 , y_0 - декартовы координаты смещения места расположения одного радиолокатора относительно другого. Величина S_0 для всех квадрантов рассчитывается одинаково

$$S_0 = \frac{\pi}{4} (R_{\max}^2 - R_{\min}^2). \quad (5.35)$$

Результаты вычислений сведены в Таблицу 5.4.

Таблица 5.4 - Значения вероятности $p_{\text{см}}$ для различных сегментов зоны наблюдения

	1, 3 квадранты	2, 4 квадранты	Общее значение для всех направлений
0-50 км	0,65	0,82	0,74
50-100 км	0,82	0,88	0,85
100-150 км	0,85	0,89	0,87

Влияние временного фактора проявляется в том, что за интервал между наблюдениями первого и второго радаров цель может переместиться из одного сегмента обзора в другой или в силу собственных законов развития так изменить свои параметры, что оцененные радарами величины ее отражаемости могут значительно отличаться друг от друга. Как уже говорилось, ДМРЛ в Пулково имел четкое расписание обзоров, а управление ММРЛ «Контур МЕТЕО-01» полностью находилось в руках исследователей. Поэтому временной интервал между наблюдениями был сведен к минимуму и не превышал 2 минут. Так как сколько-нибудь существенного перемещения метеоцели или изменения ее параметров за указанный промежуток времени ожидать не приходится, логично влиянием рассматриваемого фактора пренебречь и принять величину $p_{\text{вр}}$ равной единице.

Разница в потенциалах локаторов приводит к тому, что в каком-то интервале значений отражаемости один из них цель видит и оценивает ее параметры, другой же считает, что цели нет. Для определения тех значений отражаемости, для которых возможна описанная ситуация, достаточно найти отношение метеорологических потенциалов локаторов, определяемых по известной формуле

$$\Pi_M = \frac{0,1\pi^6 P_{\text{II}} A_p h K_{AB}}{P_{\text{III}} \lambda^4}, \quad (5.36)$$

где P_{II} - мощность излучаемого импульса;

A_p - площадь антенны;

h - пространственная протяженность зондирующего импульса;

K_{AB} - коэффициент потерь в антенно-волноводном тракте;

P_{III} - мощность шумов на входе приемника;

λ - длина волны несущего колебания.

Используя данные Таблицы 5.3, находим, что разница потенциалов локаторов «Метеор 500D» и «Контур МЕТЕО-01» составляет 9,6 дБ. В

подлежащей обработке выборке метеорологические отражаемости наблюдаемых целей укладывались в промежуток -20-+30 дБ по оценке «Метеора 500D». Полагая распределение отражаемости равномерным в указанном интервале, определяем величину $p_{\text{Пот}} = 0,81$.

Влияние разницы в ширине диаграмм направленности наиболее разнообразно и в наименьшей степени подлежит учету среди остальных перечисленных факторов. Наиболее существенное влияние при этом играет тот факт, что радиолокатор «Контур МЕТЕО-01», имеющий 3-хградусный луч, уже на дальности 20 км имеет поперечный размер разрешаемого объема около 1 км. Это приводит к тому, что предположение о полном заполнении этого объема гидрометеорами, являющееся непременным условием приведенных вычислений, может не выполняться. В результате «Контур» будет получать заниженные оценки отражаемости, причем с увеличением дальности расхождения будут увеличиваться. Оценить указанный эффект количественно невозможно. Остается лишь принять во внимание возможное уменьшение корреляции с ростом расстояния до наблюдаемых целей.

Статистической обработке была подвергнута выборка из 4,5 тысяч пар результатов измерений. Результаты теоретических расчетов и практических данных приведены в Таблице 5.5.

Полученные результаты показывают достаточно хорошее совпадение оценок, получаемых обоими радиолокаторами на дальностях до 100 км. Очевидно, именно эта величина должна быть принята максимальной для малогабаритного радиолокатора с характеристиками, подобными тем, что имеет «Контур МЕТЕО-01». На больших расстояниях, видимо, линейный размер элемента разрешения малогабаритного радиолокатора становится настолько большим, что условие его полного заполнения отражателями не выполняется для всех видов метеоцелей.

Таблица 5.5 - Результаты теоретических и статистических расчетов по определению коэффициента корреляции оценок, получаемых радиолокаторами «Метеор 500D» 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

5.4 БОРЬБА С ОТРАЖЕНИЯМИ ОТ МЕСТНЫХ ПРЕДМЕТОВ В МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОМ РАДИОЛОКАТОРЕ

Еще одной областью, в которой открываются широкие возможности для многопараметрического радиолокатора, является борьба с отражениями от местных предметов («местников»). Эти помехи, создаваемые различными неровностями земной поверхности, деревьями, зданиями, вышками и т.п. объектами, способны оказывать существенное маскирующее полезный сигнал воздействие. Их подавление – сложная задача, существующая практически во всех видах радиолокаторов.

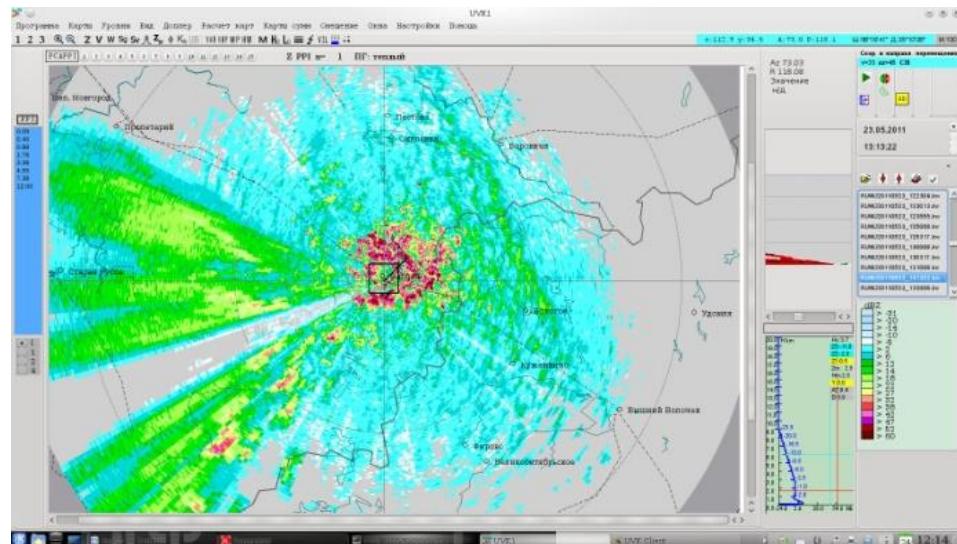
В недавнем прошлом, когда МРЛ измеряли только мощность принимаемых отражений, данная проблема решалась с помощью «карты «местников». Для ее построения выбирался день с совершенно чистым небом и на нулевом угле возвышения антенны делался скан в горизонтальной плоскости. Получаемая при этом карта радиолокационной отражаемости запоминалась и в дальнейшем вычиталась из подобных карт, формируемых при оперативной работе. Эффективность такой методики была очень низкой из-за того, что отражающие способности местных предметов зависят от сложившихся метеоусловий и могут изменяться под их воздействием в больших пределах.

Появление новых измеряемых метеорологическими радиолокаторами параметров, позволивших использовать иные принципы разделения полезного и

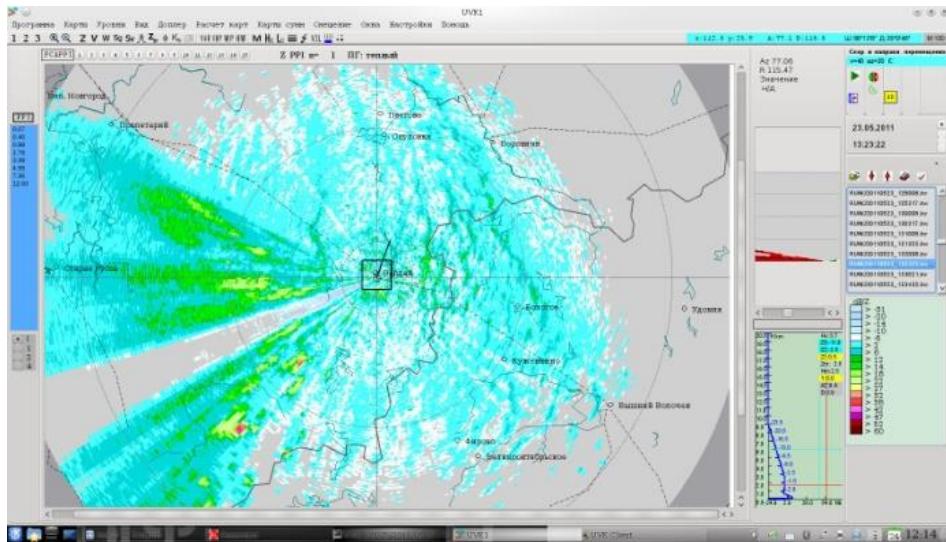
помехового сигналов, значительно повысило эффективность борьбы с рассматриваемого вида помехами.

Борьба с отражениями от местных предметов при помощи частотной фильтрации

Внедрение в практику радиометеорологических наблюдений когерентного режима работы аппаратуры, сделало возможным применение для рассматриваемых целей частотных режекторных фильтров, настроенных на нулевой доплеровский сдвиг частоты. Данная методика была давно известна в классической радиолокации точечных целей. Однако в метеорологической радиолокации она обладает рядом особенностей. Прежде всего, они заключаются в гораздо более широких спектрах отражений от метеоцелей по сравнению с точечными. Это приводит к тому, что очень частым явлением становится наличие в полезном сигнале частотных составляющих, подавляемых фильтром, и, как следствие, его «повреждение» фильтром. Пример такого случая представлен на Рисунке 5.13.



a



б

Рисунок 5.13 - Карты радиолокационной отражаемости без фильтрации (а) и с включенным режекторным фильтром (б)

На приведенном рисунке хорошо видно, что в отсутствие фильтрации (Рисунок 5.13а) на дальности до 20 км присутствуют мощные отражения от местных предметов, выделенные красным цветом. При включенном фильтре (Рисунок 5.13б) они пропадают. Однако вместе с ними пропадает и часть полезного сигнала. В частности, в среднем на 10 дБ уменьшается радиолокационная отражаемость облачного массива, расположенного к востоку от радара на расстоянии 25-50 км. Там почти полностью исчезает зеленый цвет. На западе также видно значительное подавление отражений от метеоцелей в радиусе 100 км.

Искажения полезного сигнала можно минимизировать, уменьшив ширину режекторного фильтра, но при этом может снизиться эффективность подавления помехи. Выходом из сложившегося положения может быть «целевая» фильтрация, т.е. применение режекторного фильтра к сигналам не от всех элементов разрешения, в которых могут находиться местные предметы, а только от тех, где они действительно находятся. Очевидно, что для этого требуется решить задачу распознавания данного вида помехового сигнала.

Не подлежит сомнению, что главным критерием при этом следует признать неподвижность наблюдаемой цели, т.е. близость к нулю средней частоты энергетического спектра принимаемого сигнала. Однако метеорологические объекты также способны создавать отражения с нулевой средней частотой. Поэтому необходимо введение дополнительных критериев. Если оставаться в рамках спектрального анализа, за таковой надо взять ширину спектра сигнала. Ее значение у рассматриваемой помехи, как правило, значительно меньше, чем у отражений от метеоцелей.

Такое распознавание отражений от местных предметов (среднее значение спектра радиальных скоростей частиц находится в пределах ± 2 м/с, ширина спектра не превосходит 0,5 м/с) было реализовано в программе первичной обработки (ПОИ) радиолокатора ДМРЛ-С. Недостаток его заключается в том, что хорошо распознается «чистый» сигнал от местного предмета. Если же мы имеем смесь полезного сигнала с помехой, данный алгоритм оказывается неработоспособным. Для увеличения эффективности работы рассматриваемых систем надо привлекать другие критерии, в качестве которых могут выступить поляризационные характеристики сигнала.

Применение поляризационных параметров сигнала для борьбы с отражениями от местных предметов

Из трех поляризационных параметров, измеряемых многопараметрическим радиолокатором, два – дифференциальная отражаемость и модуль коэффициента взаимной корреляции поляризационных составляющих - могут применяться для распознавания сигналов, отражаемых местными предметами [46].

Применение первого из них основано на том, что местные предметы имеют, как правило, вертикальную пространственную ориентацию, а, следовательно, отрицательное его значение. Но отрицательное значение дифференциальной отражаемости могут иметь и метеорологические образования. Поэтому распознавать помеху по значению только одного параметра будет неправильно. В ПОИ радиолокатора ДМРЛ-С был реализован алгоритм, основанный на

одновременном использовании двух критериев – нахождение среднего значения спектра радиальных скоростей частиц в пределах ± 2 м/с и дифференциальная отражаемость меньше -0,5 дБ. Пример его применения представлен на Рисунке 5.14.

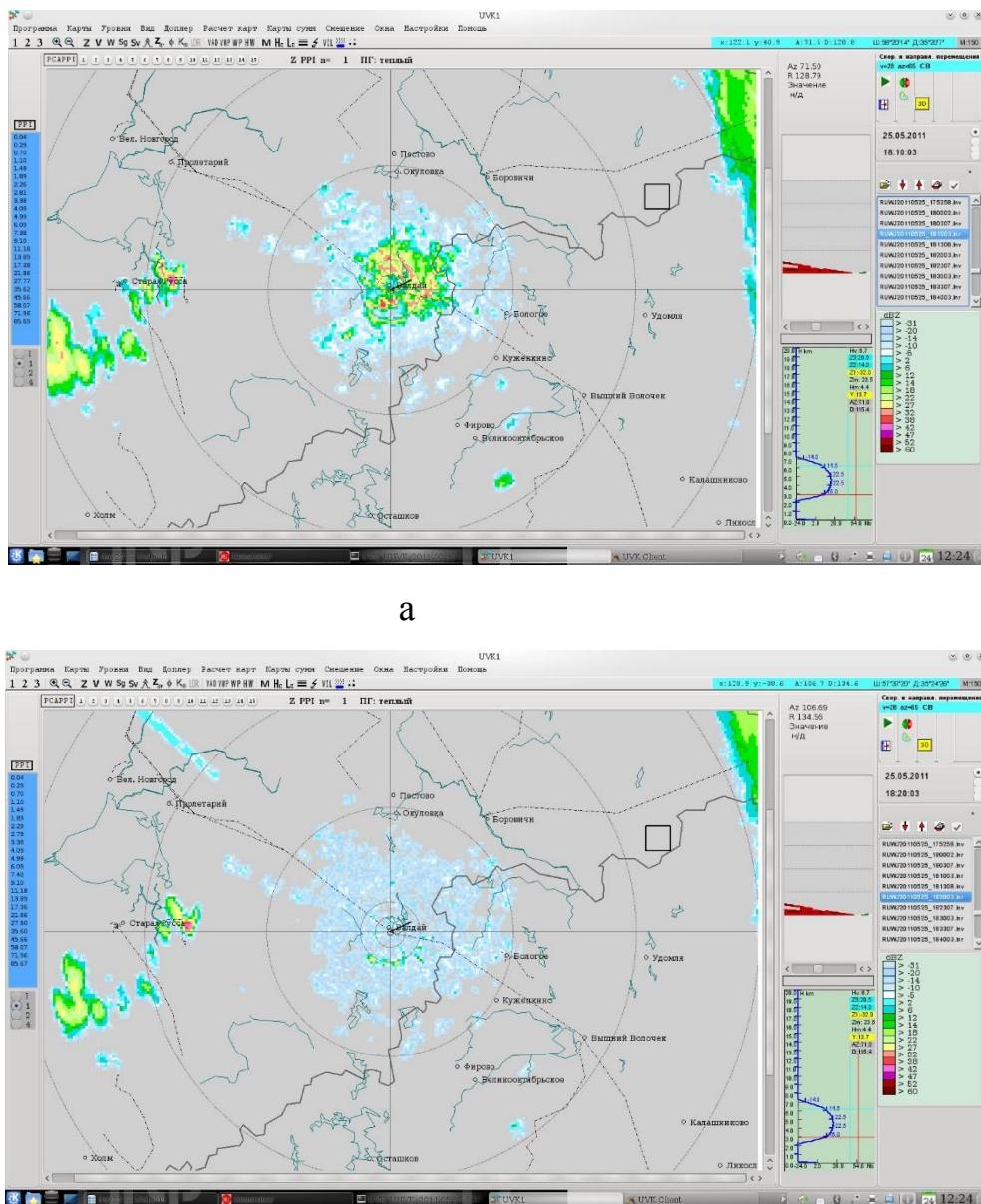


Рисунок 5.14 - Карты радиолокационной отражаемости без фильтрации отражений от местных предметов (а) и с фильтрацией по критериям нулевой средней частоты и отрицательной дифференциальной отражаемости (б), полученные с интервалом 10 минут

Эффективность данного алгоритма оказалась выше предыдущего, но всех вопросов он все равно не снял. По прежнему слабым местом остается случай смеси сигнала с помехой. Его распознавание по рассмотренным выше методикам затруднено главным образом из-за того, что средняя частота спектра в данном случае может значительно отличаться от нуля. Следовательно, для выявления рассматриваемой ситуации необходим более надежный критерий, в качестве которого может выступить модуль коэффициента взаимной корреляции поляризационных составляющих принимаемого сигнала.

Значение упомянутого параметра лежит в пределах 0,95-1 для отражений, создаваемых метеорологическими целями, и 0-0,5 для всех остальных. Следовательно, при превышении им порога 0,95 следует считать, что никаких примесей помехи в принимаемом сигнале нет и его можно смело пропускать на дальнейшую обработку. В противном случае, прежде всего, должно проверяться наличие в спектре сигнала составляющей с нулевой частотой, т.к. именно оно является необходимым условием присутствия отражений от местных предметов. В случае ее отсутствия наблюдаемая цель идентифицируется как неметеорологическая, а созданные ею отражения пропускаются на дальнейшую обработку.

При наличии указанной составляющей ее следует удалить с последующим вычислением для оставшейся части сигнала, во-первых, мощности и, во-вторых, модуля коэффициента корреляции поляризационных составляющих. Если оставшаяся мощность близка к нулю, радиолокатор наблюдал один только местный предмет и соответствующий ему сигнал должен быть исключен из обработки. Если же мощность достаточно велика, а второй упомянутый параметр увеличился, значит мы имеем дело со смесью отражений от метеоцели и местного предмета. Следовательно, удаление составляющих спектра оправдано, и дальнейшие действия зависят от полученного значения модуля коэффициента взаимной корреляции. В случае его попадания в интервал 0,95-1 помеху следует считать подавленной. Если же оно остается меньше приведенных значений,

процедуру следует повторять, увеличивая ширину режекторного фильтра до предельно возможной для отражений от местного предмета величины. Очевидно, что шаг данного увеличения зависит от многих факторов (объема обрабатываемой выборки, возможностей применяемой вычислительной техники и т.д.). В простейшем случае достаточно пропустить сигнал один раз через фильтр с выбранной на основании опыта ранее проводимых наблюдений полосой.

Если после приведенной выше обработки значение модуля коэффициента корреляции поляризационных составляющих сигнала остается менее 0,95, следует признать, что радиолокатор наблюдает цель неметеорологического происхождения, и отраженный ею сигнал пропустить на дальнейшую обработку в первоначальном виде без пропускания через режекторные фильтры.

5.5 ПЕРСПЕКТИВЫ КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ РАДИОЛОКАТОРОВ С ДРУГИМИ ТЕХНИЧЕСКИМИ СРЕДСТВАМИ

Метеорологический радиолокатор - не единственное техническое средство, применяемое в гидрометеорологической службе для наблюдения за состоянием тропосферы. Каждое из них определяет свои параметры и имеет свою область применения. Однако бывает, что эти зоны хотя бы частично перекрываются, и тогда появляется возможность как бы с двух разных точек взглянуть на одно и то же явление, получив при этом новое качество наблюдений аналогично возникновению стереоэффекта в фотографии.

Для реализации подобных наблюдений необходимо создать комплекс из двух или более согласованно работающих технических средств. На настоящий момент перспективными представляются соединения метеорологического радиолокатора с радиометром и с лидаром. Совместная работа с другими приборами, как, например, с грозопеленгатором, облегчают проведение наблюдений и представление информации, но ничего качественно нового в них не привносит.

Совместные наблюдения радиолокатора и радиометра

Комплекс, объединяющий метеорологический радиолокатор и радиометр принято называть пассивно-активной радиолокационной станцией (ПАРЛС). Идея создания такого комплекса родилась еще в 60-х годах XX-го века [152; 147]. Ее появление стало ответом на требование времени в отношении прогнозирования таких опасных явлений погоды, как гроза и град. Дело в том, что хорошим предиктором развития облака до грозового или градового состояния является его водность [3]. Однако оценить ее радиолокационными способами практически невозможно – слишком велики погрешности измерения.

С этой точки зрения идеальным инструментом служит радиометр – широкополосный приемник собственного излучения атмосферы, работающий в нашем случае в сантиметровом диапазоне волн [120]. По точности измерения водности он на порядок превосходит радиолокатор, но имеет при этом большой недостаток – измеряемый им сигнал интегрируется по всему объему луча антенны. В результате получаемые данные зависят не только от водности наблюдаемого объекта, но и от размеров последнего.

Разрешить возникшее противоречие и призван пассивно-активный комплекс [134]. Его активная часть – радиолокатор – определяет границы объекта и распределение воды внутри него, а пассивная - радиометр – оценивает интегральное содержание воды в облаке. В результате объединения информации получаем не только среднюю по объекту наблюдения водность, но и распределение ее по объему облака с выделением наиболее опасных участков. В соответствии с этим методом среднюю водность облака $\bar{w}(\vec{l})$ вдоль направления зондирования определяют по соотношению [44]:

$$\bar{w}(\vec{l}) = \frac{W(\vec{l})}{L(\vec{l})}, \quad (5.37)$$

где $L(\vec{l})$ - протяженность зондируемой зоны облака (дождя), определяемая с помощью активного канала (радиолокатора);

$W(\vec{l})$ - водозапас облака вдоль направления визирования, определяемый с помощью радиометра.

В общем виде выражение для водозапаса облаков записывается в виде [9]:

$$W(\vec{l}) = k_w(v, T_{cl})^{-1} [\tau(v, \vec{l}) - \tau_d(v, \vec{l}) - k_q(v) Q(\vec{l})], \quad (5.38)$$

где: $k_q(v)$ - эффективный удельный коэффициент поглощения в водяном паре;

$k_w(v, T_{cl})$ - эффективный удельный коэффициент поглощения в облаках;

$\tau_d(v)$ - поглощение в кислороде;

$\tau(v)$ - измеряемое радиометром полное поглощение атмосферы;

$Q(\vec{l})$ - влагозапас атмосферы вдоль луча зондирования.

Информативные участки спектра частот для определения водозапаса облаков находятся в «окнах прозрачности» атмосферы 5-15 ГГц, 30-38 ГГц, 75-95 ГГц. Для исследования стадии зарождения облаков $Cu\ hum$, $Cu\ med$ радиометрические измерения проводятся на частотах около 36 ГГц (и/или 90 ГГц), а для стадии мощных Cb оптимальным является диапазон частот 5-9.6 ГГц. Поскольку целью наблюдений ПАРЛС является своевременное распознавание грозовых и градовых облаков, настройка радиометра должна соответствовать именно последнему диапазону. Погрешность определения водозапаса облаков составляет около 30%. [76]

Для перехода от водности к интенсивности дождя используются соотношения [144]:

$$I = 3,4 \omega^{1,33} \text{ при } \omega \leq 0,32 \text{ г/м}^3, \quad I = 2,8 \omega^{1,17} \text{ при } \omega > 0,32 \text{ г/м}^3, \quad (5.39)$$

Пассивно-активный метод определения профилей водности конвективных облаков основан на измерении водозапаса зондируемой зоны с помощью микроволнового радиометра и оценки весовой функции водности с помощью активного канала пассивно-активной станции:

$$w(l) = \frac{Z(l)^{1/\beta}}{\int_{l_1}^{l_2} Z(l)^{1/\beta} dl} W(\vec{l}), \quad (5.40)$$

где $Z(l)$ – радиолокационная отражаемость;

l_1, l_2 – границы облака по данным радиолокатора;

β - параметр, зависящий от распределения капель по размерам.

Очевидно, что такая совместная обработка данных влечет за собой требование обязательной синхронности их получения. Это и являлось основным тормозом на пути распространения предлагаемого способа. Существующие на тот момент времени радиометры из-за малой чувствительности требовали слишком большого времени накопления сигнала для получения репрезентативных данных. Это значительно снижало скорость вращения радиолокатора, а, следовательно, и темп обновления получаемой им информации. В результате, дело ограничились созданием всего одного опытного образца на базе метеорологического радиолокатора МРЛ-2П [9]. С ее помощью были получены обнадеживающие результаты. Одновременно было выявлено еще одно слабое место такой системы – слишком большая зависимость от активных помех – излучений находящихся в рабочей зоне радиолокаторов и других радиотехнических средств.

Произошедшее с тех пор развитие средств радиоприема позволяет вернуться к решению поставленной задачи на новом качественном уровне [135]. Имеющиеся теперь в нашем распоряжении радиометры обладают чувствительностью на два порядка выше тех, что применялись в прошлом веке, и способны выдавать информацию в том же темпе, что и радиолокатор.

В результате была предпринята новая инициативная разработка, силами двух организаций - ОАО «НПО «Лианозовский электромеханический завод» и ВКА имени А.Ф.Можайского [136].

За основу взят радиолокатор ДМРЛ-С с новой отечественной антенной. Для того чтобы получать качественные результаты, работа обоих каналов комплекса должна быть синхронизирована не только во времени, но и в пространстве, т.е. объемы, в котором каждый из них проводит измерения, должны полностью совпадать. Следовательно, каналы должны иметь общие антенну и облучатель. Разделение сигналов происходит после малошумящего усилителя (МШУ) высокой частоты при помощи направленного ответвителя (Рисунок 5.15). Один из

выходов последнего подключается к приемнику радиолокатора, чем восстанавливается его штатная структура дальнейшей обработки информации. Имеющаяся при этом потеря 3 дБ мощности принимаемого сигнала практически не влияет на качество работы, т.к. происходит уже после первого каскада усиления и может быть легко компенсирована увеличением коэффициентов усиления последующих каскадов.

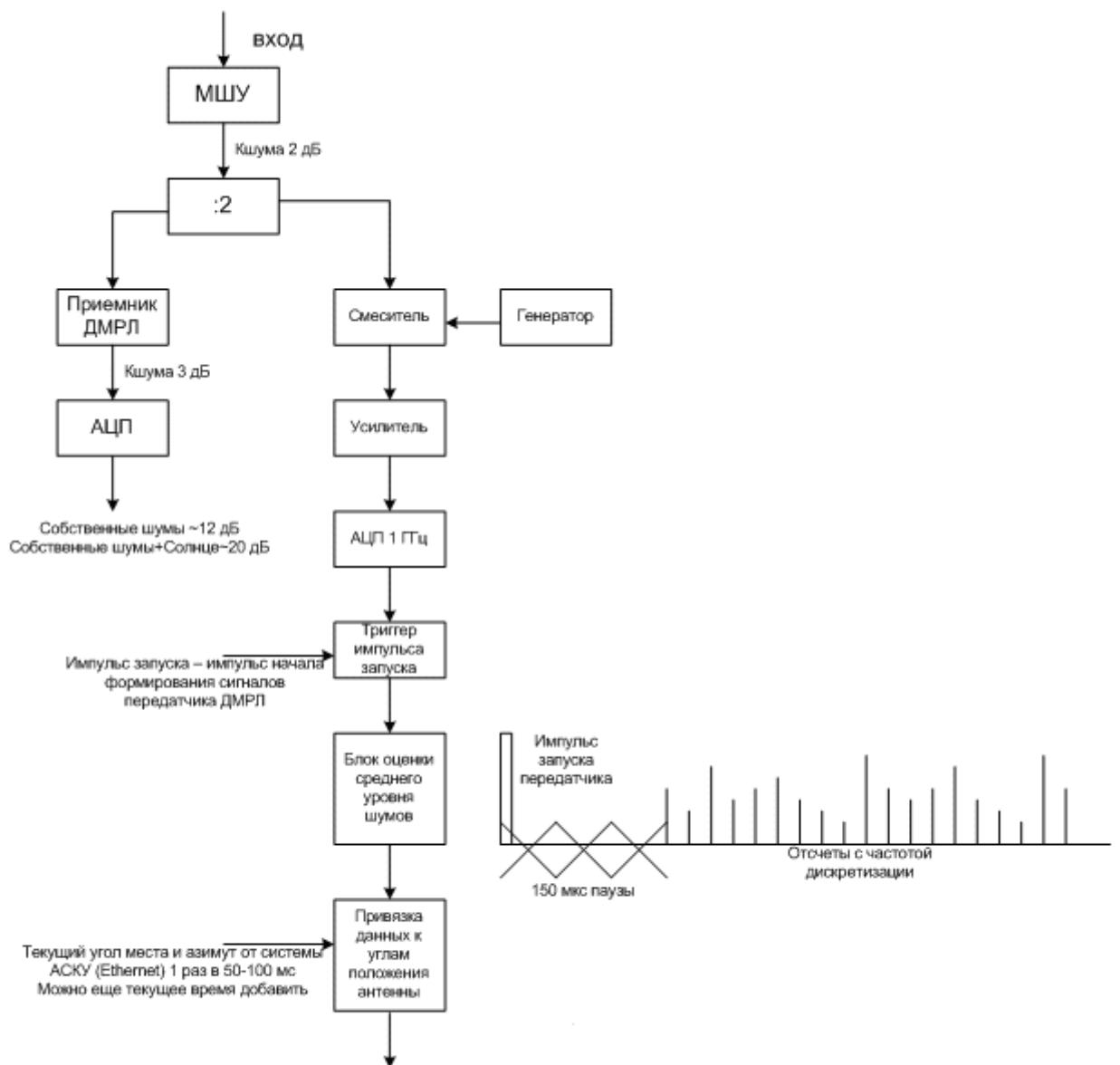


Рисунок 5.15 - Схема радиометра и его встраивания в радиолокатор

Второй выход ответвителя подключается непосредственно к радиометру, построенному по супергетеродинной схеме. Полоса рабочих частот последнего выбрана максимальной из того, что может обеспечить волноводный тракт – от 5,25 ГГц до 6 ГГц. В смесителе полоса полезного сигнала смещается в область более низких частот с верхней граничной частотой около 700 МГц, что делает возможным дальнейшую оцифровку с тактовой частотой 1,5 ГГц и разрядностью 8.

Как уже упоминалось, высокая чувствительность приемника позволила решить главную существовавшую до этого проблему увеличения скорости получения информации. Поэтому теперь на передний план выдвинулась задача помехоустойчивости. При этом в первую очередь необходимо отстроиться от помех собственного активного канала с уровнем развязки не менее 140 дБ. Частично это происходит за счет штатных устройств – ферритового циркулятора и блока защиты приемника. К этому добавляется временная селекция – на время формирования излучающего импульса (150 мкс), способного перегрузить АЦП и приемник, работа радиометра прерывается. Длительность данного строба может подбираться оптимальной в зависимости от выбранного режима работы комплекса.

Для борьбы с внешними активными помехами, о которых не имеется никаких априорных сведений, весь частотный диапазон, составляющий 750 МГц, разбивается на 20 участков шириной по 37 МГц каждый. Два из них, прилежащих к рабочим частотам радиолокатора, не обрабатываются. Этим добавляется дополнительная частотная развязка между активным и пассивным каналами. В каждом из оставшихся 18-и автономно вычисляется мощность сигнала и сравнивается с заранее установленным порогом. В случае его превышения считается, что в данном частотном отрезке присутствует помеха. Полученные в нем данные исключаются из дальнейшей разработки. Таким образом, организуется гибкая система борьбы с помехами, способная быстро адаптироваться к сложившейся обстановке.

Совмещение радиолокатора с лидаром.

В настоящее время известна только одна область радиолокации, в которой объединение с лидаром дает качественно новую информацию. Это восстановление вертикального профиля ветра. Радиолокатор здесь – один из многочисленных устройств, созданных для решения указанной задачи. Однако общепризнано, что именно он в наибольшей степени подходит для оперативного обслуживания авиации, в силу чего широко применяется в системах обеспечения полетов в аэропортах [203].

В радиолокаторе ДМРЛ-С также реализована программа восстановления профиля ветра с помощью метода VAD [42]. Однако получаемые при этом точность и разрешающая способность не удовлетворяют требованиям, предъявляемым к подобного вида оборудованию [121]. Методы, позволяющие применять радиолокатор ДМРЛ-С для обнаружения сдвигов ветра уже рассматривались в главе 3. Поэтому далее в этом разделе будем рассматривать только специфические радиолокаторы, предназначенные именно для восстановления ветра и получивших название профилометров [150]. Известно большое количество таких изделий. Однако, всем им присущ один недостаток – зависимость эффективности работы от метеоусловий. Она падает при отсутствии в окружающем пространстве гидрометеоров, т.к. именно они способны сформировать отраженный сигнал достаточной мощности, чтобы быть принятым приемником радиолокатора.

Одновременно с радиолокационными существуют профилометры лидарные [5]. Они используют в качестве цели отражения от взвешенных в воздухе твердых частиц и испытывают трудности с появлением самых мелких гидрометеоров из-за резко возрастающего при этом затухания оптических волн. Критической для них метеорологической дальностью видимости (МДВ) считается величина 5 км [88].

Таким образом, становится очевидной идея взаимной дополняемости двух упомянутых систем. Во многих аэропортах она уже реализуется – в них устанавливают обе системы и включают одну из них в зависимости от

сложившихся погодных условий. Примером может служить аэропорт Гон-Конга, схема расположения метеооборудования в котором приведена на Рисунке 5.16 [142].

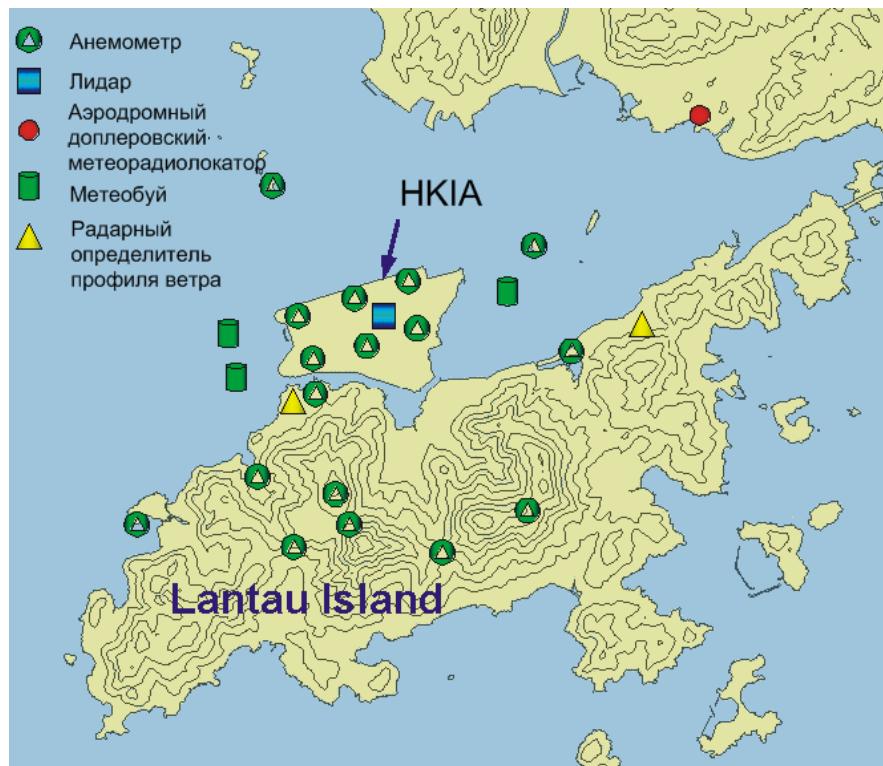


Рисунок 5.16. Карта Гонконговского международного аэропорта (HKIA) и его окрестностей

Частота несущего колебания радаров может быть различной и выбирается, исходя из решаемой ими задачи. В частности, для интересующего авиацию слоя атмосферы толщиной 500 м оптимальной принята длина волны 8 мм [22]. Радиоволны именно этого диапазона способны «видеть» мелкодисперсные метеообразования типа дымки и тумана. На Рисунке 5.17 показана зависимость максимальной дальности обнаружения метеоцелей оптической (линия 1) и радиолокационной (линия 2 - Ка-диапазон, линия 3 – Х-диапазон) системами в зависимости от величины радиолокационной отражаемости последних при одинаковой мощности излучаемого импульса [49]. Из него следует, что лидар и радар с длиной несущего колебания 8 мм хорошо дополняют один другого.

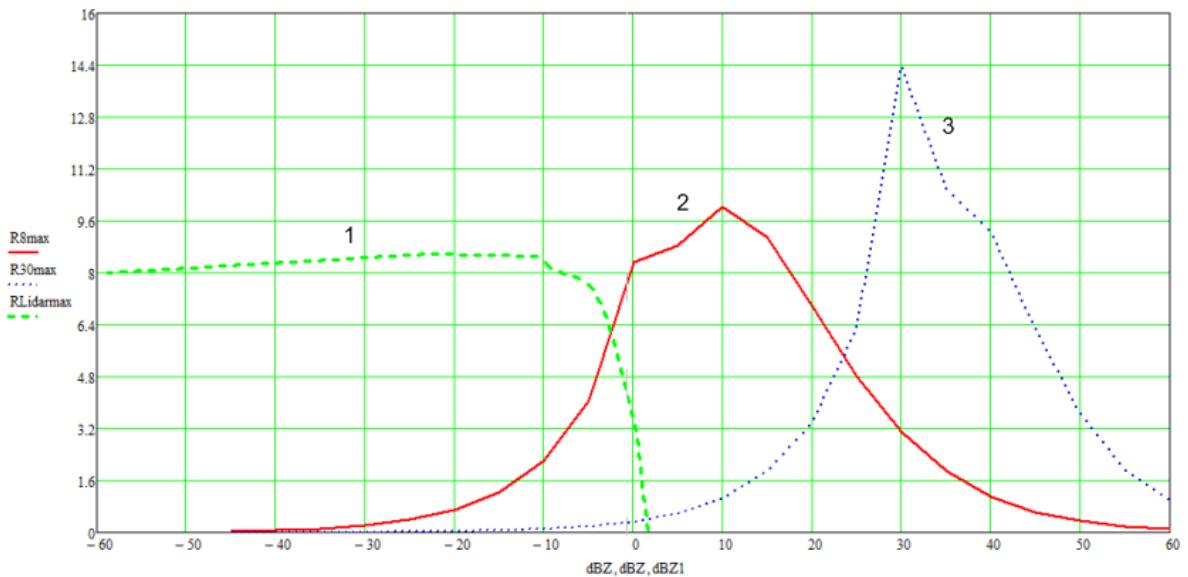


Рисунок 5.17 - Зависимость дальности действия системы от величины радиолокационной отражаемости цели для лидара (1) и радиолокатора Ка-диапазона (2) и X-диапазона (3)

Следующим шагом в развитии систем оценивания высотного профиля ветра в пограничном слое должно стать создание всепогодного измерителя путем объединения лидарной и радарной систем в одном устройстве. Помимо экономического эффекта, получаемого за счет их расположения на единой поворотной платформе, достигается единство места и алгоритмов получения информации, ее обработки и представления.

Главное же состоит в том, что аппаратура при этом становится действительно всепогодной, т.к. раздельная работа радара и лидара невозможна в случае, если часть наблюдаемого пространства занята гидрометеорами, а другая часть от них свободна.

То, что такое объединение возможно, подтверждается наличием среди выпускаемых отечественной промышленностью профилометров, использующих рассмотренные диапазоны волн. Базой для создания новой разработки может стать выпускаемый ООО «НПП «Лазерные смисиемы» (Санкт-Петербург) лидар ЛС-014 [102]. Его основные характеристики сведены в Таблицу 5.6.

Таблица 5.6 - Технические характеристики доплеровского лидара ЛС-014

Наименование	Значение
Дальность измерения	от 60 до 6000* м
Диапазон измерения направления ветра	от 0 до 360°
Длина волны лазерного излучения	1550 нм
Пространственное разрешение, не хуже	50 м
Время обновления данных о скорости и направлении ветра	1-10 сек**
Диапазон измерения скоростей	от 1 до 55 м/с
Режим сканирования	VAD, DBS, RHI, PPI, LOS

Прототипом радиолокационной системы может стать метеокомплекс 1Б67, выпускаемый ЦКБА (г. Тула) [174]. Его характеристики представлены в Таблице 5.7.

Таблица 5.7 - Основные характеристики метеокомплекса 1Б67

Наименование	Значение
Тип передатчика	Клистрон
Пиковая мощность	5 кВт
Время наработки на отказ	2000 циклов
Тип антенны	Офсетная
Размер антенны	500*500 мм
Зенитный угол сканирования	45°
Азимутальный угол сканирования	0°-360°
Рабочая частота	35 ГГц
Длительность импульса	0,4 мкс
Минимальная высота зондирования	100 м
Максимальная высота зондирования	4 км
Точность измерения высоты	30-70 м
Диапазон измерения скорости ветра	0,3-50 м/с
Точность измерения скорости ветра	0,5 м/с
Чувствительность	-90 дБZ
Потребляемая мощность	800 Вт

Продолжение таблицы 5.7

Масса	14 кг
Габаритные размеры	600*760*560 мм
Время подготовки к работе	3 мин

Значения некоторых характеристик определяет невозможность прямого заимствования рассматриваемого прибора, но использование его только как образца. К таковым, в частности, относятся его вес, габариты и размеры антенны.

Определим параметры радиолокационного блока вновь создаваемого устройства, способного обеспечить такие же, как у лидара характеристики, в условиях ухудшенной видимости.

Дальность, на которой должны производиться измерения, будем определять, исходя из следующих соображений:

- она должна быть больше «мертвой зоны» антенны, зависящей от длительности зондирующего импульса, времени восстановления чувствительности приемника и зоны Френеля, внутри которой формируется диаграмма направленности антенны. Опыт показывает, что в миллиметровом диапазоне волн все данные условия выполняются уже на расстоянии 1 км от радиолокатора;

- вертикальный размер разрешаемого объема на этой дальности не должен превышать 30 м – расстояния, на котором принято измерять величину сдвига ветра.

Удобной с этих точек зрения является дальность 1 км при ширине диаграммы направленности антенны 2 градуса.

Наложенное вторым условием ограничение должно выполняться до высот 500 м. Отсюда определяем максимальную длительность зондирующего импульса τ - при максимальном угле места антенны 30 градусов (500 м высоты при наклонной дальности 1 км) должно выполняться неравенство $\frac{c\tau}{4} \leq 30 \text{ м}$ или $\tau \leq 0,4 \mu\text{s}$.

Из условия равенства ширины луча 2 градусам получаем минимально возможный диаметр антенны

$$D = \frac{\lambda}{\theta} = 0,24\text{м}. \quad (5.41)$$

В действительности он будет, конечно, больше, около 30 см, но и этот размер хорошо согласуются с габаритами лидара.

Минимальное значение радиолокационной отражаемости метеоцелей, обнаруживаемых блоком, можно оценить по значению данного параметра у метеокомплекса 1Б67, который заявляется равным -90дБZ. Формула для его расчета имеет вид

$$Z_{\min} = \frac{R_{\min}^2}{\Pi} \cdot \frac{P_c}{P_{\text{ш}}}, \quad (5.42)$$

где R_{\min} - минимальная дальность действия радиолокатора;

Π - его метеорологический потенциал;

$P_c/P_{\text{ш}}$ - минимальное отношение сигнал-шум, достаточное для нормальной работы системы обработки информации.

Метеорологический потенциал радиолокатора определяется по формуле [141]

$$\Pi = \frac{\pi^3 c \eta}{4^5 \lambda^2 \ln 2} \cdot \frac{P_i G^2 \theta^2 \tau}{P_{\text{ш}}}, \quad (5.43)$$

где P_i - импульсная мощность передатчика;

G - коэффициент усиления антенны;

θ - ширина диаграммы направленности антенны;

τ - длительность зондирующего импульса;

c - скорость света;

η - коэффициент ослабления в волноводном тракте.

Все параметры нашего блока и метеокомплекса 1Б67 одинаковы за исключением ширины формируемой антенной диаграммы направленности (2 градуса вместо 1). Поскольку увеличение вдвое ширины диаграммы

направленности приводит к уменьшению в 16 раз коэффициента ее усиления, получаем общее снижение нашего метеорологического потенциала на 6 дБ.

Остается учесть ослабления электромагнитной волны на пути ее распространения. На интересующей нас дистанции 1 км большинством факторов, вызывающих данные затухания, можно пренебречь. Исключение составляет ливень, способный внести ослабление 20 дБ на км [7]. С учетом распространения туда и обратно это составит 40 дБ. Следовательно, искомое минимальное значение радиолокационной отражаемости цели составит -44 дБ.

Таким образом, на современном этапе существует реальная возможность создания всепогодного измерителя вертикального профиля ветра в пограничном слое атмосферы для обеспечения безопасности полетов авиации на основе комплексирования лидарных и радиолокационных средств.

Опытный образец такого устройства уже создан. При этом для более надежного перекрытия всего диапазона возможных значений отражаемости присутствующих в атмосфере гидрометеоров к уже рассмотренным двум устройствам добавлен еще один радар с длиной несущего колебания 3 см. Общий вид изделия представлен на Рисунке 5.18 [98; 97]

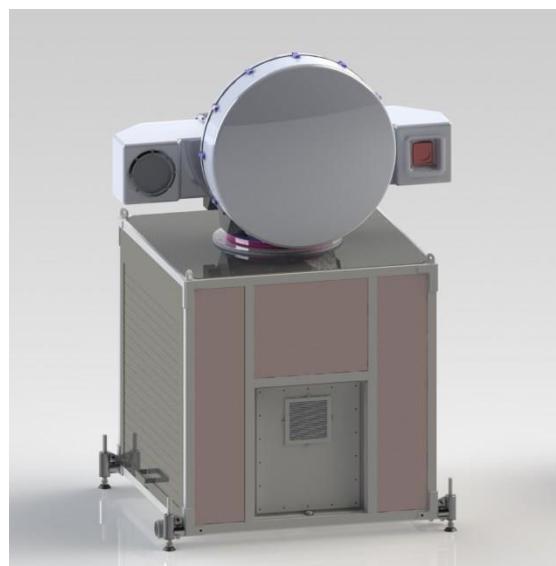


Рисунок 5.18 - Общий вид опытного образца лидарно-радиолокационного метеорологического комплекса, объединяющего лидар ИК диапазона, два радара X и Ка диапазонов

ВЫВОДЫ

Реализованные в современном метеорологическом многопараметрическом радиолокаторе технические решения, имеющие цель решить какую-либо конкретную задачу, несут в себе потенциальные возможности по улучшению ряда других характеристик рассматриваемого изделия. Так, применение сложного зондирующего импульса, вызванное желанием увеличить среднюю наработку на отказ до 3000 часов, порождает возможность значительного увеличения метеорологического потенциала радиолокатора и двукратного расширения интервала однозначного определения скорости цели. Последнее возможно также при излучении волн различной поляризации, изначально вызванной стремлением распознавать агрегатное состояние наблюдаемых гидрометеоров. Кроме этого в многопараметрических радиолокаторах возможна реализация алгоритмов подавления помех от местных предметов, эффективность которых значительно больше тех, что применялись в некогерентной аппаратуре. Наконец, появление малогабаритных метеорологических радиолокаторов, спроектированных с целью уменьшения стоимости оборудования и получения мобильных устройств, позволяет надеяться на то, что их внедрение на сеть штормооповещения приведет к значительному улучшению показателей ее работы.

Кроме этого, современное развитие техники позволяет возродить некоторые теоретические идеи, не находящие ранее практического решения. Так, на базе радиолокатора ДМРЛ-С уже создана пассивно-активная радиолокационная станция, способная на порядок улучшить точность определения водозапаса наблюдаемых метеоцелей, что, в свою очередь, улучшит показатели своевременного распознавания градо и грозоопасных облаков. При этом за счет разбиения полосы пропускания радиометра на независимые каналы решена проблема помехозащищенности данной аппаратуры, явившейся ранее преградой для нормальной работы ПАРЛС.

Объединение радара с лидаром позволяет добиться реальной всепогодности аппаратуры для восстановления вертикального профиля ветра. Созданный в ООО «Лазерные системы» опытный образец подтверждает получение данного эффекта за счет расположения обоих технических средств на одной поворотной платформе и обработки их данных единой вычислительной системой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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 каждого 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 отличии 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 сумму 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 СОКРАЩЕНИЙ

- VAD – дисплей азимутальной скорости
АЦП – аналогово-цифровой преобразователь
ВАРУ – временная автоматическая регулировка усиления
ВПП – взлетно-посадочная полоса
ГГО – Главная геофизическая обсерватория
ДН – диаграмма направленности
ИКАО – Международная организация гражданской авиации
МПИ – метод парных импульсов
МРЛ – метеорологический радиолокатор
НЧМ – нелинейная частотная модуляция
ОЯП – опасные явления погоды
ПАРЛС – пассивно-активная радиолокационная станция.
РГГМУ – Российский государственный гидрометеорологический университет
РЛС – радиолокационная станция
СВЧ – сверхвысокая частота
УИП – устройство измерения турбулентности
ФКМ – фазовая кодовая манипуляция
ЦАО – Центральная аэрологическая обсерватория
ЭПР – эффективная площадь рассеяния

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абшаев, А.М. Теоретические и экспериментальные исследования активного воздействия на градовые процессы и создание автоматизированной технологии обнаружения и предотвращения града: диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук: 25.00.30 / А.М. Абшаев; ФГБУ «Высокогорный геофизический институт». – Нальчик, 2014. – 309 С.
2. Абшаев, М.Т. Радиолокационное обнаружение града / М.Т. Абшаев // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. –1982. – № 5. – С. 483 – 494.
3. Активно-пассивный метод обнаружения градовых очагов в кучево-дождевых облаках / М.Т. Абшаев, Х.Н. Кармов // Труды ВГИ. - вып.33. – 1976. - С.43-46.
4. Алехин, С.Г. Двумерная модель аппроксиманта корреляционных функций анизотропных полей параметров атмосферы / С.Г. Алехин, С.С. Суворов, В.А. Шемелев // Известия РАН. Физика атмосферы и океана, том 50. - №6. - 2014 - С. 1-7.
5. Банах, В.А., Когерентные доплеровские ветровые лидары в турбулентной атмосфере / В.А. Банах, И.Н. Смалихо. – Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2013. – 304 С.
6. Баттан, Л.Д. Радиолокационная метеорология. / Л.Д. Баттан. – Л.: Гидрометеоиздат, 1962. – 196 С.
7. Блохина В.И. Авиационные прогнозы погоды. Учебное пособие по дисциплине «Авиационные прогнозы» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.studmed.ru/blokhina-vi-aviacionnye-prognozy-pogody_0e2f9f4572d.html.
8. Боровиков, А.М. Радиолокационные измерения осадков / А.М. Боровиков [и др.]. - Л.:Гидрометеоиздат, 1967. - 140 С.
9. Булкин, В.В. Метеорологические пассивно-активные радиолокационные системы / В.В. Булкин, Г.Г. Щукин.- Муром: ИПЦ МИВЛГУ, 2009. - 166С.

10. Булкин, В.В. Радиолокационный мониторинг опасных метеорологических явлений. / В.В. Булкин, Р.В. Первушин, Г.Г. Щукин. – СПБ.: Пере, 2016. – 98 С.
11. Быковский, С.С. Оценка погрешности измерения профиля ветра методом круговых диаграмм с применением метеорологической радиолокационной станции миллиметрового диапазона длин волн / С.С. Быковский, М.А. Кононов, В.В. Стерлядкин // Научный вестник МГТУ ГА. - №176. – 2012. – С. 39-47.
12. Бычков, А.А. Дополнительные информативные возможности малогабаритного метеорологического радиолокатора «Контур МЕТЕО-01». / А.А. Бычков, В.Ю. Жуков, Г.Г. Щукин // V Всероссийские Армандовские чтения: Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике. Материалы V Всероссийской научной конференции. – Муром. - 2015. - С. 134-139.
13. Бычков, А.А. 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.
14. Варганов, М.Е. О надежности классификации флюктуирующих объектов по поляризационному фазору рассеянной волны. / М.Е. Варганов, Д.Б. Канарейкин, В.А. Потехин //Радиотехника и электроника. – 1970. – вып. 10. – С. 148-162.
15. Вентцель, Е.С. Теория вероятностей / Е.С. Вентцель. – М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1962. – 564 с
16. Верификация метода обнаружения сдвига ветра по оценкам ширины спектра радиолокационного сигнала / Д.А. Денисенков [и др.]. // Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. – 2016. – № 2 (653). – С. 159–163.

17. Ветровой профайлер Ка диапазона. Результаты сравнительных натурных испытаний. / В.В. Стерлядкин [и др.]. // III Всероссийские Армандовские чтения. - Муром, 2013. - С. 158-163.
18. Ветровые профайлеры миллиметрового диапазона длин волн: принципы построения, место в ряду ветровых профайлеров / В.В. Стерлядкин [и др.] // сборник трудов XX Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь». – 2014. – С. 1712–1717.
19. Восстановление поля скорости воздушных потоков в метеорологической радиолокации / А.М. Девяткин и др. // Метеорология и гидрология. – 2018.- №1. - С. 107-115.
20. Вылегжанин, И.С. Результаты исследования модифицированного метода парных импульсов в метеорадиолокаторе / Труды XIII международной научно-практической конференции «СИЭТ-2012» - Одесса, 2012. – С. 156.
21. Вылегжанин, И.С. Состояние и перспективы использования поляризационных измерений в метеорологической радиолокации / И.С. Вылегжанин, В.Ю. Жуков, А.В. Рыжков. // Труды XXVII Всероссийского симпозиума «Радиолокационное исследование природных сред». - Выпуск 9. Том 2. – Санкт-Петербург, 2012. - С. 263 – 270.
22. Горелик, А.Г. Применение многоволновых доплеровских РЛС для ветрового зондирования атмосферы на разных высотах / А.Г. Горелик, С.Ф. Коломиец, Г.Г. Щукин // II Всероссийские Армандовские чтения: Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред. Материалы V Всероссийской научной конференции. – Муром: Изд.-полиграфический центр МИВлГУ, 2012. – С. 30-36.
23. Горелик, А.Г. Пути развития зарубежной и отечественной доплеровской радиолокации / А.Г. Горелик – М.: Московская государственная академия приборостроения и информатики, 1995. – 21 С.
24. Горелик, А.Г., Некоторые особенности применения многоволновых доплеровских радиолокационных станций для ветрового зондирования

атмосферы / А.Г. Горелик, С.Ф. Коломиец, Г.Г. Щукин // Научный Вестник МГТУ ГА. – 2012. – № 186. – С. 32–37.

25. ГОСТ 24728-81 Ветер. Пространственное и временное распределение характеристик. – М., 1982. – 88 С.

26. Градштейн, И.С. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений / И.С. Градштейн, И.М. Рыжик. - М.:Государственное издательство физико-математической литературы, 1963. – 1108 С.

27. Данные аэрологического зондирования со станции «Бологое» [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.weather.uwyo.edu> (дата обращения 20.11.2018)

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

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

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

31. Денисенков, Д.А. Метод восстановления профиля ветра по оценкам ширины спектра радиолокационного сигнала / Д.А. Денисенков, В.Ю. Жуков, 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.

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

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

34. Денисенков, Д.А. Определение величины сдвига ветра по направлению с помощью карт ширины спектра радиолокационного сигнала / Д.А. Денисенков, В.Ю.Жуков // Сборник трудов VII Всероссийских Армандовских чтений «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции радиоволн». – Муром, 2017. – С. 402–406.

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

36. Денисенков, Д.А. Исследование возможности применения метеорологических радиолокаторов для обнаружения сдвига ветра в пограничном слое атмосферы / Д.А. Денисенков, В.Ю. Жуков, Г.Г. Щукин // Материалы XIV Санкт-Петербургской международной конференции «Региональная информатика «РИ-214». – Санкт-Петербург, 2014, – С. 63-68.

37. Диагностика ветра по данным доплеровского метеорологического радиолокатора / А.М. Девяткин и др. // Навигация и гидрография. – 2017. – №44. - С. 62-71.

38. Диневич, Л. Применение радиолокатора МРЛ-5 для селекции радиоэха перелетных птиц и построения орнитологических карт [Электронный ресурс] / Л. Диневич, Й. Лешем // Современные научноемкие технологии. - №1. – 2013. – С. 13-21.-Режим доступа: <https://www.top-technologies.ru/ru/issue/view?id=471>. – Загл. с экрана (дата обращения 12.02.2017).
39. Диневич, Л.А. Повышение точности селекции радиоэхо птиц / Л.А. Диневич // Современные научноемкие технологии.– № 4. – 2015. – С. 114-125.
40. Довиак, Р. Доплеровские радиолокаторы и метеорологические наблюдения / Довиак Р., Зрнич Д. – Л.: Гидрометеоиздат, 1988. – 512 С.
41. Доплеровский лидарный профилометр для измерения параметров ветра / В.Р. Ахметьянов [и др.] // Измерительная техника.– 2013. – № 6. – С. 35–39.
42. Доплеровский метеорологический радиолокатор ДМРЛ-С. Руководство по эксплуатации, в 6-ти кн., ЦИВР.462414.002 РЭ, М.:ЛЭМЗ, 2011.
43. Допплеровский радиолокационный метод определения характеристик поля ветра и некоторые результаты / И.А. Готюр [и др.] // Ученые записки РГГМУ. – 2011. – № 21. – С. 66–75.
44. Есепкина, Н.А. Радиотелескопы и радиометры / Н.А. Есепкина, Д.В. Корольков, Ю.Н. Париjsкий. - М.:Наука. – 1973. - 416С.
45. Жуков В.Ю., Клейменова А.В., Колосков Б.П., Корнеев В.П., Щукин Г.Г. Результаты опытной эксплуатации малогабаритного метеорологического радиолокатора «Контур МЕТЕО-01» / В.Ю. Жуков и др. // Сборник трудов 2-й Всероссийской конференции «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды», т.1. - СПб, 2012. - С.387-393.
46. 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.

47. Жуков, В.Ю. Исследование возможности повышения оперативности работы метеорадиолокатора ДМРЛ за счет поочередного излучения ортогональных широкополосных сигналов. / В.Ю. Жуков // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета – 2011. - № 21. – С. 112-117.
48. Жуков, В.Ю. Когерентная метеорологическая радиолокация / И.В. Гончаров [и др.]. // Сборник статей памяти В.Д. Степаненко к 90-летию со дня рождения. - Санкт-Петербург, 2013. - С. 102-117.
49. Жуков, В.Ю. Лидарно-радиолокационный метеорологический комплекс / В.Ю. Жуков, [и др.]. // Известия ВУЗов. Физика – 2015.- т.58, №10/3. - С. 100-104.
50. 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». - СПб, 2013 - С. 337-344.
51. Жуков, В.Ю. Обнаружение опасных явлений погоды с использованием малогабаритного доплеровского метеорологического локатора / А.М. Девяткин [и др.]. // Труды VII Российской научно-технической конференции «Навигация, гидрография и океанография: приоритеты развития и инновации морской деятельности». – Санкт-Петербург, 2011. - С. 450-453.
52. 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.
53. 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.

54. 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.
55. 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.
56. 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.
57. 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.
58. Жуков, В.Ю. Состояние и перспективы радиофизических исследований атмосферы и подстилающей поверхности / В.Ю. Жуков [и др.]. // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И.Воейкова. – 2009. - № 560. - С. 143-168.
59. 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.

60. 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.
61. 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.
62. Жуков, В.Ю. Современные проблемы метеорологической радиолокации / В.Ю. Жуков, Г.Г. Щукин // Радиотехника и электроника. Т.61. – № 10. – 2016.– С. 927–939.
63. Жуков, В.Ю. Состояние и перспективы сети доплеровских метеорологических радиолокаторов / В.Ю. Жуков, Г.Г. Щукин // Метеорология и гидрология – 2014. – №2. – С. 92–100.
64. Журавлев, В.Б. Обоснование и экспериментальная оценка методов поляризационной селекции применительно к сетевым МРЛС 3-хсантиметрового диапазона : диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук: 04.00.22 / Владимир Борисович Журавлев ; Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова. – СПб., 1994. – 193 л.
65. Захаров, В.М. Лидары и исследование климата / В.М. Захаров, О.К. Костко, С.С. Хмелевцов. – Л.: Гидрометеоиздат, 1990. – 320 С.
66. Захаров, В.М. Метеорологическая лазерная локация / В.М. Захаров, О.К. Костко. – Л.: Гидрометеоиздат, 1977. – 222 С.
67. Зверев, А. С. Синоптическая метеорология / А. С. Зверев. - Л.: Гидрометеоиздат. – 1977. – 712 С.
68. Извлечение метеоинформации на основе спектрального и корреляционного анализа отражений в импульсных доплеровских метеорологических РЛС / Б.М. Вовшин [и др.] // Прикладная радиоэлектроника, т. 6. - № 4. – 2007. - С. 491-510.

69. Информационное обеспечение с использованием малогабаритного доплеровского метеорологического радиолокатора / С.Г. Алексин [и др.]. // Сборник трудов 2-й Всероссийской конференции «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды». - т.1. - Санкт-Петербург, 2012 - С. 310-316.
70. Информационные возможности доплеровских метеорологических радиолокаторов с двойной поляризацией / А.М. Девяткин[и др.]. // Ученые записки РГГМУ. – 2013. – № 32. – С. 66–83.
71. Использование мобильного метеорологического радиолокатора «Контур МЕТЕО-01» в работах по активному воздействию на облака / А.А, Бычков[и др.]. // Известия ВУЗов. Северокавказский регион. Естественные науки.- 2014. - №4. - С. 62-65.
72. Использование сложных зондирующих сигналов с цифровым формированием для доплеровских метеорологических радиолокаторов / Б.М. Вовшин [и др.] // Цифровая обработка сигналов. - №2. – 2009. – С.65-74.
73. Исследование эффективности метода обнаружения сдвига ветра по оценкам ширины спектра радиолокационного сигнала / Д.А. Денисенков [и др.]. // Ученые записки РГГМУ. - 2016. - №42 - С. 109-116.
74. Исследования быстроразвивающихся опасных атмосферных процессов и разработка системы их мониторинга в интересах обеспечения безопасности жизнедеятельности / А.Х. Аджиев [и др.] // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 12 (173). – С. 182–193.
75. Исследования развития грозо-градового облака. Часть 1. Развитие облака и формирование электрических разрядов / А.Х. Аджиев [и др.] // Метеорология и гидрология. – 2016. – № 9. – С. 27–40.
76. Исследования развития грозо-градового облака. Часть 2. Анализ методов прогноза и диагноза электрического состояния облаков / А.Х. Аджиев [и др.] // Метеорология и гидрология. – 2017. – № 6. – С. 31–45.

77. Исследования развития грозо-градового облака. Часть 3. Численное моделирование эволюции облака / А.Х. Аджиев [и др.] // Метеорология и гидрология. – 2017. – № 8. – С. 18–2
78. Каллистратова, М.А. Радиоакустическое зондирование атмосферы / М.А. Каллистратова, А.И. Кон. – М.: Наука. – 1985. – 197 С.
79. Канарейкин, Д.Б. Об оптимальной обработке радиолокационных сигналов в присутствии помех с учетом их поляризации. / В.Д. Канарейкин, В.А. Потехин. // Тр. VIII Всесоюзной конференции по распространению радиоволн. – Ашхабад, 1967. – С. 145-154.
80. Канарейкин, Д.Б. Поляризация радиолокационных сигналов / Д.Б. Канарейкин, Н.Ф. Павлов, В.А. Потехин - М.: Сов. радио. - 1966. – 238 С.
81. Когерентный метеорологический радиолокатор с поляризационной селекцией для оснащения сети Росгидромета / М.Т. Абшаев [и др.] // XXIII Всероссийская научная конференция «Распространение радиоволн». Труды конференции. - Йошкар-Ола, 2011 г. - С. 14-18.
82. Когерентный метеорологический радиолокатор с поляризационной селекцией сигнала для оснащения сети Росгидромета / М.Т. Абшаев [и др.]. // Труды XXVII Всероссийского симпозиума «Радиолокационное исследование природных сред». - Выпуск 9, Том 2. – Санкт-Петербург, 2012. - С. 212 – 219.
83. Козаков, К.К. Погода и Климат [Электронный ресурс] / К.К. Козаков. – Режим доступа: <http://pogodaiklimat.ru/> (дата обращения 15.03.2015).
84. Козлов, А.И. Поляризация радиоволн. Кн. 2. Радиолокационная поляриметрия / А.И. Козлов, А.И. Логинов, В.А. Сарычев. – М.: Радиотехника, 2005. - 640 С.
85. Козлов, А.И. Поляризация радиоволн. Поляризационная структура радиолокационных сигналов / А.И. Козлов, А.И. Логинов, В.А. Сарычев. – М.: Радиотехника, 2005. - 640 С.

86. Колосков, Б.П. Методы и средства модификации облаков, осадков и туманов. / Б.П. Колосков, В.П. Корнеев, Г.Г. Щукин. – СПб.: Изд. РГГМУ, 2012. – 342 С.
87. Кононов, М.А. Алгоритм и методика измерения ветра в пограничном слое атмосферы импульсно-когерентной РЛС // Научный вестник МГТУ ГА. – 2007. – № 117. – С. 108–116.
88. Коняев, М.А. Доплеровские метеолидары для систем обеспечения вихревой безопасности полетов / М.А. Коняев/, А.В. Савин // Метеоспектр. – № 1. - 2008. – С. 147–152
89. Костарев, В.В. Метеорологические наблюдения при помощи радиолокационных станций. / В.В. Костарев // Сб. Новые методы исследования атмосферы, 1947. – С. 17-25.
90. Красненко, Н.П. Акустическое зондирование атмосферного пограничного слоя / Н.П. Красненко. – Томск: СО РАН, 2001. – 280 С.
91. Красненко, Н.П. Акустическое зондирование атмосферы / Н.П. Красненко. – Новосибирск: Наука, 1986. – 169 С.
92. Красненко, Н.П. Методы и средства дистанционного акустического зондирования атмосферы. / Методы и устройства передачи и обработки информации. – Томск: ТГУСУР, 2009. – Вып. 11. – С. 144–151.
93. Крюковский, А.С. Численное моделирование распространения частотно-модулированного сигнала в анизотропной среде с учетом отклоняющегося поглощения / А.С. Крюковский, Ю.И. Скворцова, Д.С. Лукин // Труды V Всероссийской микроволновой конференции. – М.: ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, 2017, С. 258-262.
94. Куповых, Г.В. Развитие методов и средств прикладной геофизики – атмосферно-электрический мониторинг геологических неоднородностей и зон геодинамических процессов. /Г.В. Куповых, В.Н. Шулейкин, Г.Г. Щукин. – СПб.: Изд. РГГМУ, 2015. – 206 С.

95. Лаврукевич, В.В. Оценивание спектральных характеристик метеообразований в перспективных ДМРЛ / В.В. Лаврукевич, А. А. Пушкин // Труды II Всесоюзной конференции «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды». – СПб.: ВКА имени А.Ф.Можайского, 2012. - С.8-16.
96. Левин, Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники / Б.Р. Левин. - М.: Сов. Радио, 1969. - 752 С.
97. Лидарно-радиолокационный комплекс для определения профиля ветра в пограничном слое атмосферы / А.С. Борейшо [и др.]. // Труды XXIX Всероссийского симпозиума «Радиолокационное исследование природных сред». - Санкт-Петербург, 2015. С. 88-93.
98. Лидарно-радиолокационный метеорологический комплекс / А.С. Борейшо [и др.] // Известия высших учебных заведений. Физика, т.58. - №10/3. – 2015. - С. 100-104.
99. Локощенко, М.А. Содары и их использование в метеорологии / М.А. Локощенко // Мир измерений. – 2009. – № 6 – С. 21–29.
100. Мазин, И.П. Облака, строение и физика образования / И.П. Мазин, С.М. Шметер. - Л.: Гидрометеоиздат, 1983. - 279 С.
101. Малогабаритный мобильный метеорологический радиолокатор «Контур МЕТЕО-01» для исследования атмосферных образований / Д.В. Амурский [и др.] // Труды XXVII Всероссийского симпозиума «Радиолокационное исследование природных сред», Вып. 9, т.2. – СПб., 2012. - С.212-219.
102. Матвеев, Л.Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. / Л.Т. Матвеев – Л.: Гидрометеоиздат, 1975. – 640 С.
103. Мельник, Ю.А. Возможности использования одиночного доплеровского радиолокатора в метеорологических целях (обзор) / Ю.А. Мельник, В.М. Мельников, А.В. Рыжков // Труды ГГО. - Выпуск 538. – 1991. - С.8-18.

104. Мельников, В.М. Обработка информации в доплеровских МРЛ. / В.М. Мельников. // // Зарубежная радиоэлектроника. – 1993. - №4. - С. 35-42.
105. Мельничук, Ю.В. Измерение турбулентности в осадках с помощью допплеровской радиолокационной станции. / Ю.В. Мельничук // Известия АН СССР. Серия «Физика атмосферы и океана». – 1966. - № 7. - С.694-704.
106. Метеорологический полигон Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского и его развитие /, И.В. Гончаров [и др.]. // Материалы IV Всероссийской научной конференции «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды». - Санкт-Петербург), 2016. - С. 156-161.
107. Метеорологический радиолокатор МРЛ-5. Техническое описание. ЕУ1 230 032 ТО, 1974.
108. Метод обнаружения сдвига ветра при помощи доплеровского метеорологического радиолокатора / Д.А. Денисенков [и др.]. // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2016. – № 3 (23). – С. 68–73.
109. Мнацеканов, Р.А. Особенности орнитологической обстановки на Краснодарском аэродроме и безопасность полётов воздушных судов / Р. А. Мнацеканов, П. А. Тильба, // Материалы Второй Всероссийской с международным участием научно-технической конференции «Проблемы авиационной орнитологии» — М.: ИПЭЭ РАН. - 2012. - С. 54-56.
110. Моделирование распространения радиоволн на основе волновой теории катастроф и канонического оператора Маслова / А.С.Крюковский [и др.] // Труды IV Всероссийской микроволновой конференции. – М.: ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, 2016, С. 387-391
111. Москвичева, Т. Wind shear: опасен и коварен / Т. Москвичева // Air Traffic Control. – 2014. – № 1 (9). С. 24–28.
112. Наставление по метеорологическому обеспечению гражданской авиации России (НМО ГА-95) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://base.garant.ru/70107807/>.

113. Обоснование возможности получения достоверной метеорологической информации в трехкоординатных твердотельных радиолокаторах с использованием сложных сигналов / Отчет о научно-исследовательской работе – М.: КБ «Лира», 2008. – 12 С.

114. Орнитологическая безопасность полетов: проблемы и пути решения / Ю.М. Колесниченко // Проблемы безопасности полетов, М.: ВИНИТИ. - № 12. – 2007. - С. 26-34

115. Основные направления модернизации малогабаритного доплеровского метеорологического радиолокатора / И.В. Гончаров [и др.]. // Труды XXVII Всероссийского симпозиума «Радиолокационное исследование природных сред». - Выпуск 9, Том 2. – Санкт-Петербург, 2012. - С. 378–385.

116. Особенности использования сложных сигналов в доплеровских метеорадиолокаторах / Б.М. Вовшин [и др.] // Труды XIII международной научно-практической конференции «СИЭТ-2012», 2012. – С.158.

117. Отличительные признаки эхо-сигналов от птиц [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.physiologynorma.ru/rol-ptic-v-aviacii/vozmozhnosti-radiolokacionnyx-nablyudenij/> (дата обращения 12.02.2017).

118. Отчет по теме 1.2.5 (раздел 6) Плана НИОКР Росгидромета на 2007 год «Разработка методических рекомендаций по применению автоматического бесконтактного осадкометра (АБО) «Капля», с учетом результатов его опытной эксплуатации», 2007.

119. Павлюков, Ю.Б. К вопросу о создании системы валидации данных сети ДМРЛ Росгидромета. / Ю.Б. Павлюков, Н.И. Серебряник // Труды XXVIII Всероссийского симпозиум «Радиолокационное зондирование природных сред», т.2. – Санкт-Петербург, 2013. – С.291-297.

120. Пассивно-активная радиолокационная станция для исследования атмосферы / Н.В. Горностаев [и др.] // Труды ГГО. - вып. 328. – 1975. - С.120-124.

121. Перспективные ДМРЛ со сжатием широкополосных сигналов / Б.М. Вовшин [и др.] // Материалы IV Всероссийской научной конференции

«Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды». – СПб., 2016. - С. 56-61.

122. Поляризационный доплеровский метеорологический радиолокатор С-диапазона со сжатием импульсов/ Б.М. Вовшин [и др.] // Журнал радиоэлектроники. - №10. – 2009. – С.15-25.

123. Потехин, В.А. О выборе поляризационных параметров антенн с учетом статистических характеристик канала связи. / В.А. Потехин, И.З. Климов. // Тр. ЛВИКА им. А.Ф. Можайского. – 1968. - №542. С. 54-62.

124. Потехин, В.А. О распределении вероятностей положения точки поляризации на сфере Пуанкаре. / В.А. Потехин, А.П. Родимов. // Радиотехника и электроника. – 1967. - № 12. – С.64-80.

125. Применение радиолокационных методов для метеообеспечения авиации ВМФ / А.Е.Дроздов [и др.]. // Навигация и гидрография. - 2015. - №41. - С. 59-67.

126. Программное обеспечение вторичной обработки информации допплеровского метеорологического радиолокатора ДМРЛ-СМ. (шифр «ГИМЕТ-2010). Описание программы, 623.02572456.01001-01 13 01, 2011, 108с

127. Протопопов, В.В. Лазерное гетеродинирование / В.В. Протопопов, Н.Д. Устинов. – М.: Наука, 1985. – 288 С.

128. Пушкин, А.А. Статистическое оценивание энергетических и допплеровских характеристик отражений от метеообъектов при их импульсном зондировании : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : 01.04.03 / Александр Александрович Пушкин ; Московский технологический университет МИРЭА. – М., 2016. – 118 л.

129. Радиолокационная метеорологическая информация в аeronавигации. / Т.А. Базлова [и др.]. СПб:РГГМУ,2014. -364 С.

130. Радиолокационные исследования поля ветра в атмосфере / Д.А. Денисенков [и др.]. // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2016. – № 12/2. – С. 15–19.

131. Радиолокационные метеорологические наблюдения. Т.1: Научно-методические основы / Т.А. Базлова [и др.]. – СПб.: Наука, 2010. – 312 С.
132. Радиолокационные метеорологические наблюдения. Т.2: Вопросы практического применения радиолокационной метеорологической информации. / Т.А. Базлова [и др.]. – СПб.: Наука, 2010. – 518 С.
133. Радиолокационный метод исследования пространственной структуры турбулентности в облаках и осадках / А.А. Иванов [и др.] // Труды 4-го Всесоюзного совещания по радиометеорологии. Под ред. А.А. Черникова. - М.: Гидрометеоиздат, 1978. - С. 37-40.
134. Радиотеплолокация в метеорологии / Л.П. Бобылев [и др.] - Л.:Гидрометеоиздат,1987. - 283С.
135. Развитие метода пассивно-активной радиолокации для задач штормооповещения / И.С. Вылегжанин [и др.] // Труды военно-космической академии имени А.Ф.Можайского. – 2016. - №2 (653). - С.146-150.
136. Разработка метеорологического пассивно-активного радиолокатора на базе ДМРЛ-С / В.Ю. Жуков [и др.] // V Всероссийские Армандовские чтения: Сверхшироколосные сигналы в радиолокации, связи и акустике. Материалы V Всероссийской научной конференции. – Муром, 2015. – С. 58-66.
137. Разработка системного проекта размещения доплеровских метеорологических радиолокаторов на сети Росгидромета / Отчет о НИР, шифр „2008-109-6-Н”. – СПб., ГГО им. А.И. Воейкова, - 2009. – 20 С.
138. Раков, В.И. Методы аппроксимация диаграмм направленности радиолокационных станций / В.И. Раков – Л: ВМАКВ, 1958. – 59 С.
139. Руководство по аэропортовым службам. Часть 3 Создаваемая дикой природой опасность и методы ее уменьшения. Doc 9137 – AN 898. // Международная организация гражданской авиации. - 2012 г.
140. Руководство по орнитологическому обеспечению полетов в гражданской авиации (РООП ГА-89)

141. Руководство по производству наблюдений и применению информации с неавтоматизированных радиолокаторов МРЛ-1, МРЛ-2, МРЛ-5. РД 52.04.320-91. – Санкт-Петербург: Гидрометеоиздат, 1993. – 360 С.
142. Руководство по сдвигам ветра на малых высотах. Руководящий документ РД. Монреаль: Международная организация гражданской авиации, 2008. – 258 С.
143. Рыжков, А.В. Поляризационные методы метеорологической радиолокации / А.В. Рыжков // Зарубежная радиоэлектроника. – 1993. - №4. - С. 18 – 28.
144. Сальман, Е.Н. О возможности определения интенсивности жидких осадков методом пассивной и активной радиолокации / Е.Н. Сальман, Г.Г. Щукин // Рефераты докладов на Всесоюзной конференции по радиометеорологии. – Фрунзе. – 1972. -С.106-110.
145. Сверхкороткоимпульсное РЛС дециметрового диапазона / В.А.Сарычев [и др.] // IV Всероссийские Армандовские чтения: Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред. Материалы IV Всероссийской научной конференции. – Муром: ВлГМУ, 2014, С. 255-260.
146. Системы междупериодной обработки сигналов на фоне гауссовых пассивных помех в импульсных РЛС (теория, структуры, потенциальная и реальная эффективность) / С.И. Бурковский [и др.] // Сборник научных трудов 2-го Международного радиоэлектронного форума "Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития" (МРФ - 2005), т. 2. - Харьков, 2005. - С. 20 – 23.
147. Совместные радиотепловые и радиолокационные измерения метеопараметров облаков / А.Е. Башаринов [и др.] // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океанат, т.6. - №5 - 1970 - С.526-530.430-443
148. Содары [Электронный ресурс]. – URL:
http://esmoptec.ru/material/materials_id/14 (дата обращения: 01.12.2017).

149. Состояние и перспективы развертывания сети ДМРЛ-С Росгидромета / А.С. Азаров [и др.] // Инновационные методы и средства исследований в области физики атмосферы, гидрометеорологии, экологии и изменения климата. Материалы Международной научной конференции с элементами научной школы – Ставрополь: Изд-во СКФУ. - 2013. – С. 310-312.

150. Справочник «Использование радиочастотного спектра в метеорологии: прогнозирование и мониторинг погоды, климата и качества воды» – Женева: Бюро радиосвязи. – 2017. – 131 С.

151. Степаненко, В.Д. Радиолокация в метеорологии / В.Д. Степаненко. - Л.: Гидрометеоиздат, 1966. - 352 С.

152. Степаненко, В.Д. Способ определения средней водности облаков с помощью радиотеплолокационной и радиолокационной аппаратуры / В.Д. Степаненко // Инф. Сборник ЛВИКА им. А.Ф.Можайского, 1968 - №92. – С.34-41.

153. Тактико-техническое задание на опытно-конструкторскую работу «Разработка и создание малогабаритного метеорологического радиолокатора (шифр «Зодиак-ГМС»)», 2008.

154. Теоретические основы радиолокации / И. Н. Бусыгин [и др.]; под ред. Я. Д. Ширмана. – М.: Сов. Радио. – 1970. – 560 С.

155. Теоретические основы радиолокации / И.И. Буренин [и др.]; под ред В. Е. Дулевича.- М.: Сов. Радио, 1964. – 732 С.

156. Теория и практика поляризационных измерений в метеорологической радиолокации. / Б.М. Вовшин [и др.]. // II Всероссийские Армандовские чтения: Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред. Материалы V Всероссийской научной конференции - Муром, 2012. - С. 49-54.

157. Техническое задание на опытно-конструкторскую работу «Разработка доплеровского метеорологического радиолокатора диапазона 5,3 см». Шифр ДМРЛ-С, 2008.

158. Технологии сверхкороткоимпульсной радиолокации природных сред с высоким разрешением по дальности / В.А.Сарычев [и др.] // Метеорологический вестник. – 2016. – № 3 (8). – С. 17–22.
159. Участие в разработке экспериментальной установки, проведении эксперимента и обработке экспериментальных данных / Отчет о научно - исследовательской работе – СПб.: Филиал ГГО им. А.И.Воейкова НИЦ ДЗА. - 2008. – 20 С.
160. Черников, А. А. Радиолокационные отражения от ясного неба / А.А. Черников. – Л.: Гидрометеоиздат. - 1979.- 48 С.
161. Черников, А.А. Радиолокационные отражения от чистого неба / А.А. Черников. – Л.: Гидрометеоиздат, 1979. – 46 С.
162. Черняк, В.С. Многопозиционная радиолокация / В.С. Черняк. – М.: Радио и связь, 1987. – 240 С.
163. Черняк, В.С. Многопозиционные радиолокационные системы на основе МИМО РЛС / В.С. Черняк // Успехи современной радиоэлектроники – 2012. - №8. – С. 29-46.
164. Черняк, В.С. О новых и старых идеях в радиолокации: МИМО РЛС / В.С. Черняк // Успехи современной радиоэлектроники – 2011. - №2. – С.5-20.
165. Шиштин, Н.С. Облака, осадки и грозовое электричество / Н.С. Шиштин. – М.: ГИТТЛ, 1954. – С.190 – 197
166. Шупляцкий, А.Б. Радиолокационное рассеяние несферическими частицами. / А.Б. Шупляцкий // Труды ЦАО. – 1959. - №3. – С. 59-64.
167. Экспериментальная проверка метода определения сдвига ветра по ширине спектра радиолокационного сигнала / Д.А. Денисенков [и др.]. // Ученые записки РГГМУ. – 2016. – № 45. – С. 113–118.
168. Экспериментальные исследования характеристик СКИ РЛС / В.А.Сарычев [и др.] // VI Всероссийские Армандовские чтения: Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред. Материалы VII Всероссийской научной конференции. – Муром: ВлГМУ, 2016, С. 196-202.

169. Atlas, D., 1990: Radar in Meteorology. Battan memorial and 40-th Anniversary Radar Meteorology conference Met. Soc. Boston.
170. Bech, J. Doppler Radar Observations - Weather Radar, Wind Profiler, Ionospheric Radar, and Other Advanced Applications. / J. Bech, J. L. Chau (EdS.). - Rijeka, Croatia: InTech, 2012. - 482 p.
171. Beran, D.W., 1997: Operational use of ground-based remote sensors: a review. WMO/TD-№ 860.
172. Bohn, A. Radar detection of turbulence in precipitation environments. /A. Bohn // Journal of the atmospheric sciences, V.39. – 1982. - p.1819-1837.
173. Chan, P. W. Performance of eddy dissipation rate estimates from wind profilers in turbulence detection / P.W. Chan, S.T. Chan // 11th Conference on Aviation, Range and Aerospace Meteorology, 2004. - p. 37-41.
174. Chan, P. W. Use of spectrum width data from the Terminal Doppler Weather Radar (TDWR) for monitoring turbulence intensity: case studies / P.W. Chan, C.M. Li, K.H. Wong // First Asian Conference on Radar in Meteorology and Hydrology, 2007. – p. 56-67
175. Chan, P.W. Aviation Applications of Doppler Radars in the Alerting of Windshear and Turbulence. Doppler Radar Observations – Weather Radar, Wind Profiler, Ionospheric Radar, and Other Advanced Applications. / P.W. Chan, P. Zhang. – 2012. - 470p.
176. Chan, P.W. Aviation Applications of the Pulsed Doppler LIDAR – Experience in Hong Kong. / P.W Chan // The Open Atmospheric Science Journal - №3 – 2009 - p. 138–146.
177. Dissipation Rates in Thunderstorms Estimated by Doppler Radar in Relation to Aircraft In Situ Measurements. / R. Baumann [and al.] // Journal of atmospheric and oceanic technology, V.18. – 2001. - p. 1609-1627.
178. Doviak, R. J., and, 2006: Doppler radar and weather observations. / R.J. Doviak, D.S. Zrnic - Dover Publications Inc., Mineola, New York, 2006 - 562 p.

179. Doviak, R.J. Turbulence and Wind Shear in Layers of Large Doppler Spectrum Width in Stratiform Precipitation. / R.J. Doviak, V.M. Melnikov // Journal of atmospheric and oceanic technology, V.26 - march 2009 - p. 430-443.
180. Dual polarized X-band radar 50DX / Presented by Maik Schurmann // Rain gain. – april 2013 – Режим доступа: http://www.raingain.eu/sites/default/files/presentation_held_22042012.pdf – Загл. с экрана. (дата обращения 15.12.2018).
181. Estimate of Eddy Dissipation Rate Using Spectrum Width Observed by the Hong Kong TDWR Radar. / P.W.Chan [and al.] // 34th Conference on Radar Meteorology. - Williamsburg, VA, 2009. - p.108-119.
182. Estimate of Eddy Dissipation Rates Using Spectrum Width Observed by Hong Kong TDWR Radar / Zhang P. et al. // 34th Conference on Radar Meteorology. – 2009.
183. Evaluation study on wind retrieval methods from single doppler radar / Sang-Min Jang [and al.] // The 33rd Conference on Radar Meteorology, Queensland, 2007. – p 16-25.
184. Fang, M. Spectrum width statistics of various weather phenomena / M. Fang, R.J. Doviak // National Severe Storms Laboratory Report - Norman, OK, 2001. - 62 p.
185. Janssen, L.Y. The Shape of Doppler Spectra from Precipitation. / L.Y. Janssen, G.A. Van Der Spek // IEEE Trans, V.AES-21. - № 2 - 1985 - p. 208-219.
186. Kadygov, E.N., 2006: Operational aspects of different ground-based remote sensing observing techniques for vertical profiling of temperature, wind, humidity and cloud structure: a review. In Instruments and observing methods. Report WMO №89.
187. Lim1, H.-C. Comparative analysis of two wind velocity retrieval techniques by using a single Doppler radar / H.-C. Lim1, D.-I. Lee // Hydrology and Earth System Sciences. - №13 - 2009.

188. M. Fang, R.Doviak, V.Melnikov. Spectrum Width Measured by WSR-88D: Error Sources and Statistics of Various Weather Phenomena. *Journal of atmospheric and oceanic technology*. V.21, June 2004, p.888-904.
189. Marshal J.M., Peterson A.M., Barnes A.A., 1972: Combined radar acoustic sounding system – *Appl. Opt.*, 2, № 1, 108–112.
190. Meikle, H., 2008: Modem radar systems / Artech House radar library / p.701.
191. Melnikov, V., and D. S. Zrnic, 2004: Simultaneous transmission mode for the polarimetric WSR-88D: Statistical biases and standard deviations of polarimetric variables. NOAA/NSSL Interim report. - 83 pp. (Available online at www.cimms.ou.edu/~schuur/jpole/WSR-88D_reports.html). (дата обращения: 23.08.2014).
192. Melnikov, V.M. On the Alternate Transmission Mode for Polarimetric Phased Array Weather Radar. / V.M. Melnikov, D.S. Zrnic. // *Journal of atmospheric and oceanic technology*, V.32. - 2015. - p. 220-233.
193. Melnikov, V.M. Estimates of Large Spectrum Width from Autocovariances. / V.M. Melnikov, D.S. Zrnic. // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol. 21. - p.969-974.
194. Nalbandian O.G., 1977: For the theory of radio-acoustic sounding of the atmosphere. *Iz. Ak. Nauk USSR. Physics of Atm. And Oc.*, 13, № 3, P. 245–253.
195. NEXRAD Detection of Hazardous Turbulence. 44th AIAA / G. Blackburn [and al.] // Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. AIAA 2006-0076. - Reno, Nevada, 2006. – 16 p.
196. Non-uniform cyclonic wind field volume processing of the doppler velocities from a single radar / S.Panov [and al.] // [Электронный ресурс]. – URL: https://www.wmo.int/pages/prog/www/IMOP/publications/IOM-104_TECO-2010/P2_19_Panov_USA.pdf (дата обращения: 01.12.2017).
197. O'Hora, F. Comparison of Pulse compression & Whitening Transformation signal processing / F. O'Hora, R. J. Keeler. // *Proceedings of the ERAD*, 2006.

198. Potential utilization of specific attenuation for rainfall estimation, mitigation of partial beam blockage, and radar networking./ M.Diederich [and al.] // Journal of atmospheric and oceanic technology. 2014, v.31, p.599-619.
199. Principles of RASS (Radio Acoustic Sounding System) [Электронный ресурс]. – URL: <http://okinawa.nict.go.jp/EN/WPR/index8.html> (дата обращения: 01.12.2017).
200. Prospects of the WSR-88D Radar for Cloud Studies. / V.M. Melnikov [et al.]. // Journal of applied meteorology and climatology. – 2011. - V. 90. – P. 859-872.
201. Rogers, R.R. The Early Years of Doppler Radars in Meteorology. /R.R. Rogers - Boston, 1991. - 176 p.
202. Ryzhkov, A.V. Depolarization in Ice Crystals and Its Effect on Radar Polarimetric Measurements / A.V. Ryzhkov, D.S. Zrnic. // Journal of atmospheric and oceanic technology, v.24 – 2007. - p. 1256-1267.
203. Serafin, R.J. Jhtrational weather radar in the USA: progress and opportunity / R.J. Serafin, J.W. Wilson // COST 75, 1999 – P.35-61.
204. Shun, C. M. Ongoing research in Hong Kong has led to improved wind shear and turbulence alerts / C.M. Shun // ICAO Journal, T. 58. – №. 2. - 2003. – p. 4-6.
205. Strauch, R.G., Moran K.P., May P.T., Bedard A.J., Ecklund W.L., 1988: RASS temperature sounding techniques. NOAA Tech. Memo, ERL WPL-158.
206. The Theory and Practice of Application Pseudo Random Signals in Doppler Meteoradars / V. Laurukevich [and al.] // Proceedings on International Radar Symposium (IRS-2011) - Leipzig (Germany), 2011. - pp.256-261.
207. Tsukamoto, N. Wind Profiler Radars / Naoki Tsukamoto // ITU/WMO Seminar on Use of Radio Spectrum for Meteorology: Weather, Water and Climate Monitoring and Prediction. - Japan Meteorological Agency, 2009.
208. Weather applications of dual-polarization radars. / M. Kumjian [and al.] // Journal of Applied Meteorology and Climatology. – 2008 - № 47 – С. 1940 – 1961.
209. URL: http://en.sun-create.com/product_display.asp?id=5 (дата обращения 18.11.2014)

210. URL: <http://www.de.selex-es.com/documents/16243296/30905627/Kopie+von+Selex-ES-METEOR-1700C.pdf> (дата обращения 18.11.2014).
211. URL: <http://www.eecweathertech.com/eec-products.php> (дата обращения 18.11.2014).
212. URL:
<http://www.mitsubishielectric.com/bu/lidar/products/index.html?WeatherRadarSystems> (дата обращения 20.08.2014)
213. URL:
https://spravochnick.ru/fizika/optika/blizhnyaya_i_dalnyaya_zony_difrakcii/ (дата обращения: 12.11.2014)
214. URL: <https://www.furuno.com/en/systems/meteorological-monitoring/WR-2100> (дата обращения 18.11.2018).
215. URL: <https://www.toshiba.co.jp/sis/en/des/weather/products/x-band/index.htm> (дата обращения 18.11.2014)