

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

В.Ю. Жуков, А.Д. Кузнецов, О.С. Сероухова

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ДАННЫХ
ДОПЛЕРОВСКИХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ
РАДИОЛОКАТОРОВ

Учебное пособие

РГГМУ
Санкт-Петербург
2018

УДК 91(075.8)
ББК 26.23
Ж86

Рецензент: Г.Г. Шукин, профессор, д-р физ.-мат. наук, Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского

Жуков В.Ю., Кузнецов А.Д., Сероухова О.С.

Интерпретация данных доплеровских метеорологических радиолокаторов. Учебное пособие. – СПб.: РГГМУ, 2018. – 119 с.

В связи с динамичным развитием дистанционного зондирования атмосферы с использованием доплеровских метеорологических радиолокационных комплексов возросла потребность в подготовленных радиометеорологах. Настоящее пособие призвано заложить базовые основы знаний в сфере современных технологий получения радиолокационных данных и основных приемов их компьютерной интерпретации – «извлечения» содержащейся в таких данных информации.

Учебное пособие подготовлено в соответствии с программой дисциплин «Методы и средства гидрометеорологических измерений», «Методы зондирования окружающей среды», «Основы радиолокационной техники» и предназначено для ознакомления бакалавров и магистров:

– с современными доплеровскими метеорологическими радиолокационными информационно-измерительными комплексами;

– с принципами извлечения и анализа метеорологической информации, получаемой с помощью доплеровских метеорологических радиолокационных информационно-измерительных комплексов.

Пособие содержит теоретический материал и иллюстрации, показывающие схемы представления метеорологической информации. Все это позволит приобрести навыки анализа радиолокационных данных.

Представленные в учебном пособии материалы могут быть использованы в процессе преподавания по дисциплинам: «Методы и средства гидрометеорологических измерений», «Методы зондирования окружающей среды», «Основы радиолокационной техники».

Zhukov V.Yu., Kuznetsov A.D., Serouhova O.S.

Interpretation of observational data obtained Doppler weather radar. Tutorial. – St. Petersburg: ed. RSHU, 2018. – 119 pp.

Due to the dynamic development of remote sensing of the atmosphere with the use of Doppler weather radar systems has increased the need for trained radio meteorology. This manual is intended to lay the basic foundation of knowledge in the field of modern technologies of radar data and basic methods of computer interpretation – “extract” the information contained in such data.

Textbook prepared in accordance with the program of discipline “Methods and tools for meteorological measurements,” “sensing methods of environment”, “Fundamentals of radar technology” and is designed to introduce undergraduate and master’s degrees:

– with the modern Doppler weather radar information and measurement systems;

– with the principles of analysis of meteorological information obtained with the help of Doppler weather radar information and measuring systems.

The manual contains theoretical material and illustrations showing the scheme of meteorological information.

All this will allow to acquire radar data analysis skills.

Presented in the tutorial materials can be used in teaching the disciplines: “Methods and tools for meteorological measurements,” “Sensing methods of environment”, “Fundamentals of radar technology”.

© Жуков В.Ю., Кузнецов А.Д., Сероухова О.С., 2018

© Российский государственный гидрометеорологический университет (РГГМУ), 2018

ISBN 978-5-86813-462-3

Введение

Дистанционное зондирование атмосферы в силу своей универсальности, информативности и оперативности относится к одному из наиболее успешно и динамично развивающихся методов контроля состояния природной среды. Использование космических, воздушных и наземных носителей средств дистанционного зондирования, комбинация активных и пассивных методов, расширение спектральных диапазонов и улучшение технических характеристик зондирующей аппаратуры – все это и многое другое присуще современному состоянию этого метода исследования системы «подстилающая поверхность-атмосфера». Исключением не является и одно из важнейших направлений такого зондирования, основанное на использовании современных радиолокационных комплексов.

Метеорологические радиолокаторы сегодня являются уникальным средством метеорологических наблюдений, которое может обеспечить в режиме реального времени точную информацию о местоположении и характере перемещения зон интенсивных осадков, гроз, града на больших территориях. Современный радиолокатор производит циклические наблюдения с периодичностью от 3 минут в круглосуточном автоматизированном режиме, предоставляя данные с высоким пространственным разрешением (от 250 м) на площади до 200 тыс. км² (радиус зоны радиолокационного обзора – 250 км).

Первые метеорологические радиолокаторы, предназначенные для оперативных наблюдений на сети, измеряли только один параметр облаков и осадков – радиолокационную отражаемость Z . Тем не менее, это дало специалистам-метеорологам мощный инструмент наблюдений. Появилась возможность оценивать местоположение и внутреннюю структуру зон облачности и осадков, их высоту, тенденцию развития. На основе такого рода измерений были разработаны методы оценивания интенсивности осадков и идентификации гроз и града.

Большим достижением в развитии техники метеорологической радиолокации явилось введение когерентного режима ее работы. В результате увеличилось число измеряемых параметров – к радиолокационной отражаемости Z добавились средняя радиальная скорость V и ширина спектра радиальных скоростей гидрометеоров σ .

Следующим шагом на пути совершенствования радиометеорологических наблюдений стало то, что когерентные (доплеровские)

радиолокаторы стали еще и поляриметрическими. В этом случае появилась дополнительная возможность измерять еще целый ряд параметров цели, из которых наиболее информативными признаны три: дифференциальная отражаемость Z_{DR} , дифференциальная фаза Φ_{DR} и модуль коэффициента взаимной корреляции ρ_{HV} . Современный метеорологический радиолокатор – это сложный радиотехнический комплекс, позволяющий:

- значительно улучшить качество и количество получаемой информации об атмосферных осадках;
- повысить оправдываемость дистанционной идентификации различных, в том числе и опасных, явлений погоды;
- повысить оправдываемость прогнозов, что в значительной мере способствует снижению ущерба от опасных явлений погоды и природных катастроф;
- повысить оперативность передачи информации об опасных явлениях (практически, в режиме реального времени) удаленным пользователям, что, в свою очередь, позволит повысить эффективность управления во многих областях хозяйственной деятельности.

Получаемая современными метеорологическими радиолокаторами информация приобретает особую ценность в условиях значительного сокращения наблюдательной наземной сети, имевшего место в России последние 25 лет. Редкая сеть гидрометеостанций не всегда позволяет предсказать опасное погодное явление, особенно если оно формируется на недостаточно «оснащенной» метеостанциями территории. В то же время метеорологический радиолокационный комплекс способен контролировать территорию площадью более 150 000 км². В зоне своей ответственности комплекс позволяет оперативно получать информацию о ветровом режиме атмосферы, о возможном появлении шквала, грозы, града, об интенсивности и виде атмосферных осадков, представляет возможность не только наблюдать за появлением опасных явлений погоды, но и рассчитывать их скорость и направление перемещения. Ведь степень снижения экономического ущерба, причиняемого проходящим через пункт опасным явлением, во многом зависит от заблаговременности его предсказания.

Роль радиолокационной информации становится более понятной, если сопоставить зоны наблюдения наземных и радиолокационных станций. Примером такого сопоставления может служить рис. 1, где представлена карта явлений погоды по данным ДМРЛ-С с нанесенными «радиусами обзора» наземных метеорологических станций, находящихся в зоне его действия. Хорошо видно, что даже

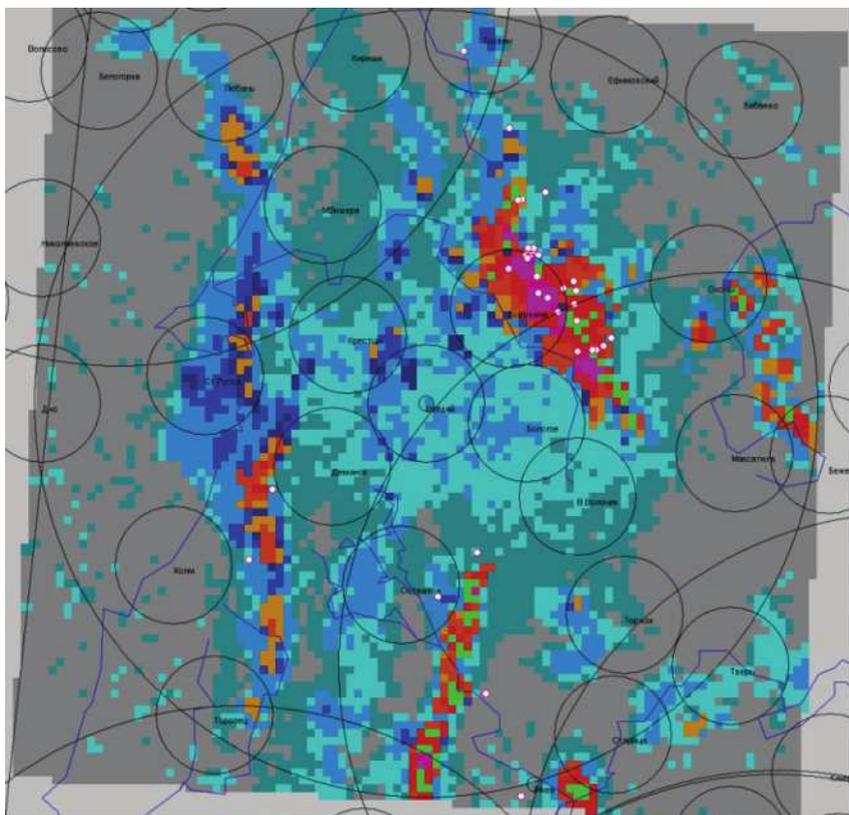


Рис. 1. Карта явлений погоды по данным ДМРЛ с нанесенными «радиусами обзора» наземных метеорологических станций, находящихся в зоне его действия

при столь плотном размещении наземных станций их «зоны обзора» даже при весьма большом «радиусе действия» далеко не полностью покрывают ту территорию, которую «освещает» ДМРЛ.

Для повышения «освещенности» территории России радиолокационной информацией в ближайшее время планируется создание достаточно густой сети многопараметрических радиолокаторов. Для этого в 2008 году правительством РФ были приняты две Федеральные программы: «Создание и развитие системы мониторинга геофизической обстановки над территорией РФ (2008–2015 гг.)» и «Модернизация ЕС ОрВД Российской Федерации (2009–2020 гг.)». После их реализации планируется создание единой радиолокационной метеорологической сети, обеспечивающей

получение радиолокационных карт на большей части территории страны и удовлетворяющей современным требованиям потребителей информации. Всего в рамках указанных программ на территории России планируется установить 140 комплектов ДМРЛ-С, разработанных и изготавливаемых ОАО «НПО «Лианозовский электромеханический завод» в кооперации с Росгидрометом. Карта планируемого размещения ДМРЛ-С на территории России представлена на рис. 2.

Объединение метеорологических радиолокаторов в сеть позволяет во многих случаях компенсировать ограничения радиолокационного метода метеонаблюдений:

- ослабление радиоизлучения в осадках;
- блокировку радиоизлучения естественными (рельеф, растительность) и искусственными (здания и сооружения) препятствиями в отдельных секторах;
- наличие помех на некоторых азимутах;
- снижение разрешающей способности радиолокатора за счет расширения луча и увеличения высоты луча из-за кривизны Земли на больших дальностях.

Возможности уже существующей радиолокационной сети иллюстрирует рис. 3, на котором приведен пример объединенной

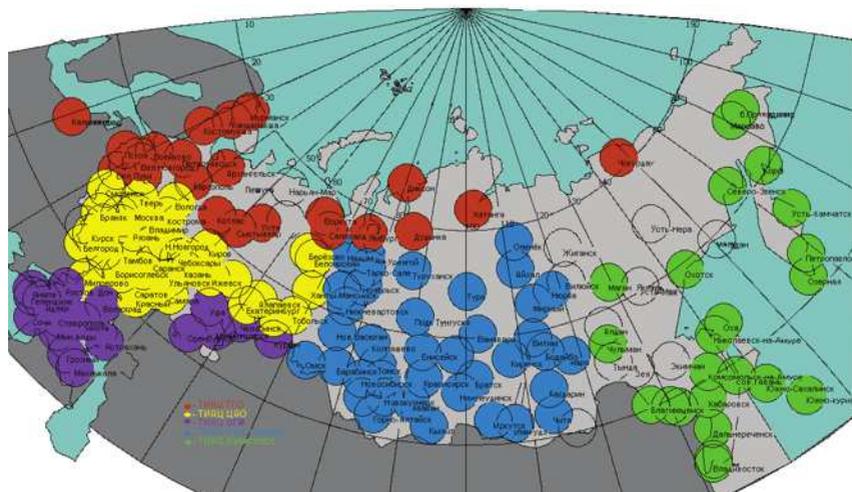


Рис. 2. Карта планируемого размещения доплеровских МРЛ на территории России. Цветом отмечена принадлежность радиолокатора одному из пяти территориальных информационно-аналитических центров (ТИАЦ)

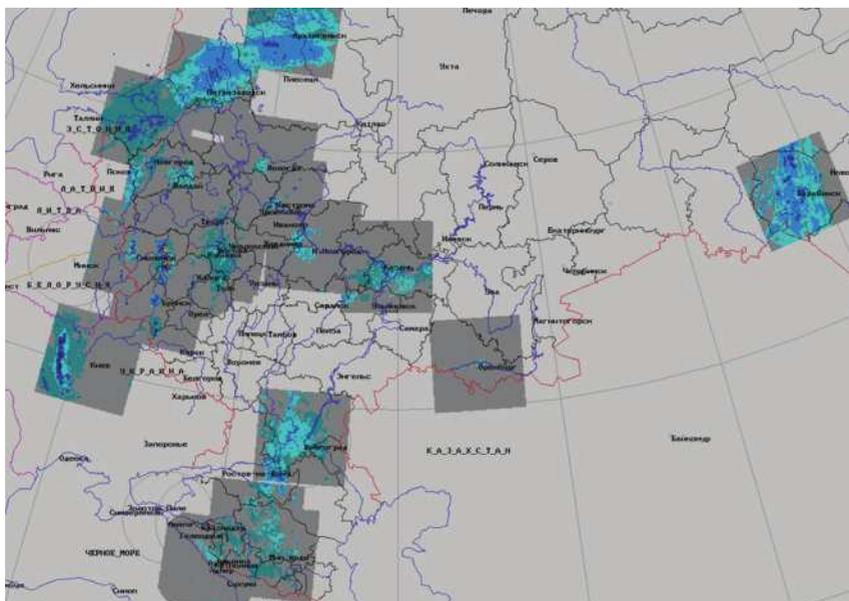


Рис. 3. Объединенная карта радиолокационной отражаемости в горизонтальном слое, расположенном на высоте 1 км (время 23:40, дата 12-05-2014), полученная с помощью уже действующих на территории России ДМРЛ-С

карты радиолокационной отражаемости в горизонтальном слое, расположенном на высоте 1 км (время 23:40, дата 12-05-2014). Эти данные получены с помощью уже действующих на территории России ДМРЛ-С. Сайт ЦАО с фактической информацией от уже размещенных на европейской территории России ДМРЛ-С находится по адресу <http://orm.mipt.ru/>.

1. Отечественные метеорологические радиолокаторы

1.1. Радиолокатор МРЛ-5

МРЛ-5 не был первым отечественным метеорологическим радиолокатором. К концу 70-х годов XX века, когда началась его разработка, промышленность СССР имела опыт производства подобных изделий. Это были радиолокаторы МРЛ-1 и МРЛ-2. Их основным назначением было обслуживание военных аэродромов. Их ориентация на военные цели приводила к тому, что они питались от напряжения частотой 400 Гц.

а)



б)



Рис. 4. Метеорологический радиолокатор МРЛ-5: а – внешний вид; б – пульт индикатора метеоролога

МРЛ-5 был первым радиолокатором, предназначенным для создания сети штормового оповещения (рис. 4). Он питался от стандартной электрической сети частотой 50 Гц и имел две волны несущего колебания – 3 и 10 см, что позволяло с успехом применять его в противорадовой службе.

Общепризнано, что данный радиолокатор – один из лучших, если не лучший, среди разработок данного направления того времени. Он успешно эксплуатировался на территории СССР и продавался во многие страны мира. Созданная на его основе сеть штормового оповещения достигала в лучшие годы 120 изделий и даже в 2010 году, когда началось обновление сети, в строю оставались 31 радиолокатор МРЛ-5. При этом их перевод в нерабочее состояние вызывался, как правило, не техническими,

а организационными трудностями – отсутствием обслуживающего персонала, финансирования для проведения ремонтов и т. п. Сама необходимость обновления сети – не результат плохого состояния радиолокаторов МРЛ-5, а их моральное устаревание. К концу первого десятилетия XXI века научные исследования показали эффективность измерения спектральных и поляризационных характеристик принимаемого сигнала, в то время как МРЛ-5 продолжал измерять только радиолокационную отражаемость цели.

Структурная схема данного радиолокатора приведена на рис. 5.

Из особенностей построения этого изделия следует отметить:

1. Наличие двух каналов с длиной волны 3 и 10 см. По сути МРЛ-5 – это два радиолокатора, работающих на одну антенну. Такое решение позволило эффективно обнаруживать град двухволновым методом. Очень важно при этом обеспечить точное равенство разрешаемых объемов в обоих каналах. Наличие одной антенны гарантирует совпадение центров этих объемов, а для выравнивания их поперечных размеров служит дополнительный отражатель, устанавливаемый между основным зеркалом антенны и облучателем. Дело в том, что ширина антенного луча пропорциональна

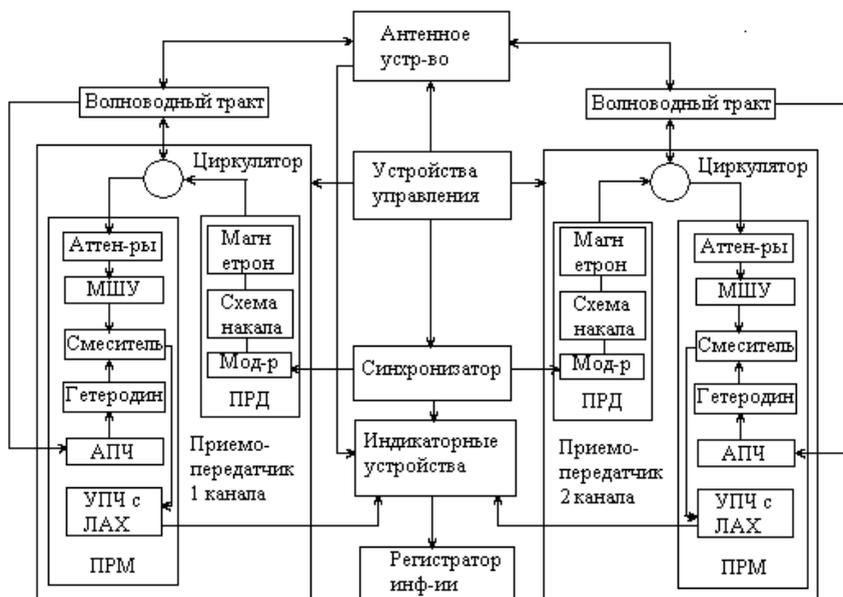


Рис. 5. Структурная схема радиолокатора МРЛ-5

отношению диаметра антенны к длине волны, в результате чего при работе на один отражатель диаграмма направленности (ДН) для 3-х сантиметрового канала в три раза меньше, чем для 10-ти сантиметрового (см. табл. П2 Приложения). Установка же дополнительного отражателя, диаметр которого в три раза меньше основного зеркала, во столько же раз увеличивает ширину ДН первого из них, делая обе диаграммы направленности одинаковыми. Для того чтобы ухудшались характеристики только 3-х сантиметрового канала, а другого оставались неизменными, этот отражатель сделан в виде металлических нитей, ориентированных вертикально. В результате, волны, имеющие вертикальную поляризацию (в МРЛ-5 это волны с $\lambda = 3$ см), им отражаются, а те, что ориентированы горизонтально ($\lambda = 10$ см), проходят сквозь него и отражаются основным зеркалом.

2. Логарифмическая зависимость выходного сигнала усилителя промежуточной частоты (УПЧ) от напряжения на его входе. Такое построение позволило расширить его динамический диапазон (отношение максимального уровня сигнала на входе устройства, при котором напряжение на выходе еще не входит в насыщение, к минимальному его значению, при котором выходной сигнал уже выделяется на фоне шумов) до 70 дБ. Это обеспечивает решение специфической задачи метеорологического радиолокатора – измерение мощности принимаемых отражений. Все другие виды радиолокаторов (обзорные, навигационные, и т. п.) такой функции не реализуют, что позволяет расширять их динамический диапазон за счет образования отрицательных обратных связей в усилителе с динамическим диапазоном 20–30 дБ. Это приводит, во-первых, к сложной зависимости выходного сигнала от входного, делающей практически невозможным точную оценку их величины, и, во-вторых, к тому, что отражения от части одновременно наблюдаемых целей попадает в зону насыщения или, наоборот, «тонет» в шумах. Метеорологический же радиолокатор должен оценивать мощность всех эхо, создаваемых одновременно попавшими в луч антенны метеорологическими образованиями, и эта мощность может изменяться в пределах именно 70 дБ.

Реализована данная зависимость в блоке «УПЧ с ЛАХ» за счет его особого построения в виде восьми самостоятельных приемников, каждый из которых включает в себя усилитель промежуточной частоты (УПЧ), амплитудный детектор (АД) и видеоусилитель (ВУ), с последующим суммированием их выходных сигналов (рис. 6).

В результате, при слабом сигнале выходное напряжение полностью определяется последним каскадом. У остальных сигналы

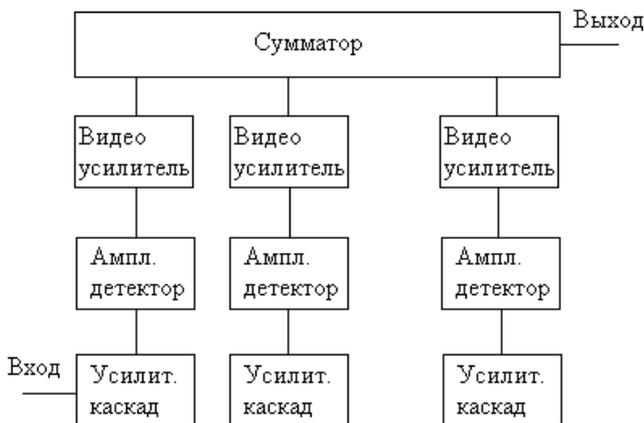


Рис. 6. Схема построения усилителя промежуточной частоты с логарифмической амплитудной характеристикой (УПЧ с ЛАХ)

настолько малы, что их можно не учитывать. По мере увеличения входного воздействия последний каскад входит в насыщение и дальнейший рост напряжения на выходе обеспечивается теперь предпоследним каскадом. При этом суммарный коэффициент усиления падает – раньше он был равен произведению коэффициентов всех восьми каскадов, а теперь только семи. Далее подобный «перехват инициативы» повторяется до тех пор, пока в насыщение не войдет первый каскад. При этом зависимость выходного напряжения от входного имеет форму, близкую к логарифмической.

3. Наличие временной регулировки усиления (ВАРУ). Ее введение вызвано тем, что одна и та же цель создает разные по величине сигналы на входе приемника радиолокатора в зависимости от дальности расположения. Измеряемая характеристика цели – радиолокационная отражаемость – оказывается пропорциональной мощности принятого отражения и обратно пропорциональной квадрату дальности создавшей его цели. Чтобы убрать последнюю зависимость надо изменять коэффициент усиления приемника по закону

$$K = K_0 * t^2, \quad (1)$$

где t – задержка сигнала относительно момента излучения зондирующего импульса. Поскольку организовать подобное управление приемником – сложная инженерная задача, был выбран более удобный путь – введение затухания в волноводный тракт по закону $1/t^2$. В результате на индикаторах радиолокатора величина принимаемых

сигналов оказывается пропорциональной радиолокационной отражаемости цели и не зависит от их дальности.

4. Автоматическая подстройка параметров приемника перед каждым зондирующим импульсом. Постоянному контролю подлежат его коэффициент усиления и частота настройки гетеродина. Для этого период повторения излучаемого сигнала выбирается таким, чтобы между моментом прихода отражений с максимальной выбранной оператором дальности и излучением следующего импульса оставалось еще время на саморегулировку приемника. На это время он отключается от антенны и на его вход подается калиброванный по амплитуде сигнал, формируемый встроенным в приемный тракт генератором шума. По величине получаемого при этом на выходе напряжения путем сравнения его с расчетным значением делается вывод о величине коэффициента усиления приемника и вводится коррекция последнего. Для подстройки частот гетеродина в момент прохождения зондирующего импульса по волноводному тракту часть его энергии направляется на смеситель системы автоматической подстройки частоты (АПЧ), на второй вход которой подаются колебания гетеродина. На выходе смесителя формируются колебания разностной частоты, которая проверяется на равенство величине 30 МГц. По результатам данной операции частота настройки гетеродина изменяется с целью компенсации выявленного отклонения. В результате описанных операций достигается высокая степень надежности получаемой радиолокационной информации.

1.2. Радиолокатор ДМРЛ-С

Решение о разработке нового отечественного метеорологического радиолокатора было принято в 2008 году, а уже в 2010-м первый экземпляр был запущен в эксплуатацию (рис. 7). Несмотря на малый срок, прошедший от написания технического задания до выпуска первого образца, данный радиолокатор не уступает по своим характеристикам аналогичным изделиям, выпускаемым в настоящее время известными зарубежными фирмами, а по некоторым параметрам до сих пор их превосходит.

Прежде всего, он является когерентным (доплеровским) и поляриметрическим. Это значит, что к традиционно измеряемой радиолокационной отражаемости в ДМРЛ-С добавлены два спектральных (средняя частота и ширина спектра принимаемого сигнала) и три поляризационных параметра (дифференциальная отражаемость, дифференциальная фаза и модуль коэффициента взаимной

корреляции поляризационных составляющих). Кроме того, ДМРЛ-С – первый серийный радиолокатор такого рода, в котором применен сложный зондирующий импульс, что значительно повысило его метеорологический потенциал.

Для того чтобы разобраться во всех перечисленных новшествах, рассмотрим их подробнее и по отдельности.

1.2.1. Когерентный режим работы радиолокатора

Смысл когерентного режима состоит в том, что фиксируется изменение фазы принимаемого сигнала в смежные периоды зондирования (за время, равное периоду повторения излучаемых импульсов T_{Π}), возникающее вследствие движения наблюдаемого объекта (рис. 8).

Если в какой-то момент времени мы получаем от одиночной цели сигнал:

$$s(t) = A \sin \left(\omega t + \varphi_0 + \omega \frac{2R}{c} \right), \quad (2)$$

где A – амплитуда сигнала, ω – несущая частота, φ_0 – начальная фаза излученного колебания, R – расстояние до цели, c – скорость света, то в следующий период повторения зондирующего сигнала, мы получим:

$$s(t + T_{\Pi}) = A \sin \left(\omega(t - T_{\Pi}) + \varphi_1 + \omega \frac{2(R + \Delta R)}{c} \right), \quad (3)$$

а)



б)



Рис. 7. Радиолокатор ДМРЛ-С:

а – внешний вид;

б – шкафы передатчика и приемника

где φ_1 – новая начальная фаза, ΔR – расстояние, пройденное целью, обладающей радиальной скоростью V_R , за время T_{Π} вдоль антенного луча, определяемое выражением:

$$\Delta R = V_R T_{\Pi}. \quad (4)$$

Уточним, что радиальная скорость – это та составляющая вектора скорости частицы, что направлена вдоль линии, соединяющей антенну и цель (рис. 8). Вторая составляющая, направленная ей перпендикулярно, называется тангенциальной скоростью. Разница фаз двух сигналов равна:

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_0 + \omega \frac{2\Delta R}{c} = \varphi_1 - \varphi_0 + 2\pi \frac{2V_R}{\lambda} T_{\Pi}. \quad (5)$$

При помощи фазового детектирования данное происходящее от периода к периоду изменение фазы может быть преобразовано в амплитудные колебания с частотой:

$$f_{\text{Д}} = \frac{2V_R}{\lambda}, \quad (6)$$

называемой доплеровским сдвигом, по которой легко рассчитывается радиальная скорость цели. Единственная сложность при этом –

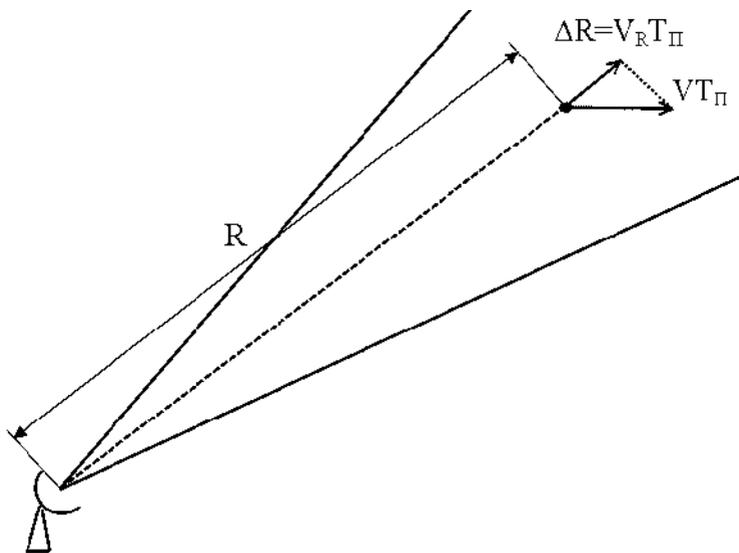


Рис. 8. Схема образования доплеровского сдвига частоты отражений от движущего объекта



Рис. 9. Функциональная схема фазового детектора

требуется знать начальные фазы колебаний в каждый период излучения зондирующего импульса (в данном случае φ_1 и φ_0). В противном случае оценить радиальную скорость объекта невозможно. Именно это знание начальной фазы излучаемого колебания отличает когерентный радиолокатор от некогерентного.

Напомним, что детектирование – процесс выделения полезной низкочастотной составляющей, закодированной в изменении амплитуды, фазы или частоты исходного высокочастотного сигнала. Фазовое детектирование – такой вид детектирования, при котором выходной сигнал зависит от разности фаз входного сигнала и опорного колебания (рис. 9).

В радиолокаторе входной сигнал представляет собой последовательность принятых от цели высокочастотных импульсов, следующих с частотой излучения зондирующих импульсов $T_{\text{п}}$, как это видно из рис. 10.

Если на выходе фазового детектора после каждого излучаемого радиолокатором импульса с задержкой на время τ фиксировать выходной сигнал, то получим последовательность отсчетов, как это показано на рис. 11.

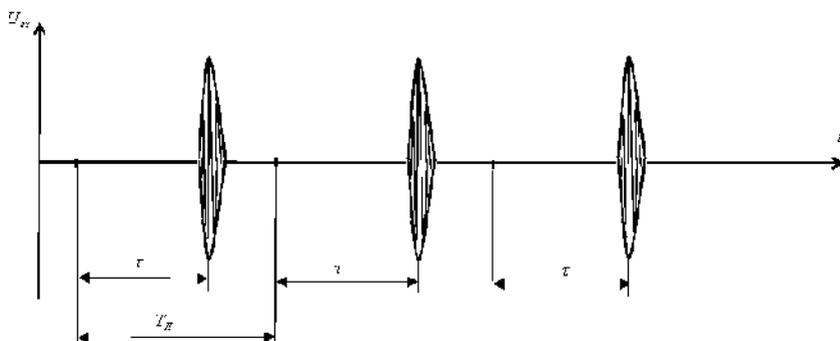


Рис. 10. Вид входного радиолокационного сигнала, отраженного точечной целью

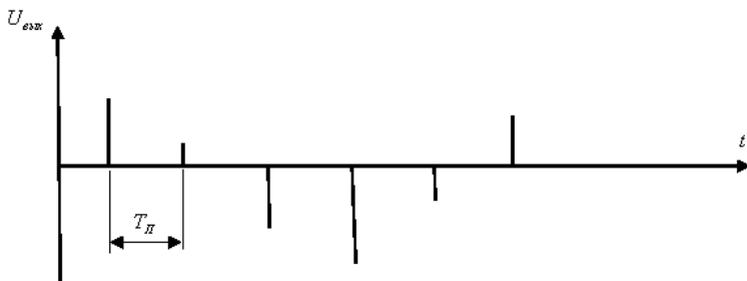


Рис. 11. Выходной сигнал точечной цели на выходе фазового детектора

Несмотря на то, что амплитуда входного сигнала постоянна, величина выходного сигнала изменяется по синусоидальному закону, что, как было уже показано, вызвано изменением фазы отражений от движущегося объекта. Частота колебаний зависит от радиальной скорости цели.

Синусоидальный сигнал с частотой $f_{\text{д}}$ и амплитудой A удобно изображать в координатах частота – мощность в виде δ -функции, как это показано на рис. 12.

Поскольку метеорологическое образование состоит из огромного числа элементарных целей, то на выходе приемника мы получаем сумму их отражений, каждое из которых имеет свою частоту и амплитуду, и может быть аналогичным образом представлено в виде δ -функции в указанной системе координат. В итоге на оси частот мы получаем целую область значений, которая определяется тем, с какими радиальными скоростями движутся частицы внутри наблюдаемого участка метеорологического образования. При этом каждой из присутствующих частот соответствует свое значение

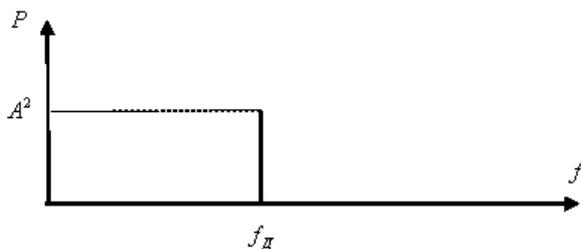


Рис. 12. Представление синусоидального сигнала в координатах частота-мощность



Рис. 13. Пример энергетического спектра эхо-сигнала метеорологического образования

мощности, которое зависит от того, сколько частиц и какого размера движутся с данной скоростью. Получаемая зависимость мощности от частоты называется энергетическим спектром сигнала, пример которого приведен на рис. 13.

Рассчитав первый и второй центральный моменты этого спектра (иначе, его среднее значение и дисперсию), мы получаем оценки среднего значения радиальных скоростей гидрометеоров и их разброса относительно среднего значения – те два дополнительных параметра, которые когерентный радиолокатор добавляет к уже известной радиолокационной отражаемости [3].

Отдельный вопрос – как оценивать энергетический спектр сигнала при оперативной работе? Для этого разработано много способов. Например, это можно сделать путем Фурье-преобразования входного сигнала и последующим возведением в квадрат модулей полученных для каждой частоты отсчетов.

Обладея двумя рассмотренными характеристиками отраженного сигнала, можно оценивать степень опасности наблюдаемых объектов. Так, большое значение ширины спектра говорит о повышенной турбулентности в наблюдаемом объеме пространства или о наличии в нем опасного сдвига ветра. По получаемым в процессе сканирования антенны оценкам средней частоты спектра восстанавливается, как это будет показано ниже, вертикальный профиль ветра и поле скоростей ветра в выбранном горизонтальном сечении.

1.2.2. Режим поляризационных измерений

«Энциклопедическое» определение поляризации звучит так: поляризация – это явление, заключающееся в том, что напряженности электрического и магнитного полей радиоволн сохраняются неизменными или изменяют по определенному закону свои направления в пространстве» [Большая советская энциклопедия, т. 20. – М.:

«Советская энциклопедия», 1975]. За основу принимается положение вектора пространственной напряженности электрического поля $\overline{E}(t)$. Если он неподвижен и расположен вертикально, волна называется вертикально поляризованной, если горизонтально – горизонтально поляризованной. В обоих этих случаях мы имеем дело с линейной поляризацией. Самый общий случай поляризации волны – эллиптическая, при которой конечная точка указанного вектора описывает эллипс в течение одного периода колебаний электромагнитной волны. Два других известных вида поляризации – круговая и уже упомянутая линейная – являются только частными случаями эллиптической. При этом надо учитывать еще одну характеристику – направление, в котором вращается вектор. Если при взгляде по направлению распространения волны оно происходит против часовой стрелки, волна называется правого вращения, в противном случае – левого.

Сигнал, формирующийся при отражении падающей волны целью, зависит как от поляризации волны, так и от свойств самой цели. Простейший пример – вертикально расположенный кусок провода. Максимальная мощность отражений от него достигается в случае, если падающая волна поляризована вертикально. Горизонтально же ориентированные колебания его просто «не замечают». На этом эффекте основана уже упоминавшаяся ранее работа второго отражателя в радиолокаторе МРЛ-5. В итоге, возникает возможность извлечь дополнительную информацию о наблюдаемой цели, недоступную в прежних радиолокаторах: например, поворачивая плоскость расположения вектора $\overline{E}(t)$ можно добиться максимума или минимума отражений и таким образом определить ориентацию в пространстве цели, имеющей вытянутую форму.

Более сложные цели вступают в более сложные взаимоотношения с облучающей волной. Для получения о них дополнительной информации используют две волны с разной поляризацией. При облучении первой из них фиксируют отражающую способность цели на той же поляризации, что и падающая волна (σ_{11}), плюс на поляризации, соответствующей второй волне (σ_{12}). Аналогично находят величины σ_{22} и σ_{21} при облучении цели второй волной. В результате получают матрицу рассеяния:

$$\begin{matrix} \sigma_{11} & \sigma_{21} \\ \sigma_{12} & \sigma_{22} \end{matrix},$$

являющуюся «портретом» цели. Информативность данной матрицы во многом зависит от выбора поляризации облучающих волн, называемых базисом. В большинстве случаев они должны быть ортогональны, т. е. не должны выражаться одна через другую. В таком качестве могут выступать две волны с круговой поляризацией разного вращения, эллиптически поляризованные волны, имеющие одинаковую форму эллипсов, но взаимно перпендикулярные оси наклона и обратные направления вращения (рис. 14) и т. д.

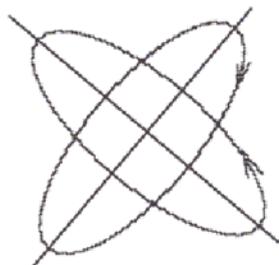


Рис. 14. Пример двух ортогонально поляризованных волн

Особенность метеорологической радиолокации состоит в том, что в большинстве случаев она имеет дело с элементарными отражателями в виде тел вращения, коими являются капли воды. Для таких целей оптимальным считается линейный базис [15]. Поскольку капли воды в вертикальном разрезе имеют форму эллипса, большая ось которого расположена горизонтально, все метеорологические радиолокаторы с режимом поляризационных измерений (иначе, поляриметрические) в качестве базиса используют вертикально и горизонтально поляризованные волны.

Исследования, проводимые в разных странах еще с семидесятых годов прошлого века, показали, что при работе с метеорологическими объектами совершенно необязательно восстанавливать матрицу рассеяния цели, что составляет трудную техническую задачу. Для извлечения интересующей нас информации о свойствах наблюдаемого метеорологического образования достаточно измерять три характеристики:

1. Дифференциальную отражаемость.
2. Дифференциальную фазу.
3. Модуль коэффициента взаимной корреляции поляризационных составляющих сигнала (сокращенно, коэффициент кросс-корреляции).

Дифференциальная отражаемость – это отношение мощностей горизонтально и вертикально поляризованных волн, определяемая в соответствии со следующим выражением:

$$Z_{DR} = \frac{P_h}{P_v} = \frac{\langle |H|^2 \rangle}{\langle |V|^2 \rangle}, \quad (7)$$

где Z_{DR} – дифференциальная отражаемость, P_h и P_v – мощности горизонтальной и вертикальной составляющих сигнала, V и H – комплексные сигналы на выходе приемников, угловыми скобками обозначено осреднение по времени. Ввиду того, что отношение осей эллипса, в который при падении превращается вертикальное сечение капли, зависит от ее размера, по значению рассматриваемого параметра можно судить о величине наблюдаемых частиц. Но наиболее эффективна дифференциальная отражаемость при определении агрегатного состояния последних. В отличие от капель воды ледяные частицы либо имеют сферическую форму (град), либо хаотично ориентированы в пространстве (снежная крупа, снежинки, ледяные иглы). Это приводит к тому, что отраженный ими сигнал имеет близкую к нулю дифференциальную отражаемость.

Дифференциальная фаза – разность фаз волн, принимаемых по горизонтальному и вертикальному каналам приемника. На практике она определяется как аргумент коэффициента взаимной корреляции двух поляризационных составляющих r_{hv} :

$$\Phi_{DR} = \arg(r_{hv}), \quad (8)$$

где

$$r_{hv} = \frac{\langle H^* V \rangle}{(P_h P_v)^{1/2}}. \quad (9)$$

В отличие от остальных измеряемых метеорологическими радиолокаторами параметров она есть результат не отражения электромагнитной волны от цели, а ее распространения по трассе от радиолокатора до цели и обратно. Из-за сплющивания падающих капель условия распространения горизонтально и вертикально поляризованных волн различны, а, как результат этого, различен набег фаз каждой из них. Значение рассматриваемой разности зависит от величины капель и их концентрации. Аналогично дифференциальной отражаемости ее значение близко к нулю при распространении в ледяных частицах и больше нуля для жидких частиц.

Модуль коэффициента взаимной корреляции оценивается в соответствии с выражением:

$$\rho_{hv} = \text{mod}(r_{hv}). \quad (10)$$

Главное назначение данного параметра – служить идентификатором того, что наблюдаемая цель метеорологическая. Его значение для нее лежит в пределах 0,95–1,0. Во всех остальных случаях он,

как правило, меньше уровня 0,5. Также он служит хорошим показателем того, что мы наблюдаем тающий град или снег – для них характерно значение этого параметра 0,95–0,98. Частицам, находящимся в строго определенном агрегатном состоянии (твердом или жидком) соответствует значение 0,99–1,0.

1.2.3. Широкополосный сигнал в метеорологической радиолокации

Величиной, характеризующей способность метеорологического радиолокатора обнаруживать цели, служит метеорологический потенциал [11]:

$$\Pi_{\text{М}} = \frac{0,1\pi^6 P_{\text{И}} A_p h K}{P_{\text{Ш}} \lambda^4}, \quad (11)$$

где $P_{\text{И}}$ – мощность импульса передатчика, $P_{\text{Ш}}$ – мощность шумов на входе приемника, A_p – площадь раскрытия антенны, h – пространственная протяженность зондирующего импульса, K – коэффициент полезного действия антенно-волноводного тракта, λ – длина волны несущего колебания.

Именно метеорологический потенциал определяет отношение сигнал-шум на выходе приемника при известной дальности цели R и ее радиолокационной отражаемости Z :

$$\frac{P_{\text{С}}}{P_{\text{Ш}}} = \Pi_{\text{М}} \frac{Z}{R^2}, \quad (12)$$

где $P_{\text{С}}$ – мощность принимаемого сигнала.

Естественно желание разработчиков добиться как можно большего метеорологического потенциала. Одним из путей достижения этого является увеличение излучаемой мощности. Однако сделать это – большая проблема, т. к. генераторы высокочастотных колебаний и так работают на грани возможного, а для волноводов ее рост существенно увеличивает вероятность пробоя. Поэтому родилась идея увеличить не мощность, а энергию излученного импульса, т. е. излучить сигнал малой мощности, но большой длительности, а при приеме сжать его до малой длительности, получив тем самым увеличение мощности принимаемого импульса (рис. 15). При этом достигается такой же эффект, как если бы передатчик излучил короткий импульс с большой мощностью, называемой в нашем случае эквивалентной (на рисунке 15 показан пунктиром).

Пунктиром показан короткий сигнал большой мощности, излучение которого привело бы к появлению на выходе приемника такого же сигнала, что и на выходе фильтра сжатия.

Но для того, чтобы импульс можно было сжать, он должен иметь сложную внутреннюю структуру, позволяющую это сделать – т. е. быть широкополосным. Дело в том, что для простого импульса

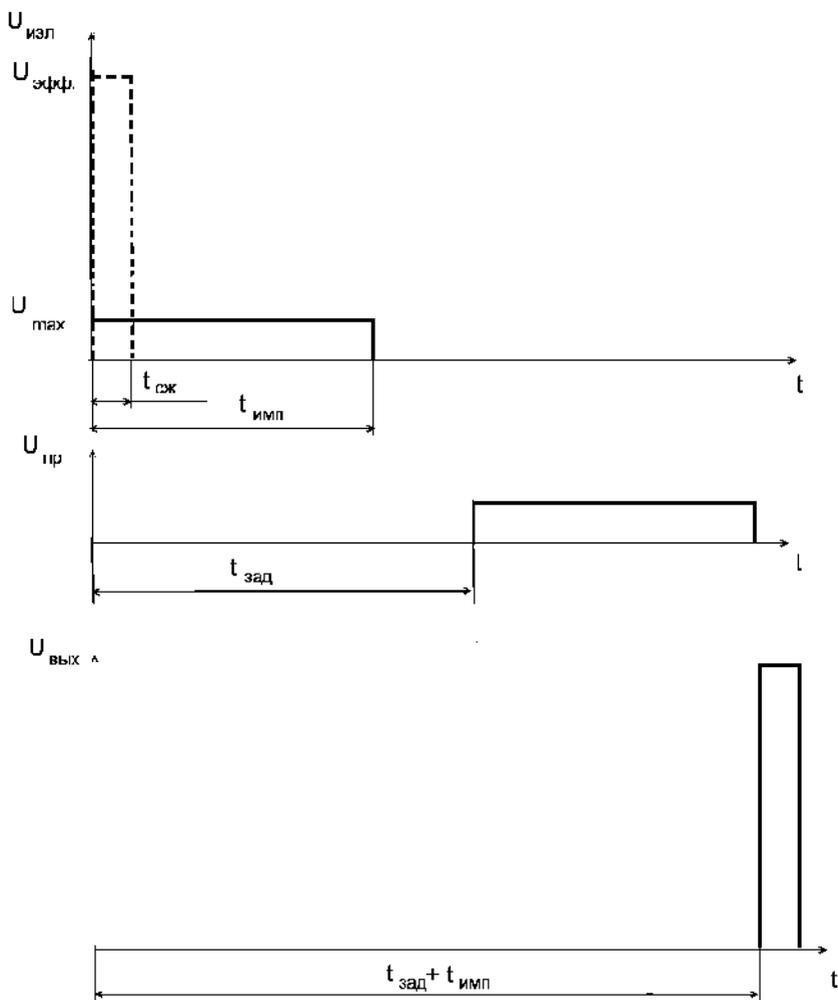


Рис. 15. Излучаемый ($U_{изл}$), принимаемый ($U_{пр}$) сигналы и сигнал на выходе фильтра сжатия ($U_{вых}$)

выполняется следующая зависимость между его длительностью τ и шириной спектра Δf :

$$\tau \Delta f = 1. \quad (13)$$

Следовательно, для того, чтобы из длинного сложного импульса получить простой короткий, надо искусственным образом у первого расширить спектр до требуемой величины. На настоящий момент известны два способа такого расширения:

1. Фазовая кодовая модуляция (ФКМ)
2. Линейная частотная модуляция (ЛЧМ).

Первый из них состоит в разбиении сигнала на равные части, в каждом из которых фаза несущего колебания принимает значение 0 или 180 градусов. Закон, по которому фаза меняется от одного элемента к другому, может быть разным, но наиболее эффективно применение для этих целей кодов Баркера. В частности, на рисунке 16 изображена структура семиразрядного ФКМ сигнала, соответствующий ему фильтр сжатия и получаемый выходной сигнал этого фильтра.

На рис. 16-а фаза колебаний в каждой из ячеек обозначена 0 или π . Аналогично обозначены дополнительные повороты фазы, вносимые фазовращателями фильтра на рис. 16, б. Величина временной задержки сигнала между соседними выводами линии задержки равна длительности ячейки. В результате, на этих выходах формируются сдвинутые по времени сигналы, фаза которых либо равна фазе входного, либо сдвинута относительно него на π в зависимости от того, через какой фазовращатель они проходят. В сумматоре все эти сигналы складываются с учетом фаз колебаний: если они равны – сигналы суммируются, если разность фаз равна π – взаимоуничтожаются. Для большей наглядности этого процесса фазы колебаний, получаемых на входах сумматора на рисунке 16, в обозначены знаками «+» и «-». На схеме показана обработка двух следующих друг за другом ФКМ сигналов. В моменты времени, когда сигнал входит или выходит из фильтра, амплитуда сигнала на его выходе равна амплитуде входного импульса, и только при полном его вхождении в фильтр она увеличивается в n раз, где n – число ячеек (в данном случае 7).

Идея ЛЧМ сигнала (рис. 17) состоит в том, что внутри импульса частота несущего колебания изменяется по линейному закону от значения f_H до значения f_K . Разность этих частот определяет длительность, до которой может быть сжат импульс.

$$\tau_{сж} = \frac{1}{|f_K - f_H|}. \quad (14)$$

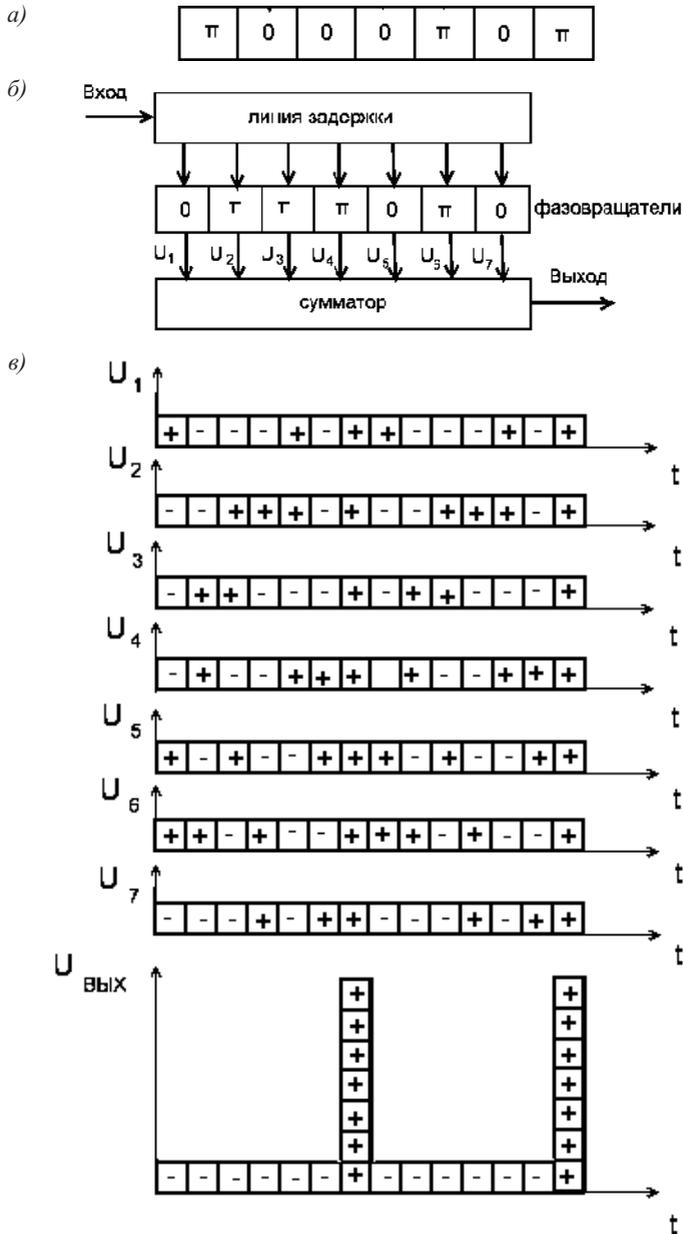


Рис. 16. Структура ФКМ сигнала – (а), фильтр сжатия – (б), процесс сжатия ФКМ сигнала – (в)

Обе технологии давно и широко применяются в классической радиолокации, имеющей дело с точечными целями. В метеорологической же радиолокации они распространения до недавних пор не имели из-за слишком жестких требований к боковым лепесткам на выходе фильтра сжатия. Это те сигналы, что формируются фильтром в моменты «входа» и «выхода» сигнала из фильтра и располагаются по бокам максимума, имеющего место при полном вхождении сигнала. Признано, что при наблюдении метеорологических образований уровень этих лепестков не должен превышать величины -50 дБ от максимального значения. При большей их величине отражения от некоторых элементов разрешения могут быть полностью замаскированы более мощными эхо от соседних участков цели. Выполнить такое условие стало возможным лишь недавно благодаря развитию теории и техники радиоприема.

В ДМРЛ-С за основу взят ЛЧМ импульс. Для выполнения поставленного условия закон изменения частоты внутри импульса был несколько изменен, в результате чего он получил название НЧМ (нелинейно частотно модулированный) импульс. Мощность излучаемого сигнала – 15 кВт, а длительность – 60 мкс. После сжатия в приемнике в 60 раз формируется импульс, эквивалентный случаю излучения одномикросекундного импульса мощностью 900 кВт.

Следует добавить, что следом за Россией метеорологические радиолокаторы со сложным сигналом стали выпускать фирмы и других стран, но все они пошли путем использования ФЧМ сигнала. Уменьшения боковых лепестков они добиваются введением весовых окон, т. е. перед процедурой сжатия умножают элементы, на которые он разбит, на весовые коэффициенты. Из-за этого теряется около половины принимаемой мощности, что отсутствует у отечественного ДМРЛ-С.

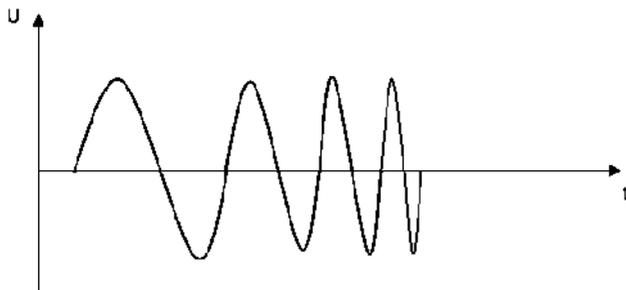


Рис. 17. Структура ЛЧМ сигнала

1.2.4. Структурная схема и основные характеристики радиолокатора ДМРЛ-С

Структурная схема радиолокатора ДМРЛ-С представлена на рисунке 18.

Роль синхронизатора выполняет специальный вычислитель, расположенный в шкафу приемника. Он вырабатывает синхроимпульсы, поступающие на вход модулятора, управляющего работой генератора высокочастотных колебаний, в качестве которого выбран клистрон. Одновременно на него поступают колебания из блока формирователя сигналов. В результате, клистрон вырабатывает высокочастотные импульсы, следующие далее на направленный ответвитель, в котором часть излучаемой энергии направляется в схему контроля работы передатчика. Здесь СВЧ сигналы преобразуются в детекторной секции в видеоимпульсы, после чего поступают в субблок контроля мощности и на контрольное гнездо, через которое при помощи осциллографа можно контролировать форму огибающей зондирующего импульса. В зависимости от измеренной излучаемой мощности выбирается режим работы вентилятора, обеспечивающего нормальный температурный режим клистрона.

Основная энергия направляется через вентиль и фильтр гармоник на переключатель каналов. Последний, в зависимости от вида работы радиолокатора, выбранного оператором, направляет энергию либо целиком в канал горизонтальной поляризации, либо разделяет ее поровну между ним и каналом вертикально поляризованной волны. Вентиль защищает передатчик от энергии, отраженной от различных неоднородностей волноводного тракта, направляя ее в согласованную нагрузку. Фильтр гармоник предназначен для защиты от посторонних радиоэлектронных средств, а также аппаратуры изделия ДМРЛ-С от гармонических составляющих излучаемого сигнала.

Поляризационные каналы устроены одинаково и состоят из ферритового циркулятора и блока направленных ответвителей. Циркуляторы создают возможность работы передатчика и приемника на одну антенну, обеспечивая прохождение энергии или из передатчика на антенну, или из антенны в приемник, а направленные ответвители служат для оперативного контроля коэффициента бегущей волны путем измерения соотношения мощностей падающей и отраженной волны.

Далее по волноводам и вращающимся волноводным переходам энергия поступает в облучатель антенны, где оба канала соединяются,

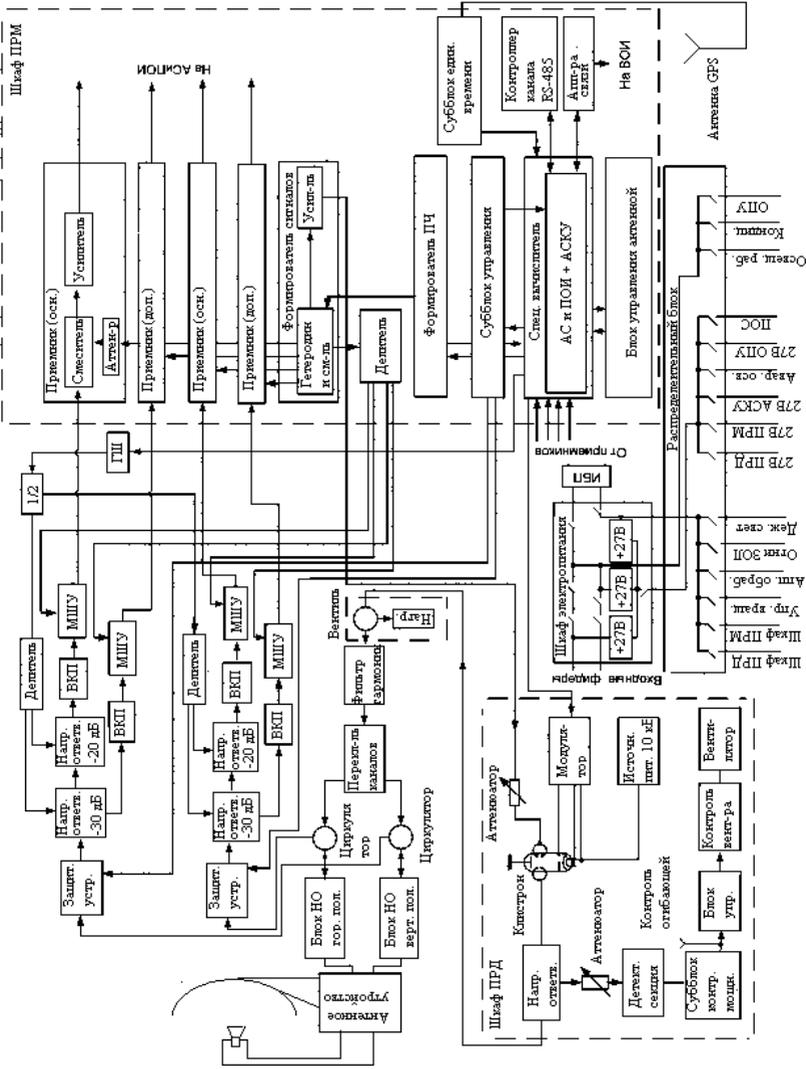


Рис. 18. Структурная схема радиолокатора ДМРЛ-С

и на ее отражатель, формирующий диаграмму направленности и направляющий ее в окружающее пространство.

Отраженная целью энергия падает на отражатель и концентрируется в облучателе, где в зависимости от ее поляризации разделяется между идентично построенными каналами, в каждом из которых через циркуляторы и защитные устройства попадает в направленный ответвитель. Здесь она разделяется между двумя (основным и дополнительным) приемными каналами. В первый из них сигнал поступает целиком, а во второй с ослаблением на 30 дБ. Такое построение приемника обеспечивает требуемый большой динамический диапазон – отношения максимально возможной величины выходного напряжения к ее минимально возможному значению. Ниже это будет объяснено подробнее.

После преобразования частоты и усиления в приемниках сигналы направляются в систему автоматического сбора и первичной обработки информации (АС и ПОИ), расположенной в блоке спец. вычислителя и далее по каналу связи в систему вторичной обработки информации (ВОИ). Последняя может быть расположена не в месте установки радиолокатора, а, например, в центре сбора данных от различных автоматических систем. Первичная обработка состоит в вычислении измеряемых параметров сигнала (мощность, средняя частота спектра и т. д.), борьбе с шумами и помехами, устранении неоднозначности измерений, объединении полученных данных с координатами антенны и дальностью, на которой зафиксирован сигнал. Вторичная обработка заключается в идентификации наблюдаемых целей, визуализации получаемой информации, кодировании ее в удобном для потребителя виде и передаче по каналам связи.

Для того чтобы быть уверенным в корректности получаемой информации, основные параметры радиолокатора перед началом и после окончания каждого цикла обзора пространства проверяются нахождение в заданных пределах и, если надо, корректируются. Данный контроль обеспечивается введением на вход приемных каналов калиброванных сигналов генератора шума (ГШ) через направленные ответвители волноводного тракта и пилот-сигнала, формируемого гетеродином и вводимого через специальные входы малошумящих усилителей (МШУ). Управляет данным процессом автоматическая система управления и контроля (АСКУ).

К особенностям построения радиолокатора ДМРЛ-С относятся:

1. Возможность оценивания спектральных характеристик принимаемых сигналов за счет их построения по типу «истинной когерентности» (рис. 19).

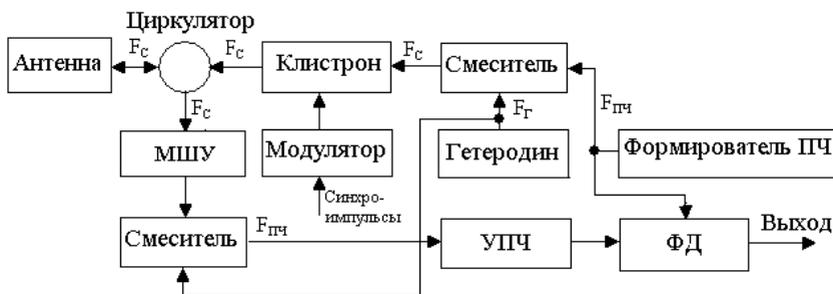


Рис. 19. Схема реализации когерентного режима по типу «истинной когерентности»

Два генератора – гетеродин и формирователь промежуточной частоты (ПЧ) – постоянно вырабатывают гармонические колебания с частотами F_{Γ} , $F_{\text{ПЧ}}$ и начальными фазами колебаний φ_{Γ} , $\varphi_{\text{ПЧ}}$ соответственно. В первом смесителе их сигналы смешиваются и выделяется синусоида суммарной частоты $F_c = F_{\Gamma} + F_{\text{ПЧ}}$:

$$S(t) = A \sin(2\pi F_c t + \varphi_{\Gamma} + \varphi_{\text{ПЧ}}), \quad (15)$$

где A – некоторый постоянный коэффициент, также как и используемые ниже коэффициенты B и C .

В клистроне эти колебания модулируются по амплитуде выходным напряжением модулятора, управляемого синхроимпульсами, и усиливаются по мощности. Далее через ферритовый циркулятор зондирующий сигнал поступает в антенну и излучается в окружающее пространство. Если на пути своего распространения сигнал встречает цель, формируемые при этом отражения поступают в антенну. Из-за прохождения сигналом расстояния до цели и обратно он приобретает задержку по времени на величину τ и сдвиг по фазе $\varphi_{\text{Ц}}$:

$$S_{\text{отр}}(t) = S_{\text{мод}}(t - \tau) \sin[2\pi F_c(t - \tau) + \varphi_{\Gamma} + \varphi_{\text{ПЧ}} + \varphi_{\text{Ц}}], \quad (16)$$

где $S_{\text{мод}}(t)$ – модулирующая функция (как правило, последовательность прямоугольных импульсов), $\varphi_{\text{Ц}} = 2\pi R/\lambda$, R – расстояние до цели, λ – длина волны несущего колебания радиолокатора.

Через циркулятор и малошумящий усилитель высокой частоты (МШУ) этот сигнал поступает на еще один смеситель, на второй вход которого подаются колебания гетеродина. На его выходе посредством частотных фильтров выделяют сигнал разностной частоты:

$$S_{\text{СМ}}(t) = BS_{\text{МОД}}(t - \tau) \sin \left\{ \left[2\pi F_c (t - \tau) + \varphi_{\Gamma} + \varphi_{\text{ПЧ}} + \varphi_{\text{Ц}} \right] - \right. \\ \left. - \left[2\pi F_{\Gamma} (t - \tau) + \varphi_{\Gamma} \right] \right\} = BS_{\text{МОД}}(t - \tau) \sin \left[2\pi F_{\text{ПЧ}} (t - \tau) + \varphi_{\text{ПЧ}} + \varphi_{\text{Ц}} \right]. \quad (17)$$

После прохождения через усилитель промежуточной частоты (УПЧ) этот сигнал поступает на фазовый детектор (ФД), где смешивается с колебаниями формирователя ПЧ, на выходе которого отфильтровываются колебания разностной частоты:

$$S_{\text{ВЫХ}}(t) = CS_{\text{МОД}}(t - \tau) \sin \left\{ \left[2\pi F_{\text{ПЧ}} (t - \tau) + \varphi_{\text{ПЧ}} + \varphi_{\text{Ц}} \right] - \right. \\ \left. - \left[2\pi F_{\text{ПЧ}} (t - \tau) + \varphi_{\text{ПЧ}} \right] \right\} = CS_{\text{МОД}}(t - \tau) \sin(\varphi_{\text{Ц}}) = \\ = CS_{\text{МОД}}(t - \tau) \sin \left(2\pi \frac{R}{\lambda} \right). \quad (18)$$

Очевидно, что входной сигнал оказывается независимым от начальных фаз колебаний гетеродина и формирователя ПЧ и определяется набегом фазы, который зондирующий импульс получил при распространении до цели и обратно. Если цель неподвижна ($R = \text{const}$), соответствующее ей напряжение на выходе фазового детектора постоянно. Если же дальность цели изменяется ($R = R_0 + V_R t$), это напряжение становится гармоническим с частотой, зависящей от скорости V_R радиального (вдоль луча антенны) движения цели.

2. Возможность оценивать поляризационные характеристики цели за счет наличия двух приемо-передающих каналов (горизонтальной и вертикальной линейной поляризации). Каналы совершенно идентичны и различаются только способом подключения волновода к облучающему рупору антенны. В результате, один из них при излучении возбуждает в рупоре колебания только горизонтальной поляризации, а при приеме выделяет эти колебания из суммарного отраженного сигнала. Другой делает то же самое с вертикально поляризованными волнами.

3. Наличие линейного приемника с динамическим диапазоном 100 дБ. Использовать логарифмический усилитель, как это было сделано в МРЛ-5, в данном случае невозможно. Поскольку в радиолокаторе ДМРЛ-С предусмотрены измерения спектральных характеристик, тракт, по которому проходит сигнал, должен быть линейным – любое нелинейное преобразование сигнала приводит к искажению его спектра. По этим же причинам нежелательно применять временную регулировку усиления (ВАРУ) – нестабильность управляющего напряжения способна испортить получаемые оценки.

Готового линейного усилителя с требуемым динамическим диапазоном пока еще не существует. Поэтому пришлось в каждом из поляризационных каналов делать два приемника. На один принимаемый сигнал поступает напрямую, а на другой с ослаблением 30 дБ. При достаточно малой мощности отражений на обработку посылаются сигналы с выхода первого из них. Если же их мощность возрастает настолько, что фиксируется ограничение выходного сигнала, система управления изменяет поток информации, забирая ее со второго (дополнительного) приемника.

4. Электропитание радиолокатора ДМРЛ-С организовано от двух независимых каналов (фидеров) с автоматическим переключением с одного на другой в случае пропадания энергии в том, к которому в этот момент был подключен радиолокатор. Для поддержания оборудования в рабочем состоянии на время переключения служит источник бесперебойного питания (ИБП), мощности которого хватает на то, чтобы довести до конца начатый обзор пространства даже в том случае, если энергия пропадет в обоих каналах электропитания.

5. Радиолокатор обеспечен дополнительными системами единого времени, связью по различным каналам с потребителем, выбором температурных режимов, пожаротушением, защитой от несанкционированного доступа. Все это совместно с автоматической системой контроля и управления (АСКУ) позволяет этому комплексу длительно время работать в автоматическом режиме без участия человека.

1.2.5. Малогабаритные метеорологические радиолокаторы

Если посмотреть на карту сети штормоповещения, создающейся на базе ДМРЛ-С (см. рис. 2), создается впечатление того, что области обзора радиолокаторов надежно закрывают территорию России (по крайней мере, ее Европейскую часть). Однако такой взгляд «сверху» обманчив и, чтобы убедиться в этом, достаточно взглянуть на территорию между двумя ДМРЛ-С «сбоку» (рис. 20).

Становится очевидным тот факт, что из-за кривизны земной поверхности с увеличением расстояния антенный луч располагается все выше над землей. На дальности 100 км большая часть диаграммы направленности антенны находится в зоне выше 1 км, а на максимальной дальности 250 км – выше 4 км. Следовательно, 100 км – предельное расстояние, на котором мы еще можем наблюдать осадки, далее до 180 км нам доступны только процессы, происходящие

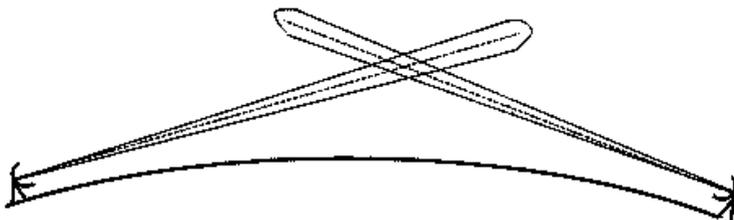


Рис. 20. Схема расположения антенных лучей радиолокаторов в вертикальной плоскости

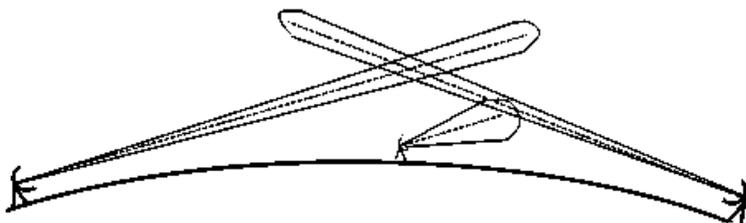


Рис. 21. Возможная схема расположения малогабаритного радиолокатора относительно метеорологических радиолокаторов сети штормоповещения

в районе нулевой изотермы, а на краю области – лишь «верхушки» каких-либо мощных атмосферных процессов. Поправить сложившуюся ситуацию можно двумя способами [8]:

- более плотным расположением ДМРЛ-С, что значительно увеличивает затраты на создание сети;
- расположением между радиолокаторами ДМРЛ-С малогабаритных радиолокаторов с меньшей дальностью работы, более широким антенным лучом, но гораздо менее дорогими (рис. 21).

Понимание этого привело к тому, что все ведущие в рассматриваемой нами области фирмы начали разработку и выпуск «малых» радиолокаторов, которые кроме уже указанного имеют и другие области применения:

- метеорологическое обеспечение небольших аэродромов, на которых устанавливать «большие» и дорогостоящие радиолокаторы нецелесообразно;
- метеорологическое обеспечение морских судов;
- обеспечение активных воздействий в местах, необорудованных метеорологическими радиолокаторами.

Отечественная промышленность представлена в этом секторе рынка двумя изделиями:

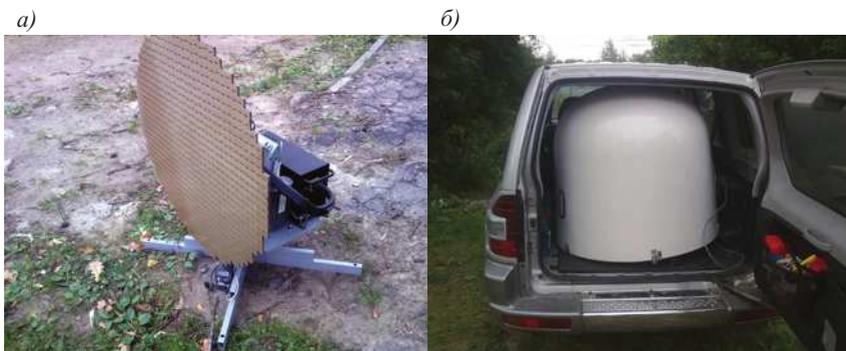


Рис. 22. Внешний вид малогабаритного метеорологического радиолокатора «Контур МЕТЕО-01»: *а* – без радиопрозрачного укрытия; *б* – в полном сборе готовый к транспортировке

1. Радиолокатором «Контур МЕТЕО-01» (см. рис. 22) разработки ООО «Контур НИИРС» (г. Санкт-Петербург). Его главное достоинство – малый вес и габариты, позволяющие поместить его в багажнике джипа, а развернуть для работы на крыше любого автомобиля. Ради этого пришлось отказаться от когерентного режима работы, не говоря уже о поляриметрии.

2. Радиолокатором «Зодиак» (рис. 23) разработки ОАО «Завод «Энергия» совместно с Военно-космической академией имени А.Ф. Можайского (г. Санкт-Петербург). Он выгодно отличается от первого наличием когерентности, более узким антенным лучом и большим метеорологическим потенциалом, однако значительно проигрывает в массе и габаритах.

Основные характеристики этих и других уже упоминавшихся радиолокаторов приведены в Приложении 3.



Рис. 23. Внешний вид малогабаритного метеорологического радиолокатора «Зодиак»

2. Атмосферные осадки и радиолокационные методы измерения их характеристик

2.1. Краткий обзор характеристик атмосферных осадков

Измерение характеристик атмосферных осадков является одной из важнейших задач метеорологии. В детальной оперативной информации о них заинтересованы многие отрасли, они играют важную роль при прогнозировании погоды. Отсутствие этих данных может приводить к катастрофическим последствиям. В то же время их получение является очень сложной задачей в силу многообразия и высокой пространственно-временной изменчивости осадков. К данным характеристикам относятся:

- вид осадков;
- протяженность и продолжительность осадков;
- структура или распределение составляющих осадки частиц по размерам;
- количество и интенсивность осадков.

Виды осадков. Имеется в виду их разделение на жидкие, твердые и смешанные. Для дистанционной идентификации видов осадков не существует каких-либо иных технических методов, кроме радиолокационных. Особенно значимо прогнозирование града, широко применяемое в службах градозащиты. Большое значение имеет также распознавание жидкой фазы частиц, расположенных в области отрицательных температур, позволяющее своевременно выявить зоны возможного обледенения летательных аппаратов. В ряде случаев возможна и более подробная классификация наблюдаемых целей.

Протяженность и продолжительность осадков. В этой области преимущество радиолокационных методов бесспорно. Только с их помощью можно определить площадь, на которой выпадают осадки в интересующий момент времени или длительность их существования в выбранной точке пространства.

Структура осадков или распределение составляющих их частиц по размерам. Имеет как самостоятельное, так и прикладное значение, позволяющее повысить точность оценок интенсивности

осадков. Традиционными здесь являются контактные методы, основанные на измерении величины тени частиц, пролетающих через узкую щель прибора. По сравнению с ними радиолокационные методы не имеют каких-либо существенных преимуществ за исключением, может быть, удобства эксплуатации.

Количество и интенсивность осадков. Основное преимущество радиолокационных методов для определения характеристик осадков по сравнению с традиционными (осадкомеры и плювиографы) состоит в оперативности и возможности проведения измерений на больших площадях. Основной недостаток – меньшая по сравнению с ними точность оценивания. Поэтому выбор метода измерений существенно зависит от решаемых задач. Последние могут быть очень разнообразны:

- для сельского хозяйства важны данные о количестве осадков, выпавших на больших площадях в течение длительного периода времени от недель до месяцев;
- службу прогнозов интересует количество осадков, выпавших на территории страны за период 3–12 часов;
- для обслуживания авиации, дорожных служб, служб МЧС, обеспечения работы гидротехнических сооружений первостепенное значение приобретает оперативность информации об осадках повышенной интенсивности.

Очевидно, что именно в последнем случае радиолокационные методы особенно актуальны.

2.2. Радиолокационное измерение интенсивности осадков

2.2.1. Радиолокационное измерение интенсивности осадков по мощности отраженного сигнала

В метеорологической радиолокации непосредственно оценивается именно интенсивность осадков. Суммарное количество осадков за выбранный промежуток времени рассчитывается как сумма произведений оценок интенсивности, полученных радиолокатором в каждом из проведенных в этот интервал времени обзоров, на интервал между обзорами.

Метод применяется в активных первичных радиолокаторах, т. е. радиолокаторах, излучающих в пространство зондирующие импульсы и принимающих их отражения от находящихся в зоне обзора метеорологических образований. Этот метод разработан в 60-е годы

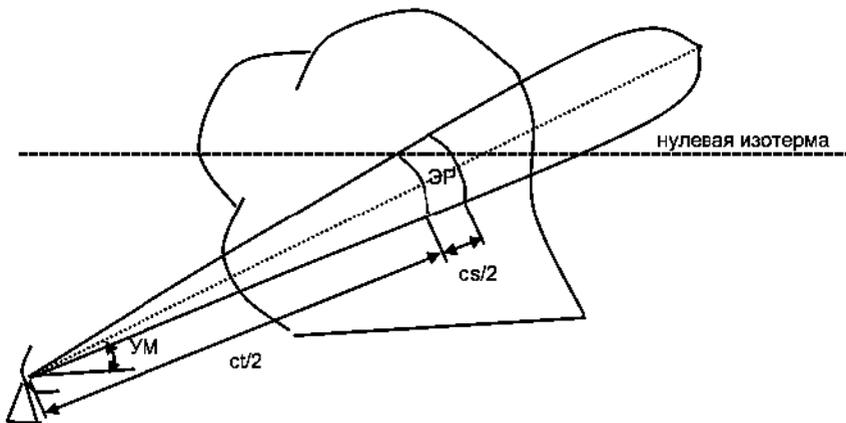


Рис. 24. Схема наблюдения метеорологического образования радиолокатором:

ЭР – элемент разрешения, УМ – угол места антенны,
 t – время задержки принимаемого сигнала относительно излучения зондирующего импульса, s – длительность зондирующего импульса,
 c – скорость света в окружающем пространстве

прошлого века, когда метеорологические радары были некогерентными, т. е. могли измерять только амплитуду принимаемого сигнала. Однако он широко используется и в современных доплеровских и поляриметрических радарх.

В основе метода лежит взаимосвязь мощности отражений от количества и размера составляющих цель частиц, выражающаяся формулой:

$$P = \frac{P_{\text{ш}} \Pi_{\text{М}}}{R^2} Z \eta, \quad (19)$$

где $\Pi_{\text{М}}$ – метеорологический потенциал радиолокатора, полностью определяемый его техническими характеристиками; $P_{\text{ш}}$ – мощность шумов на выходе приемника; R – расстояние до цели; η – коэффициент, учитывающий ослабление радиоволн; Z – радиолокационная отражаемость осадков.

Схема наблюдения метеорологического образования радиолокатором представлена на рис. 24.

Радиолокационная отражаемость Z осадков при условии, что длина волны λ несущего колебания радиолокационной станции (РЛС) значительно превосходит диаметр отражающих частиц D , определяется следующим соотношением, где суммирование ведется по единичному объему пространства:

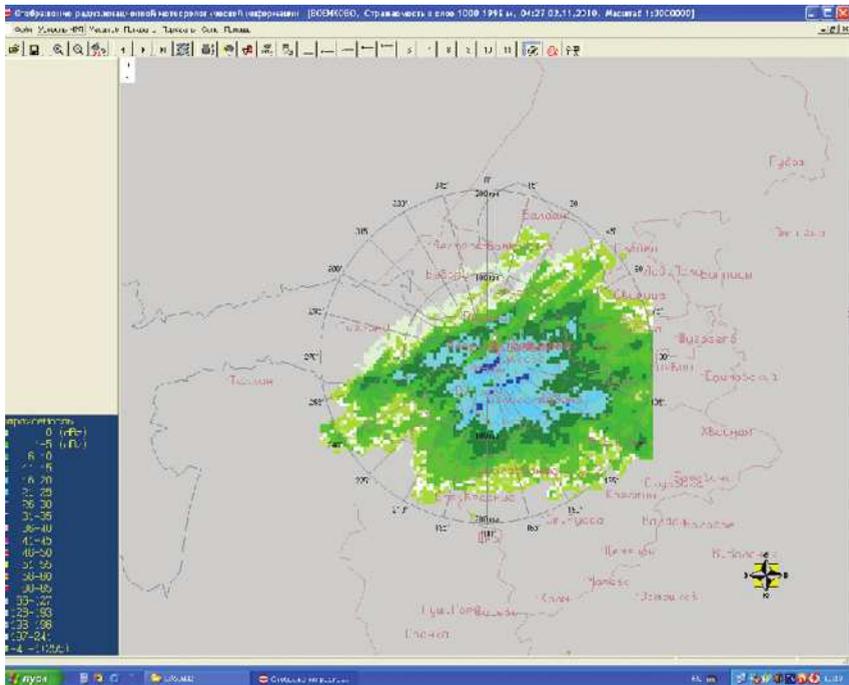


Рис. 25. Пример карты радиолокационной отражаемости

$$Z = \sum_i D_i^6 \left| \frac{m_i^2 - 1}{m_i^2 + 2} \right|^2, \quad (20)$$

где D_i – диаметр i -той частицы, m_i – комплексный коэффициент преломления i -той частицы.

Пример карты радиолокационной отражаемости представлен на рис. 25.

Ослаблением волн в большинстве случаев пренебрегают. Множитель $\left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2$, входящий в формулу (20), равен 0,93 для воды и 0,197 для льда с единичной плотностью.

По измеренному значению отражаемости вычисляется интенсивность осадков I в рассматриваемом элементе пространства. Указанные величины связаны между собой известным соотношением:

$$Z = aI^b, \quad (21)$$

где Z измеряется в $\text{мм}^6/\text{м}^3$, I в $\text{мм}/\text{час}$, a и b – коэффициенты.

Формула (21) носит название Маршалла-Пальмера и основана на одноименном законе распределения частиц по размерам. Авторами закона предложены следующие значения коэффициентов: $a = 200$, $b = 1,6$. В случае наблюдения снегопада применяют $a = 1780$, $b = 2,21$, а при тающем снеге $a = 398$, $b = 2,21$.

Однако характеристики осадков (интенсивность, спектр размеров дождевых капель, скорость воздушных потоков и т. д.) изменяются во времени и в пространстве в достаточно больших пределах, следствием чего является и изменение эмпирических параметров a и b в соотношении (21). Это подтверждается данными экспериментальных измерений, проводимых различными исследователями в различных точках земного шара, представленными в табл. 1.

Таблица 1

Связь между радиолокационной отражаемостью Z ($\text{мм}^6/\text{м}^3$) и интенсивностью осадков I ($\text{мм}/\text{час}$)

Z	Место наблюдений	Пределы изменения I	Авторы	Примечания
$257 \cdot I^{1,55}$	Эльбрус	–	Литвинов	367 спектров в 7 дождях (тающий снег)
$209 \cdot I^{1,69}$	Киев	–	Мучник и др.	88 спектров дождя
$290 \cdot I^{1,41}$	Гавайские острова	0.28–127	Бланчард	28 спектров дождя
$214 \cdot I^{1,60}$	Вашингтон	0.37– 144	Векслер	98 спектров дождя
$200 \cdot I^{1,60}$	Оттава	0.15–35	"	250 спектров дождя
$436 \cdot I^{1,34}$	Ист-Хилл	0.41–25.1	Бест	149 спектров дождя
$127 \cdot I^{1,29}$	Сидней	0.2–9	Туоми	34 спектра дождя
$217 \cdot I^{1,41}$	Майами	234	Джонс	877 спектров в продолж. дождях
$144 \cdot I^{1,60}$	"	469	"	661 спектр в ливнях
$256 \cdot I^{1,67}$	Тайпойн	157	"	438 спектров в грозах
$344 \cdot I^{1,54}$	Ленинград	1–13	Сальман	Дождь
$200 \cdot I^{1,5}$	"	1–58	Котов	"

Z	Место наблюдений	Пределы изменения I	Авторы	Примечания
$127 \cdot I^{2,87}$	Австралия	–	Хиггс	Ливни
$162 \cdot I^{1,16}$	Лексингтон	–	Атлас и Чмела	Обложные осадки
$303 \cdot I^{1,7}$	Москва	–	Шуляцкий	Дожди < 7 мм/час
$405 \cdot I^{1,49}$	"	–	"	Дожди 7 ÷ 60 мм/час
$289 \cdot I^{1,59}$	"	-	"	Дожди > 60 мм/час
$109 \cdot I^{1,64}$	Хандала	-	Рамана, Мурти, Гупта	Орографические муссонные дожди
$342 \cdot I^{1,42}$	Дели	-	"	Не орографические муссонные дожди
$219 \cdot I^{1,41}$	Пуна	-	Сиварам-кришнан	Грозы
$67,6 \cdot I^{1,94}$	"	-	"	Обложные дожди
$66,5 \cdot I^{1,92}$	"	-	"	Дожди из теплых облаков

Очевидно, что величина a изменяется в пределах от 3,44 до 630, а b – от 1,16 до 2,87.

Основными факторами, влияющими на точность измерений, являются:

1. Неполное заполнение луча частицами метеообразования. Дело в том, что метеорологическая отражаемость вычисляется по величине мощности принимаемого сигнала в предположении о полном заполнении импульсного объема радиолокатора элементарными отражателями. Если же это условие не выполняется, в вычисления вносится ошибка, переходящая и на оценку интенсивности осадков, принимающую пониженное значение. Эффект неполного заполнения элемента разрешения РЛС метеообразованием иллюстрирует рис. 26.

Эффект неполного заполнения элемента разрешения характерен для границ метеорологических образований и хорошо виден на рис. 27, где по краям облачности четко просматривается «окантовка» из минимальной величины значений параметра.

2. Частичное блокирование луча. Возникает при наличии какого-либо мешающего наземного предмета, затеняющего часть

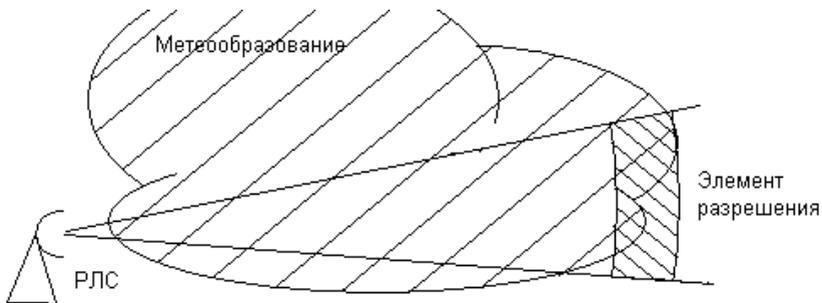


Рис. 26. Пример неполного заполнения элемента разрешения РЛС частицами метеорологического образования

расположенных за ним элементов разрешения. В этой роли часто выступают телевизионные башни, опоры линии электропередач, заводские трубы. Поскольку осадки всегда наблюдают при горизонтальном расположении антенны, данные высокие предметы непременно попадают в зону обзора и ведут к занижению оценок. На рис. 27 подобный случай виден в виде узкой полосы, расположенной к юго-востоку от радара.

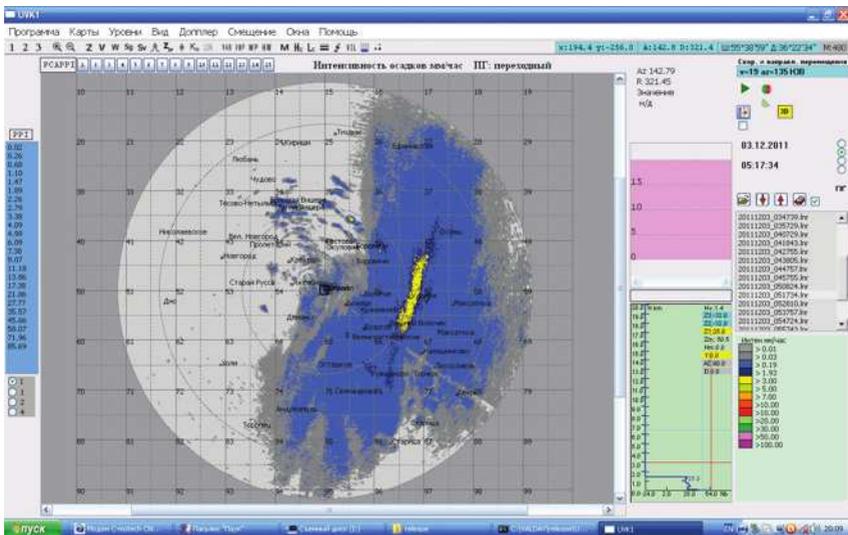


Рис. 27. Карта интенсивности осадков, полученная радиолокатором ДМРЛ-С в г. Валдай 03.12.2011 г.

3. Повышенное затухание радиоволн в осадках большой интенсивности.

4. Отличие реального распределения размеров капель от закона Маршалла-Пальмера, вызванное, например, следующими явлениями:

– таянием града, при котором образующиеся частицы в среднем больше частиц дождя;

– испарением капель в воздухе, которое приводит к образованию распределений с относительно большим числом крупных капель вблизи поверхности земли;

– сдвигом ветра, который сортирует капли осадков при их выпадении на поверхность земли.

Опыт измерений осадков в радиолокационной системе АКСОПРИ с использованием соотношения Маршалла-Пальмера показывает, что среднеквадратическая ошибка при измерении интенсивности осадков может достигать 300% [13]. Однако, несмотря на это было установлено, что измерение суммы осадков радиолокационным способом все же имеет смысл и становится тем точнее, чем больше интервал осреднения по пространству и времени. Измерения накопленных сумм осадков на интервалах от часа и более имеют удовлетворительную точность. Это подтверждается тем, что в международных проектах по обмену радиолокационными данными в Европе – *OPERA* и *BALTRAD*, карты мгновенной интенсивности и часовые накопленные слои осадков являются основными вторичными продуктами.

2.2.2. Измерение интенсивности осадков по затуханию радиоволн

Данный метод применим в так называемой многопозиционной радиолокации, характеризующейся разнесением в пространстве излучателя и приемника радиоволн. Между ними образуется трасса, условия распространения по которой зависят от метеоусловий и, в частности, от количества и размера дождевых капель (см. рис. 28).

Коэффициент ослабления радиоволн k в осадках (отношение мощности принимаемой волны при наличии осадков на трассе к мощности волны при их отсутствии) равен:

$$k = 0,434 \int_0^{\infty} n(D) Q_D dD, \quad (22)$$

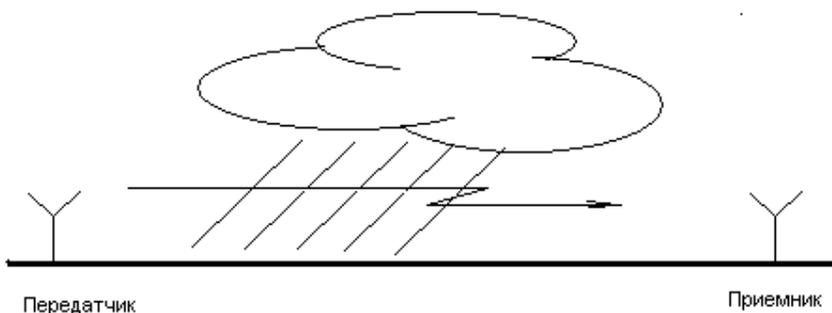


Рис. 28. Схема измерения осадков по затуханию радиоволн

где $n(D)$ – распределение капель по размерам; Q_{ID} – ослабление, вызываемое отдельной каплей и определяемое выражением

$$Q_{ID} = \frac{\lambda^2}{2\pi} \operatorname{Re} \left(\sum (2n+1)(a_n + b_n) \right); \quad (23)$$

λ – длина волны несущего колебания радиолокатора; a_n и b_n – функции Бесселя и Ханкеля от аргументов $\frac{\pi D}{\lambda}$ и m ; D – диаметр капли; m – комплексный показатель преломления.

Связь измеряемого коэффициента ослабления с интенсивностью осадков имеет вид, аналогичный формуле Маршалла-Пальмера

$$k = k_0 I^\gamma, \quad (24)$$

где коэффициенты k_0 и γ также как и в предыдущем случае, уточняются в соответствии с параметрами радиолокатора и условиями окружающей среды.

Метод обладает большей точностью по сравнению с методом оценивания мощности отражений. Однако главный его недостаток – невозможность проведения измерений на большом пространстве ввиду ограниченности участком трассы – делает его малоприменимым для оперативных наблюдений.

2.2.3. Измерение интенсивности осадков по величине собственного излучения метеообразований

Метод применим в пассивной радиолокации или, иначе, радиометрии. В этом случае энергия в пространство не излучается, а фиксируется величина собственного теплового излучения объектов

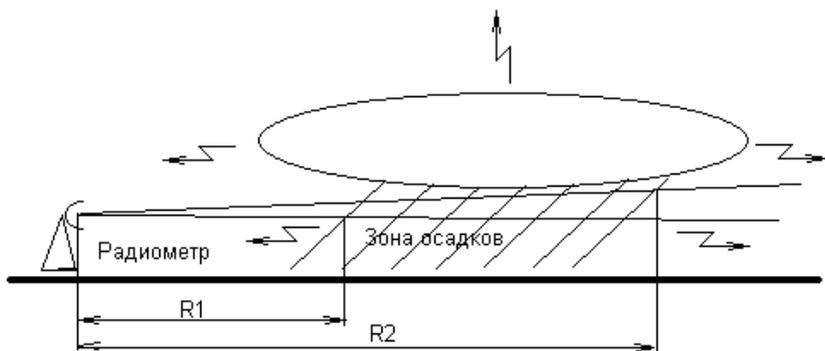


Рис. 29. Схема наблюдения осадков радиометром

наблюдения. Приемник, именуемый в данном случае радиометром, измеряет мощность принимаемого сигнала, пропорциональную антенной температуре (см. рис. 29).

Для измерения интенсивности осадков интерес представляет разница антенных температур при наблюдении осадков и свободной атмосферы, которая связана с интенсивностью осадков I следующей приближенной формулой:

$$\Delta T \approx 0,23k_0 \bar{T}_{OC} \int_{R_1}^{R_2} I(R) dR, \quad (25)$$

где k_0 – коэффициент ослабления радиоволн в осадках в $\frac{\text{дБ/км}}{\text{мм/час}}$; \bar{T}_{OC} – средняя температура осадков; R_1 и R_2 – начальная и конечная наклонные дальности, на которых наблюдаются осадки.

Коэффициенты k_0 и \bar{T}_{OC} являются постоянными величинами для района и сезона проведения наблюдений.

Формула (25) делает явным основной недостаток радиометрических наблюдений – они работают как интегратор осадков на площади их выпадения. В некоторых случаях, например, в сельском хозяйстве, где, как указывалось ранее, важна оценка общего количества осадков, выпавших на больших площадях, этого вполне достаточно. Однако измерить интенсивность осадков в какой-либо выбранной точке радиометр не в силах. Преодоление этого недостатка достигается путем одновременных наблюдений активного радиолокатора и радиометра [5]. В получаемой таким образом пассивно-активной радиолокационной системе объединяются

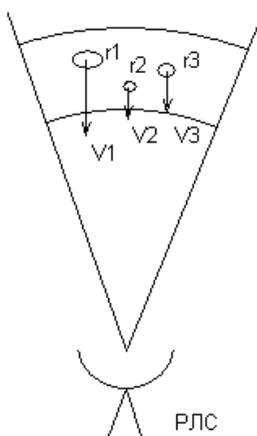


Рис. 30. Схема измерения интенсивности осадков когерентными РЛС

достоинства двух методов. По получаемым оценкам отражаемости определяют границы зоны осадков и предварительные оценки их интенсивности (см. п. 2.4). Далее радиометрическая информация об интегральной интенсивности, получаемая синхронно с радиолокационной, распределяется внутри данной зоны пропорционально отражаемости. В результате точность получаемых оценок значительно повышается.

2.2.4. Измерение интенсивности осадков в когерентных радиолокаторах

Когерентные (доплеровские) радиолокаторы измеряют в дополнение к традиционной радиолокационной отражаемости среднюю радиальную скорость частиц и ширину спектра данных скоростей. Это дает им возможность обнаруживать такие опасные для авиации явления как сдвиг ветра и повышенную турбулентность. Но при работе на применяемых обычно в радиолокационной метеорологии малых углах места антенны (от 0 до 30 градусов) они не имеют никаких преимуществ по сравнению с некогерентной локацией с точки зрения оценки параметров осадков.

Ситуация радикально меняется, если направить антенну строго вверх (см. рис. 30). В этом случае радиальными для локатора становятся скорости свободного падения частиц.

Величина скорости свободного падения частиц функционально связана с их размером. Это приводит к следующему алгоритму оценивания:

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

$$I = \frac{4}{3} \pi \int_0^{\infty} v(r) n(r) r^3 dr, \quad (26)$$

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

По точности данный метод превосходит все остальные дистанционные методы и сравним с точностью традиционных методов. Главный его недостаток – невозможность оценивать параметры осадков на большой территории из-за того, что антенный луч должен быть установлен вертикально. Поэтому применять его в больших и дорогостоящих радиолокаторах экономически неэффективно. Однако сейчас разработаны специальные, основанные на рассмотренном методе измерения, гораздо менее габаритные и более дешевые приборы для использования в автоматических метеостанциях. Пример тому – автоматический бесконтактный осадкомер «Капля».

2.2.5. Измерение интенсивности осадков по величине затухания и дифференциальной фазе отраженного сигнала

Метод недавно разработан и в оперативной практике широко не применяется. Реализация его возможна только в поляризметрических радиолокаторах, т. е. радиолокаторах, способных излучать и принимать радиоволны двух ортогональных поляризаций (как правило, горизонтальной и вертикальной).

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

$$I = c_1(t) c_2(\lambda) A^{1,03}, \quad (27)$$

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

$$A(R) = \frac{[Z(R)]^b C(b, PIA)}{J(R_1, R_2) + C(b, PIA) J(R, R_2)}. \quad (28)$$

Здесь

$$J(R_1, R_2) = 0,46b \int_{R_1}^{R_2} [Z(x)]^b dx; \quad (29)$$

$$J(R, R_2) = 0,46b \int_R^{R_2} [Z(x)]^b dx; \quad (30)$$

$$C(b, PIA) = \exp(0,23bPIA) - 1; \quad (31)$$

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 последнего нам заранее неизвестна, и для ее оценивания используется его зависимость от дифференциальной фазы:

$$PIA(R_1, R_2) = \alpha [\Phi_{DP}(R_1) - \Phi_{DP}(R_2)], \quad (32)$$

где величина постоянной α определяется частотой несущего колебания и может корректироваться в процессе измерений по получаемым оценкам дифференциальной отражаемости Z_{DR} на участке луча от R_1 до R_2 .

Точность метода при наблюдении осадков в радиусе до 100 км в два раза выше, чем при измерении по величине радиолокационной отражаемости. Кроме этого он обладает следующими важными преимуществами, вытекающими из того факта, что измеряемые параметры неэнергетические:

- устойчивостью к частичному блокированию луча;
- отсутствием необходимости калибровать радиолокатор.

На рис. 31 приведены для сравнения карты интенсивности осадков, полученные радиолокатором ДМРЛ-С и рассчитанные обычным (по радиолокационной отражаемости) и новым (по затуханию и поляризационным характеристикам) методам.

2.3. Определение вида осадков

2.3.1. Определение вида осадков в некогерентных РЛС

Некогерентные радиолокаторы, измеряющие только амплитуду принимаемого сигнала, не способны непосредственно определять вид наблюдаемых осадков. Здесь используются косвенные методы, основанные на разнице радиолокационной отражаемости Z частиц воды, находящихся в разных фазовых состояниях. Как уже отмечалось ранее, множитель

$\left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|$, входящий в формулу (20), равен

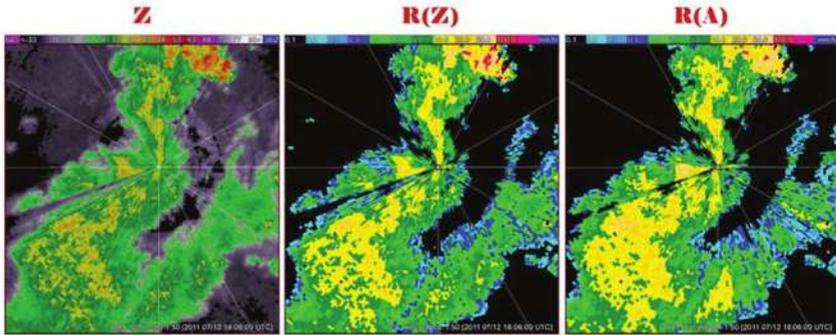


Рис. 31. Карты радиолокационной отражаемости – (слева), интенсивности осадков, рассчитанной по отражаемости – (в центре), и интенсивности осадков, рассчитанной по затуханию радиоволн и поляризационным характеристикам – (справа)

0,93 для воды и 0,197 для льда с единичной плотностью. С учетом этого значительного различия (более чем в 4 раза), вопрос о том, жидкие или твердые осадки мы наблюдаем, решается на основании температуры окружающего воздуха. Только в случае появления в холодный период года участка с аномально большой отражаемостью он идентифицируется как участок с переохлажденной водой.

2.3.2. Определение вида осадков в поляриметрических РЛС

В основе поляриметрических методов селекции осадков лежит эффект сжатия капли воды в вертикальной плоскости при ее свободном падении в атмосфере. 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 пропорциональна ее размерам, по величине дифференциальной отражаемости можно судить о среднем размере частиц, составляющих осадки (см. рис. 32).

Твердые 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.

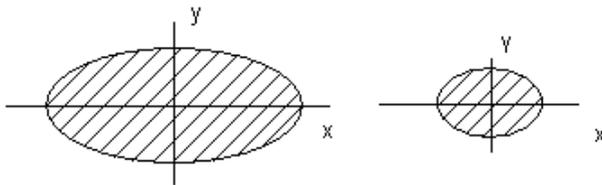


Рис. 32. Схематическое представление формы деформированной капли при свободном падении в зависимости от ее размеров

Наилучшие результаты дает одновременное использование нескольких параметров. Например, анализ радиолокационной и дифференциальной отражаемостей позволяет идентифицировать следующие метеорологические цели:

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

Привлечение еще одного поляризационного параметра – модуля коэффициента взаимной корреляции поляризационных составляющих сигнала – увеличивает надежность правильной идентификации наблюдаемых целей. К сожалению, в отечественных программах вторичной обработки информации данная функция не предусмотрена. Поэтому иллюстрировать возможности поляриметрического радиолокатора в этом плане приходится чужими примерами. На рис. 33 представлены карты радиолокационной отражаемости (а), дифференциальной отражаемости (б), модуля коэффициента взаимной корреляции (в) и природных явлений (г) одного и того же облачного массива.

В передней части облачного массива 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 (НР на карте явлений). Далее следует область, характеризующаяся средними значениями обеих отражаемостей (24–28 дБ для радиолокационной и около 0,5 дБ для дифференциальной). Следовательно, это умеренный дождь, обозначаемый символом RA на рис. 33 г.

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 33 в явно видно уменьшение модуля коэффициента взаимной корреляции в этой области до величины 0,85, что однозначно идентифицирует ее как мокрый снег (*WS*).

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

2.4. Измерение протяженности, продолжительности и структуры осадков

В некогерентной радиолокации за осадки принимаются все отражения, получаемые в слое от 0 до 1 км. Линейный размер области, занимаемой этими отражениями, в интересующем направлении и есть в данном случае протяженность осадков. Их продолжительность в выбранной точке определяется как произведение числа обзоров, при которых над ней фиксировались отражения в указанном слое, на интервал между соседними обзорами.

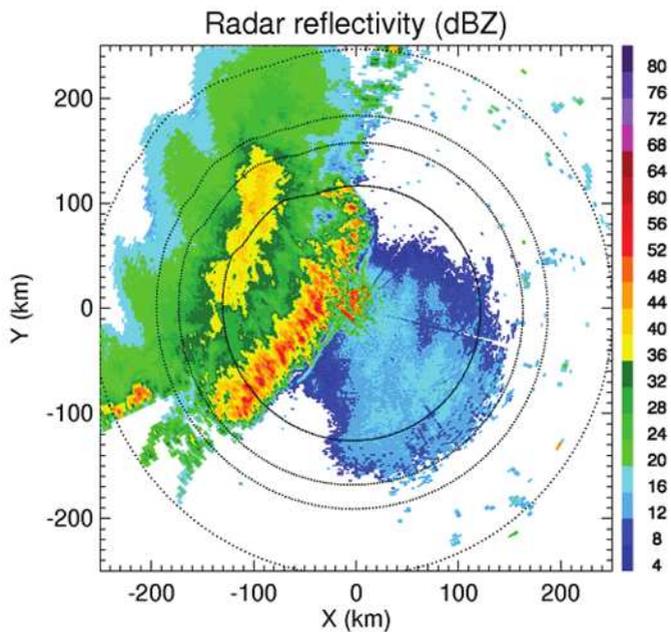
Радары с двумя поляризационными каналами имеют возможность разделять наблюдаемые цели на метеорологические и иные. Так по значению дифференциальной отражаемости идентифицируются и исключаются из рассмотрения следующие объекты, часто попадающие в зону видимости локатора:

- скопления птиц или насекомых, которым соответствуют очень большие (более 10 дБ) значения Z_{DR} ;
- местные предметы («местники»), характеризующиеся отрицательными значениями Z_{DR} .

Еще большими возможностями в делении целей на метеорологические и не метеорологические обладает коэффициент взаимной корреляции. Его значение близко к единице для первых и гораздо меньше ее для вторых. Это дает возможность дополнительно к уже перечисленным объектам наблюдения распознавать пыльные бури, пассивные помехи и т. д.

Пример идентификации «местников» и области скопления насекомых перед надвигающимся атмосферным фронтом можно видеть на том же рисунке 32, где указанные зоны обозначаются буквами GC и BS соответственно.

a)



b)

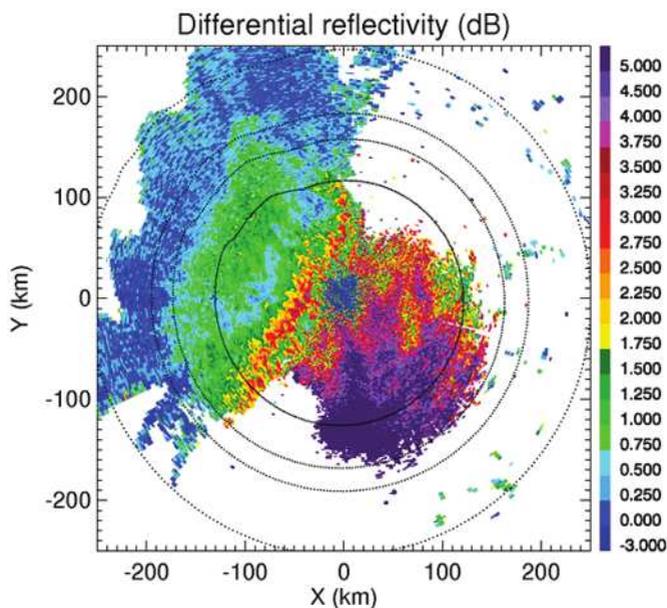
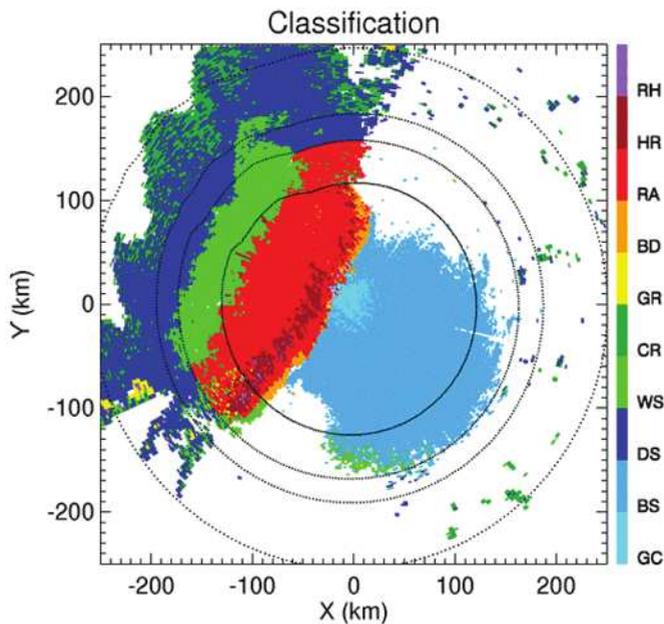


Рис. 33 (начало). Карты радиолокационной отражаемости – (a), дифференциальной отражаемости – (b), модуля коэффициента взаимной корреляции – (в) и природных явлений – (г)

б)



в)

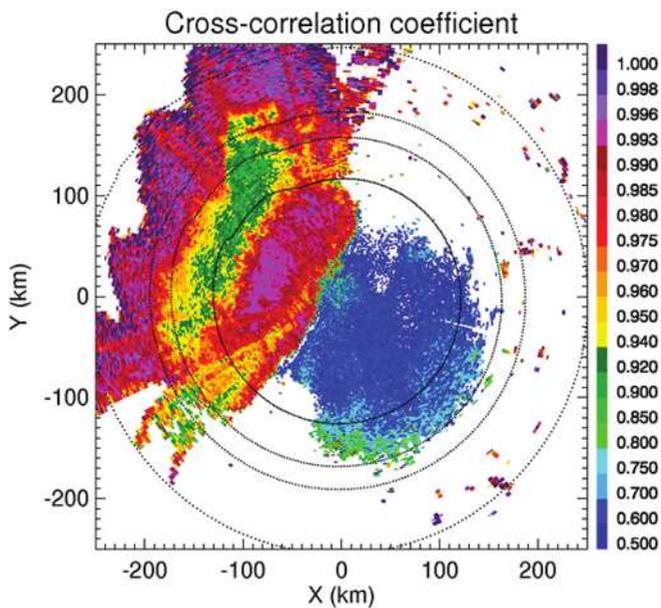


Рис. 33 (окончание). Карты радиолокационной отражаемости – (а), дифференциальной отражаемости – (б), модуля коэффициента взаимной корреляции – (в) и природных явлений – (г)

Способностью измерять структуру осадков, т. е. распределение составляющих их частиц по размерам обладают только когерентные метеорологические радиолокаторы и только при вертикальном расположении луча антенны. Принцип их работы уже был рассмотрен ранее, в п. 2.2.4.

3. Радиолокационное измерение параметров ветра

Измерять параметры ветра способны только когерентные (иначе доплеровские) радиолокаторы. Причем в отличие от классического измерителя параметров скорости ветра, который получает осредненные по времени величины в одной точке пространства, когерентный метеорологический радиолокатор получает величины, осредненные по всему разрешаемому объему в выбранный момент времени. Но его главное отличие и самый большой недостаток состоит в том, что он измеряет не сам вектор скорости, а лишь его проекцию на ось луча антенны, т. е. радиальную составляющую этого вектора.

На практике же в подавляющем большинстве случаев надо знать истинную величину скорости ветра и его направление. Для их измерения с помощью радиолокатора приходится использовать специальные методы.

3.1. Использование двух и более радиолокаторов

Очевидно, что синхронное измерение двумя радиолокаторами радиальных скоростей дает возможность восстановить полный вектор скорости в горизонтальной плоскости (рис. 34).

Но одно только совмещение центров импульсных объемов двух метеорологических радиолокаторов представляет собой достаточно трудную техническую проблему с учетом осуществления ими динамического сканирования области зондирования. Действительно, наиболее распространенная протяженность зондирующего импульса таких радаров – 150 м. Следовательно, на расстоянии 50 км угол, под которым второй радар видит этот отрезок, составляет:

$$\theta = \frac{0,15}{50} = 0,003 \text{ рад} = 0,17 \text{ град.} \quad (33)$$

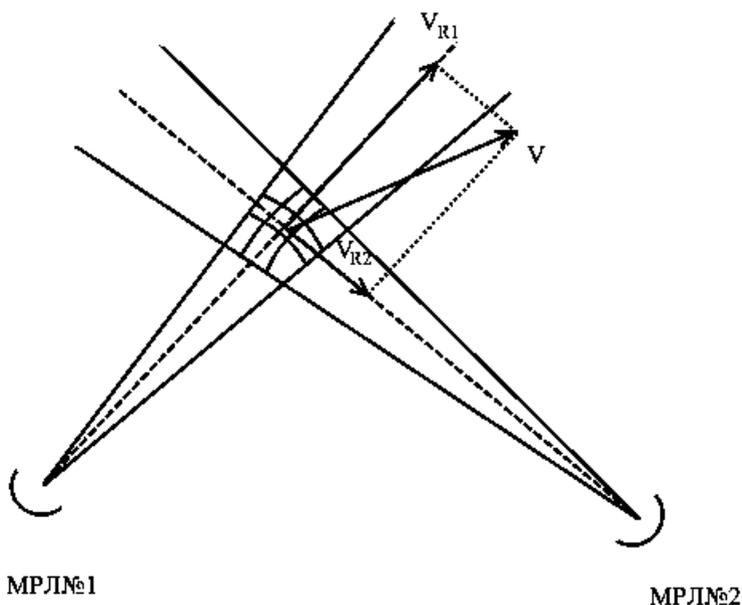


Рис. 34. Схема измерения вектора горизонтальной скорости ветра при помощи двух радиолокаторов

Из анализа этого соотношения следует, что точность, с которой должна устанавливаться антенна каждого радиолокатора, должна быть не хуже 0,1 градуса, что обеспечивается не во многих современных устройствах. Но даже после решения данной инженерной задачи, остаются проблемы с совмещением элементов разрешения, по объему которых усредняется значение радиальной скорости. Из схемы, приведенной на рис. 34, видно, что эти элементы не совпадают и повернуты один относительно другого. При ширине луча антенны 1 градус на расстоянии 50 км их линейные поперечные размеры равны 870 метрам. Следовательно, при уже упомянутой продольной протяженности элемента разрешения 150 м, общий объем этих двух элементов составит примерно 17 %. Это означает, что скорости, измеряемые каждым из MRЛ, относятся к совершенно разным областям пространства и фактически никак не связаны между собой.

Сложности технической реализации и проблемы с интерпретацией результатов измерений обусловили то, что предпочтение отдается другим методам оценивания параметров скорости ветра.

3.2. Восстановление среднего значения вектора скорости в горизонтальном слое по результатам конических разрезов

Идея метода состоит в том, что в процессе сканирования окружающего пространства угол между вектором скорости и осью луча антенны постоянно изменяется (см. рис. 35 и 36).

Таким образом, в процессе обзора локатором окружающего пространства мы получаем массив оценок средней радиальной скорости частиц для каждого элемента разрешения, расположенного в рассматриваемом слое и заполненном частицами метеорологического образования:

$$\tilde{V}_{Rij} = V \cos(\theta - \alpha_i) \cos \beta_j, \quad (34)$$

где V , θ – величина и направление вектора средней по слою горизонтальной скорости ветра, α_i , β_j – текущие значения азимута и угла места антенны радиолокатора.

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

$$F = \sum_{i,j} \left(\tilde{V} \cos(\tilde{\theta} - \alpha_i) \cos \beta_j - \tilde{V}_{Rij} \right)^2. \quad (35)$$

Иными словами, надо подобрать такие значения искомых величин, при которых функция F принимает минимальное значение. Как известно, для этого достаточно решить следующую систему уравнений:

$$\frac{dF}{d\tilde{V}} = 0, \quad (36)$$

$$\frac{dF}{d\tilde{\theta}} = 0. \quad (37)$$

Пример восстановленных таким образом параметров вектора средней по рассматриваемому слою скорости ветра приведен на рис. 37.

Рассчитывая подобным образом скорость ветра для различных горизонтальных слоев окружающего пространства, получают вертикальный профиль ветра, представленный на рис. 38.

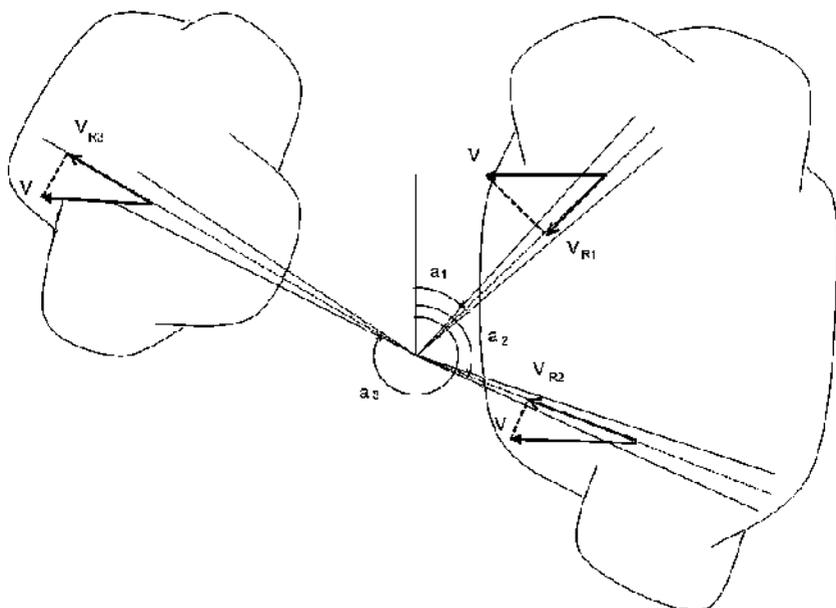


Рис. 35. Изменение радиальной составляющей скорости ветра V_R при сканировании антенны в горизонтальной плоскости

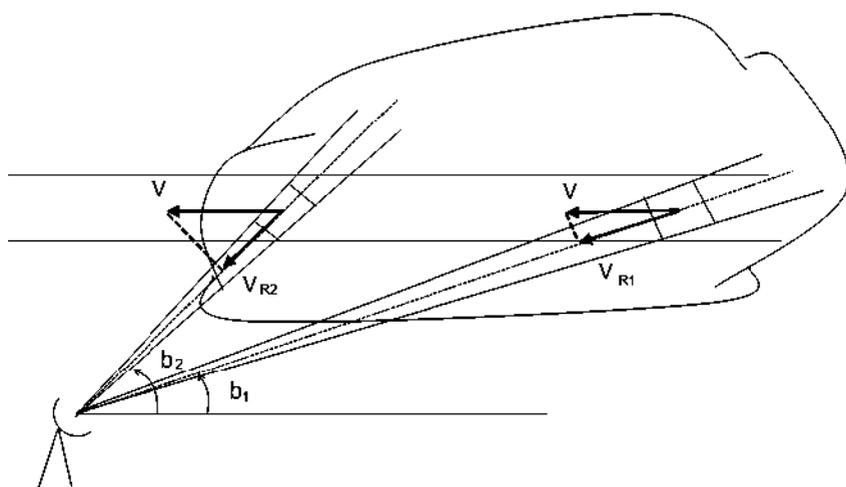


Рис. 36. Изменение радиальной составляющей скорости ветра V_R при сканировании антенны в вертикальной плоскости

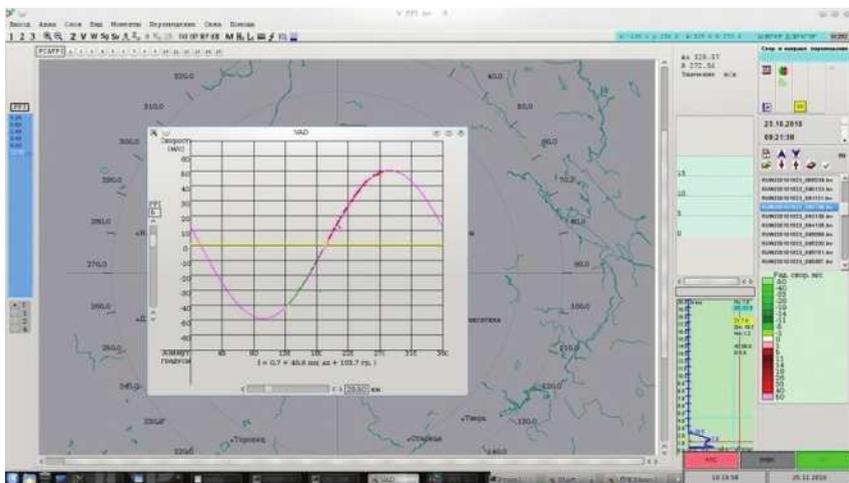


Рис. 37. Пример представления на экране дисплея азимутальной скорости (VAD) для радиолокатора ДМРЛ-С

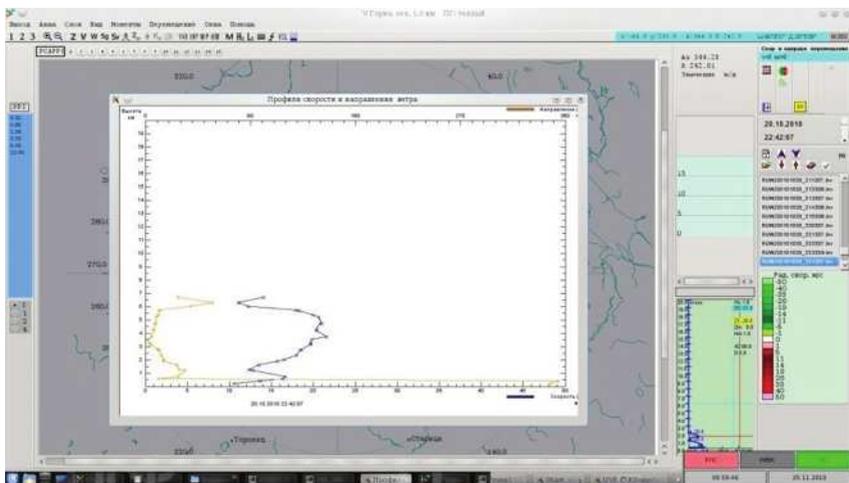


Рис. 38. Пример представления результатов расчета вертикального профиля ветра (WP) для радиолокатора ДМРЛ-С

3.3. Восстановление структуры поля ветра в горизонтальном слое

Иногда на практике бывает недостаточно измерять только среднее значение вектора скорости и необходимо получить более подробную картину распределения его параметров по просматриваемому пространству. В этом случае используется тот же алгоритм оценивания среднего значения с тем отличием, что теперь интересующий горизонтальный слой разбивается на области, внутри которых вектор скорости ветра считается постоянным и реализуется уже рассмотренная процедура. Подробность восстановления поля ветра зависит от размеров выбранных областей. Чем они меньше, тем ближе фиксируемая радиолокатором картина к реальному распределению вектора скорости ветра по пространству.

Пример подобного расчета приведен на рис. 39.

4. Радиолокационное распознавание опасных явлений погоды

4.1. Распознавание опасных явлений погоды в некогерентных радиолокаторах

Своевременное распознавание опасных явлений погоды, прогнозирование их развития и направления распространения – основная задача метеорологической радиолокации. Алгоритмы ее решения зависят от того, каким арсеналом средств снабдили данный радар его разработчики. Иначе, является он некогерентным, когерентным или поляриметрическим.

Некогерентный радиолокатор измеряет только мощность принимаемых отражений. По ее величине и координатам области пространства, из которого она получена, оценивают степень опасности наблюдаемого явления и идентифицируют его. К числу опасных явлений, распознаваемых таким образом, относятся:

- ливень;
- гроза;
- град.

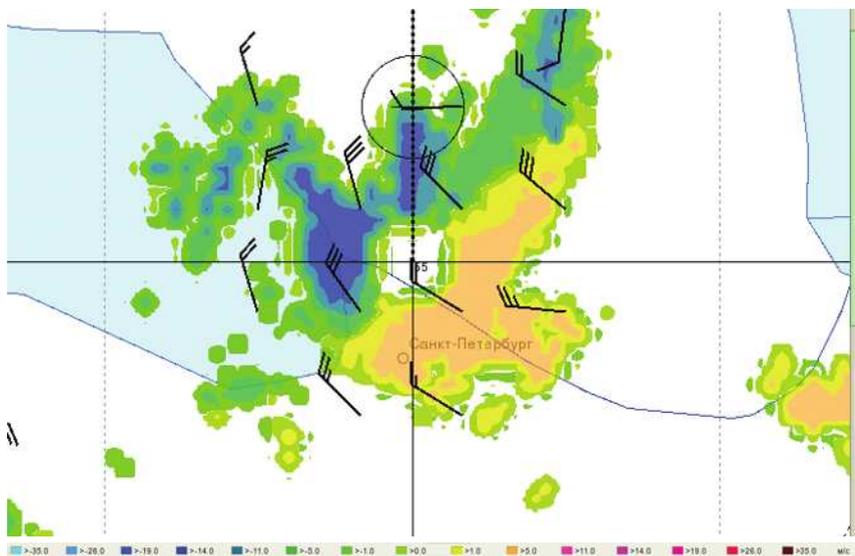
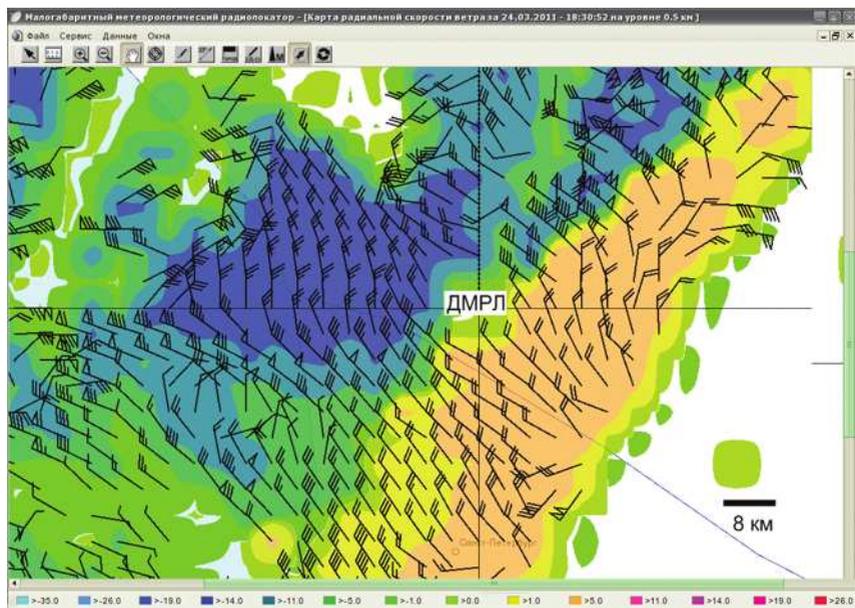


Рис. 39. Рассчитанное по данным малогабаритного метеорологического радиолокатора «Зодиак» поле ветра на высоте 0,5 км при размере области осреднения 8×8 км (вверху) и на высоте 2 км при размере области осреднения 20×20 км (внизу)

Ливень – единственное опасное явление, обнаруживаемое некогерентным радиолокатором непосредственно. Главное свойство ливня, как и любых других осадков, – создание отражений в области пространства, расположенной непосредственно над землей. Поэтому всякая обнаруживаемая им пространственно распределенная цель, находящаяся ниже уровня 1 км, однозначно трактуется как осадки, а их интенсивность рассчитывается по оценке радиолокационной отражаемости в соответствии с формулой Маршалла-Пальмера. Если интенсивность осадков превышает уровень 3 мм в час, их идентифицируют как ливень и область его существования наносят на карту опасных явлений, как это показано, например, на рис. 40.

Гроза не может быть определена радиолокатором непосредственно, т. к. он не в силах зафиксировать сам факт молниевых разрядов. Радиолокационный приемник настроен на тот сигнал, который излучается его же передатчиком. Поэтому любой другой сигнал, в том числе и электромагнитный импульс, возникающий при молниевом разряде, воспринимается им как помеха и по возможности подавляется системой обработки. Существует еще возможность увидеть не саму молнию, а канал, по которому происходит разряд. В виду того, что он представляет собой явно выраженную



Рис. 40. Карта явлений погоды, полученная малогабаритным метеорологическим радиолокатором «Контур МЕТЕО-01» 11.08.2011 года

атмосферную неоднородность, зондирующий сигнал радиолокатора будет от него отражаться и беспрепятственно проходить по приемному тракту. Но время существования данного канала очень мало, а его координаты заранее вычислены быть не могут. Поэтому вероятность попадания молниевых каналов в луч антенны фактически равна нулю.

Остается использовать косвенные характеристики – особенности пространственного распределения радиолокационной отражаемости наблюдаемого объекта. На основе исследований данных особенностей был выработан специальный Y -параметр, определяемый по формуле:

$$Y = H \lg Z_3, \quad (38)$$

где H – верхняя граница радиоэхо наблюдаемого объекта, $\lg Z_3$ – радиолокационная отражаемость на высоте 2–2,5 км над нулевой изотермой.

Если он превышает некоторый порог $Y_{\text{кр}}$, облако считается грозоопасным. Значение самого порога вычисляется по формуле:

$$Y_{\text{кр}} = H_{-22^\circ\text{C}} \lg Z_{3\text{min}}, \quad (39)$$

где $H_{-22^\circ\text{C}}$ – высота изотермы -22°C , $\lg Z_{3\text{min}}$ – минимальное значение $\lg Z_3$ в грозах, определяемое индивидуально для каждого места установки радиолокатора и постоянно корректируемое по мере накопления статистических данных.

В зависимости от полученного значения Y -параметра гроза прогнозируется с различной вероятностью:

- 70 %, если он больше $Y_{\text{кр}}$;
- 70 % – 90 %, если он больше $Y_{\text{кр}} + 6$;
- 90 %, если он больше $Y_{\text{кр}} + 14$.

Пример наблюдения грозы представлен на рис. 41.

Град также не может быть обнаружен некогерентным радиолокатором непосредственно. Использовать тот факт, что ледяные частицы создают отражения как минимум на порядок меньшей мощности, чем частицы воды такого же размера, не представляется возможным, т. к. эхо-сигналы такого же уровня могут формироваться малоразмерными каплями. Кроме того, при таянии градины покрываются тонким слоем воды и тогда мощность отражаемых ими электромагнитных волн резко увеличивается, становясь равной мощности, отражаемой каплей воды того же размера, что и градина. Поэтому решение о грозоопасности наблюдаемого облака принимается при выполнении одного из следующих пяти косвенных критериев:

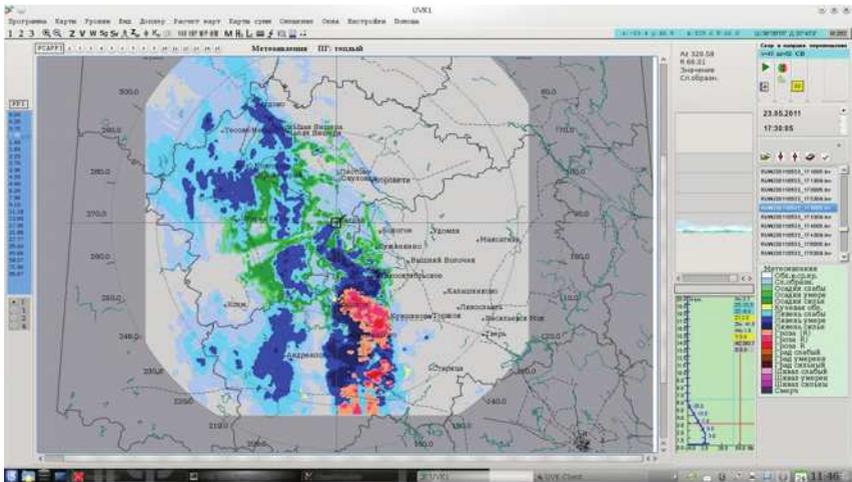


Рис. 41. Пример наблюдения грозы метеорологическим радиолокатором ДМРЛ-С

1. Превышение отражаемостью наблюдаемого облака на любом уровне порога $\lg Z = 2,8$.

2. При верхней границе облака, превосходящей 10 км, превышение отражаемостью наблюдаемого облака на любом уровне порога $\lg Z = 3,7$.

3. При верхней границе облака, превосходящей 10 км, одновременное выполнение условий $\lg Z_2 \geq 2,8$, $\lg Z_3 \geq 2,8$, $\lg Z_4 \geq 2,8$, где Z_2 и Z_4 – отражаемости участков облака, расположенные на высотах от 2 до 4 и от 4 до 6 км соответственно.

4. Превышение Y -параметром значения некоторого параметра, величина которого зависит от географического района, в котором расположен радиолокатор.

5. При дальности цели не более 50 км превышение отражаемостью части облака, расположенной на высоте 1,4 км над нулевой изотермой, значения $\lg Z_T = 2,8$.

На этом фактически исчерпываются возможности некогерентного метеорологического радиолокатора в определении опасных явлений погоды.

4.2. Распознавание опасных явлений погоды в когерентных радиолокаторах

Когерентный режим значительно расширяет список идентифицируемых опасных явлений. К тем, что обнаруживались некогерентным радиолокатором, добавляются [2]:

- зоны сильного ветра;
- смерчи;
- фронты порывистости;
- области сдвига ветра;
- зоны повышенной турбулентности;
- микрошквалы.

Зоны сильного ветра и фронты порывистости проявляются на карте радиальных скоростей в виде областей повышенного значения параметра или его значительного градиента, а зоны повышенной турбулентности и сильного сдвига ветра в виде таких же областей на карте ширины спектра [17]. Примером может служить рис. 42, где представлены карты среднего значения (*a*) и ширины спектра (*b*) радиальных скоростей частиц, полученные американским радаром *WSR-88D*.

На верхней карте хорошо видна область высоких скоростей около 26 км/с с координатами 20 км на запад и 20 км на юг от центра, имеющая вид красного пятна. Ветер здесь направлен от радиолокатора. Вторая область с меньшими, но тоже высокими скоростями (примерно 25 м/с) наблюдается в виде зеленой зоны, удаленной от центра на 60 км к северу и 40 км к западу. Здесь направление противоположенное.

На нижней карте вторая область высоких скоростей окружена зонами повышенной ширины спектра (красные пятна), связанными с сильным сдвигом ветра. Это говорит о локальной неоднородности ветра, т. е. о большой порывистости.

Одновременно на обеих картах на расстоянии примерно 40 км к западу хорошо просматривается фронт порывистости в виде тонкой полосы, протянутой с юга на север. Это вытекающий из облака холодный воздух, движущийся далеко перед облаком, и вбирающий в себя насекомых, пыль, листья и т. п. На карте средних скоростей он виден в виде дуги градиента скоростей – перед ним скорости нулевые, а после него положительные. На карте ширины спектра ему соответствует дуга больших значений параметра.

Способ обнаружения смерча зависит от того, как соотносятся его размеры с размерами разрешаемого объема радиолокатора (области пространства, ограниченной диаграммой направленности

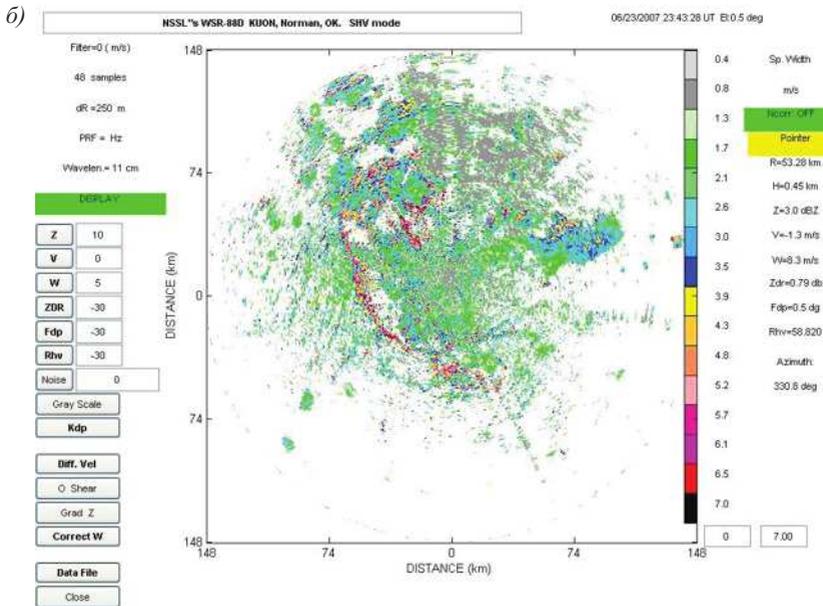
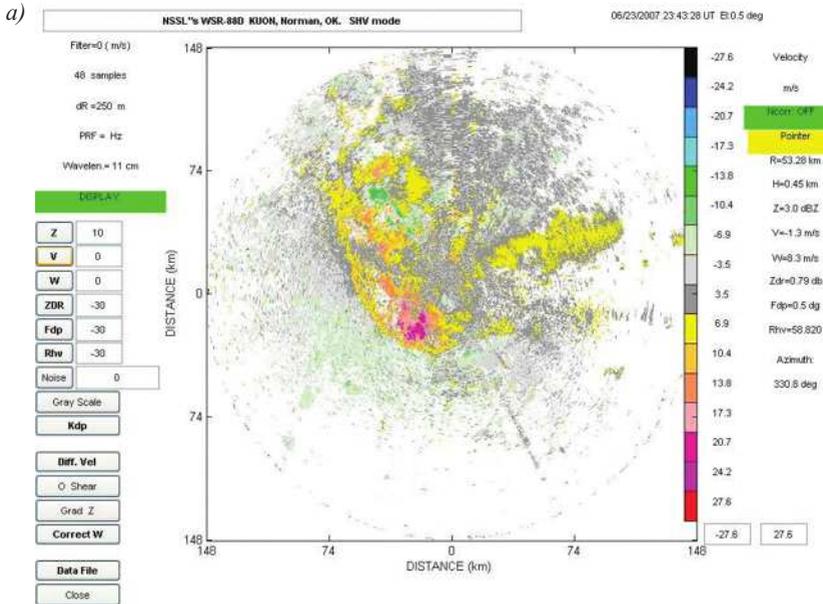


Рис. 42. Одновременно полученные карты средних значений (а) и ширины спектра (б) радиальных скоростей частиц метеорологического образования

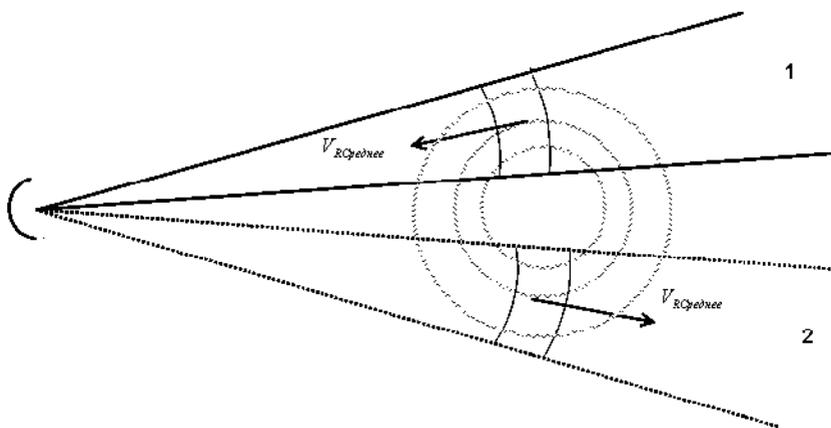


Рис. 43. Схема образования скачка средней радиальной скорости отражений от смерча при перемещении луча антенны в горизонтальной плоскости из положения 1 в положение 2

антенны и длительностью импульса на выходе приемника). 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 рис. 43.

Случай наблюдения смерча представлен на рис. 44.

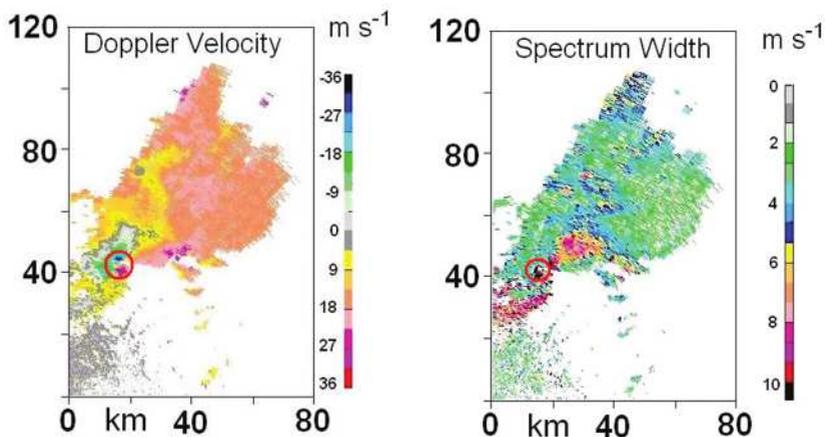


Рис. 44. Случай наблюдения смерча метеорологическим радиолокатором *WSR-88D*. Карта средних радиальных скоростей (вверху) и ширины спектра скоростей (внизу)

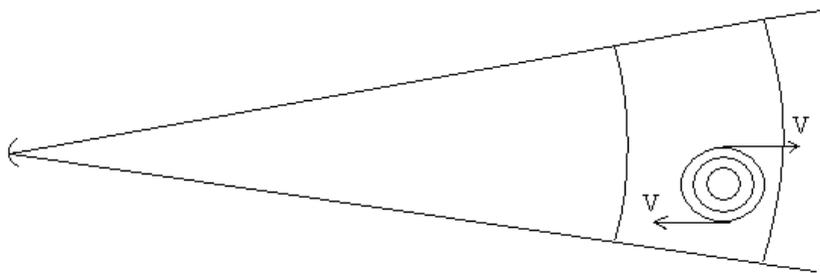


Рис. 45. Схема наблюдения смерча в случае, когда его размеры не превосходят размеров элемента разрешения радиолокатора

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

В случае же превышения размеров смерча над размерами разрешаемого объема радиолокатора (рис. 45) зафиксировать скачок средней радиальной скорости практически невозможно. В этих условиях единственный способ обнаружить смерч – зафиксировать область повышенного значения ширины спектра скоростей, образующуюся при попадании в антенный луч быстро вращающегося вихря. Но однозначно трактовать наблюдаемую ситуацию уже нельзя, т. к. к такому же расширению спектра приводят другие природные явления – повышенная турбулентность, сдвиг ветра и т. д.

Поскольку на практике, как правило, размеры смерча малы по сравнению с разрешаемым объемом радиолокатора, обнаружение смерча по результатам спектрального анализа принимаемого сигнала – явление редкое.

Микрошквал – резкое нисходящее движение небольшого объема воздуха – наиболее трудно обнаруживаемое явление из приведенного списка. В отличие от остальных непосредственное его обнаружение невозможно, т. к. влияние вертикальной составляющей скоростей частиц на величину радиальной скорости составит существенным только при больших углах возвышения антенны, а, значит, на очень небольшом расстоянии от радара. Поэтому в основу поиска данного явления положено измерение дивергенции (растекания) средних радиальных скоростей в смежных по дальности элементах разрешения, расположенных в приземном слое. Для этого при близком к нулевому значению углу возвышения антенны вычисляют разницу оценок средней скорости в объемах, расположенных перед и после исследуемой дальности (рис. 46).

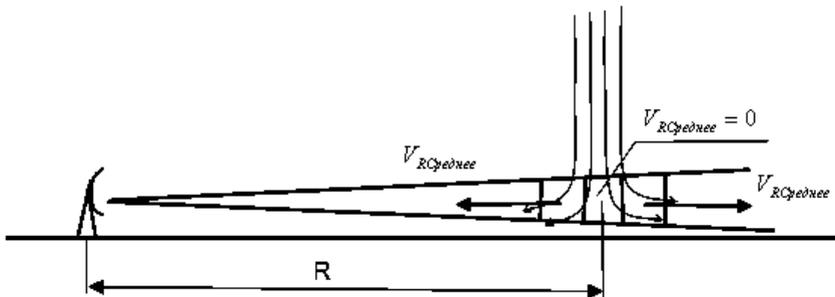


Рис. 46. Схема распознавания микроквала по дивергенции средних радиальных скоростей

4.3. Распознавание опасных явлений погоды в поляриметрических радиолокаторах

Дальнейшее расширение списка обнаруживаемых опасных явлений погоды возможно только введением режима поляризационных измерений. Из всех измеряемых радиолокатором параметров для рассматриваемой нами проблемы обнаружения опасных явлений интерес представляют только дифференциальная отражаемость и модуль коэффициента взаимной корреляции. Их использование дает возможность с большой надежностью идентифицировать уже упоминавшиеся смерч и град, а также обнаруживать ряд новых опасных явлений:

- область переохлажденной воды;
- скопления птиц и насекомых;
- пыльные бури.

Обнаружение смерча с помощью поляризационных измерений основывается на том, что смерч в ходе своего существования всасывает в себя пыль и различные предметы, т. е. часть составляющих его частиц не относится к метеорологическим. Соответственно значение модуля коэффициента взаимной корреляции поляризационных составляющих отраженной волны падает до некоторого значения, являющегося промежуточным между чисто метеорологической и полностью не метеорологической целью. Именно появление участка с уменьшенным относительно уровня 0,98–1 значением данного параметра является надежным признаком существования смерча. Одновременно с этим в рассматриваемой области уменьшается значение дифференциальной отражаемости, т. к. попавшие внутрь смерча пыль и инородные предметы ориентированы в пространстве

хаотически и формируют эхо-сигнал с нулевым значением указанного параметра. Пример наблюдения смерча приведен на рисунке 47.

Град поляриметрическим радиолокатором в отличие от некогерентного обнаруживается непосредственно. Поскольку градины имеют, как правило, округлую форму и хаотично ориентированы в пространстве, дифференциальная отражаемость принимаемого от них сигнала равна нулю, что явно выделяет их на фоне капель воды, характеризующихся положительным значением данного параметра. Одновременно тающий град выявляется и на карте модуля коэффициента взаимной корреляции в виде области пониженного значения параметра, как это видно на рис. 48.

Обнаружение области переохлажденной воды, представляющей опасность для летательных аппаратов ввиду их возможного оледенения, представляет собой задачу, противоположную той, что была только что рассмотрена. Здесь надо искать зону с положительной дифференциальной отражаемостью на фоне частиц льда, для которых характерно ее значение, близкое к нулю. Если же такая область

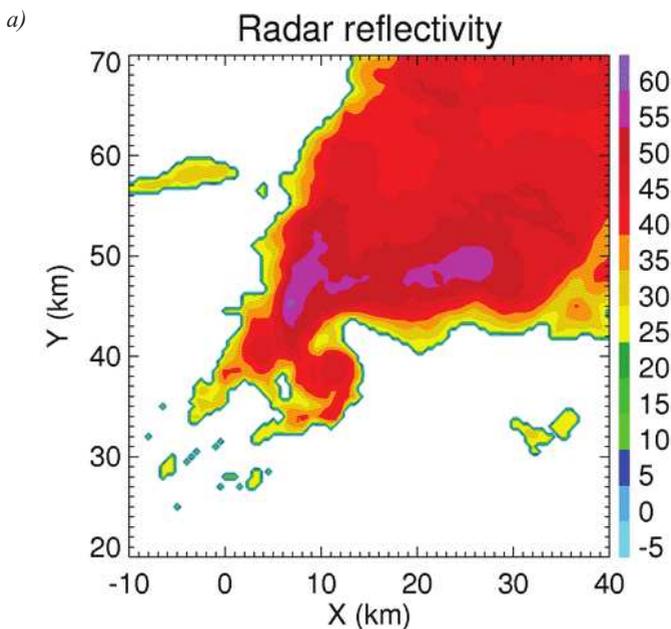


Рис. 47 (начало). Пример наблюдения смерча на картах радиолокационной отражаемости (а), дифференциальной отражаемости (б) и модуля коэффициента взаимной корреляции (в), полученных поляриметрическим радиолокатором

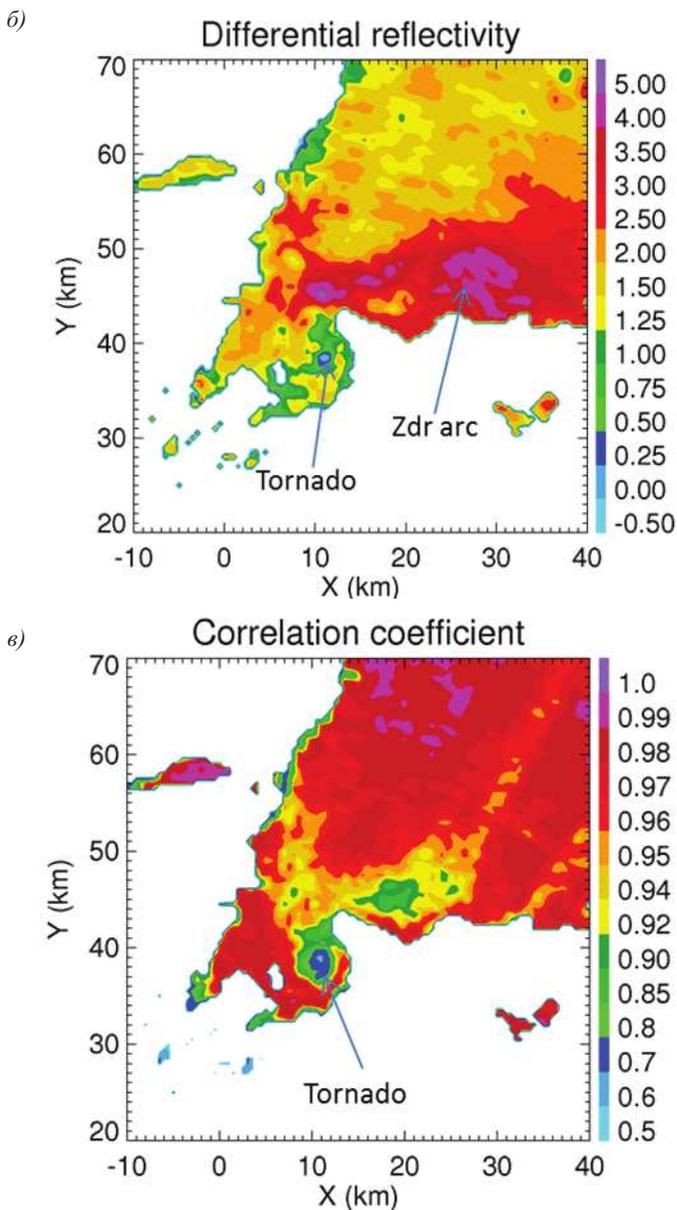


Рис. 47 (окончание). Пример наблюдения смерча на картах радиолокационной отражаемости (а), дифференциальной отражаемости (б) и модуля коэффициента взаимной корреляции (в), полученных поляриметрическим радиолокатором

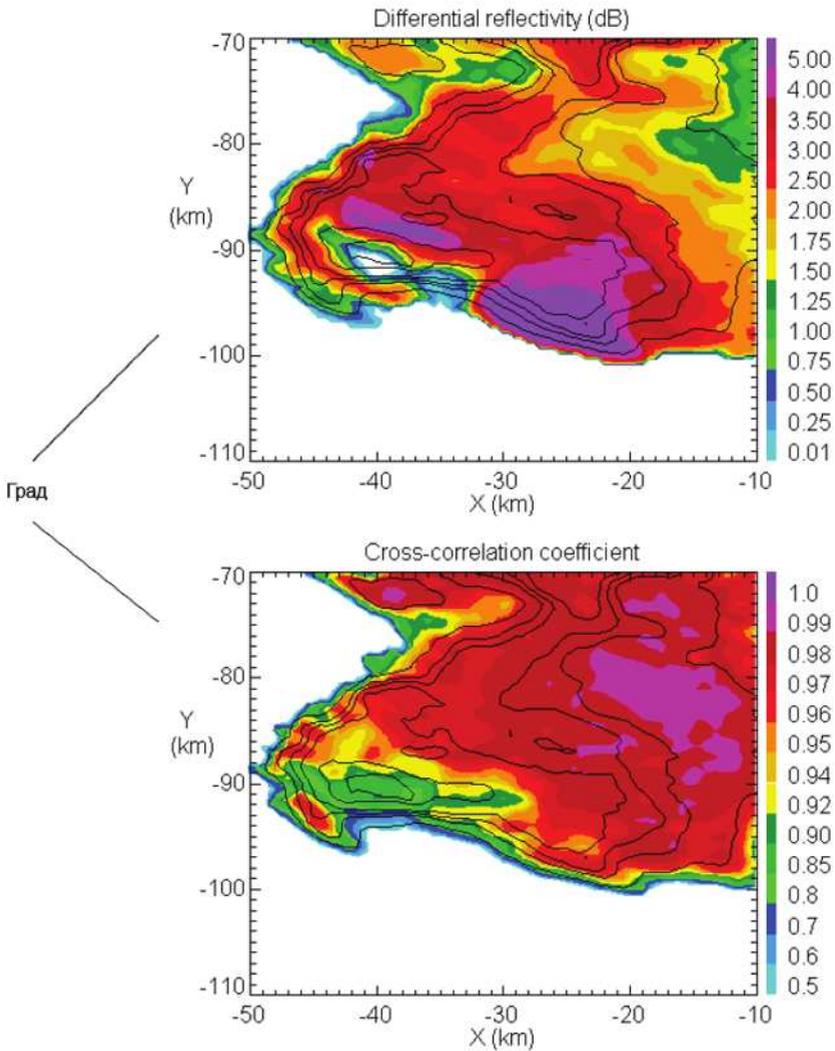


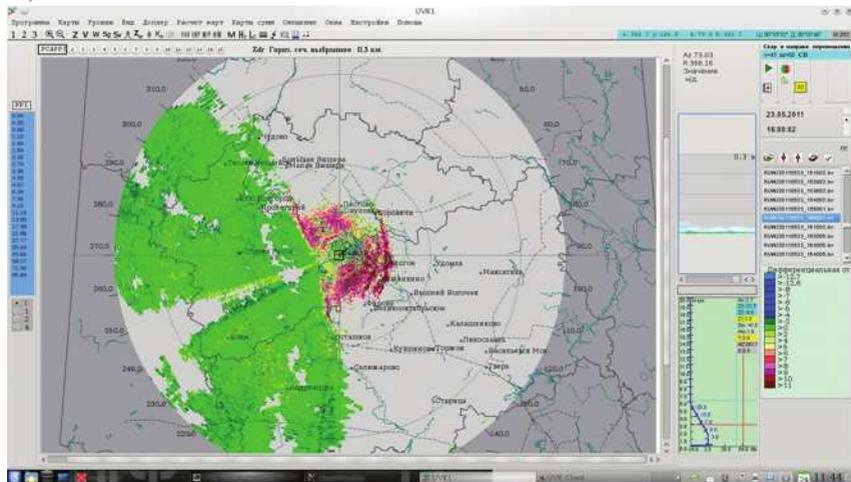
Рис. 48. Пример наблюдения града на картах дифференциальной отражаемости и модуля коэффициента взаимной корреляции

существует в чистом небе, то признаком ее опасности служит расположение выше уровня нулевой изотермы.

Скопление птиц и насекомых, также опасных для авиации, распознается по очень большому значению дифференциальной отражаемости (более 10 дБ). Это вызвано тем, что отношение горизонтального

размера к вертикальному у данного вида целей гораздо больше того, что может быть у капель воды. Одновременно они, не являясь метеорологическим образованием, отражают сигнал с малым значением модуля коэффициента взаимной корреляции. Пример обнаружения подобного опасного явления показан на рис. 49.

а)



б)

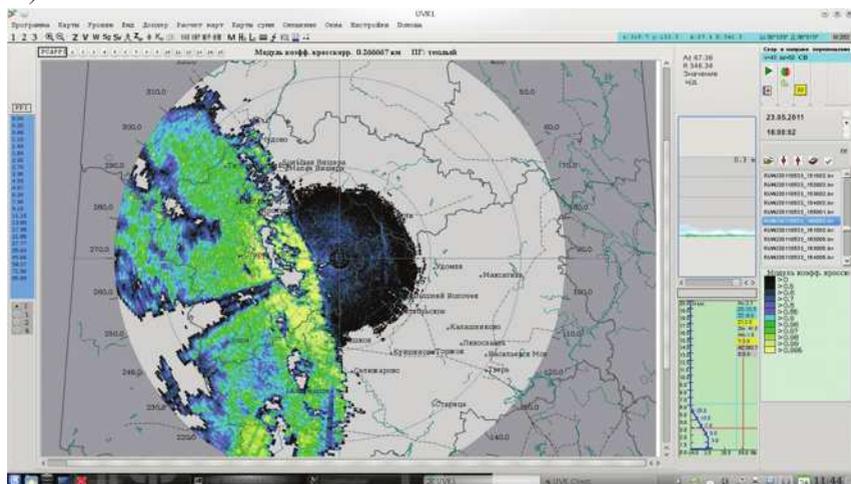


Рис. 49. Пример наблюдения зоны скопления птиц и насекомых в области перед наступающим атмосферным фронтом на картах дифференциальной отражаемости (а) и модуля коэффициента взаимной корреляции (б)

Пыльная буря может быть идентифицирована по малому значению модуля коэффициента взаимной корреляции создаваемых ею как не метеорологической целью отражений, и нулевому значению дифференциальной отражаемости, обуславливаемому тем, что составляющие пыльную бурю частицы могут быть и не круглые, но совершенно не ориентированы в пространстве.

5. Валидация данных, полученных с помощью доплеровских метеорологических радиолокаторов

5.1. Общие вопросы валидации и верификации радиолокационных данных

Согласно стандарту, валидация (*validation* – придание законной силы) определена следующим образом: «Подтверждение на основе представления объективных свидетельств того, что требования, предназначенные для конкретного использования или применения, выполнены».

Верификация (*verification* – проверка) – подтверждение на основе представления объективных свидетельств того, что установленные требования были выполнены.

Разница между валидацией и верификацией заключается в том, что валидация подтверждает, что «создан правильный продукт», а верификация подтверждает, что «создан продукт так, как и намеревались это сделать».

Важное отличие верификации и валидации заключается в том, что верификация производится практически всегда. Верификация выполняется методом сравнения данных, получаемых радиолокационными (дистанционными) и наземными средствами наблюдения. На основе такого сопоставления делается вывод о принципиальной возможности определения тех или иных метеорологических параметров или явлений с помощью ДМРЛ. Верификация обычно производится создателями радиолокационной техники и математического обеспечения ДМРЛ для того, чтобы убедить потребителей

в возможности определения радиолокационными методами тех или иных параметров для их практического применения.

Необходимость в валидации возникает не всегда. Она появляется только тогда, когда возникают требования, связанные с конкретным применением тех или иных радиолокационных технологий в конкретных условиях. Например, когда необходимо подтвердить возможность практического использования радиолокационных данных для метеорологического обеспечения авиации в условиях данного района тропической зоны или в Арктике. Валидация – это подтверждение на основе представления объективных свидетельств возможности определения радиолокационными методами тех или иных метеорологических параметров или явлений, но уже в конкретных специфических условиях.

В общем случае валидация – это подтверждение соответствия конечного продукта predetermined эталонным требованиям. Применительно к радиолокации – это проверка правильности получаемых метеорологической радиолокационной станцией оценок метеорологических параметров путем их сопоставления с заранее задаваемыми или известными значениями этих же параметров.

Из приведенного определения следует, что для проведения рассматриваемой процедуры, прежде всего, необходимо иметь эталонную цель, характеристиками которой можно каким-то образом управлять или измерять их каким-либо независимым от радиолокатора способом.

Например, в классической радиолокации, занимающейся наблюдением точечных целей, таким эталоном может служить летательный аппарат. Координаты, направление движения и скорость последнего могут быть заранее заданы и с большой точностью контролироваться навигационными системами. К сожалению, метеорологические РЛС лишены такой возможности, т. к. объектами их наблюдений служат облака, осадки и другие явления природы, характеристики которых управлению не поддаются. Однако и в этой области валидация некоторых результатов измерений может проводиться.

Напомним, что современные метеорологические радиолокаторы способны измерять шесть параметров принимаемого сигнала:

- мощность, по которой рассчитывается радиолокационная отражаемость цели;
- средний доплеровский сдвиг частоты, функционально связанный со средней радиальной скоростью частиц в наблюдаемом элементе разрешения;

- ширину спектра, характеризующую разброс радиальных скоростей частиц в упомянутом объеме;
- дифференциальную отражаемость;
- дифференциальную фазу;
- модуль коэффициента взаимной корреляции поляризационных составляющих сигнала.

Рассмотрим возможности валидации каждого из них.

Радиолокационная отражаемость. Альтернативы радиолокационному методу измерения данного параметра не существует. Однако возможность проверки правильности ее оценивания есть. Дело в том, что по результатам измерения отражаемости рассчитывают интенсивность осадков, связанную с последней известной зависимостью Маршалла-Пальмера:

$$Z = aI^b, \quad (40)$$

где Z – радиолокационная отражаемость в $\text{мм}^6/\text{м}^3$; I – интенсивность осадков в $\text{мм}/\text{час}$; a и b – коэффициенты.

Следовательно, сравнивая результаты радиолокационных измерений с показаниями наземных приборов, мы опосредованно проверяем правильность оценивания отражаемости. Плохо лишь то, что традиционные осадкомеры измеряют не интенсивность, а количество осадков за некоторый временной интервал. Поэтому и сравнению с ними подлежат не сами результаты расчета по приведенной формуле, а их сумма за выбранный отрезок времени, что лишает процесс валидации оперативности.

Правда, в последнее время в практику оперативных наблюдений широко внедряются автоматические бесконтактные осадкомеры «Капля». По своей сути это малогабаритные доплеровские радиолокаторы малой мощности, антенны которых неподвижны и направлены строго вверх. Точность проводимых ими измерений сравнима с точностью обычных осадкомеров. При этом оценивается именно интенсивность, а результаты измерений могут передаваться по линиям связи в реальном масштабе времени.

Все это дает возможность организовать постоянно действующую автоматическую систему валидации измерений параметров осадков. Для этого вокруг радиолокатора должна быть создана сеть осадкомеров «Капля». Большая проблема – распределение измерителей в зоне обзора радиолокатора. Наилучшим решением было бы размещение их вокруг РЛС с наиболее возможной плотностью и в максимально возможном количестве. К сожалению это невыполнимо и приходится идти на компромиссы. С этой точки зрения

важно определить минимальное количество измерителей, обеспечивающее надежное перекрытие всей площади интересующего пространства.

Прежде всего, определяют размеры этого пространства. Интенсивность осадков с наибольшей точностью измеряется в круге радиусом 50 км. Именно эту площадь обычно и выбирают в качестве той, внутри которой действие системы будет наиболее эффективным. Далее определяют размеры ячейки пространства, для которой осадки можно считать однородными. Обычно эти размеры устанавливаются 15×15 км или 30×30 км. Поскольку речь идет о минимальном количестве измерителей «Капля», логично остановиться на последнем варианте. Поиск искомой величины иллюстрируется рис. 50. На нем изображены квадратные ячейки 30×30 км и окружность диаметром 50 км. Посредством смещения окружности ищется вариант с минимальным количеством квадратов, имеющих общую с кругом площадь не менее 20 %.

Не составляет труда подсчитать, что число ячеек с указанным выше свойством равно 11. Это и есть то минимальное количество измерителей «Капля», которое необходимо для надежной валидации данных локатора. При этом каждый из них должен располагаться внутри ячейки. Реально это условие также трудновыполнимо, т. к. измеритель не может быть поставлен в произвольной точке пространства. Его надо обеспечить электропитанием, каналом связи, наконец, охраной. Наверное, единственно возможный вариант – расположение его на территории действующей метеостанции. Но попадание метеостанций в каждую из представленных на рис. 50 ячейку, не гарантировано. Поэтому количество измерителей подбирается, исходя из местных условий индивидуально для каждой позиции радиолокатора.

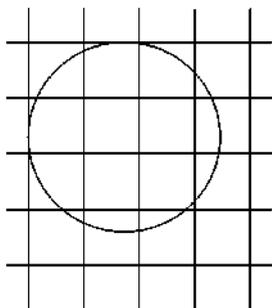


Рис. 50. Взаимное расположение ячеек 30×30 км и зоны обзора локатора радиусом 50 км

Другой путь валидации измерения радиолокационной отражаемости – проверка правильности идентификации опасных явлений погоды. В качестве последнего общепринято использовать грозу, т. к., с одной стороны, это наиболее опасное явление, и, с другой стороны, оно надежно фиксируется наземными наблюдателями на достаточно большом расстоянии в отличие, например, от ливня, града или шквала, имеющих гораздо более локальный характер.

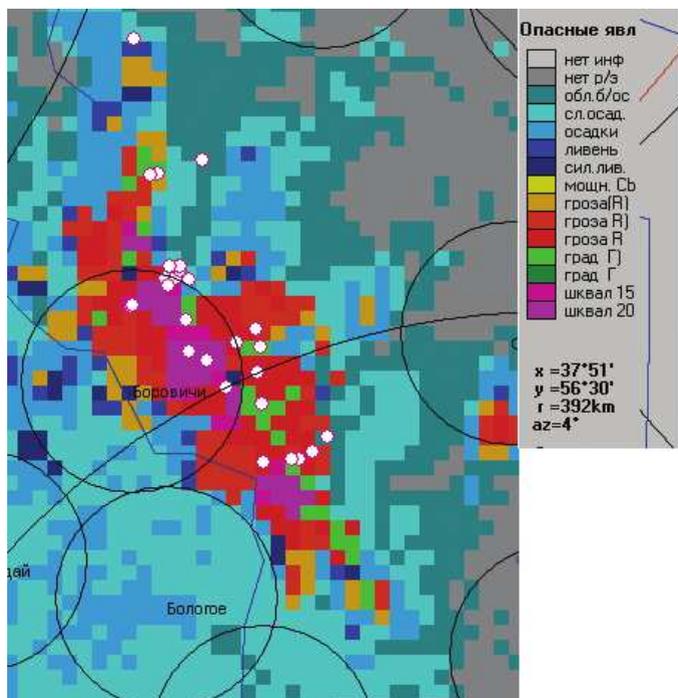


Рис. 51. Фрагмент карты опасных явлений погоды с нанесенными на нее координатами молниевых разрядов (белые точки) по данным грозопеленгационной сети

Идентификация грозы в радиолокаторе основана на вычислении Y -параметра, являющегося произведением отражаемости участка цели на высоте 2–2,5 км над нулевой изотермой на высоту верхней границы облачности. В качестве эталонов используется информация наземных метеостанций и/или данные грозопеленгационных сетей. Пример наложения карт радиолокационных и грозопеленгационных наблюдений приведен на рис. 51.

Для оценки качества идентификации гроз используются два критерия – оправдываемость и достоверность идентификации.

Оправдываемость идентификации гроз – это вероятность обнаружения радиолокатором гроз, зафиксированных наземной метеостанцией. Рассчитывается как отношение числа зафиксированных радиолокатором гроз, совпавших с грозами по данным метеостанции ($N_{\text{мрл-мс}}$), к их общему числу по данным наземных метеостанций ($N_{\text{мс}}$), выраженное в %:

$$P_{\text{опр}} = \frac{N_{\text{мрл-мс}}}{N_{\text{мс}}} 100 \%. \quad (41)$$

Достоверность идентификации гроз – это вероятность подтверждения наблюдателями метеостанции (или другими независимыми эталонными источниками) гроз, обнаруженных радиолокатором. Достоверность рассчитывается как отношение числа гроз, зафиксированных метеостанцией, совпавших с грозами по данным радиолокатора ($N_{\text{мс-мрл}}$), к их общему числу по данным радиолокатора ($N_{\text{мрл}}$):

$$P_{\text{дост}} = \frac{N_{\text{мс-мрл}}}{N_{\text{мрл}}} 100 \%. \quad (42)$$

В качестве показателей качества наблюдений ДМРЛ по $P_{\text{опр}}$ могут быть выбраны следующие значения:

- $P_{\text{опр}} \geq 70 \%$ – удовлетворительно,
- $P_{\text{опр}} \geq 80 \%$ – хорошо,
- $P_{\text{опр}} \geq 90 \%$ – отлично.

Рассмотрим методику оценки качества работы ДМРЛ на примере обнаружения гроз с помощью ДМРЛ-С, установленной на Валдае. При использовании в качестве эталонной информации о грозах данных наземных метеостанций (МС), содержащихся в штормовых сообщениях и таблицах, где указывается время начала и окончания гроз, применяются следующие правила:

- поскольку наблюдения на ДМРЛ-С проводятся каждые 10 минут, сопоставление радиолокационной и эталонной (по всем МС, входящим в «штормовое кольцо») информации проводится за каждые 10 минут. Каждый 10-минутный интервал времени в промежутке отмеченной метеостанцией грозы считается случаем грозы. Так, если гроза на МС «Валдай» отмечена с 05:00 до 05:20, случаев грозы будет 3: в 05:00, в 05:10 и в 05:20;

- на карте метеорологических явлений ДМРЛ-С за каждые 10 мин грозового интервала, отмеченного метеостанцией, в радиусе r (в настоящее время используется значение $r = 25$ км) от МС выбирается максимально опасное явление;

- если случаю грозы по МС в момент T_0 соответствует явление по ДМРЛ-С в интервале времени $T_0 \pm \Delta t$, где $\Delta t = 10$ мин (то есть в интервале $T_0 - 10$ мин... $T_0 + 10$ мин) не менее опасное, чем гроза (индекс R на рис. 50), а именно, от грозы до сильного шквала, то случай грозы по МС считается оправдавшимся и входит в выборку $N_{\text{мс-дмрл}}$;

– если случаю грозы по МС в момент T_0 соответствует другое явление по ДМРЛ-С в указанном временном интервале ($T_0 - 10$ мин... $T_0 + 10$ мин), этот случай считается не оправдавшимся и входит в выборку $N_{\text{НЕОПР}}$ не оправдавшихся случаев. В сумме эти две выборки составляют весь массив значений $N_{\text{МС}}$:

$$N_{\text{МС}} = (N_{\text{МС-ДМРЛ}} + N_{\text{НЕОПР}}). \quad (43)$$

В табл. 2 приведен пример расчета оправдываемости для грозы, наблюдавшейся на МС с 12:19 по 13:22. По радиолокационным наблюдениям на ДМРЛ-С в этом интервале были зафиксированы явления, приведенные в первой графе.

Лишь один случай грозы по МС в 12:50 оказался не оправдавшимся, т. к. в интервале с 12:40 по 13:00 по ДМРЛ-С гроз не отмечено; отмечались сильные ливни (индекс W). Оправдываемость $P_{\text{опр}}$ составила 86% (6 случаев грозы по МС из 7 оправдались).

Таблица 2

Пример расчета оправдываемости по принятым правилам сопоставления (индекс R – гроза, индекс W – сильные ливни)

Срок наблюдений	Явление по ДМРЛ	Явление по МС	Количество оправдавшихся гроз ($N_{\text{МС-ДМРЛ}}$)	Общее количество гроз ($N_{\text{МС-ДМРЛ}} + N_{\text{НЕОПР}}$)
1	2	3	4	6
12:10	R			
12:20	W	гроза	1	1
12:30	R	гроза	1	1
12:40	W	гроза	1	1
12:50	W	гроза	не оправдавшаяся	1
13:00	W	гроза	1	1
13:10	R	гроза	1	1
13:20	R	гроза	1	1
13:30	R			
Сумма			6	7
Оправдываемость, $P_{\text{опр}}$, %			86 %	

Следует отметить, что радиус выбора максимально опасного явления, соответствующий радиусу определения грозы наблюдателем в окрестности МС, зависит от условий местности. Так, в условиях открытых пространств степей и полупустынь (например,

на МС «штормового кольца» ДМРЛ-С «Волгоград») наблюдатель часто отмечает грозы на расстоянии 40 км и более.

При определении достоверности $P_{\text{дост}}$ пространственный радиус r_1 выбора максимального явления по данным ДМРЛ-С в окрестности МС для подтверждения гроз по ДМРЛ-С данными МС должен быть меньше r , т. к. это должен быть радиус, в котором наблюдатель МС гарантированно не может пропустить грозу (10–15 км). Временной интервал подтверждающих данных по МС должен быть существенно больше, чем при определении $P_{\text{опр}}$ ($\Delta t = \pm 30$ мин) – «–30 мин» от времени начала явления по ДМРЛ-С от грозы (индекс R) до сильного шквала и «+30 мин» ко времени окончания явления от грозы (индекс R) до сильного шквала по ДМРЛ-С, если кроме МС не привлекаются никакие другие эталонные данные. То есть, если грозы по ДМРЛ-С в радиусе 25 км от МС наблюдались с 05:00 до 06:00 ч, а в интервале от 04:30 ч до 06:30 ч по данным МС не получено подтверждения гроз, они будут считаться недостоверными, т. е. «ложными тревогами». И напротив, если во временном интервале от 04:30 до 06:30 получено подтверждение грозе по данным МС, она считается достоверной.

Средняя радиальная скорость частиц. Валидация данного параметра непосредственно невозможна. Но, как и в предыдущем случае, существует путь опосредованного подтверждения правильности получаемых оценок. Речь идет о среднем по выбранному слою значении вектора горизонтальной скорости ветра, вычисляемым по оценкам средней радиальной скорости частиц в элементах разрешения, наблюдаемых под разными углами азимута и заключенных внутри этого слоя, как это было показано на рис. 35 и 36.

По результатам наблюдений, проведенных под разными углами места и азимутами, решением обратной задачи восстанавливаются величина и направление скорости ветра в различных горизонтальных слоях просматриваемого пространства. Пример рассчитанных таким образом параметров скорости ветра, полученных радиолокатором ДМРЛ-С, приведен на рис. 52.

В качестве эталона для оценки качества радиолокационного измерения параметров ветра используются данные температурно-ветрового зондирования атмосферы. Поскольку оно проводится лишь два раза в сутки, то для сравнения с ним нужно выбирать ближайшие по времени обзоры радиолокатора. Стандартный интервал между их проведениями равен 10 минутам, что значительно меньше интервала, в течение которого средняя скорость ветра может существенно измениться. Поэтому в расчетах характеристик качества радиолокационного зондирования параметров ветра могут участвовать данные

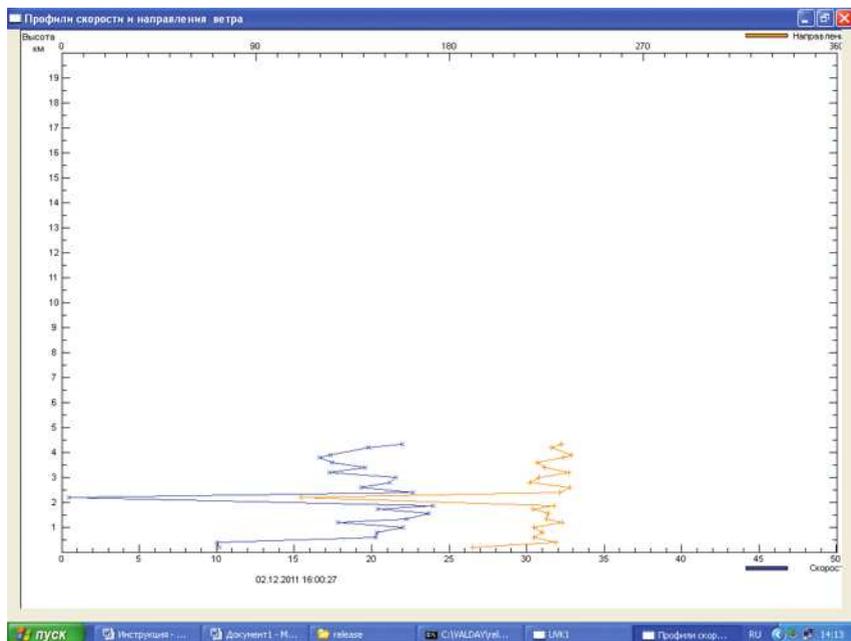


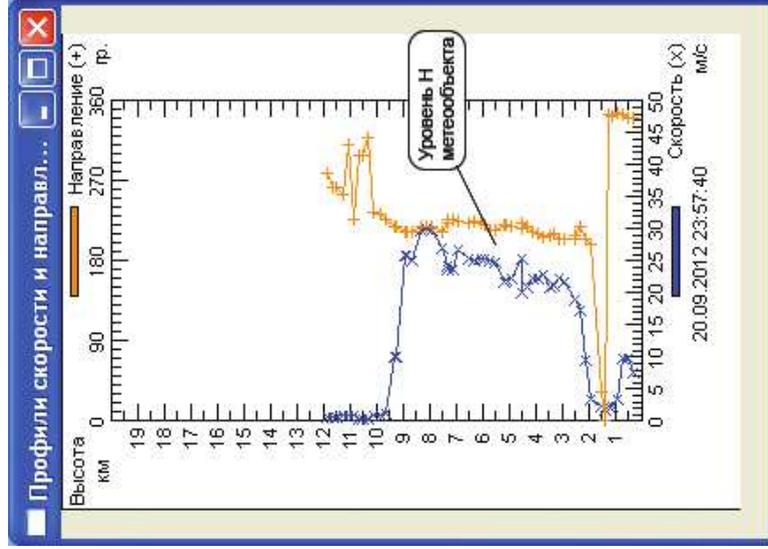
Рис. 52. Пример расчета скорости и направления ветра для различных высот, получаемый радиолокатором ДМРЛ-С

более чем одного обзора (например, проводимые непосредственно до и после зондирования), что повышает точность оценивания.

Как и ранее, проиллюстрируем, в качестве примера, оценку качества радиолокационного измерения параметров ветра на примере ДМРЛ-С, установленного на Валдае.

На ДМРЛ-С за каждый срок строится карта среднего вертикального профиля ветра VW , пример которой приведен на рис. 53 а. На этом графике синим цветом обозначен вертикальный профиль скорости ветра, оранжевым – профиль направления. Из рисунка видно, что в нижнем слое резко меняется направление ветра – с $340\text{--}360^\circ$ у поверхности земли до $190\text{--}200^\circ$ на уровне 2 км. Выше 2 км направление ветра остается почти постоянным до уровня высоты метеорологического объекта (облачности) – 8 км. То есть, в слое «земля – 2.0 км» направление ветра меняется примерно на 150° , что может служить признаком высоких значений сдвига ветра в этом слое. На рис. 53-б приведен вертикальный профиль ветра по результатам аэрологического зондирования атмосферы на ближайшей к Валдаю аэрологической станции Бологое.

а)



б)

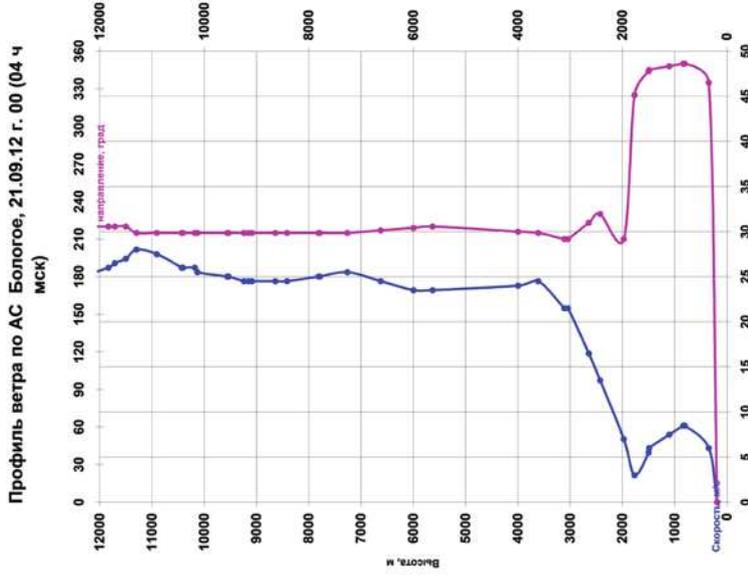


Рис. 53. Вертикальный профиль ветра за 00 ВСВ 21.09.2012: а) по ДМРЛ-С «Валдай», б) по аэрологической станции «Бологое»

Рассматривая рис. 53 можно заметить, что профили ветра очень похожи до 8 км – высоты верхней границы радиоэха облачности по ДМРЛ-С.

Проведенные в течение 2012 г. сравнения полученных по данным ветрового зондирования на ДМРЛ-С «Валдай» значений скорости и направления ветра для уровней от 1 до 9 км (в каждом случае – до уровня высоты метеорологического объекта) с данными аэрологической станции Бологое показали их хорошее совпадение:

– среднее значение разности модулей скоростей ΔV составило 3.8 м/с,

– среднее значение разности направлений ветра Δdd составило 22.2°.

Следует заметить, что наилучшее совпадение профилей ветра по данным ДМРЛ-С и по аэрологическим данным наблюдается при однородном потоке в зоне радиолокационного обзора ДМРЛ-С по всей толще тропосферы, содержащей метеорологические объекты. Однако в некоторых случаях, когда имеет место вихревой процесс, значения ветра, полученные ДМРЛ-С, и ветер по аэрологическим данным могут не совпадать. Причиной этому может служить тот факт, что при расчете горизонтального ветра по данным радиолокационного зондирования используется алгоритм *VAD*, предполагающий наличие равных скоростей ветра по окружности с центром в месте установки ДМРЛ-С, что не учитывает наличие завихренности и дивергенции ветра в зоне зондирования.

Ширина спектра радиальных скоростей частиц. Алгоритма проверки правильности оценивания данного параметра на данный момент не существует.

Дифференциальная отражаемость. Как и в предыдущих случаях, возможно только косвенное подтверждение правильности ее измерения. Основывается оно на том, что главный результат, достигаемый применением данного параметра, – это возможность распознавания агрегатного состояния наблюдаемых частиц. Путем сравнения данных радиолокатора и метеостанций рассчитываются, например, оправдываемость и достоверность идентификации твердых осадков по формулам, аналогичным (41) и (42).

Подтвердить правильность измерения дифференциальной отражаемости можно также методом, который используется для калибровки приемного тракта, т. е. для регулирования его таким образом, чтобы коэффициенты усиления каждого из каналов (горизонтального и вертикального) были одинаковы. В качестве эталонной цели выбираются частицы дождя, наблюдаемые под углом места 90°.

При свободном падении капли деформируются в вертикальном направлении. В горизонтальной же плоскости они остаются идеально круглыми и одинаково рассеивают электромагнитные волны различной поляризации. Поэтому для калибровки радара его антенну устанавливают вертикально и при наблюдении жидких осадков добиваются того, чтобы дифференциальная отражаемость цели была нулевой. При валидации же достаточно убедиться в том, что оценка измеряемого параметра равна нулю.

Дифференциальная фаза. На основе оценки данного параметра сейчас разработаны новые методы измерения интенсивности осадков, обладающие значительно большей точностью по сравнению с прежними методами. В соответствии с этим их валидация производится по уже ранее упоминавшимся алгоритмам, разработанным для измерений по методу Маршалла-Пальмера.

Модуль коэффициента взаимной корреляции поляризационных составляющих сигнала. Главное назначение этого параметра – идентификация типа наблюдаемой цели (метеорологическая или иная). В связи с этим валидация рассматриваемых измерений возможна путем сопоставления данных радиолокатора и метеостанций по уже приводимым выше методикам. В качестве эталона не метеорологической цели могут выступать пыльные бури, скопления птиц или насекомых, отражения от земной поверхности.

5.2. Валидация данных о параметрах ветра в свободной атмосфере, полученных с помощью ДМРЛ-С

Ранее были приведены примеры результатов сопоставления данных радиолокационного зондирования атмосферы ДМРЛ с данными других ДМРЛ или наземных метеорологических станций. В двух следующих разделах будет продолжена оценка возможностей ДМРЛ на основе аналогичного сопоставления. Материалы этих разделов могут служить пособием для проведения валидации радиолокационных данных в процессе выполнения лабораторных, курсовых и выпускных работ студентами метеорологического факультета.

В данном разделе рассматриваются методика и результаты валидации данных радиолокационных измерений характеристик ветра в свободной атмосфере. Эти измерения осуществлялись с помощью поляризационного доплеровского метеорологического радиолокатора С-диапазона, установленного на Валдае (рис. 54). Полученные



Рис. 54. Поляризационный доплеровский метеорологический радиолокатор С-диапазона, установленный на Валдае

данные сравнивались с результатами аэрологического зондирования атмосферы с использованием радиозонда на аэрологической станции Бологое (эти данные принимались за эталон).

Корректный подход к оценке точности измерения профилей ветра с помощью доплеровского радиолокатора должен заключаться в осуществлении синхронного ветрового зондирования свободной атмосферы с помощью доплеровского метеорологического радиолокатора и аэрологического радиолокационного метеорологического комплекса. Полученные таким образом ряды измерений должны затем поступать в ПЭВМ для определения с заданной доверительной вероятностью средней квадратической погрешности измерения скорости и направления ветра с помощью ДМРЛ. Однако организации синхронных наблюдений по данной схеме далеко не всегда представляется возможной. При этом даже размещение двух измерительных

комплексов в одном месте не обеспечивает полной синхронизации данных из-за различия методики их получения при использовании ДМРЛ и радиозонда (в частности, длительность ветрового зондирования с помощью ДМРЛ порядка 10–15 мин, длительность аэрологического зондирования с помощью радиозонда 1.5–2 часа). Поэтому рассматриваемая далее методика сравнения данных от двух, расположенных на расстоянии нескольких километров друг от друга зондирующих комплексов, представляется вполне корректной.

Подготовка данных. В том случае, когда данные о профилях ветра, полученные доплеровским радиолокатором и на аэрологической станции, представлены в цифровом виде, для их сопоставления достаточно провести интерполяцию на единую сетку высот с последующим расчетом статистических характеристик, отражающих степень согласованности этих данных.

Рассмотрим подготовку данных к валидации для случая, когда вертикальные профили скорости и направления ветра представлены в графической форме. Пример такого представления данных ветрового зондирования с помощью ДМРЛ представлен на рис. 55. Здесь синим цветом изображен график зависимости скорости ветра (нижняя шкала, м/с) от высоты (ось ординат, км), а желтым цветом – график зависимости направления ветра (верхняя шкала, град) от высоты (ось ординат, км).

В случае, когда данные представлены в графической форме, процесс их подготовки к валидации усложняется. Для проведения сопоставления необходимо провести оцифровку данных. Одним из возможных подходов к решению этой задачи является использование растрового графического редактора *Microsoft Paint* и пакета «*Surfer 9*».

Также необходимо получение эталонных данных при помощи аэрологического зондирования в пункте Бологое. Для этих целей могут быть использованы возможности пакета «Оскар», где аэрологические данные представляются в графическом и табличном виде, представленном на рис. 56. В этом случае для оцифровки графических данных может быть использована та же методика, что и для данных, полученных при помощи доплеровского радиолокатора.

В качестве примера рассмотрим результаты валидации радиолокационных данных о скорости и направлении ветра с 03.12 2011 по 25.12.2011. Все эти данные после оцифровки были переведены в электронные таблицы «*Excel*», что позволило создать цифровую базу данных из 18 электронных таблиц. При этом все данные ДМРЛ-С относились к сроку 04 ч. 01 мин. и сроку 16 ч. 01 мин., а данные аэрологического зондирования – к срокам 00 ч. 01 мин. и

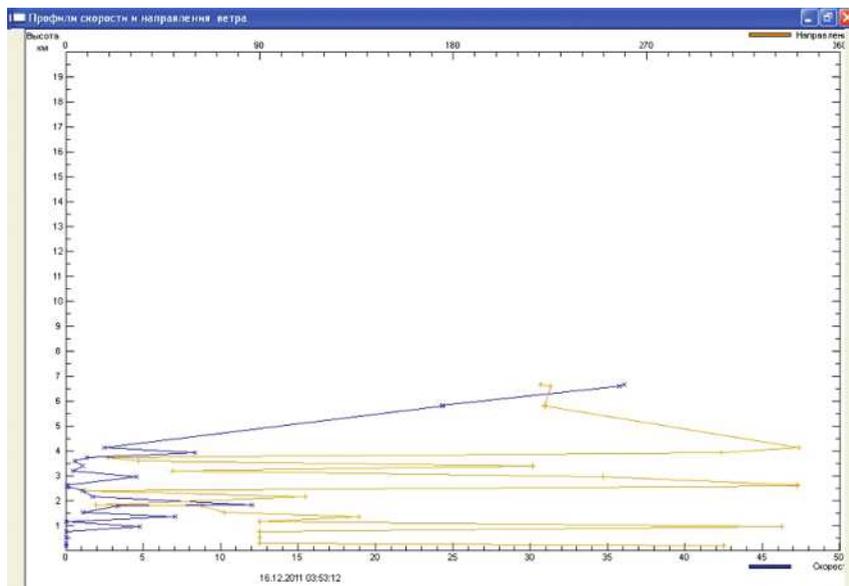


Рис. 55. Пример графического представления данных о скорости и направлении ветра, полученных при помощи доплеровского радиолокатора

12 ч.01 мин. (за те же сутки). При этом не ставилась задача синхронизации этих данных по высоте – в каждом конкретном случае сетка высот была своя. Затем сопоставление данных производилось на качественной основе путем построения совместных графиков – на одном графике строились данные и аэрологические, и доплеровские. Ниже приведены примеры такого рода графиков для скорости и направления ветра.

Анализ всех имеющихся данных показал следующее:

1. В данных аэрологического зондирования отсутствуют «выбросы» – грубые ошибки. Это, по всей видимости, определяется тем, что перед вводом этих данных в базу «Оскар» они были подвержены предварительной обработке на предмет выявления и устранения такого рода ошибок.

2. В данных доплеровского зондирования присутствуют «выбросы» – грубые ошибки. Пример данных с наличием такого рода «выбросов» представлен на рис. 57.

Исключив из рассмотрения данные ДМРЛ с выбросами, рассмотрим результаты их сопоставления с аэрологическими данными. Такое сопоставление иллюстрируют рис. 58–61.

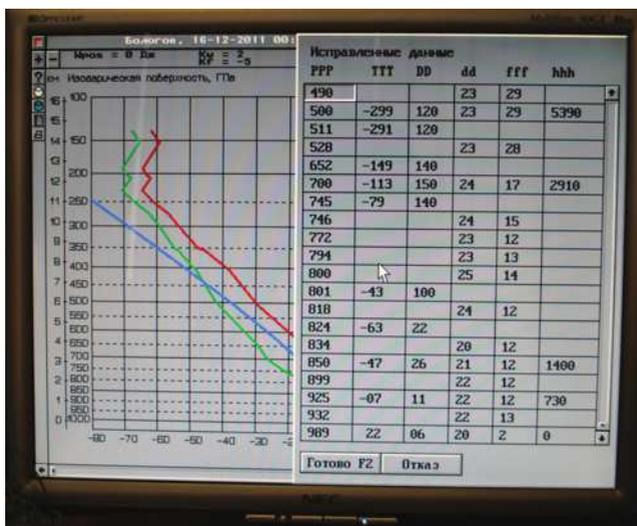


Рис. 56. Внешний вид интерфейса пакета «Оскар» – графическая и табличная формы представления данных зондирования (Бологое, 16.12.2011, 00.00 UTC)

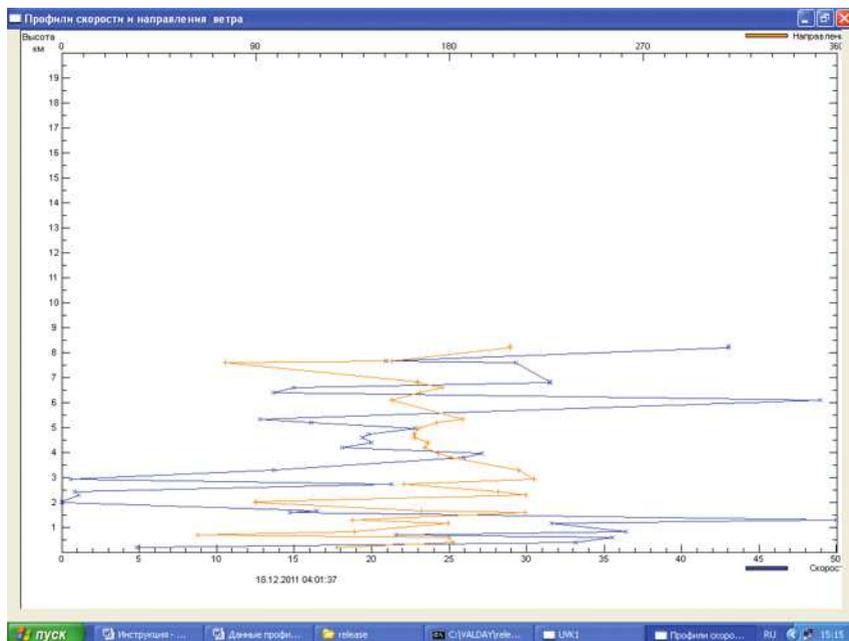


Рис. 57. Профили скорости и направления ветра с «выбросами» (ошибками), срок 18.12.2011, 04-01

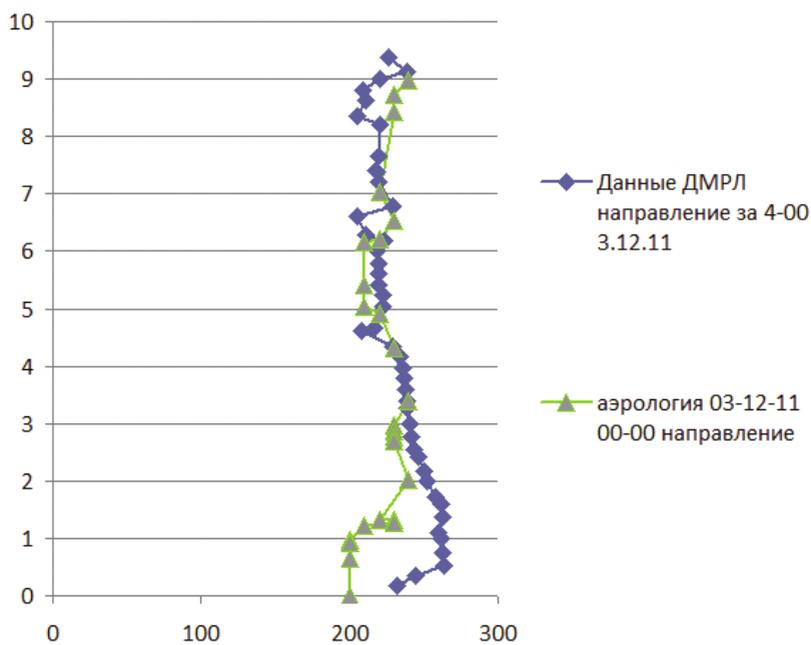
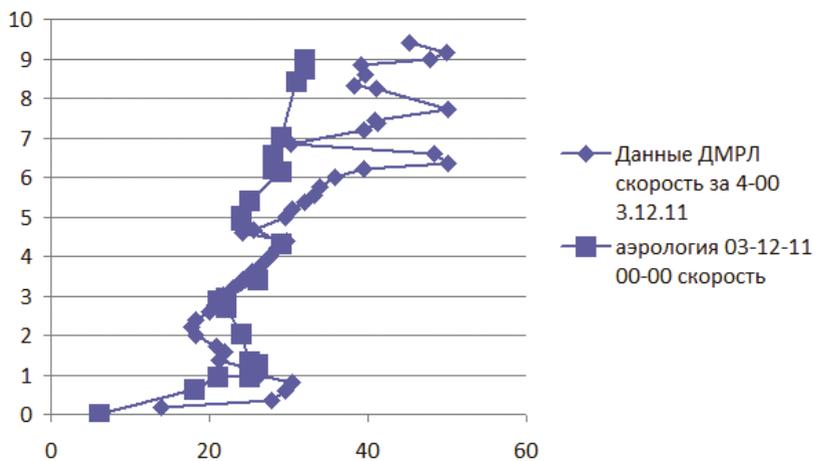


Рис. 58. Профили скорости и направления ветра, срок 03.12.2011, 04-01

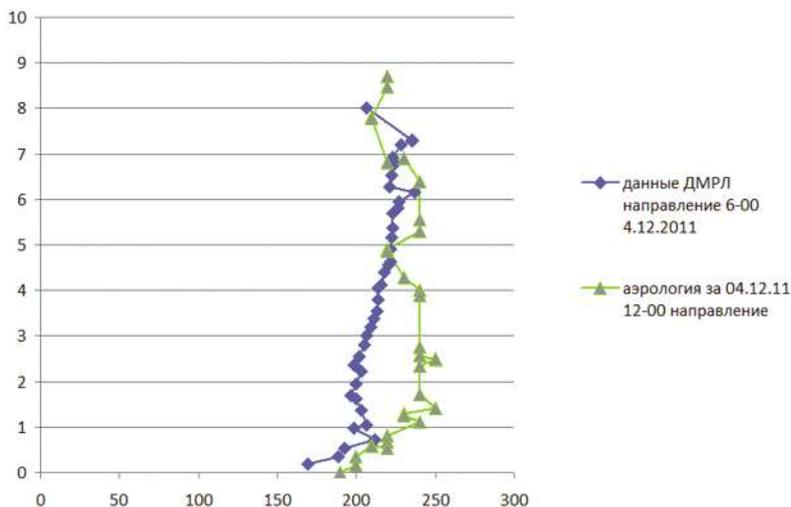
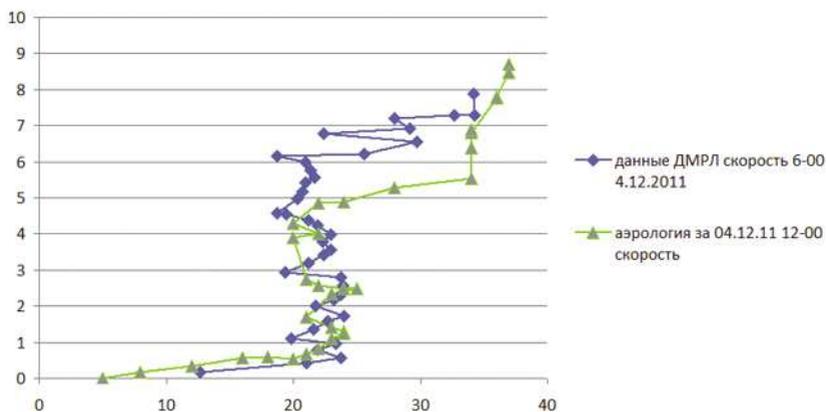


Рис. 59. Профили скорости и направления ветра, срок 04.12.2011, 06-01

Как следует из анализа рис. 58–61, все измерения по скорости и направлению ветра, выполненные с помощью ДМРЛ-С, достаточно хорошо согласуются с данными аэрологического зондирования до высот порядка 5 км.

Однако необходимо отметить, что этот вывод относится только к тем данным ДМРЛ, которые не содержат грубых ошибок (эти данные были исключены на предварительном этапе анализа информации от ДМРЛ-С). Поэтому результаты проведенного исследования

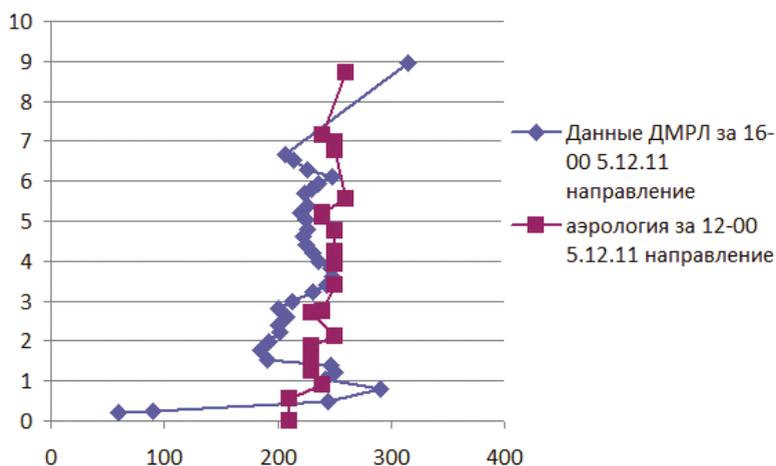
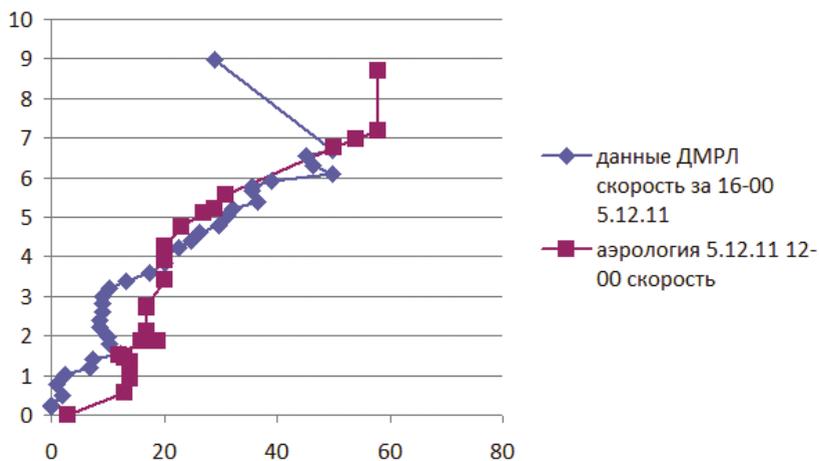


Рис. 60. Профили скорости и направления ветра, срок 05.12.2011, 16-01

можно сформулировать следующим образом – для оперативного использования информации о характеристиках ветра в свободной атмосфере по данным ДМРЛ необходимо дополнить соответствующее математическое обеспечение блоком, осуществляющим контроль результатов зондирования. Данный блок, например, мог бы просто исключать данные на тех высотах, где присутствуют «выбросы».

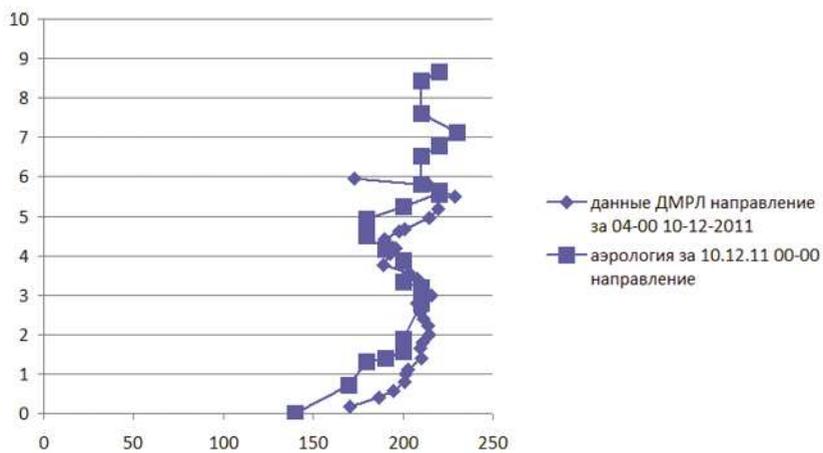
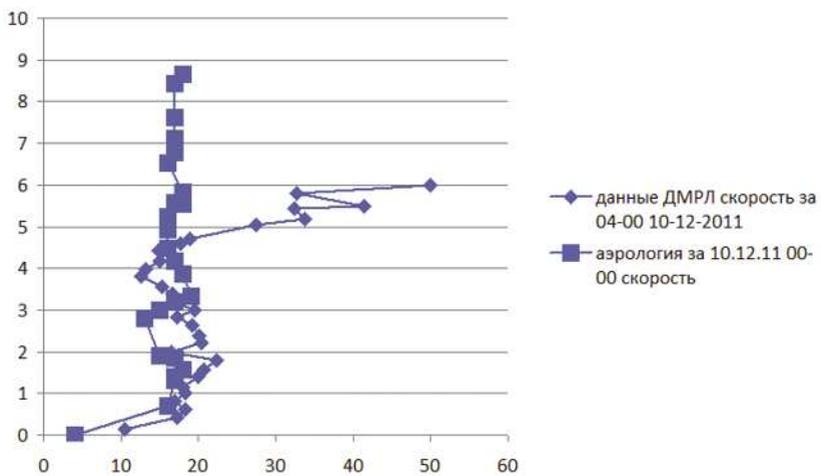


Рис. 61. Профили скорости и направления ветра, срок 10.12.2011. 04-01

5.3. Валидация возможностей распознавания облачности и обнаружения осадков доплеровским локатором в летний период

В данном параграфе рассматриваются методика и результаты оценки вероятности распознавания облачности и обнаружения осадков доплеровским локатором. При проведении данного исследования использовались синхронные радиолокационные и стационарные наблюдения за два летних месяца 2012 г. Радиолокационные данные представлялись следующей информацией, полученной на ДМРЛ с помощью АМРК «Метеоячейка» по восьми синоптическим срокам: тип облачности, наличие осадков, азимут и удаление явления от МРЛ. В качестве исходного стационарного материала использовались данные наблюдений 12 метеостанций Ленинградской области, расположенных в радиусе действия ДМРЛ.

Для определения вероятности обнаружения и распознавания облачности и осадков с помощью доплеровского локатора было проведено согласование радиолокационной информации с данными стационарных (наземных) наблюдений.

Радиолокационные данные представлены информацией, полученной на ДМРЛ Санкт-Петербург, аэропорт Пулково с помощью АМРК «Метеоячейка», за два месяца – июль и август 2012 года. Была произведена оценка радиолокационного распознавания облаков вида Q (Cb , Cu), N (Ns , As), S (St , Sc) и наличия осадков.

Для анализа облачности и осадков были использованы данные наблюдений на 12 метеорологических станциях Ленинградской области, расположенных в радиусе действия доплеровского локатора, равном 150 км.

Характеристики станций представлены в табл. 3.

Таблица 3

Характеристика метеостанций

Метеостанция	Координаты	Удаление от Пулково, км	Направление от Пулково	Высота над уровнем моря, м
Кронштадт	N = 59°57'44'' E = 30°41'05''	33	Запад	3
Шлиссельбург	N = 60°12'52'' E = 31°29'10''	48	Восток	5
Белогорка	N = 59°20'58'' E = 30°06'38''	51	Юг	101
Волосово	N = 59°25'18'' E = 29°28'22''	58	Юго-Запад	117

Метеостанция	Координаты	Удаление от Пулково, км	Направление от Пулково	Высота над уровнем моря, м
Любань	N = 59°20'58'' E = 31°14'30''	78	Юго-Восток	22
Озерки	N = 60°12'52'' E = 29°01'11''	81	Северо-Запад	11
Сосново	N = 60°32'19'' E = 30°19'36''	83	Север	40
Кингисепп	N = 59°20'58'' E = 28°33'20''	104	Запад	27
Кириши	N = 59°20'58'' E = 32°01'09''	113	Юго-Восток	29
Новая Ладога	N = 60°06'23'' E = 32°20'59''	121	Северо-Восток	13
Выборг	N = 60°03'48'' E = 28°42'22''	130	Северо-Запад	28
Николаевское	N = 58°33'24'' E = 29°50'12''	139	Юг	26

На рис. 62 представлена карта расположения наземных метеорологических станций в исследуемой области

При сопоставлении радиолокационной и станционной информации принимались следующие условия:

– Тип облачности считался распознанным ДМРЛ, если он подтверждался данными визуальных наблюдений.

– Осадки считались обнаруженными ДМРЛ, если они подтверждались данными визуальных наблюдений.

– Максимальное расстояние между облачностью или осадками, обнаруженными ДМРЛ, и метеостанцией не превышало горизонтального разрешения 4 км.

– Время регистрации облачности или осадков на метеостанции отличалось от срока радиолокационного наблюдения не более чем на 6 минут.

Сравнение данных, полученных с помощью радиолокационных и станционных наблюдений. Полученный результат количества зафиксированных случаев обнаружения кучевой, слоистой и слоисто-дождевой облачности, а также наличие осадков представлен в табл. 4. Здесь использованы следующие сокращения:

Q – Кучевая облачность;

N – Слоисто-дождевая облачность;

S – Слоистая облачность.



Рис. 62. Карта расположения наземных метеорологических станций в Ленинградской области

Таблица 4

Результаты сопоставления радиолокационных и станционных наблюдений

R, км	По станциям	По данным МРЛ					Всего случаев	Оправданность, %
		Q	N	S	осадки	Р/э не обнар.		
0–50								
Кронштадт R = 33	Q	16	4		2	2	24	67
	N	1	24	15	1	1	42	57
	S		12	22			34	65
	осадки	8			13		21	62
Шлиссельбург R = 48	Q	12	1	3	1		17	71
	N		28	14		4	46	61
	S		9	24	2	2	37	65
	осадки	5		1	12		18	67
Итого для R < 50 км							239	

Продолжение табл. 4

R, км	По стан- циям	По данным МРЛ					Всего случаев	Оправды- ваемость, %
		Q	N	S	осадки	Р/э не об- нар.		
50–100								
Белогорка	Q	28	25	11	8	7	79	35
R = 51	N	9	47	9	2	6	73	64
	S	6	13	44		12	75	59
	осадки	17		2	25	4	48	52
Волосово	Q	27	6	2		11	46	59
R = 58	N	5	28	5			38	74
	S	8	12	45	4		69	65
	осадки	2		5	26	4	37	70
Любань	Q	28	5	2	2		37	76
R = 78	N	5	38	6	2	3	54	70
	S		9	36			45	80
	осадки	1	2	6	22		31	71
Озерки	Q	17	8	9		2	36	47
R = 81	N	7	29	12		6	54	54
	S		17	45			62	73
	осадки	12	3		17		32	53
Сосново	Q	20	8	10	13	1	52	38
R = 83	N	1	34	9	1	2	47	72
	S		10	45		7	62	73
	осадки	9			17		26	65
Итого для 50 < R < 100 км							1003	
100–150								
Кингисепп	Q	18	31	13	6	10	78	23
R = 104	N	10	37	9		8	64	58
	S	3	20	44		10	77	57
	осадки	13		2	17	7	39	44
Кириши	Q	15	4			9	28	54
R = 113	N	3	16	2			21	76
	S	2	12	21	4	1	40	53
	осадки	8		7	16	7	38	42
Новая Ладога	Q	16	9	2	2		29	55
R = 121	N	9	19	6		1	35	54
	S		7	24		3	34	71
	осадки		4	11	21		36	58

R, км	По стан- циям	По данным МРЛ					Всего случаев	Оправды- ваемость, %
		Q	N	S	осадки	Р/э не об- нар.		
Выборг R = 130	Q	19	6	7			32	59
	N	7	29	8		8	52	56
	S		2	33			35	94
	осадки	11			22		33	67
Николаевское R = 139	Q	23	7	7	10		47	49
	N		27	5		4	36	75
	S		8	42		6	56	75
	осадки	12		2	19		33	58
Итого для 100 < R < 150 км							843	

Рассмотрено 2085 сроков совместного наблюдения облачности и осадков. Количество рассмотренных объектов в анализируемый период составило 505 случаев конвективной облачности, 562 – слоистообразной, 626 – слоисто-дождевой, 392 – осадков. Средняя достоверность обнаружения осадков составила 59,1 %. Средняя достоверность распознавания типов облаков: конвективной – 52,8 %, слоисто-дождевой – 64,3 %, слоистой – 69 %.

Выявлено наилучшее совпадение данных лоатора с наблюдениями на станциях Любань и Выборг. Вероятность обнаружения всех типов объектов здесь оказалась более 60 %. Неудовлетворительная вероятность распознавания оказалась в районе станций Кингисепп, Белогорка, Кириши, Новая Ладога, Озерки. По всем типам объектов вероятность не превысила 60 %.

Наибольшие значения вероятности правильного распознавания кучевой облачности получены в районе станций Любань (76 %) и Шлиссельбург (71 %), слоисто-дождевой облачности – в районе станций Кириши (76 %) и Волосово (74 %), слоистой – Выборг (94 %) и Любань (80 %). Максимальные вероятности обнаружения осадков получены в районе станций Любань (71 %) и Волосово (70 %).

Не обнаруженные лоатором конвективные облака относятся в большинстве случаев к слоисто-дождевым, особенно в радиусе до 50 км. Это может быть связано с неточностью критериев распознавания облачности. Велика вероятность случаев, когда радиолокатор классифицировал слоисто-дождевые облака как слоистые. В данном случае большее доверие следует оказывать наблюдениям

локатора, так как в случае наличия сплошной облачности нижнего яруса облачность среднего яруса может быть не видима наблюдателем на станции. При «пропуске» осадков они распознаются в большинстве случаев как радиоэхо кучевых.

Оценка вероятности радиолокационного распознавания типа облачности. Были проведены исследования зависимости вероятности радиолокационного распознавания типа облачности от ее удаления от ДМРЛ. В табл. 5 представлены средние значения вероятности распознавания облачности в зависимости от радиуса обзора локатора.

Таблица 5

Зависимость среднего значения вероятности распознавания облачности от расстояния до локатора

Расстояние, км	Средние значения вероятности распознавания облачности, %		
	<i>Q</i>	<i>N</i>	<i>S</i>
0–50	69	59	65
50–100	51	67	70
100–150	48	64	70

На основании данных таблицы можно отметить, что средние значения вероятности не превышают 70 %. Наблюдается низкая вероятность обнаружения кучевой облачности в радиусе от 50 км. Начиная с этого расстояния, нижняя граница облака (а для облаков небольшой вертикальной протяженности и их вершина) оказывается ниже линии радиогоризонта локатора. Достоверность обнаружения слоистой облачности (*S*) с увеличением расстояния почти не изменяется. Для слоисто-дождевой облачности (*N*) наилучшая достоверность находится в радиусе 50–100 км.

На основе собранного материала был проведен анализ зависимости среднего значения вероятности распознавания облачности от направления от радиолокатора на станцию и от расстояния между радиолокатором и станцией. Диаграмма вероятности обнаружения кучевой облачности на рис. 63-а показывает максимальное значение (71 %) в восточном направлении, минимальное значение (38 %) – в северном направлении.

Аналогичные диаграммы были построены для облачности *N* и *S* (рис. 63-б и 63-в).

На диаграмме рис. 63-б вероятность обнаружения слоисто-дождевой облачности примерно с равными значениями (70–73 %)

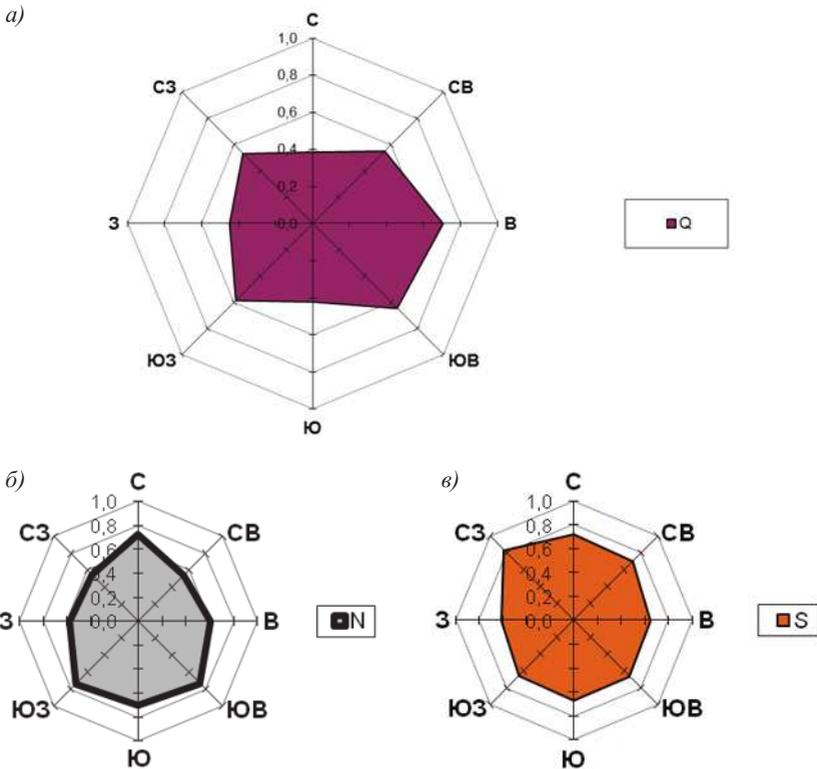


Рис. 63. Средние значения вероятности распознавания облачности в зависимости от направления локатора на метеостанцию (в долях единицы): а) кучевой облачности (Q), б) слоисто-дождевой облачности (N), в) слоистой облачности (S)

представлена станциями, расположенными в северном, южном и юго-западном направлениях. Минимальное значение (54 %) – в северо-восточном направлении, максимальное значение (74 %) – в юго-восточном направлении.

Вероятность обнаружения слоистой облачности (рис. 63-в) – приблизительно одинакова во всех направлениях, за исключением северо-западного. Анализ полученных диаграмм позволяет сделать вывод о том, что азимут расположения облачности практически не влияет на вероятность ее обнаружения.

Были исследованы случаи отсутствия радиозеха при наличии облачности (табл. 6).

Таблица 6

Зависимость количества случаев необнаружения радиоэха от расстояния

Радиус, км	Количество случаев отсутствия радиоэха			
	Q	N	S	Осадки
0–50	2	5	2	0
50–100	14	17	19	8
100–150	19	21	20	14

Анализ табл. 6 показывает, что чем дальше станции расположены от ДМРЛ, тем больше вероятность ошибок. Большие значения могут свидетельствовать о расположении станций в зонах перепада рельефа, вследствие чего вершины облаков лежат ниже линии радиогоризонта. Наблюдается большое количество случаев не распознавания слоистой и слоисто-дождевой облачности. Возможной причиной этого является недостаточно адекватное разделение этих видов облачности используемыми алгоритмами их распознавания.

В табл. 7 представлены случаи необнаружения радиоэха облачности в зависимости от направления обзора локатора.

Таблица 7

Количество случаев отсутствия регистрации радиоэха облачности в зависимости от направления обзора локатора

	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ
Q	1			9	7	11	12	2
N	2	1	4	3	10		9	14
S	7	3	2	1	18		10	

Максимальное количество случаев отсутствия регистрации радиоэха наблюдается в западном, юго-западном и южном направлениях – это станции Кингисеппа, Волосово, Белогорки. Минимальное количество случаев не обнаружения облачности – в северном, северо-восточном и восточном направлениях. Это станции, расположенные в Сосново, Новой Ладоге и Шлиссельбурге.

Оценка зависимости вероятности радиолокационного обнаружения зон осадков от их удаления и азимута расположения.

Были выполнены исследования зависимости вероятности радиолокационного обнаружения осадков от величины удаления станции от ДМРЛ, а также направления от ДМРЛ Пулковое на станцию. В табл. 8 представлены средние значения вероятности обнаружения осадков в зависимости от радиуса обзора локатора.

Таблица 8

Зависимость средней вероятности обнаружения осадков от расстояния до зон осадков

Радиус, км	Достоверность, % осадки
0–50	64
50–100	62
100–150	54

Как видно из табл. 8, в радиусе 100–150 км высока вероятность «пропуска» осадков, они распознаются в большинстве случаев как радиоэхо кучевых. Это естественное ограничение радиолокационного метода наблюдений, так как МРЛ дает достоверную информацию об осадках в теплый период года на расстоянии до 60 км (как было отмечено выше).

Зависимость вероятности обнаружения осадков от направления зондирования представлена в табл. 9.

Таблица 9

Зависимость вероятности обнаружения осадков от направления зондирования

	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ
Осадки	0,65	0,58	0,67	0,57	0,55	0,70	0,53	0,60

Из анализа данных табл. 9 видно, что азимут расположения зон осадков не играет существенной роли в их обнаружении, как и в случае с распознаванием типа облачности.

В табл. 10 представлены случаи необнаружения радиоэха.

Таблица 10

Зависимость случаев необнаружения радиоэха осадков от расстояния

Радиус, км	Количество случаев отсутствия радиоэха осадков
0–50	0
50–100	8
100–150	14

Чем дальше станции расположены от ДМРЛ, тем больше вероятность ошибок.

В табл. 11 представлена зависимость отсутствия случаев р/э осадков от направления зондирования.

Таблица 11

Зависимость отсутствия случаев р/э осадков от направления зондирования

	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ
Осадки	0	0	0	7	4	4	7	0

Отсутствие случаев р/э осадков зафиксировано в западном, юго-западном, южном и юго-восточном направлениях, как и в случаях с необнаружением Q-облачности.

Зависимость достоверности обнаружения осадков от расстояния метеостанций до ДМРЛ (Пулково) представлена в табл. 12.

Таблица 12

Зависимость достоверности обнаружения осадков от расстояния до ДМРЛ

Расстояние, км	33	48	51	58	78	81	83	104	113	121	130	139
Достоверность, %	62	67	52	70	71	53	65	44	42	58	67	58

Как видно из анализа табл. 12, максимальная достоверность 71 % наблюдается в районах станций г. Любань (78 км) и 70 % – в районе Волосово (58 км), минимальная достоверность 42 % – в районах станций г. Кириши (113 км) и 44 % – в районе г. Кингисепп (104 км).

Анализ представленного материала позволяет сделать следующие выводы:

– Наилучшее совпадение данных локатора с наблюдениями на станциях выявлено в районах Любани и Выборга. Вероятность обнаружения всех типов объектов здесь оказалось более 60 %. Неудовлетворительной вероятностью распознавания оказалась в районе станций Кингисепп, Белогорка, Кириши, Новая Ладога, Озерки. По всем типам объектов вероятность не превысила 60 %.

– Зависимость вероятности радиолокационного распознавания типов облачности и обнаружения осадков от расстояния показала, что средние значения не превышают 70 %. Наблюдается низкая достоверность обнаружения кучевой облачности в радиусе от 50 км. Велика вероятность пропуска осадков в радиусе от 100 км.

– Не обнаруженные локатором конвективные облака относятся в большинстве случаев к слоисто-дождевым, особенно в радиусе до 50 км. Это может быть связано с неточностью критериев распознавания облачности. Велика вероятность случаев, когда радиолокатор классифицировал слоисто-дождевые облака как слоистые. В данном случае большее доверие следует оказывать наблюдениям локатора, так как в случае наличия сплошной облачности нижнего яруса

облачность среднего яруса может быть не видима наблюдателем на станции. При «пропуске» осадков они распознаются в большинстве случаев как радиоэхо кучевых.

– Не было выявлено зависимости достоверности распознавания облачности и обнаружения осадков от направления обзора локатора.

– Чем дальше станции расположены от ДМРЛ, тем больше количество случаев не обнаружения облачности и осадков.

Список

ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Абшаев М.Т. Радиолокационное обнаружение града // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. 18. № 5. 1982. С. 483–494.

2. Автоматизированные метеорологические радиолокационные комплексы «Метеоячейка» / Под ред. Н.В. Бочарникова, А.С. Солонина. – СПб.: Гидрометеиздат, 2007. – 236 с.

3. Боровиков А.М., Костарев В.В., Мазин И.П., Смирнов В.И., Черников А.А. Радиолокационные измерения осадков. – Л.: Гидрометеиздат, 1967. – 140 с.

4. Готюр И.А., Девяткин, А.М., Жуков В.Ю., Кулешов Ю.В., Шукин Г.Г. Информационные возможности доплеровских метеорологических радиолокаторов // Ученые записки Российского гидрометеорологического университета № 31. – СПб.: изд. РГГМУ, 2013.

5. Ефремов В.С., Вовшин Б.М., Вылегжанин И.С., Лаврукевич В.В., Седлецкий Р.М. Поляризационный доплеровский метеорологический радиолокатор с-диапазона со сжатием импульсов // <http://jre.cplire.ru/jre/oct09/6/text.html>.

6. Жуков В.Ю., Шукин Г.Г. Состояние и перспективы сети доплеровских метеорологических радиолокаторов // Метеорология и гидрология. – 2014. – № 2. – С. 92–100.

7. Киселев В.Н., Кузнецов А.Д. Методы зондирования окружающей среды (атмосферы). Учебник. – СПб.: изд. РГГМУ, 2004. 429 с.

8. Козлов А.И., Логвин А.И., Сарычев В.А. Поляризация радиоволн. Радиолокационная поляриметрия. – М.: Радиотехника, 2007, 638 с.

9. Колосков Б.П., Корнеев В.П., Шукин Г.Г. Методы и средства модификации облаков и туманов. – СПб.: РГГМУ, 2012. – 342 с.

10. Метеорологические автоматизированные радиолокационные сети / Под ред. Г.Б. Брылева. – СПб.: Гидрометеиздат, 2002. – 331 с.

11. Павлюков Ю.Б., Серебряник Н.И. К вопросу о создании системы валидации данных сети ДМРЛ Росгидромета // Труды 28 Всероссийского симпозиума «Радиолокационное исследование природных сред». – СПб, 2013, С. 291–297.

12. Приказ Росгидромета от 01.02.2014 «Временные методические указания по использованию информации доплеровского метеорологического радиолокатора ДМРЛ-С в синоптической практике» // М., 2014.

13. Радиолокационные метеорологические наблюдения. Том I: Научно-методические основы / Под ред. А.С. Солонина. – СПб.: Наука, 2010. – 311 с.

14. Радиолокационные метеорологические наблюдения. Том II: Вопросы практического применения радиолокационной метеорологической информации / Под ред. А.С. Солонина. – СПб.: Наука, 2010. – 517 с.

15. Руководящий документ РД 52.04.320-91. Руководство по производству наблюдений и применению информации с неавтоматизированных радиолокаторов МРЛ-1, МРЛ-2, МРЛ-5. – СПб.: Гидрометеиздат, 1993. – 357 с.

16. Щукин Г.Г., Степаненко В.Д., Снегуров А.В. Перспективные направления радиолокационных наблюдений за атмосферой // Труды ГГО. – 2010. – Вып. 561. – С. 223–241.

17. Melnikov V.M., Zrnic Dusan S.. Estimates of Large Spectrum Width from Autocovariances. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. – Vol. 21. – P. 969–974.

18. Ryzhkov A.V. and al. The joint polarization experiment. Polarimetric rainfall measurements and hydrometeor classification // BAMS. – June 2005. – P. 809–824.

Приложения

Приложение 1. Историческая справка

Первые метеорологические наблюдения с помощью радиолокаторов были проведены в годы второй мировой войны. В послевоенный период были заложены теоретические основы метеорологических наблюдений, связавшие измерения параметров радиоэха с характеристиками гидрометеоров.

Первые метеорологические радиолокаторы, предназначенные для оперативных наблюдений на сети, были однопараметрическими и проводили измерения только одного параметра облаков и осадков – радиолокационной отражаемости Z . Тем не менее, даже измерение только одного параметра дало специалистам-метеорологам мощный инструмент наблюдений: появилась возможность оценивать местоположение и внутреннюю структуру зон мощной облачности и осадков, их высоту, тенденцию развития, на его основе был развит радиолокационный метод измерения осадков. В СССР большое развитие получил метод идентификации гроз на основе анализа вертикальной структуры поля радиолокационной отражаемости. Были отработаны радиолокационные алгоритмы идентификации града и проведена отработка методики противорадовых работ. В этот период в МРЛ использовались аналоговые приемные устройства, наблюдения проводились ручным способом, а для отображения информации использовались индикаторы кругового обзора на лучевых трубках.

К данному поколению радиолокаторов относились советские метеорологические радиолокаторы МРЛ-1, МРЛ-2. Необходимо отметить, что МРЛ-1 был первым двухволновым радиолокатором, т.е. излучал электромагнитные волны длиной волны 3 см и 8 мм. Однако миллиметровый канал достаточно быстро обнаружил свою низкую эффективность.

Следующий шаг в технике радиолокации был сделан в направлении использования доплеровских методов радиолокационных метеонаблюдений. К измерениям радиолокационной отражаемости Z добавились радиальная доплеровская скорость V и ширина доплеровского спектра W . На основе использования этих трех измеряемых на ДМРЛ параметров в США большое развитие получили методы идентификации таких опасных явлений погоды, связанных с ветром, как смерчи и торнадо. К сожалению, в СССР в этом направлении

проводились только исследовательские работы, серийный оперативный доплеровский радиолокатор разработан не был.

В 70-е годы в нашей стране был разработан радиолокатор МРЛ-5, ставший единственным в мире серийным двухволновым радиолокатором (длина волны 3 и 10 см), который широко использовался не только для штормооповещения, но и в исследованиях измерения осадков двухволновым методом, а также в работах по градозащите при проведении активных воздействий с использованием двухволнового метода обнаружения града.

В конце 70-х годов прошлого века для управления радиолокатором и обработки полученной информации стали использоваться ЭВМ, радиолокационные наблюдения стали автоматизированными. К Олимпиаде-80 в московском регионе была запущена первая отечественная радиолокационная сеть из трех радиолокаторов МРЛ-5 (Долгопрудный, Калуга, Рязань) под управлением ЭВМ. Объединение информации трех радиолокаторов производилось на печатающем устройстве, а информация передавалась в Гидрометцентр СССР.

В 1985 г. в Москве были проведены испытания первого комплекса АКСОПРИ, на основе которого была создана радиолокационная сеть «Московское кольцо», до настоящего времени обеспечивающая оперативные наблюдения в московском регионе. Потребителями метеорологической радиолокационной информации, в первую очередь – карт метеоявлений, ВГО, интенсивности и накопленных осадков, являются оперативные службы Росгидромета, авиационные метеорологи и службы УВД, коммунального и транспортного управления и др.

Позже были разработаны другие отечественные автоматизированные системы радиолокационных метеонаблюдений – «Метеочейка», «АСУ-МРЛ», «Мерком», «Антиград».

Первые отечественные исследования на поляризаационных метеорологических радиолокаторах были проведены в 60-х годах прошлого века, однако только через 50 лет эта технология была внедрена в оперативную практику метеонаблюдений. На начальном этапе работ проводились эксперименты с разными видами поляризации радиоизлучения (например, с излучением круговой и приемом линейной) и типом обработки принимаемой информации (череспериодной одноканальной или одновременной двухканальной).

Объединение метеорологических радиолокаторов в сеть позволяет во многих случаях компенсировать ограничения радиолокационного метода метеонаблюдений, каковыми являются: ослабле-

ние радиоизлучения в осадках, блокировка радиоизлучения естественными (рельеф, растительность) и искусственными (здания и сооружения) препятствиями в отдельных секторах, азимутальные направления с помехами, снижение разрешающей способности радиолокатора за счет расширения луча и увеличение высоты луча за счет кривизны Земли на больших дальностях.

Сегодня метеорологические радиолокационные сети созданы во всех развитых странах: в США сеть *NEXRAD* объединяет 156 доплеровских поляризационных радиолокаторов *S*-диапазона *WSR-88D*, в Европе в рамках международного проекта *OPERA* объединяются около 180 радиолокаторов различных производителей, работающих по разным программам наблюдений. Часть из них является доплеровскими и поляризационными. В Китае, Японии, Австралии радиолокаторы также объединены в национальные сети. Как правило, для объединения радиолокационной информации используются первичные данные наблюдений.

Традиционно в радиометеорологии используются три частотных диапазона длин волн: *X* (3,2 см), *C* (5,3 см) и *S* (10 см).

Диапазон *S* используется в условиях интенсивных осадков, т. к. он наименее подвержен ослаблению в них. Однако, для обеспечения ширины луча 1° приходится использовать антенны диаметром 9 м.

Диапазон *X* почти не используется в оперативных наблюдениях, так как испытывает сильное (примерно в 100 раз по сравнению с *S*-диапазоном) затухание в осадках, но позволяет использовать относительно малые антенны – 2 м для формирования луча шириной 1° .

В нашей стране диапазон 3,2 см традиционно широко использовался в метеорологических радиолокаторах серии МРЛ. В МРЛ-5 с антенной диаметром 4,5 м использование для зондирования излучения *X*-диапазона обеспечивает ширину луча $0,5^\circ$, что особенно эффективно в зимних условиях с низкой облачностью.

Частотный диапазон *C* (длина волны 5,3 см) является разумным компромиссом в радиометеорологии между размерами антенны и ослаблением в осадках. В радиолокаторе ДМРЛ-С антенна диаметром 4,3 м обеспечивает ширину луча $0,95^\circ$.

Дальность радиолокационных наблюдений сегодня определяется не столько возможностями техники (метеорологические потенциалы однотипных радиолокаторов различных производителей примерно равны), сколько решаемыми задачами и естественными ограничениями. Радиолокационный луч, выпущенный под нулевым

углом места, из-за кривизны Земли на дальностях свыше 100 км отрывается от поверхности Земли на более чем 600 м. На дальностях более 250 км радиолокатор может обнаруживать только верхушки мощных облачных систем.

Обзорные метеорологические радиолокаторы (например, сеть *NEXRAD* в США) имеют луч шириной 1° , и проводят наблюдения на большой территории (до 460 км по дальности) в цикле наблюдений длительностью от 4,5 до 10 минут в зависимости от выбранного режима, который выбирает дежурный специалист *NWS Regional Office* (аналог российского ЦГМС) исходя из текущей обстановки. Обзорные метеорологические радиолокаторы в США, Индии, странах Юго-Восточной Азии проводят радиолокационные наблюдения на океанском побережье с целью раннего обнаружения тропических циклонов.

Специализированные доплеровские радиолокаторы TDWR C-диапазона (США, Гонконг, Китай) устанавливаются в аэропортах для обнаружения опасных микропорывов и сдвигов ветра на малых высотах и имеют более узкий луч 0.5° и радиальное разрешение 150 м. Высокое пространственное разрешение (по углу) обеспечивается на дальностях до ~ 90 км от места установки из-за естественного уширения и подъема луча над поверхностью земли с расстоянием. Кроме того, радиоизлучение на длине волны 5 см (С-диапазон) испытывает заметное ослабление в осадках по сравнению с 10-см диапазоном у радиолокаторов *NEXRAD*. В отличие от обзорных, радиолокаторы *TDWR* используют более сложную модель сканирования: непрерывное круговое под низким углом места антенны, а в случае обнаружения радиоэха выше порога – быстрое секторное сканирование под одним или двумя углами места для обнаружения зон порывов и сдвигов.

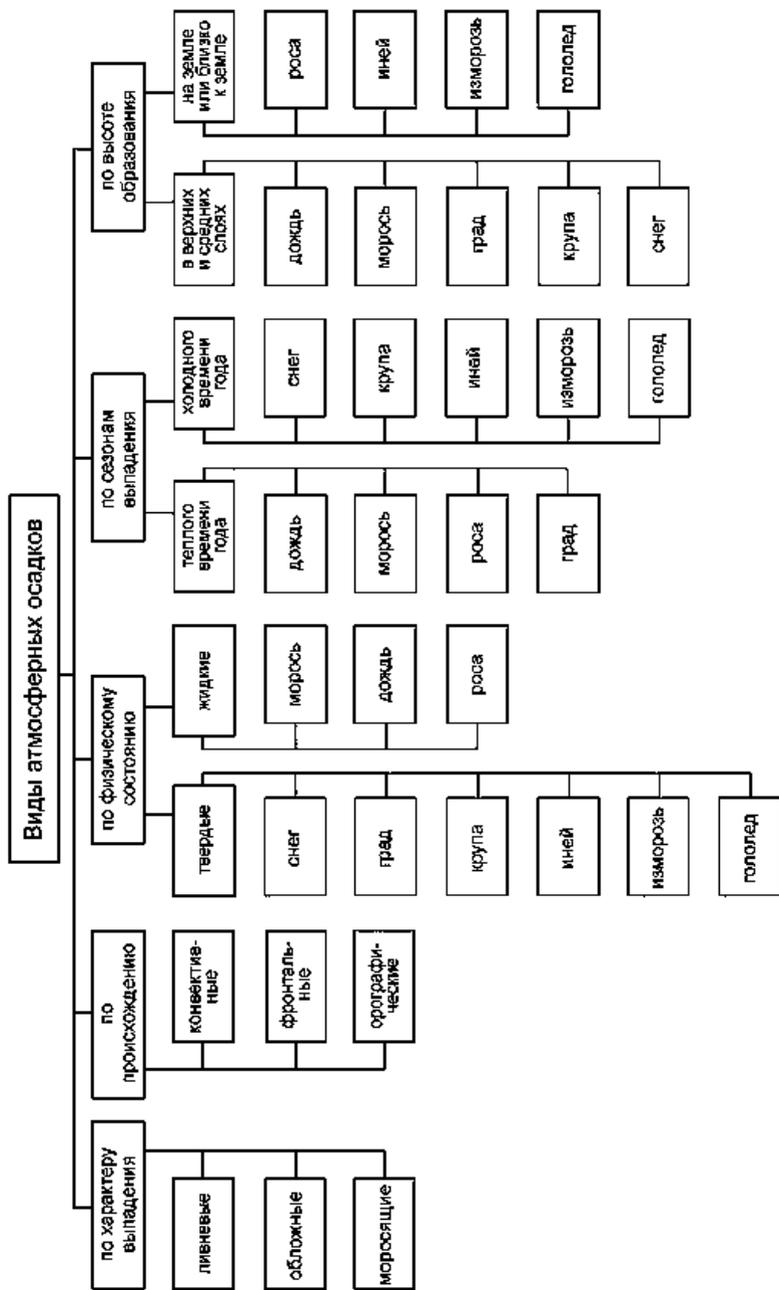
В передвижных метеорологических радиолокаторах, где ограничены размеры антенны (авиационных бортовых, автомобильных), для зондирования используют длину волны 3,2 см.

Таким образом, используемые в разных странах метеорологические радиолокаторы различаются не только используемой длиной волны. МРЛ производят наблюдения в разных режимах с разной длительностью циклов. Для метеорологической обработки данных наблюдений используется различное программное обеспечение, отличающееся выходными продуктами. Также отличаются выбор углов и программы сканирования облачной атмосферы.

Частотные диапазоны РЛС американского стандарта IEEE

Диапазон	Этимология	Частоты	Длина волны	Примечания
<i>HF</i>	<i>high frequency</i>	3–30 МГц	10–100 м	Радары береговой охраны, «загоризонтные» РЛС.
<i>P</i>	<i>previous</i>	< 300 МГц	> 1 м	Использовался в первых радарах.
<i>VHF</i>	<i>very high frequency</i>	50–330 МГц	0,9–6 м	Обнаружение на больших дальностях, исследования Земли.
<i>UHF</i>	<i>ultra high frequency</i>	300–1000 МГц	0,3–1 м	Обнаружение на больших дальностях (например, артиллерийского обстрела), исследования лесов, поверхности Земли.
<i>L</i>	<i>Long</i>	1–2 ГГц	15–30 см	Наблюдение и контроль за воздушным движением.
<i>S</i>	<i>Short</i>	2–4 ГГц	7,5–15 см	Управление воздушным движением, метеорология, морские радары.
<i>C</i>	<i>Compromise</i>	4–8 ГГц	3,75–7,5 см	Метеорология, спутниковое вещание, промежуточный диапазон между <i>X</i> и <i>S</i> .
<i>X</i>		8–12 ГГц	2,5–3,75 см	Управление оружием, наведение ракет, морские радары, погода, картографирование среднего разрешения; в США диапазон 10,525 ГГц ± 25 МГц используется в РЛС аэропортов.
<i>Ku</i>	<i>under K</i>	12–18 ГГц	1,67–2,5 см	Картографирование высокого разрешения, спутниковая альтиметрия.
<i>K</i>	<i>kurz</i> – «короткий»	18–27 ГГц	1,11–1,67 см	Использование ограничено из-за сильного поглощения водяным паром, поэтому используются диапазоны <i>K_u</i> и <i>K_a</i> . Диапазон <i>K</i> используется для обнаружения облаков, в полицейских дорожных радарах (24,150 ± 0,100 ГГц).
<i>K_a</i>	<i>above K</i>	27–40 ГГц	0,75–1,11 см	Картографирование, управление воздушным движением на коротких дистанциях, специальные радары, управляющие дорожными фотокameraми (34,300 ± 0,100 ГГц).
<i>mm</i>		40–300 ГГц	1–7,5 мм	Миллиметровые волны, делятся на два следующих диапазона.
<i>V</i>		40–75 ГГц	4,0–7,5 мм	Медицинские аппараты КВЧ, применяемые для физиотерапии.
<i>W</i>		75–110 ГГц	2,7–4,0 мм	Сенсоры в экспериментальных автоматических транспортных средствах, высокоточные исследования погодных явлений

Приложение 2. Классификация атмосферных осадков



Приложение 3. Характеристики современных метеорологических радиолокаторов

Таблица П2

Характеристики отечественных и зарубежных сетевых метеорологических радиолокаторов

Наименование параметра	МРЛ-2	МРЛ-5		ДМРЛ-С	NEXRAD WSR-88D (США)	Vaisala WRM200 (Финляндия)	Gematronik Meteor 500C (Германия)	ЕЕС DWSR 2501C (США)
		1 канал	2 канал					
1 Рабочий диапазон частот, МГц	9595	9595	2950	5600–5650	2700–3000	5500–5700	5500–5700	5200–5700
2 Антенна зеркальная параболич.								
Угол места, град	от -1 до +98	от -1 до +98	от -1 до +98	от -2 до +91	от -1 до +60	от -2 до +108	от -2 до +182	от -2 до +90
Диаметр, м	3,0	1,4/4,5	4,5	4,5	8,54	4,5	4,2	4,2
Ширина ДН в двух плоскостях по уровню 3 дБ на каждой поляризации, град	0,74	1,5/0,5	1,5	1,0	0,95	0,95	1,0	0,95
Коэффициент усиления, дБ, не менее	46	40/49	40	45	45,5	45	45	45
Боковые лепестки ДН, минус дБ, не более	10	23	25	29	27	28	28	?
Скорость вращения, град/сек	36	0–36	0–36	40	30	40	1,2–36	60
Точность установки, град	0,5 азимут / 0,25 УМ	0,25		0,1	0,1	< 0,1	0,1	0,05
Поляризация линейная: Н – горизонтальная, V – вертикальная.	Н	Н	V	Н + V	Н + V	Н + V	Н + V	Н + V
3 Передатчик								
Тип (М-Магнетрон, К-клистрон)	М	М	М	К	К	М	М	М

Наименование параметра	МРЛ-2	МРЛ-5		ДМРЛ-С	NEXRAD WSR-88D (США)	Vaisala WRM200 (Финляндия)	Gematronik Meteor 500C (Германия)	EFC DWSR 2501C (США)
		1 канал	2 канал					
Импульсная мощность, кВт	210	250	800	15/900	750	250	250	250
Длительность импульса, мкс	1; 2	1; 2	1; 2	1; 25, 60	1,6; 4,5-5,0	0,5; 0,8; 1; 2	0,5; 0,8; 1; 2	0,2-2,0
зондирования, Гц	300; 600	250; 500	250; 500	300-2000	300-1300	200-2400	200-2400	200-2400
Тип модуляции	моно	моно	моно	моно + НЧМ	моно	моно	моно	моно
4 Приемник								
Чувствительность приемника, минус дБ/Вт, не менее	132	134	135	142	143		142	143
Коэффициент шума, дБ, не более	не нормирован	6,9	6,0	2,5	4,6	2	< 2	< 3
Промежуточная частота, МГц	60	30	30	60	57,6	442/60	40	30
Ширина полосы, МГц	1,5	1	1	1	0,63			0,75
Динамический диапазон, дБ	70	70	70	> 100	90	> 99	> 99	105
Подавление местных, минус дБ	-	-	-	> 55	56	55	45	> 46
5 Обработка	РУЧНАЯ	Метеочейка, АКСОПРИ, Мерком		ГИМЕТ-2010	ORDA	IRIS	RAINBOW	EDGE
Однозначно определяемая доплеровская скорость в режиме «скорость», не менее м/с	-	-	-	±62,5	±42		±63,8	±128

Таблица ПЗ

Основные характеристики малогабаритных метеорологических радиолокаторов

Наименование параметра	TWR-03D (Китай)	WR-25XP (Италия)	Ranger X5 (США)	Meteor50DX SELEX (Германия)	Зодиак (Россия)	Контур МЕТЕО-01 (Россия)	RAINSCANNER (Германия)
Когерентность	+	+	+	+	+	-	-
Двойная поляризация	-	+	+	+	-	-	-
Сжатие импульса	-	-	+	-	-	-	-
Несущая частота, МГц	9410	9410±30	9200–9700	9300–9500	9345	9345	9410
Импульсная мощность, кВт	25	25	0,5	55, 75	50	5	25
Тип генератора	-	Магнетрон	Транзистор	Магнетрон	Магнетрон	Магнетрон	Магнетрон
Ширина ДН антенны, гр.	1,8	3,2	0,95	1,30; 1,0	1,5	3	1 гориз. 20 верт.
Дальность действия, км	120	45	120	100	100/160	100	
Габариты, м	1000 * 150	-	-	2,8 * 2,55	Ø2,5	Ø1,2	-
Горизонтальный	0			3,9	2	1,1	
Вертикальный	1950						
Вес, кг	120	150	-	2930	450	60	130

Приложение 4. Состав запланированной сети ДМРЛ-С

До 2020 г. по плану развертывания ДМРЛ-С должно быть установлено около 140 радиолокационных позиций в рамках выполнения двух программ:

– ФЦП «Модернизация Единой системы организации воздушного движения Российской Федерации (2009-2020 гг.)» – запланирована установка 100 радиолокаторов ДМРЛ-С.

– Программа «Геофизика» – запланирована установка 40 радиолокаторов ДМРЛ-С.

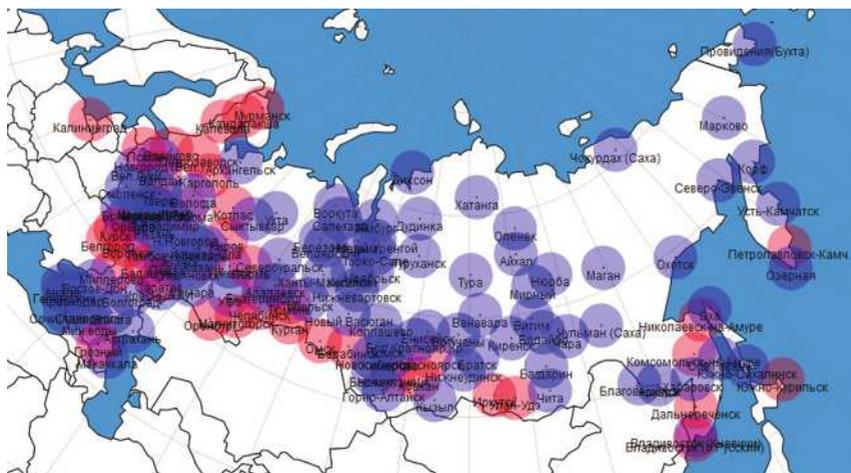


Рис. П.1. Запланированный состав сети ДМРЛ-С Росгидромета на конец 2020 г.
Красным цветом обозначены позиции по программе «Геофизика»,
синим – по ФЦП «ОрВД». Радиус номинальной зоны обзора – 250 км

расстояний от которых до сравниваемой пары ДМРЛ-С и АМРК не превышала 50 км.

В областях перекрытий зон обзоров двух радиолокаторов с помощью специальной программы на картах за одинаковые сроки наблюдений для высот от 1 до 6 км выбирались отражаемости Z, превышающие задаваемый порог (10, 20 dBZ) для ячеек попарно: по ДМРЛ-С «Валдай» и другим АМРК: «Метеор-Метеоячейка» и АКСОПРИ «Тверь».

На рис П.3 и П.4 представлены карты явлений погоды для двух сроков, соответственно, при прохождении холодного фронта (04.08.12 г.) и холодного фронта с волнами (07.08.12 г.). На рис. П.3 показана карта за срок 15:00 мск 04.08.12 г., а на рис. П.4 за срок 20:30 мск 07.08.2012 г.

Среднее значение разности $\Delta Z = Z_{\text{ДМРЛ-С}} - Z_{\text{АМРК}}$ по 2331 случаю для измерений в 2012 г. на ДМРЛ-С «Валдай» составило 1,42 дБ.

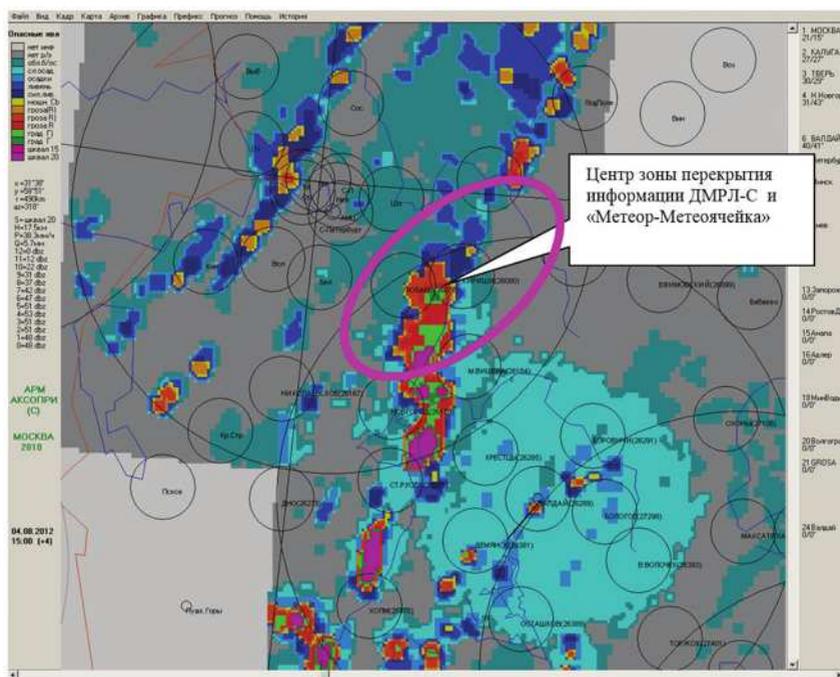


Рис. П.3. Явления погоды в срок 15:00 мск 04.08.12 г. по ДМРЛ-С «Валдай» и «Метеор-Метеоячейка», в т. ч. – в зоне их перекрытия

Высота верхней границы облачности ($H_{\text{ВГО}}$) – важная характеристика, позволяющая судить о ее виде ($H_{\text{ВГО}}$ слоистообразных облаков ниже и однороднее, чем кучевообразных) и степени опасности (особенно это касается обеспечения полетов авиации). За верхнюю границу облачности в ПО «ГИМЕТ-2010» принимается высотный уровень с отражаемостью минус 5 dBZ. В этом случае радиолокационная высота верхней границы, как правило, хорошо (в пределах нескольких сотен метров) согласуется с визуально фиксируемой высотой облаков.

Оценка точности измерений высоты верхней границы радиоэха облачности проводится во время сертификационных испытаний МАК, а также при проведении метеорологической адаптации каждого ДМРЛ-С при вводе его в эксплуатацию. В этот период оценивается правильность измерения $H_{\text{ВГО}}$ путем сопоставления $H_{\text{ВГО}}$, измеренных ДМРЛ-С, с данными $H_{\text{ВГО}}$, полученными на действующих АМРК, информация которых используется в оперативной практике (в том числе и тех, которые обеспечивают полеты авиации). Значения $H_{\text{ВГО}}$ оценивались при различных синоптических ситуациях

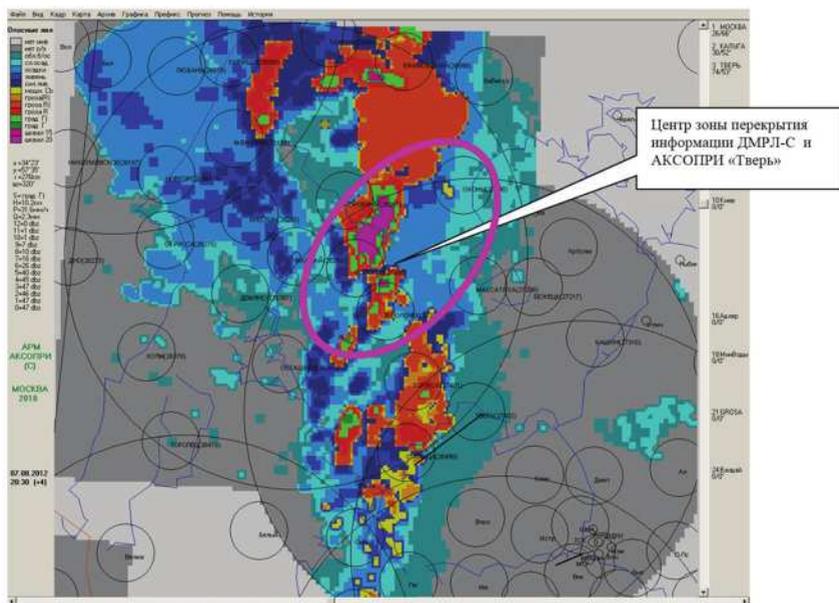


Рис. П.4. Явления погоды в срок 20.30 мск 07.08.12 г. по ДМРЛ-С «Валдай» и АКСОПРИ «Тверь»

для метеорологических объектов, находящихся в зонах перекрытий АМРК, в равноудаленных точках, соответственно от ДМРЛ-С и других АМРК.

Для ДМРЛ-С «Валдай» для сравнения были выбраны следующие АМРК: АКСОПРИ «Валдай», АКСОПРИ «Тверь», АМРК Метеор-Метеоячейка «Пулково». С помощью специальной программы по большому массиву данных были рассчитаны разности $\Delta H_{\text{вго}}$ и их средние значения для нескольких дат 2012 г. Результаты сопоставления показали, что значения разностей $\Delta H_{\text{вго}}$ по ДМРЛ-С и указанных АМРК по модулю не превышали 0.5 км, а среднее значение $\Delta H_{\text{вго}}$ по 1506 измерений составило 0.05 км.

Содержание

Введение	3
1. Отечественные метеорологические радиолокаторы	8
1.1. Радиолокатор МРЛ-5	8
1.2. Радиолокатор ДМРЛ-С	12
1.2.1. Когерентный режим работы радиолокатора	13
1.2.2. Режим поляризационных измерений	17
1.2.3. Широкополосный сигнал в метеорологической радиолокации	21
1.2.4. Структурная схема и основные характеристики радиолокатора ДМРЛ-С	26
1.2.5. Малогабаритные метеорологические радиолокаторы	31
2. Атмосферные осадки и радиолокационные методы измерения их характеристик	34
2.1. Краткий обзор характеристик атмосферных осадков	34
2.2. Радиолокационное измерение интенсивности осадков	35
2.2.1. Радиолокационное измерение интенсивности осадков по мощности отраженного сигнала	35
2.2.2. Измерение интенсивности осадков по затуханию радиоволн	41
2.2.3. Измерение интенсивности осадков по величине собственного излучения метеообразований	42
2.2.4. Измерение интенсивности осадков в когерентных радиолокаторах	44
2.2.5. Измерение интенсивности осадков по величине затухания и дифференциальной фазе отраженного сигнала	45
2.3. Определение вида осадков	46
2.3.1. Определение вида осадков в некогерентных РЛС	46
2.3.2. Определение вида осадков в поляриметрических РЛС	47
2.4. Измерение протяженности, продолжительности и структуры осадков	49
3. Радиолокационное измерение параметров ветра	52
3.1. Использование двух и более радиолокаторов	52
3.2. Восстановление среднего значения вектора скорости в горизонтальном слое по результатам конических разрезов	54
3.3. Восстановление структуры поля ветра в горизонтальном слое	57
4. Радиолокационное распознавание опасных явлений погоды	57
4.1. Распознавание опасных явлений погоды в некогерентных радиолокаторах	57
4.2. Распознавание опасных явлений погоды в когерентных радиолокаторах	62
4.3. Распознавание опасных явлений погоды в поляриметрических радиолокаторах	66
5. Валидация данных, полученных с помощью доплеровских метеорологических радиолокаторов	71
5.1. Общие вопросы валидации и верификации радиолокационных данных	71
5.2. Валидация данных о параметрах ветра в свободной атмосфере, полученных с помощью ДМРЛ-С	82
5.3. Валидация возможностей распознавания облачности и обнаружения осадков доплеровским локатором в летний период	91
Список использованных источников	101

Приложения	103
Приложение 1. Историческая справка	103
Приложение 2. Классификация атмосферных осадков	108
Приложение 3. Характеристики современных метеорологических радиолокаторов	109
Приложение 4. Состав запланированной сети ДМРЛ-С	112
Приложение 5. Валидация ДМРЛ на основе сопоставления его данных с радиолокационной отражаемостью от АМРК, находящихся в зоне радиолокационного обзора ДМРЛ	113

Учебное пособие

Жуков В.Ю., Кузнецов А.Д., Сероухова О.С.

Интерпретация данных
доплеровских метеорологических радиолокаторов

Начальник РИО А.В. Ляхтейнен
Редактор Л.Ю. Кладова
Верстка М.В. Ивановой

Подписано в печать 14.06.18. Формат 60×90 ¹/₁₆. Гарнитура Times New Roman.
Печать цифровая. Усл. печ. л. 7,5. Тираж 150 экз. Заказ № 686.
РГГМУ, 195196, Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98.
