ИНСТИТУТ РАДАРНОЙ МЕТЕОРОЛОГИИ

МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ СЕТИ

Санкт-Петербург
Гидрометеоиздат
2002

УДК 551.501.81:621.396.96

Авторский коллектив: Т.А. Базлова, Н.В. Бочарников, Г.Б. Брылёв, Л.И. Кузнецова, А.Г. Линев, С.А. Маланичев, В.А. Оленев, Т.В. Паркинен, А.С. Солонин, В.К. Устинов, В.И. Фролов, Е.С. Четверикова, Н.А. Якимайнен.

Ответственный редактор Г.Б. Брылёв.

Редакционная коллегия:
А.С. Солонин, д-р физ.-мат. наук (председатель)
Т.А. Базлова, канд. физ.-мат. наук
Н.В. Бочарников, канд. физ.-мат. наук
Г.Б. Брылёв, канд. физ.-мат. наук
В.И. Фролов, канд. техн. наук.
С.А. Маланичев
В.А. Оленев

Изложены научно-методические, технические и организационно-экономические вопросы создания и эксплуатации многофункциональных метеорологических автоматизированных радиолокационных сетей, предназначенных для одновременного решения задач штормового оповещения об опасных гидрометеорологических явлениях, измерения осадков и краткосрочного прогноза на территории России.

Сети создаются на базе доплеровских и обычных автоматизированных радиолокаторов с использованием надежных алгоритмов для метеорологической интерпретации радиолокационных измерений параметров облаков и осадков. Они обеспечивают трансляцию выходной информации об опасных явлениях населению через средства массовой информации и выдачу ее на персональные компьютеры и рабочие станции потребителей (в рамках специализированного метеообслуживания).

Изложены особенности работы сетей в Великобритании, США, Испании, Японии, Скандинавских странах и странах Западной Европы, а также достижения в разработке многопараметрических радиолокаторов (включая доплеровские) нового поколения.

Scientific methodical, technical and organizational economic questions of creation and operation of the multipurpose meteorological automated radar networks intended for the simultaneous decision of problems of the storm notification about the dangerous hydrometeorological phenomena, measurements of rainfall and the short-term forecast for territories of Russia are stated.

The networks are created on the base of Doppler and usual automated radars with use of reliable algorithms for meteorological interpretation of radar measurements of parameters of clouds and rainfall. They provide translation of the target information on dangerous phenomena to the population through mass media and its distribution on personal computers and workstations of consumers (within the framework of specialized weather service).

Features of networks operation in the Great Britain, USA, Spain, Japan, the Scandinavian countries and the countries of the Western Europe, and also achievement in development of multiparameter radars (including Doppler radars) of new generation are stated.

М $\frac{1805040400-11}{069(02)-02}$

© ИРАМ, 2002 г.

ISBN 5-286-01453-4

ОГЛАВЛЕНИЕ

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АМРК	Автоматизированный метеорологический радиолокационный комплекс
АПЧ	Автоматическая подстройка частоты
АРЧ	Автоматическая регулировка частоты
АСУВД	Автоматизированная система управления воздушным движением
АЦП	Аналого-цифровой преобразователь
ВЧ	Высокая частота
ДМРЛ	Доплеровская метеорологическая радиолокационная станция
ДНА	Диаграмма направленности антенны
ИКО	Индикатор кругового обзора
ИКО ПВ	Индикатор кругового обзора постоянной высоты
ИСЗ	Искусственный спутник Земли
МАРС	Метеорологическая автоматизированная радиолокационная сеть
МРЛ	Метеорологический радиолокатор
ПЧ	Промежуточная частота
ПЭВМ	Персональная электронно-вычислительная машина
РПУ	Радиопрозрачное укрытие антенны МРЛ
УВД	Управление воздушным движением
ЭЛТ	Электронно-лучевая трубка
NEXRAD	Метеорологический радиолокатор нового поколения США
$Z_э$	Эквивалентная или эффективная радиолокационная отражаемость в мм^6·м$^{-3}$ или дБZ
$v_р$	Средняя радиальная скорость, м·с$^{-1}$
σ_v	Ширина спектра, м·с$^{-1}$
Z_{DR}	Дифференциальная отражаемость, дБ
CDR	Коэффициент круговой поляризации
LDR	Коэффициент линейной деполяризации
K_{DP}	Фаза прохождения, град·км$^{-1}$
c	Скорость света, м·с$^{-1}$
f	Излучаемая частота, Гц
$f_д$	Доплеровский сдвиг частоты
P_r	Принимаемая мощность, мВт или дБ·мВт
P_t	Излучаемая мощность, кВт
λ	Длина излучаемой волны, см
θ	Ширина диаграммы направленности антенны на уровне половины мощности, град.
τ	Длительность импульса, мкс
γ	Вертикальный градиент отражаемости, дБZ/км
S	Радиолокационный частотный диапазон (2000–4000 МГц, λ = 15...7,5 см)
C	Радиолокационный частотный диапазон (4000–8000 МГц, λ = 7,5...3,75 см)
X	Радиолокационный частотный диапазон (8000–12 500 МГц, λ = 3,75...2,4 см)

ПРЕДИСЛОВИЕ

Основная задача настоящей монографии – ознакомление научной и технической общественности нашей страны с научно-методическими аспектами создания многофункциональных метеорологических автоматизированных радиолокационных сетей. Такие оперативные сети функционируют в США, Англии, Франции, Германии, Испании, Скандинавских странах, Австралии на базе доплеровских и обычных автоматизированных метеорологических радиолокаторов (МРЛ). Их создание является одним из важных научно-технических достижений последнего десятилетия XX века. Многофункциональные сети МРЛ пришли на смену национальным сетям МРЛ, работавшим в ручном режиме съема данных с большой дискретностью получения информации во времени и в пространстве. Их основной задачей было штормовое оповещение об опасных явлениях, связанных с облачностью, авиации, а также населения крупных городов и густонаселенных регионов, где повторяемость таких явлений велика.

Информация многофункциональных сетей МРЛ может использоваться одновременно для штормового оповещения об опасных гидрометеорологических явлениях, измерения осадков и сверхкраткосрочного прогноза погоды. Совмещенные (композитные) радиолокационные карты по территории страны с темпом обновления 10–15 минут поступают (в рамках общего и специализированного метеорологического обслуживания) потребителям, чья деятельность зависит от условий погоды, на персональный компьютер в удобном для работы виде и транслируются всем желающим через средства массовой информации.

В Западной Европе начиная с 1980 г. исследования в области радиолокационной метеорологии проводились в рамках программ по сотрудничеству в науке и технологии COST (COoperation in Science and Technology) Комиссии европейского сообщества (КЕС) (Commission of the European Communities). Программы COST позволяли специалистам европейских стран в полной мере использовать преимущества совместных проектов. Они финансировались в рамках национальных программ и частично КЕС.

Проект COST-72 (1980–1986 гг.) был посвящен радиолокационному измерению осадков. В проекте COST-73 (1986–1991 гг.) (продолжение COST-72) разрабатывались проблемы создания сети автоматизированных метеорологических радиолокаторов в Европе. Задачами проекта COST-75 (1991–1998 гг.) являлись исследование алгоритмов и практических аспек-

тов функционирования оперативных сетей автоматизированных МРЛ, а также развитие многопараметрических МРЛ, включая доплеровские, и МРЛ с фазированной решеткой (электрическим сканированием).

Авторский коллектив заранее благодарен своим читателям за замечания и предложения.

---

* Основные научные и практические результаты по программам COST опубликованы в материалах заключительных международных семинаров.

1. European Communities. – Commission. Physical Sciences, series EUR 10353 "Measurement of precipitation by radar. COST Project 72". Proceedings of a final seminar, Final report EN-FR, 1986. 244 p.

2. Commission of the European Communities, COST "Organization", World meteorological organization, XII-4751-89-EN, COST 73 "Seminar on «Weather radar networking»", September 5–8, 1989, Brussels (Belgium), 1989. 589 p.

3. European Commission, EUR 18567, «COST 75 – Advanced weather radar systems – International seminar», ed. C.G. Collier, Luxemburg. Office for official publications of the European Communities, 1999. 858 p.

ГЛАВА 1

КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ОБЪЕКТАХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

1.1. Кучево-дождевые облака

Кучево-дождевые облака **(Cb)** – основные объекты радиолокационных наблюдений. Часто используют термины «конвективные облака» или «облака вертикального развития» [5, 7, 8].

Общеизвестно, что Cb образуются в атмосфере при высокой влажности в пограничном слое, неустойчивости в средней тропосфере и наличии ниже уровня конденсации термической или динамической конвекции.

При внутримассовой синоптической ситуации (к ней относят и слабо выраженные вторичные фронты) Cb образуются над районами, где отчетливо выражена неоднородность подстилающей поверхности (побережья рек, озер, морей, границы городской застройки).

В зонах активных атмосферных фронтов Cb образуются в результате квазиупорядоченного мезомасштабного подъема воздуха. Мезомасштабные восходящие потоки обычно связаны с мезомасштабной конвергенцией в нижней тропосфере.

Формирование кучево-дождевых облаков из мощных кучевых (Cu cong.) происходит при проникновении вершин Cu cong. в слои с отрицательной температурой воздуха. При этом наблюдается оледенение вершин облаков и выпадение из них крупнокапельных осадков. В наиболее развитых по вертикали и горизонтали Cb отмечаются град, смерчи, сдвиги ветра, значительные объемные электрические заряды. Такие Cb становятся грозовыми.

Гроза – комплексное атмосферное явление, неотъемлемой частью которого являются многократные электрические разряды между облаками или между облаком и землей (молнии), сопровождающиеся громом. С момента начала интенсивного укрупнения частиц в конвективных облаках происходит их интенсивная электризация и разделение разноименных зарядов. Электризация в основном характерна для зоны, где существуют и капли, и кристаллы.

Для облаков, переходящих в грозовое состояние, характерно чрезвычайно быстрое нарастание напряженности электрического поля во времени. Наиболее мощные конвективные облака, которые дают интенсивные осадки, имеют и максимальную молниевую активность. Сред-

няя толщина переохлажденной зоны в грозах составляет 4,7–5,6 км. С увеличением высоты нулевой изотермы возрастает число гроз, их средние и максимальные высоты.

Молниевая активность, как правило, отмечается в одном или двух слоях (от 0 до –20 °С и от –20° до –45 °С). На тех же высотах находятся центры отрицательного заряда, эффективно нейтрализуемого молниевыми разрядами. Длина ионизированных молниевых каналов изменяется от 2 до 14 км при среднем значении 5 км. Диаметр канала молний составляет от 1 до 1,5 см, скорость их распространения $(0{,}2...1{,}4)\cdot 10^8$ м/с.

Скорость перемещения большинства гроз находится в диапазоне 20–60 км/ч. При скорости перемещения более 70 км/ч грозы обыкновенно сопровождаются градом и смерчами.

Град растет в мощных восходящих потоках Cb за счет гравитационной коагуляции зародышей града. Кучево-дождевое облако может состоять из одной или нескольких (до пяти–восьми) конвективных ячеек. Эволюция каждой из них определяется преобладающим направлением вертикального движения воздуха и имеет три стадии: роста, зрелости и распада. По структуре Cb подразделяют на одноячейковые, мультиячейковые и суперячейковые (рис. 1.1.1–1.1.3). В этой последовательности возрастает их разрушительный потенциал (см. табл. 1.1.1). При такой классификации за ячейку принимают элемент кучево-дождевого облака, с которым связаны локальные максимумы интенсивности осадков и скорости восходящих потоков.

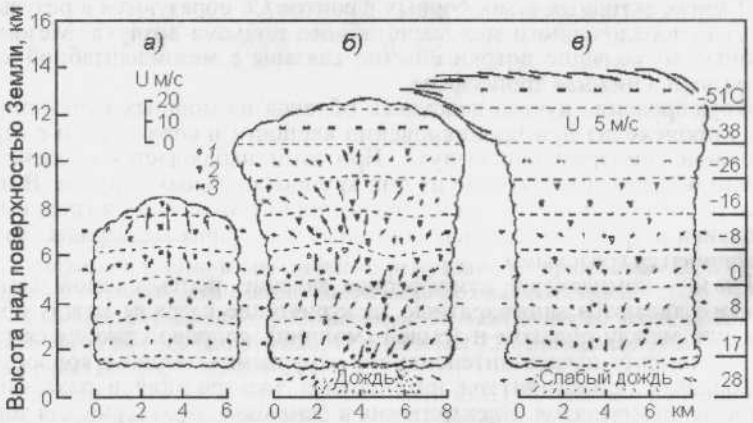

Рис. 1.1.1. Модель грозовой ячейки Байерса и Брейама [8].
а – стадия развития кучевого облака, *б* – стадия зрелости, *в* – стадия распада. *1* – дождь, *2* – снег, *3* – ледяные кристаллы; приведен масштаб вектора скорости *U* (м/с).

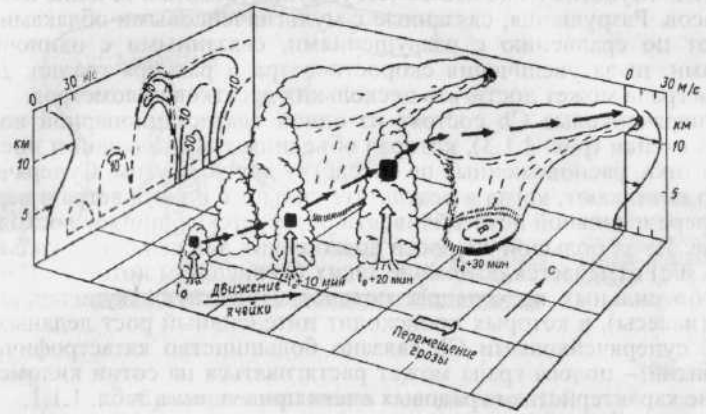

Рис. 1.1.2. Схематическое изображение многоячейкового кучево-дождевого облака. В начальный момент времени t_0 облако состоит из четырех ячеек, находящихся на различных стадиях развития. Показано развитие самой молодой (южной) ячейки в последовательные моменты времени. Жирными стрелками отмечена траектория облачного объема в растущей ячейке. Показано вертикальное сечение радиоэха в начальный момент времени, а также профиль ветра и изолинии отражаемости; черные квадраты – ядра отражаемости [8].

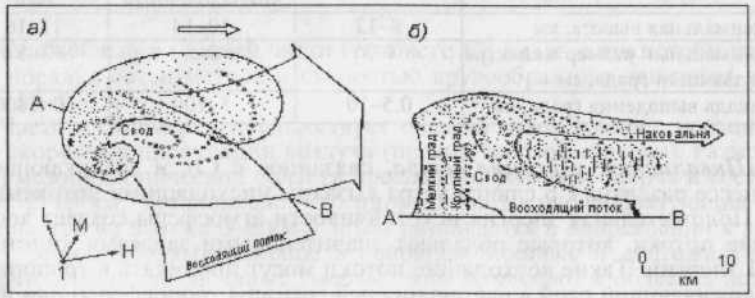

Рис. 1.1.3. Горизонтальное и вертикальное сечения потока воздуха и траектории частиц осадков в суперячейковом Cb (по [8]).
1 – направление ветра относительно облака на уровне его нижней (*L*), средней (*M*) и верхней (*H*) частей.

Часто одноячейковые Cb являются начальной стадией формирования мультиячейковых облаков. Дочерние ячейки могут быстро возникать на расстоянии до 20–30 км от первичной (материнской) ячейки. Чем больше развита первичная ячейка по вертикали, тем выше скорость ее переноса и тем быстрее она догонит дочернюю ячейку и сольется с ней. Типичная схема градового четырехячейкового Cb приведена на

рис. 1.1.2. Мультиячейковые Cb могут существовать в течение нескольких часов. Разрушения, связанные с мультиячейковыми облаками, возрастают по сравнению с разрушениями, связанными с одиночными ячейками, из-за увеличения скорости ветра и размера градин. Длина полосы града может достигать нескольких десятков километров.

Суперячейковые Cb состоят из одной квазистационарной конвективной ячейки (рис. 1.1.3), которая объединяет восходящий и нисходящий потоки, расположенные по соседству друг с другом. Суперячейковые Cb возникают, когда в результате сильного сдвига ветра в верхней атмосфере и сильной неустойчивости образуется обширное восходящее течение. Из-за большой скорости восходящих движений (несколько десятков м/с) отмечается обтекание таких Cb внешним потоком. В области особо сильных восходящих потоков существуют куполообразные ниши (навесы), в которых происходит интенсивный рост ледяных частиц. С суперячейковыми Cb связано большинство катастрофических градобитий – полоса града может растягиваться на сотни километров. Краткие характеристики градовых ячеек приведены в табл. 1.1.1.

Таблица 1.1.1

Характеристики градовых процессов [7]

Основные параметры градового облака	Градовый процесс		
	одноячейковый	многоячейковый упорядоченный	суперячейковый
Максимальная высота, км	8–12	10–14	11–16
Максимальный размер в спектре выпадающего града, см	1–3	2–5	3–8
Площадь выпадения града, км^2	0,5–10	5–100	60–1800

Шквалистое усиление ветра, связанное с Cb, и возникающие в процессе развития Cb сдвиги ветра вызваны нисходящими потоками из Cb. Положительная энергия неустойчивости атмосферы создает восходящие потоки, которые обладают значительными запасами кинетической энергии. Такие восходящие потоки могут проникать в тропопаузу (задерживающий слой в районе нижней границы тропосферы) или даже пробивать ее. По статистике число таких Cb составляет не более 10 % от числа наблюдавшихся за грозовой сезон. Чем выше расположена верхняя граница Cb, тем сильнее компенсирующие нисходящие потоки, больше сдвиги ветра и скорость шквала (рис. 1.1.4). Параметры различных сдвигов ветра, связанных с Cb, приведены в табл. 1.1.2.

Смерч. Наиболее высокие грозовые Cb, помимо шквалов, могут сопровождаться смерчами (торнадо). При этом внутри грозового Cb возникает спиральный вихрь типа водоворота. Смерч представляет собой

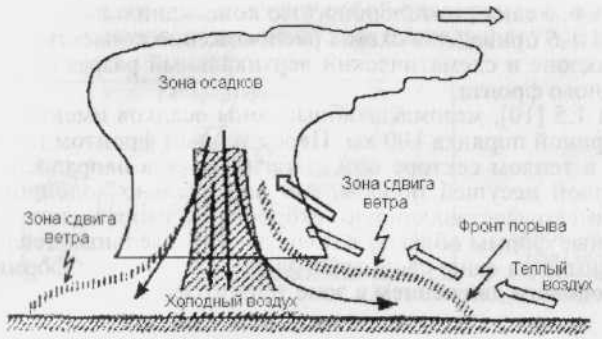

Рис. 1.1.4. Воздушные потоки в окрестности грозового кучево-дождевого облака в стадии развития [9].

Таблица 1.1.2

Сравнение различных сдвигов ветра [14]

Наименование	Горизонтальные размеры, км	Временной интервал	Максимальная скорость ветра, км/ч (м/с)
Фронт порывистости	10–100	1–10 ч	65 (18)
Макровзрыв	4–10	10–60 мин	70 (23)
Микровзрыв	1–4	2–20 мин	85 (27)

расположенный в нижней части грозового Cb вихрь с диаметром сечения порядка сотен метров и скоростью кругообразного движения воздуха 50–100 м/с.

Часто в Cb смерчу предшествует область мезоциклона с повышенной скоростью циркуляции воздуха (против часовой стрелки). Размеры этой мезоциклонической области превышают размеры смерча и составляют 2–15 км. Установлено, что циркуляция в смерчеобразующих Cb начинается на высоте 6–8 км и затем развивается в направлении к земле. С мезоциклонами связаны в основном мощные и долгоживущие смерчи. Менее интенсивные смерчи часто возникают в областях повышенных градиентов ветра (сдвига ветра): на фронтах порывистости, холодных фронтах и т.п.

Повторяемость смерчей зависит от частоты и интенсивности гроз в данном районе. С увеличением интенсивности грозоградового процесса вероятность появления смерчей возрастает. Наибольшая повторяемость смерчей отмечена в районе Великих равнин в США.

Cb *на фронтальных разделах.* За время существования мультиячейковых и суперячейковых Cb образуется мезомасштабная зона осадков, размеры которой в несколько раз превышают размеры зоны осадков из одноячейкового Cb. Конфигурация такой зоны осадков и поле изогиет (линий равной интенсивности осадков) определяются площа-

дью и траекторией Cb, а также интенсивностью конвекции.

На рис. 1.1.5 и 1.1.6 приведены схемы расположения конвективных полос осадков в циклоне и схематический вертикальный разрез облачной системы холодного фронта.

Согласно рис. 1.1.5 [10], мезомасштабные зоны осадков имеют вид длинных полос шириной порядка 100 км. Перед теплым фронтом полосы параллельны, а в теплом секторе они вытягиваются в направлении ветра в потоке теплой несущей полосы, т.е. параллельно холодному фронту. Полосы имеют составляющую скорости в направлении от фронта. Конвективные формы облаков в полосах, параллельных теплому фронту, развиваются на фоне слоистой облачности, которая формируется общим восходящим движением в зоне теплого фронта.

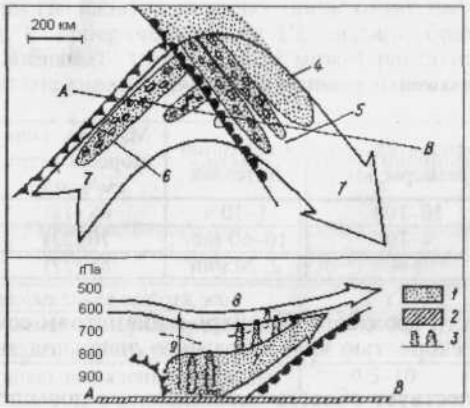

Рис. 1.1.5. Расположение конвективных полос осадков в циклоне (вверху) и вертикальный разрез циклона по линии *AB* (внизу) [10].
1 – обложные осадки, *2* – ливневые (конвективные) осадки, *3* – конвективная облачность, *4* – обложные осадки теплого фронта, *5* – конвективные полосы осадков теплого фронта, *6* – конвективные полосы осадков теплого сектора, *7* – теплая несущая полоса, *8* – слой относительно сухого воздуха, *9* – неустойчивый слой.

На рис. 1.1.6 [10] показана типичная мезомасштабная структура холодных фронтов над территорией США. Зафронтальная полоса связана с деформацией фронтального раздела. Увеличенный наклон фронта приводит к увеличению скорости восхождения теплого воздуха, а это в свою очередь приводит к активному развитию генерирующих ячеек в слабо неустойчивом слое, который обнаруживается в теплой воздушной массе на высоте 6–8 км.

1.2. Осадки

Виды осадков. Из облаков выпадают жидкие, твердые и смешанные осадки. Жидкие осадки подразделяются на ливневые, обложные и моросящие. Твердые осадки выпадают в виде града, ледяной крупы, снега, снежной крупы, снежных зерен, ледяного дождя и ледяных игл. Смешанные осадки представляют собой одновременно выпадающие осадки различных видов: дождь со снегом и дождь с крупой [7].

Рис. 1.1.6. Схематический вертикальный разрез облачной системы холодного фронта [10].
I и II – широкая и узкая полосы осадков холодного фронта.

Масштабы. К осадкам синоптического масштаба относят осадки на площади более 100 000 км^2, время прохождения которых над точкой и дождемером достигает 10 ч и более. К мезомасштабным относят зоны осадков протяженностью 50–80 км, площадью от 1000 до 10 000 км^2 и временем прохождения над точкой от 1 до 2 ч. За ячейки осадков принимают небольшие зоны протяженностью 1–4 км, площадью до 10 км^2, из которых выпадают ливни длительностью несколько минут. Почти все тропические дожди и примерно половина дождей в умеренных широтах обусловлены ячеистой конвекцией.

Интенсивность I и количество Q осадков. Все климатологические сведения об интенсивности и количестве осадков получены по наблюдениям на дождемерной сети. В последние 20 лет к ним добавились наблюдения на дисдрометрах – оптических приборах, в которых измеряется распределение дождевых капель по размерам за время Δt их падения через освещаемый объем дисдрометра.

Интенсивность осадков I на данном уровне, т.е. масса воды, падающая сквозь единичную площадку в единицу времени, зависит от концентрации дождевых капель, спектра их размеров и скорости падения относительно земли. В общем случае I зависит от времени и места выпадения.

Для практических расчетов принимают, что жидкие осадки однородны во времени и в пространстве, а вертикальные потоки у поверхности земли отсутствуют. Тогда получаем

$$I = \frac{\pi}{6} \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} D^{3+\beta} N(D) dD, \qquad (1.2.1)$$

где $D_{\max}$ и $D_{\min}$ – максимальный и минимальный диаметр капель в осадках; $D^{\beta} \approx v$ – скорость установившегося падения капель, где β – параметр, зависящий от размера частиц [4]; $N(D)$ – функция распределения

частиц осадков в единице объема воздуха по диаметрам D (см. п. 1.3.1). Согласно [4], с ошибкой не более 10 % можно считать, что $\beta = 1$ при D от 0,2 до 1,2 мм, $\beta = 0{,}78$ при D от 0,4 до 3,4 мм и $\beta = 0{,}5$ при D от 0,8 до 5 мм.

Обычно в качестве меры интенсивности осадков принято использовать толщину слоя воды, выпадающей в единицу времени. I измеряется в мм/ч. Возрастание интенсивности осадков приводит к увеличению концентрации и среднего размера капель.

Количество атмосферных осадков характеризуется их суммой Q (мм). Сумма осадков «измеряется высотой слоя воды, который образовался бы на участке горизонтальной поверхности непосредственно или в результате таяния кристаллов льда при условии, что вода не стекает, не испаряется и не просачивается через поверхность» [4]:

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} I(t)dt, \qquad (1.2.2)$$

где t_1 и t_2 – время начала и окончания выпадения осадков.

Статистические зависимости между I и Q. За обложные обычно принимают осадки с I от 0,6 до 3,0 мм/ч, за ливневые – с $I > 3$ мм/ч. В качестве характеристики осадков можно использовать среднюю ($I_{ср}$) и максимальную (I_{max}) интенсивность за дождь. Эти величины, а также Q связаны между собой.

Для описания статистической зависимости между $I_{ср}$, I_{max} и Q наиболее пригодной оказалась степенная функция типа

$$y = A*x^m.$$

В табл. 1.2.1 по данным Валдайского ливнемерного куста приведены статистические зависимости для дождей разной продолжительности: ≤1, 1–3, ≥3 ч.

В табл. 1.2.2 по тем же данным для осадков продолжительностью меньше 1 ч приведена зависимость между I_{max} и Q для четырех градаций интенсивности. По данным за 5 лет было выяснено, что вероятность выпадения очень сильных осадков такой продолжительности не превышает 0,5 %, а сильных – 3 % числа всех дождей в теплое время года в районе Валдайского ливнемерного куста [2].

Наиболее изменчивой характеристикой дождей является их мгновенная интенсивность. Для одного дождя она может изменяться во времени и по территории в десятки и сотни раз. Именно с этой характеристикой приходится иметь дело при радиолокационном измерении осадков (см. главу 3).

Таблица 1.2.1

Соотношение между средней ($I_{ср}$) и максимальной (I_{max}) интенсивностью осадков и их количеством Q для осадков различной продолжительности по данным Валдайского ливнемерного куста [2]

y	Продолжительность дождя в часах		
	≤1	1–3	≥3
I_{max} мм/мин	$8{,}18\, I_{ср}^{1{,}46}$	$148{,}94\, I_{ср}^{2{,}07}$	$89{,}04\, I_{ср}^{1{,}71}$
Q мм	$1{,}93\, I_{max}^{0{,}58}$	$7{,}02\, I_{max}^{0{,}42}$	$13{,}46\, I_{max}^{0{,}38}$
Максимальное значение интенсивности и количества осадков по экспериментальным данным			
$I_{ср}$, мм/ч	84	16,8	48
I_{max}, мм/ч	234	348	222
Q, мм	21,0	56,0	62,4

Таблица 1.2.2

Взаимосвязь между I_{max} и Q для осадков продолжительностью меньше 1 ч [3] по данным плювиографических наблюдений

Градация	Качественная оценка	I_{max} мм/мин	Q_i мм	$\overline{Q}_i$ мм
1	Слабые	0,008–0,048	0–0,6	0,33
2	Умеренные	0,05–0,417	0,61–2,2	1,2
3	Сильные	0,418–1,0	2,21–7,2	4,2
4	Очень сильные	>1	>7,3	14,66

Из табл. 1.2.3 следует, что с увеличением I уменьшается среднее время Δt сохранения постоянной интенсивности.

Таблица 1.2.3

Среднее время Δt сохранения постоянной интенсивности дождей [1]

I, мм/ч	0,1–0,3	0,3–1	1–3	3–10	10–30
Δt, мин	8	5,5	4,0	2,5	1,5

Климатические характеристики. Известные механизмы образования осадков предполагают широтную зависимость интегрального распределения вкладов осадков различной интенсивности в их общее количество (табл. 1.2.4).

Еще более контрастно такая зависимость будет выглядеть, если взять данные для Валдая и Батуми. За год число дней с осадками боль-

ше 20 мм для Валдая составляет 3, а для Батуми – 42. В районе Валдая повторяемость моросящих осадков равняется 30 %, обложных – 56 %, ливневых – 14 %.

Заметно изменяется продолжительность осадков – от нескольких минут до нескольких суток, хотя дожди продолжительностью больше 30 ч наблюдаются в Европе не каждый год. Для района Валдая осадки длительностью менее 1 ч составляют 53,2 %, от 1 до 3 ч – 23,9 %, а более 3 ч – 22,9 % всех наблюдавшихся за 5 лет (8117).

Таблица 1.2.4

Повторяемость (число дней) различных значений суточных сумм осадков за год [7]

Пункт наблюдения	Q мм/сут			
	>0,1	>10	>20	>30
Вологда	187,2	9,6	2,4	0,3
Иркутск	137,2	9,9	3,37	1,25
Астрахань	77	4,0	1	0,5
Ялта	118	16	5	2
Казалинск	58	2	0,4	0,2
Ай-Петри	168	30	13	6

В табл. 1.2.5 приведено среднее месячное и годовое количество осадков для разных физико-географических зон.

Абсолютный максимум I составляет для территории США 1850 мм/ч, Германии – 930 мм/ч, России – 426 мм/ч.

Точность определения характеристик осадков. Средний слой осадков на некоторой площади за время Δt есть

$$P(t) = \iint_S dxdy \int_t^{t+\Delta t} I(x, y, t)dt. \qquad (1.2.3)$$

Для получения истинного среднего значения слоя осадков P на площади необходимы измерения на самой плотной дождемерной сети, например, как в [12] (49 дождемеров на площади 100 км^2). По данным такой сети за 10 лет наблюдений было найдено уравнение регрессии

$$\lg E = -0{,}51 + 0{,}68 \lg P + 0{,}94 \lg A_g - 0{,}01 \lg T - 0{,}75 \lg A_n. \qquad (1.2.4)$$

Здесь $E = |P - P_g|$ – абсолютная разница (мм) между лучшей оценкой истинного среднего слоя воды P (мм) при максимальной плотности дождемеров и средним по выборке слоем осадков P_g (мм), рассчитанным

по данным дождемеров на менее плотной сети; A_g – средняя площадь (км^2) на один дождемер; A_n – площадь (км^2) сети дождемеров; T – длительность (часы) процесса выпадения осадков над сетью дождемеров.

Таблица 1.2.5

Среднее месячное и годовое количество осадков (мм) [7] в разных физико-географических условиях

Пункт	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
Тропики													
Сингапур	288	158	197	184	191	174	163	174	180	203	263	238	2413
Пустыня													
Ашхабад	22	21	44	38	28	6	2	1	3	11	15	19	210
Умеренная зона													
Рим	80	72	69	70	57	38	15	23	70	118	111	100	803
Варшава	30	26	28	39	50	61	83	68	44	40	38	34	541
Лондон	53	40	37	38	46	46	56	59	50	57	64	48	594
Холодная зона													
Екатеринбург	15	17	17	22	40	59	80	82	49	29	25	27	462
Новосибирск	20	14	15	13	33	52	59	55	33	31	28	23	378
Иркутск	18	12	9	17	27	67	75	63	45	22	18	20	393

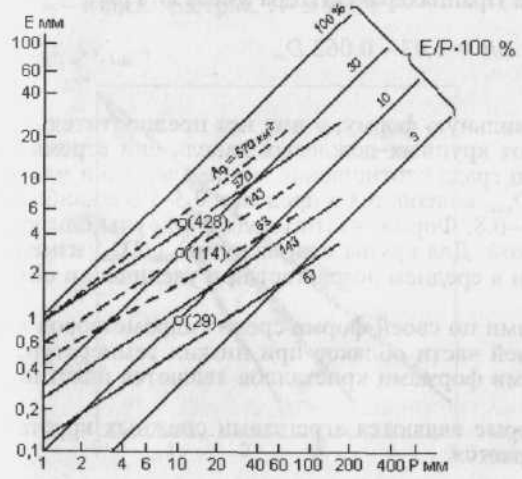

Рис. 1.2.1. Абсолютная ошибка E при измерении осредненного по площади слоя осадков P при различной плотности сети осадкомеров [12].

Уравнение регрессии (1.2.4) графически представлено на рис. 1.2.1. Из рисунка видно, что ошибка E возрастает с увеличением среднего слоя осадков, хотя относительная ошибка $(E/P)\cdot 100$ при этом уменьшается. С увеличением плотности сети дождемеров A_g ошибка E уменьшается.

Отметим, что высокая пространственная изменчивость интенсивности и количества осадков определяет большую естественную дисперсию характеристик осадков и, следовательно, большие ошибки на любой дождемерной сети.

1.3. Микрофизические свойства гидрометеорных частиц

Форма и ориентация. Форма дождевой капли определяется силами поверхностного натяжения, гидростатическим и аэродинамическим давлением воздушного потока вокруг капли. Крупные дождевые капли (диаметром больше 2 мм) при падении сплющиваются, их горизонтальный диаметр становится больше вертикального. Форма таких жидких капель близка к сплющенному сфероиду с отношением осей, зависящим от диаметра равновеликой сферы $D_e = \left(ab^2\right)^{1/3}$, где a – размер капли вдоль оси вращения, ориентированной близко к вертикали, а b – конечный диаметр.

Эмпирическая формула Праппахера–Питтера имеет вид [9]

$$a/b = 1{,}03 - 0{,}062\, D_e,$$

где D_e – в миллиметрах.

Градины имеют неправильную форму, у них нет предпочтительной ориентации, и в отличие от крупных дождевых капель они стремятся упасть быстрее. Для частиц града соотношение минимального и максимального диаметров D_{min}/D_{max} колеблется в пределах 0,3–1,0 с наиболее вероятным значением 0,75–0,8. Форма частиц ледяной крупы близка к сферической или конической. Для крупы отношение D_{min}/D_{max} изменяется в пределах 0,55–0,90 и в среднем возрастает при увеличении объема частицы.

Наиболее анизотропными по своей форме среди гидрометеоров являются кристаллы в верхней части облаков при низких температурах. Самыми распространенными формами кристаллов являются пластины, иглы и столбики.

Форма снежинок, которые являются агрегатами снежных кристаллов, практически не повторяется.

Размеры. Лучше всего изучена функция распределения по размерам жидких капель. В самом общем виде она может быть записана следующим образом:

$$N(D) = N_0 D^{\mu} \exp\left(-\frac{3{,}67+\mu}{D_0}\right), \qquad (1.3.1)$$

где $N(D)$ – число капель в единице объема на единицу интервала размеров (от D до $D + \Delta D$); N_0 составляет от 30 до 30 000 мм$^{-1}$м$^{-3}$; μ – от –2 до 4; D – диаметр капли; D_0 – медианный объемный диаметр, который определяется из соотношения

$$\int_0^{D_0} D^3 N(D)dD = \int_{D_0}^{D_{max}} D^3 N(D)dD$$

и составляет от 0,5 до 2,5 мм; D_{max} – максимально возможный диаметр капли, обычно равный 6–8 мм.

Частным случаем формулы (1.3.1) является распределение Маршалла–Пальмера (рис. 1.3.1). Оно получается при $\mu = 0$ и $N_0 = 8000$ мм$^{-1}$м$^{-3}$. В этом случае медианный диаметр D_0 и интенсивность осадков I связаны соотношением

$$D_0 = 0{,}895\, I^{0{,}21}, \qquad (1.3.1а)$$

где D_0 – в миллиметрах, I – в мм/ч.

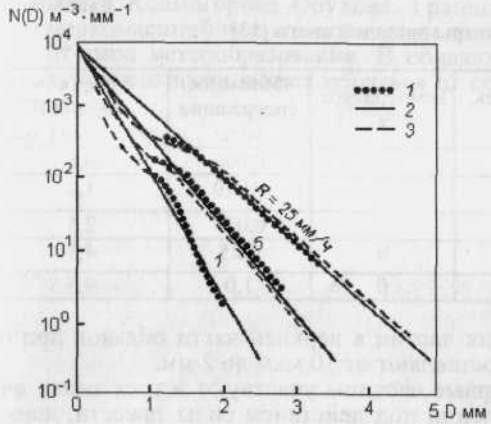

Рис. 1.3.1. Измеренные распределения капель по размерам (*1*), их наилучшая аппроксимация экспонентами (*2*) и экспериментальные кривые других авторов (*3*) [8].

Распределение Маршалла–Пальмера описывает только крупнокапельную часть спектра ($D \geq 1$ мм) и справедливо только для $I < 35$ мм/ч.

Как показывают многочисленные исследования, распределение $N(D)$ заметно меняется от одной зоны осадков к другой и зависит от стадии развития, вида осадков и синоптической ситуации, при которой образуются осадки.

Функция распределения частиц крупы и града описывается выражением [9]

$$N(D) = N_0 e^{-\Lambda D}, \qquad (1.3.2)$$

где $N_0 = 4 \cdot 10^3 \cdot \Lambda^{5,3}$, Λ – в мм$^{-1}$. При этом максимальный размер градины может достигать 60–80 мм, а частицы крупы – 10–12 мм.

Аналогичной зависимостью описывается распределение снежинок по размерам. В этом случае параметры N_0 (м$^{-3}$·мм$^{-1}$) и Λ (мм$^{-1}$) связаны с интенсивностью снегопада формулами

$$N_0 = 2500\, I^{-0,94}, \qquad \Lambda = 2,29\, I^{-0,45}. \qquad (1.3.3)$$

Под интенсивностью снегопада понимается количество воды, образующееся в результате таяния снега и выраженное в мм/ч. Максимальные размеры снежных хлопьев составляют 15–20 мм.

В табл. 1.3.1 приведены параметры моделей снега, которые дают представление об интенсивности снегопада [13].

Таблица 1.3.1

Параметры моделей снега [13]

Тип модели	Плотность, г/см^3	Температура, °С	Объемное содержание воды	Скорость падения (D = 5 мм), м/с
Сухой снег	0,08	–6	0,006	0,8
Влажный снег	0,10	0	0,010	1,2
Мокрый снег	0,27	0	0,077	2,5
Обводненный снег	0,50	0	0,25	4,5
Дождь	1,0	0	1,0	9,5

Размеры кристаллических частиц в верхней части облаков при отрицательной температуре составляют от 10 мкм до 2 мм.

Движение. Гидрометеорные частицы участвуют в трех типах движений: гравитационном падении под действием силы тяжести, движении в турбулизованной воздушной среде и движении в упорядоченных крупномасштабных конвективных потоках (восходящих и нисходящих).

Гравитационные скорости падения частиц определяются их размером, фазовым состоянием и соотношением плотности частицы и окружающего воздуха. Для водяных капель установившаяся скорость их падения в неподвижном воздухе определяется известной формулой

$$\nu(D) = 3,778\, D^{0,67}, \qquad (1.3.4)$$

где D – в миллиметрах, ν – в м/с.

Гравитационная скорость падения жидких капель не превышает 10 м/с (см. табл. 1.3.1).

Для градовых частиц связь скорости гравитационного падения с диаметром имеет следующий вид:

$$\nu(D) = 4,51\, D^{0,5}, \qquad (1.3.5)$$

где D – в миллиметрах, ν – в м/с. При этом при максимальном размере градины 60 мм гравитационная скорость может достигать 35 м/с.

Значения гравитационной скорости для снежинок приведены в табл. 1.3.1; для кристаллических частиц они не превосходят 2–2,5 м/с.

Крупномасштабные движения в облаках и осадках определяются стратификацией поля ветра, а также наличием восходящих и нисходящих конвективных потоков, характерных для кучевых и кучево-дождевых облаков. Обусловленные турбулентностью мелкомасштабные движения определяют диапазон и поле скоростей, которые описываются в первом приближении теорией однородной и изотропной турбулентности Колмогорова–Обухова. Граница между крупномасштабным и мелкомасштабным компонентами движения весьма условна и зависит от типа метеообразования. В облаках величина внешнего масштаба турбулентности может меняться от сотен метров до нескольких километров.

ГЛАВА 2

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ МЕТЕОНАБЛЮДЕНИЙ

2.1. Отражающие свойства гидрометеоров

Распространяющаяся в воздушной среде плоская электромагнитная волна, излучаемая радиолокатором, возбуждает в частицах облаков и осадков вторичное излучение. Гидрометеоры становятся осцилляторами и колеблются с частотой падающей волны. Часть переизлученной ими энергии распространяется и в направлении, противоположном первичной падающей волне, т. е. в направлении на радиолокатор. Множество одновременно облученных радиолокатором гидрометеоров создают суммарный отраженный сигнал (в предположении однократного рассеяния), в котором и содержится метеорологическая информация об отражающих объектах.

Для оценки отражающих свойств частиц облаков и осадков применяется ряд связанных между собой характеристик:

– эффективная площадь рассеяния i-й частицей (σ_i),

– удельная площадь обратного рассеяния частиц облаков и осадков (η),

– радиолокационная отражаемость (Z).

Эффективная площадь рассеяния σ. При выполнении рэлеевских условий рассеяния электромагнитного излучения, согласно которым радиус частицы a намного меньше длины падающей на нее плоской электромагнитной волны ($a \le 0{,}03\ \lambda$) и много меньше λ внутри самой частицы $a < 0{,}13 \cdot \lambda/|m|$, выражение для σ_i выглядит следующим образом:

$$\sigma_i = \frac{64\pi^5 a^6}{\lambda^4}\left|\frac{m^2-1}{m^2+2}\right|^2 = \frac{\pi^5 D^6}{\lambda^4}\left|\frac{m^2-1}{m^2+2}\right|^2, \qquad (2.1.1)$$

где m – комплексный показатель преломления частицы на длине волны λ, $D = 2a$ – диаметр сферических частиц.

Наличие мнимой части в показателе преломления m указывает на то, что падающая на частицу энергия частично поглощается веществом частицы. Для воды в сантиметровом диапазоне

$$\left|\frac{m_в^2-1}{m_в^2+2}\right|^2 = 0{,}93 \pm 0{,}004,$$

а для льда с единичной плотностью этот множитель равен 0,197 и колеблется в диапазоне 0,176–0,208. Для облаков и осадков диапазон изменения величины σ_i (при λ от 0,5 до 10 см) может достигать восьми порядков ($\sigma_i = 10^{-8}...1$ см^2).

При рассеянии, отличном от рэлеевского, когда возрастают размеры частиц гидрометеоров, расчет σ представляет значительные трудности. Рассеяние по всем направлениям заметно увеличивается, а σ начинает осциллировать, постепенно приближаясь к предельному значению, пропорциональному πa^2.

Удельная площадь обратного рассеяния облаков и осадков η является суммарной эффективной площадью рассеяния единичного объема облака (или осадков), заполненного рассеивающими частицами (каплями, кристаллами и т.д.):

$$\eta = \sum_{i=1}^{N} \frac{\sigma_i}{V_э}, \qquad (2.1.2)$$

где – η в м$^{-1}$, N – число рассеивающих частиц в эффективном объеме $V_э$ отражающей области.

Для исключения зависимости η от λ вводят понятие радиолокационной отражаемости Z (м^3), которая описывается выражением

$$Z = \frac{\lambda^4}{\pi^5}\eta. \qquad (2.1.3)$$

Здесь λ – длина волны (м), η – в м$^{-1}$, Z – в м^3.

Если отражают рэлеевские сферические частицы, то

$$\eta = \frac{\pi^5}{\lambda^4}\left|\frac{m^2-1}{m^2+2}\right|^2 \sum_{i=1}^{N} \frac{D_i^6}{V_э}. \qquad (2.1.4)$$

Радиолокационная отражаемость Z – величина, характеризующая отражающие свойства единичного объема облаков и осадков. Она может интерпретироваться как сумма возведенных в шестую степень диаметров частиц, находящихся в единице объема $V_э$:

$$Z = \sum_{i=1}^{N} \frac{D_i^6}{V_э}. \qquad (2.1.5)$$

В облаках и осадках величина Z (мм^6·м$^{-3}$) изменяется от Z_{min} = 10^{-5} мм^6·м$^{-3}$ до Z_{max} = 10^7 мм^6·м$^{-3}$.

В практике радиолокационных наблюдений отражаемость облаков и осадков измеряют в мм^6·м$^{-3}$ или дБZ относительно Z_0 = 1 мм^6/м^3:

$$Z\,(\text{мм}^6/\text{м}^3) = 10^{18}\,Z\,(\text{м}^3) = 10^{12}\,Z\,(\text{см}^3),$$

$$Z\,(\text{дБZ}) = 10\,\lg\frac{Z}{Z_0},$$

$$Z\,(\text{мм}^6\cdot\text{м}^{-3}) = 10^{0{,}1Z}\,(\text{дБZ}).$$

Если отражаемость Z определяется через радиус частиц a, то

$$Z_a\,(\text{дБZ}) = Z\,(\text{дБZ}) - 18.$$

Эквивалентная радиолокационная отражаемость $Z_э$ характеризует свойства единичного объема облака или осадков и равна отражаемости капельного облака, формирующего равный по амплитуде отраженный сигнал.

Величина $Z_э$ определяется формулой

$$Z_э = \frac{\lambda^4 \eta}{\pi^5 \left|\dfrac{m_в^2 - 1}{m_в^2 + 2}\right|^2}. \qquad (2.1.6)$$

Таким образом, для водяных частиц $Z_э \equiv Z$.

Для ледяных частиц

$$Z_э = \left\{ \left|\frac{m_л^2 - 1}{m_л^2 + 2}\right|^2 \Big/ \left|\frac{m_в^2 - 1}{m_в^2 + 2}\right|^2 \right\} Z$$

или $Z_э$ = (0,189...0,224) Z.

С учетом приведенных единиц измерений $Z_э$ (дБZ) для ледяных частиц можно записать следующим образом:

$$Z_э = Z - (7{,}2...6{,}5). \qquad (2.1.7)$$

Для частиц, отличных от рэлеевских, имеем

$$Z_э = 3{,}52\cdot 10^9\,\eta\,\lambda^4, \qquad (2.1.8)$$

где η – в см$^{-1}$ и λ – в сантиметрах.

Дифференциальная отражаемость. При одновременном облучении частиц облаков и осадков электромагнитным полем с горизонтальной и вертикальной поляризацией вводится понятие дифференциальной отражаемости Z_{DR} (дБZ):

$$Z_{DR} = Z_г / Z_в, \qquad (2.1.9)$$

$$Z_{DR} = 10\,\lg\,(Z_г / Z_в),$$

где $Z_г$ и $Z_в$ – радиолокационная отражаемость при горизонтальной и вертикальной поляризациях электромагнитного излучения (мм^6·м$^{-3}$).

Расчет радиолокационной отражаемости можно проводить по результатам микрофизических измерений размеров частиц в облаках и осадках. Из определения Z следует, что отражаемость хорошо реагирует на изменение крупнокапельной части спектра. Процессы укрупнения частиц в облаках и осадках сразу приводят к увеличению Z.

Однако на практике Z определяют из уравнения радиолокации атмосферных образований. Если не делается специальных оговорок, то в статьях по радиолокационной метеорологии приводятся результаты измерения $Z_э$.

2.2. Уравнение радиолокации атмосферных образований

Уравнение радиолокации атмосферных образований связывает среднюю мощность сигнала $\overline{P}_{пр}$, отраженного от облаков и осадков, дальность метеоцели R и отражаемость $Z_э$ с техническими параметрами радиолокатора.

В каждый момент времени радиолокационный сигнал формируется совокупностью частиц облаков и осадков, отраженные сигналы которых *одновременно* поступают на вход приемника радиолокатора. Эта совокупность заключена в пределах радиолокационного (импульсного) объема, образованного шириной диаграммы направленности антенны (ДНА) радиолокатора и половиной пространственной протяженности зондирующего импульса его передатчика.

Величина радиолокационного объема V определяется по формуле

$$V = \frac{\pi}{16\ln 2} R^2 \Theta_0 \varphi_0 h_з, \qquad (2.2.1)$$

где V – радиолокационный объем (м^3); R – удаление импульсного объема от радиолокатора (м); Θ_0 и φ_0 – ширина диаграммы направленности антенны по точкам половинной мощности (по уровню 3 дБ) в двух взаимно перпендикулярных плоскостях (рад); $h_з = c\tau_{зонд}$ – пространственная протяженность зондирующего импульса передатчика (м); $\tau_з$ – длительность зондирующего импульса (мкс); c – скорость распространения электромагнитных колебаний в атмосфере (м/с).

Как следует из (2.2.1), величина V возрастает с дальностью: при увеличении R в 10 раз V увеличивается в 100 раз. Разрешающая способность по дальности остается неизменной.

Метеорологические радиолокаторы (МРЛ) обладают рядом специфических особенностей, которые обеспечивают их высокую эффективность при обнаружении и измерении параметров метеообразований. Основные характеристики МРЛ (об этом подробнее в главе 6) находятся в следующих пределах:

Длина волны λ ..... 5 мм –11 см
Импульсная мощность ..... 100–1000 кВт
Чувствительность приемника $P_{пр}$ ..... 10^{-13}–10^{-14} Вт
Длительность зондирующего импульса $\tau_{зонд}$ ... 0,5–4 мкс
Скорость обзора пространства ..... до 36 °/с 6 об/мин
Диаграмма направленности антенны Θ ..... 0,5–2°

Уравнение радиолокации атмосферных образований (2.2.2) [1, 3, 5, 8, 9, 11, 13, 17] получено для однократного рассеяния и при условии взаимной независимости рассеяния частиц друг от друга

$$\overline{P}_{пр} = \frac{P_{пер} G^2 \Theta_o \varphi_o}{4^5 \ln 2 \pi^2 R^2} \eta \chi K_{зап} K_{РПУ} K_З K_{АВ}, \qquad (2.2.2)$$

где $\overline{P}_{пр}$ – средняя мощность принятого сигнала (Вт); $P_{пер}$ – импульсная мощность электромагнитных колебаний, генерируемых передатчиком МРЛ (Вт); G – коэффициент усиления антенны; η – удельная площадь обратного рассеяния; $K_{зап}$ – коэффициент заполнения радиолокационного объема V частицами облаков и осадков; $K_{АВ}$ – коэффициент полезного действия антенно-волноводного тракта на прием и передачу; $K_{РПУ}$ – коэффициент учета ослабления в пленке воды, образуемой на оболочке радиопрозрачного укрытия антенны (РПУ) во время выпадения осадков в месте установки МРЛ; $K_З$ – коэффициент, учитывающий влияние подстилающей поверхности на диаграмму направленности антенны МРЛ; χ – ослабление радиоволн в газах атмосферы, облаках и осадках при их распространении на пути $2R$.

Перед преобразованием уравнения (2.2.2) в форму, удобную для практических расчетов, рассмотрим подробнее основные параметры, входящие в него, и диапазон их изменения в реальных условиях работы МРЛ.

Диаграмма направленности антенны (ДНА). Для достижения высокой разрешающей способности в пространстве для МРЛ используют антенны с узкой, игольчатой диаграммой направленности, которая формируется параболическим зеркалом.

Ширина диаграммы направленности Θ (град.) определяется диаметром параболического зеркала $D_{Ант}$ и рабочей длиной волны МРЛ λ [1]:

$$\Theta = 72{,}8 \frac{\lambda}{D_{Ант}}. \qquad (2.2.3)$$

В табл. 2.2.1 приведены расчеты $D_{Ант}$ в зависимости от величины Θ для основных рабочих длин волн МРЛ: 10 см (полоса частот S); 5,4 см (полоса частот C) и 3,2 см (полоса частот X).

Таблица 2.2.1

Диаметр антенны $D_{Ант}$ (м) в зависимости от длины волны МРЛ λ

Θ° на уровне 3 дБ	λ см		
	10 (S)	5,4 (C)	3,2 (X)
0,5	14,6	7,86	4,5
1,0	7,2	4,0	2,4
1,5	4,8	2,7	1,6
2,0	3,6	2,0	1,2

Линейные размеры ДНА, равные ΘR, приведены в табл. 2.2.2.

Коэффициент усиления антенны G показывает, во сколько раз мощность изотропного излучателя должна быть больше мощности направленного излучателя, чтобы в данной точке пространства создать такой же поток энергии:

$$G = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2}, \qquad (2.2.4)$$

где A_e – эффективная площадь антенны, тесно связанная с площадью раскрыва $A_р = \pi D^2_{Ант}/4$. Величина G измеряется в децибелах. Для МРЛ значение G может достигать 30 дБ.

Таблица 2.2.2

Линейные размеры диаграммы направленности антенны ΘR (км) в зависимости от удаления от МРЛ R

$\Theta°$	R км					
	10	50	100	150	200	250
0,5	0,085	0,425	0,85	1,275	1,7	2,125
1,0	0,17	0,85	1,7	2,55	3,4	4,25
1,5	0,255	1,275	2,55	3,825	5,1	6,375
2,0	0,34	1,7	3,4	5,1	6,8	8,5

Диаграмма направленности антенны МРЛ окончательно формируется в зоне Френеля–Фраунгофера на расстоянии, определяемом по формуле

$$R_{\text{Фр}} \geq \frac{2D^2_{\text{Ант}}}{\lambda}.$$

Только за пределами $R_{\text{Фр}}$ ДНА МРЛ имеет игольчатый характер.

На рис. 2.2.1 приведено трехмерное изображение распределения энергии, излучаемой антенной МРЛ. Из рис. 2.2.1 видно, что, кроме главного, основного (полезного) лепестка ДНА, под различными углами к нему образуются боковые лепестки, уровень которых составляет обычно менее 10 % мощности, излучаемой основным лепестком.

На рис. 2.2.2 представлено распределение коэффициента усиления антенны G в двумерной плоскости.

Ширина ДНА МРЛ обычно аппроксимируется функцией Гаусса и определяется по точкам половинной мощности основного лепестка, или иначе на уровне 3 дБ. Из рис. 2.2.2 очевидно, что это общепринятое правило удобно для расчетов, но при прецизионных измерениях на МРЛ требуется экспериментальный съем ДНА в месте установки. Для наглядности можно воспользоваться моделированием ДНА, содержащей несколько лепестков [1]. В первом приближении распределение мощности в зависимости от угла можно представить следующим выражением:

$$10\lg\left(\frac{G_\varphi}{G_m}\right) = -3\left(\frac{\varphi - \varphi_m}{\varphi_0}\right)^2,$$

где G_m – коэффициент усиления антенны в направлении оси лепестка, составляющий угол φ_m, а φ_0 – угол, при котором выигрыш за счет направленности уменьшается до $^1/_2\, G_m$.

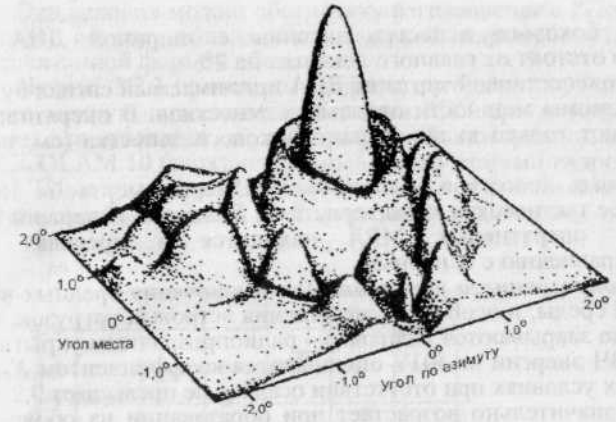

Рис. 2.2.1. Образец трехмерного (карандашного) игольчатого луча ДНА для отражателя в виде параболоида радиолокатора AN/FPQ-6 [15].

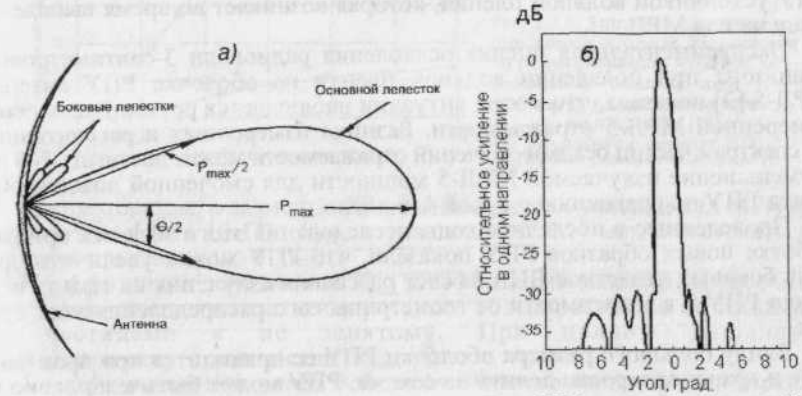

Рис. 2.2.2. Разрез ДНА МРЛ с параболическим отражателем [17] (показаны только первый и второй боковые лепестки) (*а*) и распределение коэффициента усиления параболической антенны G в двумерной плоскости (*б*).

Модель ДНА представлена в табл. 2.2.3 [1].

Таблица 2.2.3

Лепесток	G_m относительно главного лепестка, дБ	Угол половинной мощности	Угловое расстояние от главного лепестка
Главный	0	φ_0	0
Боковой 1	–20	$\varphi_0/2$	4 φ_0
Боковой 2	–27	$\varphi_0/2$	6 φ_0

Ось первого бокового лепестка антенны с шириной ДНА 1° ($\varphi_0 = 0{,}5°$) обычно отстоит от главного лепестка на 2°.

В случае многолепестковой картины ДНА принимаемый сигнал будет синтезирован из суммы мощности отдельных лепестков. В оперативной практике учитывают только вклад первого бокового лепестка (см. подробнее п. 2.5).

Наличие боковых лепестков увеличивает размеры «мертвой» зоны МРЛ и ухудшает ее тактические характеристики. Величина G первого бокового лепестка оперативных МРЛ находится в пределах от –23 до –30 дБ по сравнению с основным.

Влияние радиопрозрачного укрытия. Для исключения вредных воздействий внешней среды, и особенно уменьшения ветровых нагрузок, антенны МРЛ обычно закрываются колпаком – радиопрозрачным укрытием (РПУ). Потери СВЧ энергии на РПУ оцениваются коэффициентом $K_{РПУ}$, который в обычных условиях при отсутствии осадков не превышает 0,2 дБ. Величина потерь значительно возрастает при образовании на оболочке РПУ устойчивой водяной пленки, которая возникает во время выпадения осадков над МРЛ.

Экспериментальная оценка ослабления радиоволн 3-сантиметрового диапазона при появлении водяной пленки на оболочке РПУ антенны МРЛ-5 [2] показала, что в этой ситуации наблюдается резкое уменьшение измеренной МРЛ-5 отражаемости. Разница измеренных и рассчитанных по спектрам частиц осадков значений отражаемости может достигать 7–9 дБ, а уменьшение излучаемой МРЛ-5 мощности для смоченной дождем оболочки РПУ по сравнению с сухой 4–6 дБZ.

Проведенные в последние годы исследования этого эффекта при разработке новых образцов РПУ показали, что РПУ может увеличить уровень боковых лепестков ДНА за счет рассеяния излучения на стыках оболочки РПУ и в зависимости от геометрического распределения этих стыков.

Ввиду большого размера оболочки РПУ ее приходится при производстве и транспортировке делить на секции. РПУ может быть выполнено из относительно больших секций, подобных коркам апельсина, которые соединяются вертикально. Если РПУ выполнено в форме псевдослучайной фигуры, то оно состоит из множества фрагментов неправильной формы, исключающих облучение антенной параллельных соединений.

Как отмечают авторы [14], РПУ в виде «апельсина» (как у МРЛ-5) не создает экстремального усиления боковых лепестков по углу места, особенно при горизонтальной поляризации.

Для того чтобы обеспечить минимум ослабления оболочкой РПУ во время дождя, свойства поверхности оболочки должны в идеальном случае отвечать двум условиям:

1) вода на поверхности оболочки должна оседать в виде бусинок, а не сплошной пленкой;

2) вода должна быстро скатываться с поверхности оболочки РПУ.

Эти условия можно обеспечить изготовлением РПУ из особого химического состава, обладающего высокой гидрофобностью, со специально рассчитанной формой оболочки.

На рис. 2.2.3 приведены графики потерь при прохождении излучения через мокрую поверхность оболочки РПУ при интенсивности дождя 10 мм/ч для оболочек с негидрофобной поверхностью и с покрытием ESSCOLAM 10 (запатентованный многослойный гидрофобный материал) [14]. Из-за потерь на РПУ постоянно и с нарастанием занижается интенсивность осадков вдоль всей траектории радиолуча.

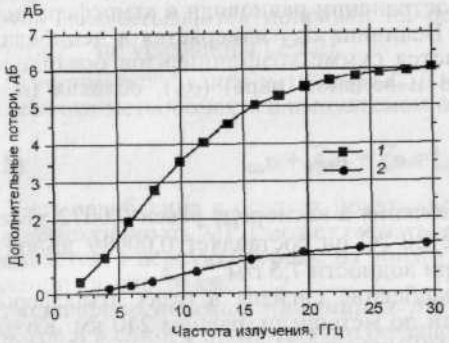

Рис. 2.2.3. Типичные дополнительные потери в одном направлении на радиопрозрачном укрытии, обусловленные пленкой воды (I = = 10 мм/ч), в зависимости от частоты излучения [14].
1 – негидрофобное покрытие РПУ; *2* – РПУ изготовлено из ESSCOLAM 10.

Таким образом, в зависимости от атмосферных условий над МРЛ при частоте излучения 10 ГГц $K_{РПУ}$ в уравнении (2.2.1) может изменяться в широких пределах – до 9 дБ.

Коэффициент заполнения $K_{зап}$. Коэффициент заполнения рассчитывается как отношение части импульсного объема, занятого отражающими частицами к не занятому. При полном заполнении $K_{зап} = 1$, при отсутствии частиц $K_{зап} = 0$.

Коэффициент полезного действия антенно-волноводного тракта $K_{АВ}$

$$K_{АВ} = K_{пер} \cdot K_{пр},$$

где $K_{пер}$ и $K_{пр}$ – коэффициенты полезного действия антенно-волноводного тракта при передаче и приеме. Величина $K_{АВ}$ зависит от длины волноводного тракта, качества его изготовления и сборки, а $K_{АВ}$ является технической характеристикой конкретного МРЛ и может изменяться от 0,2 до 10 дБ. Величина $K_{АВ}$ указывается в техническом паспорте на МРЛ.

Коэффициент, учитывающий влияние подстилающей поверхности на ДНА, $K_З$. При углах места (возвышения) антенны МРЛ ε, больших половины ширины диаграммы направленности антенны (т.е. при $\varepsilon \geq \Theta_0/2$), $K_З = 1$.

При нулевом угле места надо учитывать влияние подстилающей поверхности, которое зависит от шероховатости поверхности, длины волны МРЛ и ширины ДНА. Значение $K_З$ в этих ситуациях определяется экспериментально для конкретного МРЛ и места его установки.

Ослабление радиоволн. Ослабление энергии радиоволн при их распространении в тропосфере обусловлено двумя причинами: поглощением радиоволн, т.е. превращением электромагнитной энергии СВЧ диапазона в тепловую, и рассеянием радиоволн частицами облаков и осадков.

Поглощение радиоволн происходит в газах тропосферы (в кислороде и водяном паре) и частицами воды и льда облаков и осадков. Для расчета полного ослабления при распространении радиоволн в атмосфере вводят коэффициент ослабления $\alpha_{осл}$. Величина $\alpha_{осл}$ измеряется в децибелах на единицу пути (дБ/км) и равняется сумме коэффициентов ослабления в атмосферных газах (кислороде и водяном паре) ($\alpha_{аг}$), облаках ($\alpha_{обл}$) и осадках ($\alpha_{ос}$):

$$\alpha_{осл} = \alpha_{аг} + \alpha_{обл} + \alpha_{ос}. \qquad (2.2.5)$$

Для λ = 3 см коэффициент ослабления в кислороде равен 0,0072 дБ/км, в водяном паре при температуре 20 °С он составляет 0,00039 дБ/км при водности 1 г/м^3 и 0,004 дБ/км при водности 7,5 г/м^3.

Для МРЛ с λ = 3,2 см ослабление сигнала в газах атмосферы на 3 дБ происходит при расстоянии до метеоцели, равном 240 км. Коэффициент ослабления $\alpha_{осл}$ в облаке (дБ·км$^{-1}$/г·м$^{-3}$) на длине волны 3 см находится в пределах от $2{,}5\cdot10^{-3}$ (для кристаллических облаков) до $8{,}6\cdot10^{-2}$ (для водяных облаков при t = 0 °С). Для МРЛ с λ = 5 см ослабление атмосферными газами составляет 1,5 дБ на 100 км.

Ослабление в осадках представляют обычно как функцию интенсивности осадков (табл. 2.2.4). Ослабление в сухом снеге мало́, а в мокром снеге такое же, как и в осадках.

Таблица 2.2.4

Двойное ослабление в жидких осадках (дБ/км) в зависимости от длины волны (см) и интенсивности осадков [13]

Интенсивность осадков I мм/ч	Длина волны МРЛ, см		
	3	5,6	10
0,5	0,006	0,002	0,0003
1	0,014	0,004	0,0006
5	0,122	0,03	0,003
10	0,302	0,066	0,006
50	2,5	0,430	0,03
100	6,16	0,962	0,06
200	15,3	2,16	0,12

Для оценки общего двустороннего ослабления радиоволн следует использовать следующее выражение:

$$\chi = 10\lg\frac{P_{пр}}{P_{пр.о}} = 2\int_0^R \alpha_{осл}(r)dr, \qquad (2.2.6)$$

где $P_{пр.о}$ – мощность, которая была бы принята без учета ослабления.

Для конкретного района размещения МРЛ на длинах волн меньше 10 см обычно рассчитываются поправки на ослабление, которые вводят для расчета $\overline{P}_{пр}$ по уравнению (2.2.2).

С учетом ослабления истинное ($Z_{ист}$) и измеренное ($Z_{изм}$) значения отражаемости метеообъекта в импульсном объеме связаны соотношением

$$Z_{ист} = Z_{изм} + \chi\,. \qquad (2.2.7)$$

Учет ослабления в осадках показывает, что реальная метеорологическая эффективность МРЛ может оказаться гораздо меньше расчетной, что сказывается, в первую очередь, на обнаружении зон облаков и осадков на удалении свыше 50 км.

Метеорологический потенциал МРЛ. Для удобства практических расчетов и в связи с относительно большой стабильностью основных технических параметров МРЛ вводят понятие потенциала МРЛ, который определяется по формуле

$$П_м = \frac{\pi^3}{4^5\ln 2}\frac{P_{пер}G^2\Theta_0\varphi_0 h_3 K_{АВ}}{P_{пр.min}\lambda^2}, \qquad (2.2.8)$$

где $П_м$ – метеорологический потенциал, $P_{пр.min}$ – минимально обнаружимая мощность отраженного сигнала (Вт), $P_{пр.min} = P_ш$ – уровень шумов приемного устройства.

С учетом (2.2.8) уравнение радиолокации атмосферных образований можно записать следующим образом:

$$\frac{\overline{P}_{пр}}{P_ш} = П_м\frac{Z_э}{R^2}\chi K_{РПУ}\cdot K_З\cdot K_{зап}. \qquad (2.2.9)$$

В оперативной практике уравнение (2.2.9) принимают при следующих допущениях:

1) расчет $Z_э$ ведется для рэлеевских сферических частиц при однократном некогерентном рассеянии;

2) имеет место полное заполнение импульсного объема отражающими частицами: $K_{зап} = 1$;

3) не учитывается влияние подстилающей поверхности на ДНА ($K_З = 1$), что, строго говоря, возможно только при углах места антенны больше $\Theta/2$;

4) не учитывается ослабление радиоволн при их распространении до цели и обратно при интенсивности осадков ≤ 10 мм/ч.

При перечисленных допущениях уравнение (2.2.2) запишется в виде

$$\frac{\overline{P}_{пр}}{P_{ш}} = \Pi_{м} \frac{Z_{э}}{R^2} [K_{РПУ}\, \chi]. \qquad (2.2.10)$$

Если члены уравнения выражены в децибелах, то $Z_э$ (дБZ) определяется следующим образом:

$$Z_э\,(дБZ) = 10 \lg \left(\frac{\overline{P}_{пр}}{P_{ш}}\right) - 10 \lg \Pi_{м} + 20 \lg R - [10 \lg K_{РПУ} + \chi]. \qquad (2.2.11)$$

В таком виде уравнение радиолокации атмосферных образований учитывает и способ измерения отраженного сигнала, и особые условия наблюдений (заключены в квадратные скобки).

2.3. Распространение радиоволн сантиметрового диапазона

Радиоволны сантиметрового диапазона распространяются в атмосфере в пределах прямой видимости по криволинейным траекториям из-за рефракции, обусловленной диэлектрической неоднородностью атмосферы. По этой причине траектория любой радиоволны, первоначально горизонтальная, по мере удаления от источника радиоволн загибается вниз, к поверхности Земли.

Классификация видов рефракции в зависимости от отношения кривизны радиолуча ρ к радиусу Земли $a_З$ приведена на рис. 2.3.1.

При распространении радиоволн над сферической Землей появляется радиогоризонт, т.е. граница, определяемая точками касания линии «радиозрения» с поверхностью Земли. Радиорефрация в атмосфере и расстояние до горизонта определяются вертикальным градиентом показателя преломления воздуха g_n. Показатель преломления для радиоволн является функцией температуры, влажности и давления атмосферы. Каждый из перечисленных параметров убывает с высотой. В условиях нормальной рефракции дальность радиовидимости $R_{рг}$ (км) при поднятой на высоту h^* (м) над поверхностью Земли антенне МРЛ и находящейся на высоте H (м) над поверхностью Земли цели будет определяться простой формулой

$$R_{рг}\,(км) = \sqrt{\frac{2a_З}{1 + a_З g_n}}\left(\sqrt{h^*} + \sqrt{H}\right) = 4{,}1\left[\sqrt{h^*(м)} + \sqrt{H(м)}\right], \qquad (2.3.1)$$

где $a_З$ – радиус Земли (6370 км), $g_n = -4 \cdot 10^{-8}$ м$^{-1}$ – градиент показателя преломления.

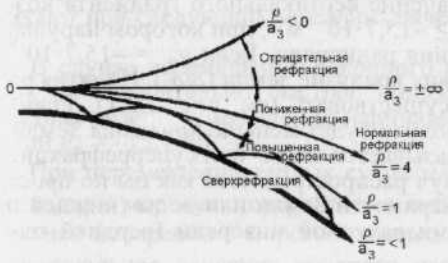

Рис. 2.3.1. Классификация видов рефракции.

Из формулы (2.3.1) следует, что при нулевом угле возвышения антенны с увеличением расстояния от МРЛ радиолуч поднимается над поверхностью Земли (табл. 2.3.1).

Начиная с удаления 50 км от МРЛ, существует зона радиотени от поверхности Земли до нижней границы ДНА. Цели, оказавшиеся в этой зоне, не будут обнаруживаться МРЛ.

Таблица 2.3.1

Высота (км) нижней границы диаграммы направленности антенны МРЛ над поверхностью Земли в зависимости от угла места антенны ε

ε	Удаление от МРЛ, км				
	50	100	150	200	250
0°	0,15	0,6	1,35	2,4	3,75
0,5°	0,58	1,47	2,655	4,14	5,925

Высота отражающих целей относительно уровня расположения антенны МРЛ (h^*) с учетом угла места (угла возвышения) антенны (ε) в условиях нормальной рефракции ($\xi = 6 \cdot 10^{-5}$ км) определяется по формуле

$$H = R \sin \varepsilon + \xi R^2 + h^*, \qquad (2.3.2)$$

где R – расстояние от радиолокатора до цели (км). Второй член формулы (2.3.2) учитывает искривление траектории в условиях нормальной атмо-

сферной рефракции. Формула (2.3.2) справедлива в среднем при хорошо перемешанной атмосфере, в дни с выпадением осадков.

На рис. 2.3.2 представлены зависимость изменения ширины ДНА с удалением от МРЛ при нормальной рефракции в атмосфере и высота зоны радиотени.

2.4. Аномальное распространение радиоволн

Существует критическое значение вертикального градиента коэффициента преломления воздуха $g_n \geq -15{,}7\cdot10^{-8}$ м$^{-1}$, при котором нарушаются обычные условия распространения радиоволн. Если $g_n = -15{,}7\cdot10^{-8}$ м$^{-1}$, то кривизна радиолуча будет равна кривизне Земли (ρ/a_3). Понятия радиогоризонта при этом не будет существовать (см. рис. 2.3.1). Если $g_n > -15{,}7\cdot10^{-8}$ м$^{-1}$, то кривизна радиолуча будет меньше кривизны Земли. Явление, наблюдаемое при этом, называется сверх- или суперрефракцией.

При сверхрефракции радиолуч распространяется как бы по пространственному волноводу вдоль поверхности Земли или воды (нижней плоскостью) и нижней границы температурной инверсии (верхней плоскостью).

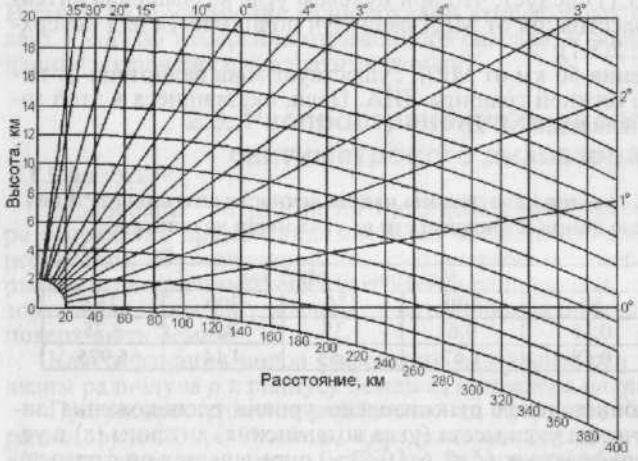

Рис. 2.3.2. Эффект кривизны Земли при нормальной (стандартной) атмосферной рефракции [17].

Под углами места антенны, близкими к ~ 0°, т.е. когда радиолуч выходит под небольшим углом наклона к горизонту, он испытывает полное внутреннее отражение в слое нижней границы инверсии, затем он достигает поверхности Земли, опять от нее отражается, достигает нижней границы инверсии и т.д.

Распространение радиоволн происходит вдоль Земли по атмосферному волноводу. Дальность радиовидимости при этом резко увеличивается. Однако обилие отражений от поверхности Земли резко уменьшает эффективность работы МРЛ по метеорологическим целям – облакам и осадкам – из-за большого числа мешающих отражений от поверхности Земли.

Сверхрефракция обычно отмечается при наличии инверсии температуры (возрастании с высотой температуры воздуха) при пониженной влажности в приземном слое. Условия для сверхрефракции радиоволн возникают при следующих метеорологических ситуациях.

1. В случае перемещения холодного воздуха над теплым, когда, несмотря на относительно быстрое понижение температуры с высотой, вследствие резкого уменьшения парциального давления водяного пара с высотой $g_n > -15{,}7\cdot10^{-8}$ м$^{-1}$.

2. При перемещении теплых сухих масс воздуха с континента на более холодную морскую поверхность в летнее время. При этом наблюдается сильное испарение с морской поверхности. При слабом перемешивании парциальное давление водяного пара уменьшается с высотой, а температура повышается. В этом случае $g_n > -15{,}7\cdot10^{-8}$ м$^{-1}$.

3. Над сушей при ясной безоблачной погоде ночью при возникновении приземных радиационных инверсий температуры, которые сопровождаются образованием росы. Утром, с восходом солнца и усилением испарения происходит заметное уменьшение влажности с высотой.

4. В антициклонах вследствие оседания воздуха на верхних уровнях при образовании так называемой инверсии сжатия, которая, как правило, сопровождается значительным уменьшением содержания водяного пара. При этом образуются приподнятые атмосферные волноводы. Они могут сливаться с приземными, образуя высокие волноводы.

5. При оттоке влажного воздуха из грозовых облаков.

6. При заметном испарении влаги после дождя при движении сухого воздуха над влажной поверхностью водоема и влажной землей.

По повторяемости эти метеорологические ситуации можно расставить следующим образом:

1) ночное радиационное охлаждение поверхности Земли;
2) адвекция влаги над землей от водоемов;
3) отток влажного воздуха из грозовых облаков;
4) испарение влаги после дождя при перемещении сухого воздуха над влажной поверхностью Земли.

Назвать уникальным аномальное распространение радиоволн нельзя. В некоторых регионах Земли оно может наблюдаться на МРЛ буквально каждый день.

2.5. Ограничения радиолокационных метеорологических методов наблюдений

2.5.1. Перечень ограничений

Изложенные в п. 2.2–2.4 сведения позволяют сформулировать недостатки и ограничения радиолокационного метода для метеорологических наблюдений.

1. МРЛ может принимать отраженные сигналы от облаков, вершины которых находятся выше линии радиогоризонта. От облаков, верхняя граница которых располагается ниже линии радиогоризонта (в области радиотени), информацию на МРЛ получить невозможно.

2. Наличие высоких местных предметов (здания, башни, сопки) вокруг МРЛ создает углы закрытия, превышающие нулевой. В связи с этим увеличивается минимальная высота обнаружения облачности, расположенной в азимуте высоких местных предметов, возрастает верхняя граница радиотени.

3. С удалением от МРЛ увеличивается минимальное значение отражаемости $Z_{\min}(R)$, которое при заданном потенциале $П_м$ может фиксироваться приемным устройством МРЛ. По этой причине облака, отражаемость которых $Z < Z_{\min}(R)$, не будут обнаруживаться МРЛ.

4. МРЛ могут не обнаруживать облака, которые находятся за зоной интенсивных и протяженных осадков. Ослабление радиоволн, особенно на длинах волн меньше 5 см, фактически приводит в этих ситуациях к уменьшению $Z_{\min}(R)$.

5. Уменьшение $Z_{\min}(R)$ отмечается и при выпадении осадков непосредственно на оболочку РПУ МРЛ.

6. С увеличением расстояния от МРЛ увеличивается ширина ДНА МРЛ и, следовательно, уменьшается разрешающая способность по угловым координатам. Отсюда следует зависимость информации МРЛ о высоте и площади облаков и осадков от расстояния.

7. Экологические ограничения.

Все перечисленные ограничения должны учитываться при разработке методов метеорологической интерпретации радиолокационной информации.

2.5.2. Погрешности определения высоты границ радиоэха облаков

Верхняя граница радиоэха облаков будет соответствовать верхней границе облаков, если выполняется условие $Z(H_{вг}) \geq Z_{\min}(R)$, где $Z(H_{вг})$ – отражаемость на верхней границе облака, R – расстояние от границы облака до МРЛ, а $Z_{\min}(R)$ – минимально обнаружимая отражаемость на этом расстоянии.

Большой диапазон изменения Z в верхних слоях облаков приводит к тому, что верхняя граница радиоэха облака может совпадать с верхней границей облака, а может располагаться выше или ниже. Зная об этом, многие исследователи для определенности сопоставлений за верхнюю границу радиоэха облаков принимают высоту изолиний $Z_э = 30$ дБZ или $Z_э = 23$ дБZ.

В [4] проведен анализ ошибок определения $H_{вг}$ с удалением от МРЛ с учетом технических параметров МРЛ (потенциал $П_м$, λ, ДНА, уровень боковых лепестков ДНА) и параметров облака (Z_{max} и градиент отражаемости на верхней границе облака dZ/dh). В указанной работе на основании экспериментальных данных принято, что большинство облаков имеет сравнительно плоскую вершину и убывание Z вблизи верхней границы близкó к гауссову.

Как следует из рис. 2.5.1, усредненный ДНА МРЛ профиль $Z_{эф}(x)$ отличается от действительного $Z(x)$ большей сглаженностью и расплывчатым характером границы облака. Искажение формы профиля, обусловленное конечной шириной ДНА, возрастает с увеличением дальности R.

Граница облака $x_р$, формируемая МРЛ на расстоянии R, определяется как ордината точки пересечения профиля $Z_{эф}(x)$ с прямой $Z = Z_{\min\ обн}(П_м, R) = R^2/П_м$ и в зависимости от R и $П_м$ может быть как больше $x_{гр}$ ($x_р^{(1)}$ на рис. 2.5.1), так и меньше $x_{гр}$ (см. $x_р^{(2)}$).

Знак ошибки радиолокационного измерения границы облака $\Delta x = x_р - x_{гр}$ зависит от того, какой из эффектов превалирует: влияние конечной ширины ДНА, приводящее к систематическому завышению $x_{гр}$, или влияние уменьшения $Z_{\min}(R)$ на больших расстояниях, приводящее к занижению $x_{гр}$ по сравнению с истинной границей. В общем случае величина Δx является весьма сложной функцией R, $П_м$, Z_{max}, $Z_{гр}$ и Θ_0.

На рис. 2.5.2 приведены результаты расчетов Δx. Из рис. 2.5.2 видно следующее:

– с увеличением градиента Z на верхней границе облака завышение высоты верхней границы облака возрастает,

– с увеличением Z_{max} и $П_м$ величина Δx возрастает.

Грубая оценка влияния бокового лепестка ДНА определяется формой облака и распределением в нем отражаемости. На больших расстояниях необходимо учитывать отражения от земли по боковому лепестку ДНА. Влияние вклада бокового лепестка на точность измерения высоты верхней границы облака максимально при взаимном расположении границы облака и сечения ДНА, указанном на рис. 2.5.3. В этом положении главный лепесток дает уже пренебрежимо малый вклад в отраженный радиолокационный сигнал.

Из анализа [4] следует, что влияние бокового лепестка можно не учитывать, если

$$4{,}25\, A^* Z_{max} < Z_{\min}(R, П_м).$$

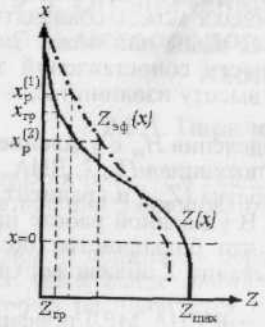

Рис. 2.5.1. Действительный $Z(x)$ и усредненный МРЛ $Z_{эф}(x)$ профили отражаемости в облаке [4].

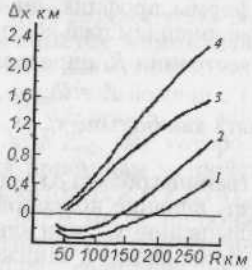

Рис. 2.5.2. Зависимости ошибки Δx от расстояния R для различных значений ρ и $Z_{эф\ max}$ при $П_м$ = 50 дБ (270 в ед. СИ) [4].

Кривая	1	2	3	4
$\rho = Z_{эф\ max}/dZ/dh$	1,0	1,0	0,4	0,4
$Z_{эф\ max}$	38	48	38	48

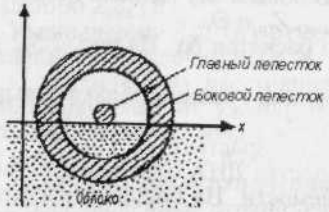

Рис . 2.5.3. Иллюстрация оценки влияния бокового лепестка на измерение Δx [4].

При мощности излучения в боковом лепестке от –17 до –25 дБ относительно максимума в главном лепестке ДНА величина A^* изменяется от 10^{-5} до $4 \cdot 10^{-4}$. Для $A^* = 4 \cdot 10^{-4}$, Z_{max} = 38 дБZ, $П_м$ = 47 дБ неравенство выполняется при R = 100 км. Это означает, что для Cb в стадии зрелости с высотой верхней границы более 9 км при наличии в верхней переохлажденной части ядра Z_{max} > 50 дБZ существует вероятность завышения верхней границы облаков за счет боковых лепестков в радиусе до 100 км. Однако повторяемость таких Cb в боль-шинстве регионов Земли ничтожно мала.

Таким образом, повторяемость ошибок измерения $H_{вг}$ будет зависеть от принятой методики измерений и повторяемости микро- и макроструктуры облачности в районе наблюдений.

В табл. 2.5.1 [3] приведены данные о средней высоте $\overline{H}_{гроз}$ гроз для трех радиусов обзора МРЛ по данным оперативных измерений, а также среднеквадратические отклонения (СКО) $H_{гроз}$.

Из табл. 2.5.1 следует, что увеличение радиуса обзора для МРЛ-2 и МРЛ-5 с $П_м \geq 50$ дБ сказывается на среднем значении высоты верхней границы гроз $H_{гр}$. Средняя высота радиоэха гроз с увеличением радиуса обзора убывает, разность значений средней высоты для каждого радиуса обзора можно считать достоверной на 5 %-ном уровне значимости. Это означает, что при оперативных наблюдениях влияние уменьшения Z_{min} (R) превалирует над эффектом увеличения ширины ДНА.

Таблица 2.5.1

Изменение средних значений максимальной высоты радиоэха гроз $\overline{H}$ (км) в зависимости от радиуса обзора МРЛ [3]

Характеристика	Радиус обзора, км		
	40	100	180
Среднее, км	9,2	9,0	8,9
Доверительный интервал для среднего, км	±0,07	±0,04	±0,03
СКО, км	1,84	1,87	1,86
Число случаев	2645	8882	18197

Однако при фиксированном радиусе обзора МРЛ средняя высота гроз при ширине ДНА $\Theta_0 = 0{,}5°$ и $\Theta_0 = 44'$ и при $П_м \geq 50$ дБ является надежной и устойчивой статистической характеристикой за грозовой сезон.

Экспериментальные оценки показали [8], что средние вероятные ошибки определения верхней границы кучево-дождевых облаков с опасными явлениями составляют ±0,51 км в радиусе 150 км, а для всех остальных форм облаков ±(0,54...0,6) км в радиусе 20 км (для МРЛ-2 с $П_м$ = = 50 дБ).

Такие значения ошибок в целом удовлетворяют требованиям оперативного применения данных МРЛ о высоте верхней границы облаков.

2.5.3. Влияние боковых лепестков ДНА

Боковые лепестки ДНА МРЛ могут влиять не только на измерения высоты облаков, но и на отражаемость. Причина этого заключается в суммировании отраженного от местных предметов и облаков сигнала на входе приемного устройства МРЛ, если первый боковой лепесток находится в отражающем объекте.

Оценку возможности приема боковым лепестком отраженного от облака сигнала можно провести с помощью уравнения радиолокации атмосферных образований. Для этого в уравнение (2.2.11) подставляется значение $П_м^*$ (дБ) = $П_м - G^2_{1бок.л}$. В современных МРЛ первый боковой лепесток имеет коэффициент усиления $G_{1бок.л}$ = –(23…30) дБ относительно главного. Таким образом, если в зоне облака отмечаются неоднородности с отражаемостью $Z > 46…60$ дБZ, то следует ожидать вклада сигнала, полученного из ДНА первого бокового лепестка в суммарное значение отражаемости, а также искажения истинных значений площади и высоты верхней границы радиоэха.

За счет боковых лепестков ДНА МРЛ отраженные сигналы от высоко расположенных местных предметов могут отмечаться при углах места антенны МРЛ от 0 до 90°. В этом случае при зеркальном отражении сигнал дает не только первый, но и все боковые лепестки антенны, которыми при измерениях в облаках можно пренебречь.

2.5.4. Экологические ограничения

Электромагнитная энергия СВЧ диапазонов обладает выраженным биологическим действием [6]. При систематическом облучении организма человека, превышающем предельно допустимый уровень (ПДУ), вначале возникают компенсаторно-приспособительные реакции, которые являются общими неспецифическими реакциями организма. В том случае, если облучение продолжается, могут развиваться патологические изменения, которые обычно носят обратимый характер. Степень функциональных нарушений и тяжести патологических изменений зависит от уровня плотности потока электромагнитного излучения и длительности облучения, а также от индивидуальных особенностей организма (более чувствительны больные люди, дети и лица пожилого возраста). Кроме того, степень воздействия электромагнитных полей на организм человека зависит не только от уровня, но и от длины волны и режима облучения.

Расчет предельно допустимых уровней (ПДУ) электромагнитных полей, санитарно-защитных зон (СЗЗ), зон ограничения застройки (ЗОЗ) вокруг МРЛ приведены в нормативных документах и методиках, утвержденных Минздравом РФ.

Расчет контура постоянного уровня, равного ПДУ, производится по формуле [6]

$$H_m = h_a - r\,\mathrm{tg}\left[\frac{(2\Theta_0)}{2}\sqrt{\frac{\ln\left(\text{ПДУ}\cdot r^2/П_м^*\right)}{-0{,}69}} - \varepsilon_0\right], \qquad (2.5.1)$$

где H_m – высота на контуре постоянного уровня (м), h_a – высота центра излучения (м), $П_м^*$ – потенциал МРЛ (мкВт), ε_0 – угол места максимума излучения (град.), r – дальность (м); Θ_0 – ширина диаграммы направленности антенны МРЛ (град.), ПДУ – значение предельно допустимого уровня электромагнитного поля (мкВт/см^2).

На рис. 2.5.4 приведен пример построения СЗЗ и ЗОЗ с учетом рельефа местности.

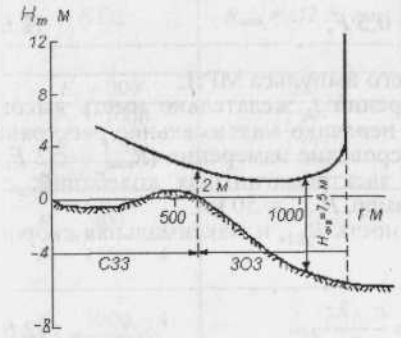

Рис. 2.5.4. Иллюстрация расчета санитарно-защитной зоны (СЗЗ) и зоны ограничения застройки (ЗОЗ) с учетом рельефа местности при ε_0 = –0,2° и h_a = 8 м; $H_{огр}$ – высота ограничения застройки [6].

Размещение МРЛ на резко пересеченной местности или на высотных домах и доминирующих возвышенностях при расчете СЗЗ и ЗОЗ требует учета облучения МРЛ по боковым лепесткам диаграммы направленности антенны. При расчетах по нормализации электромагнитной обстановки в местах размещения МРЛ учитывается только первый боковой лепесток.

Удаление границы СЗЗ по первому боковому лепестку МРЛ-5 (–23 дБ, или $5\cdot10^{-3}$) (в режиме штормового оповещения) на длине волны 3 см при ПДУ = 60 мкВт/см^2 равно 200 м. Для сравнения при том же ПДУ удаление границы СЗЗ по главному лепестку диаграммы направленности составляет для МРЛ-5 1200 м.

Уменьшение размеров СЗЗ может достигаться увеличением минимального угла места антенны при оперативном режиме работы, что является дополнительным ограничением, или запретом излучения в определенных азимутах.

2.6. Физические основы доплеровских измерений на МРЛ

Доплеровский частотный сдвиг $f_д$ представляет собой скорость изменения фазы отраженного сигнала движущегося объекта, отсчитываемой в последовательные периоды повторения:

$$f_д = \left| f_{пр} - f_{изл} \right| = 2\frac{v_р}{c} f_{изл} = \frac{2v_р}{\lambda}, \qquad (2.6.1)$$

где $v_р$ – радиальная (доплеровская) составляющая скорости цели, $f_{изл}$ – излучаемая частота (Гц), $f_{пр}$ – принимаемая частота.

Для импульсного МРЛ максимальная доплеровская частота f_{max}, которую еще можно однозначно разрешить, определяется выражением

$$f_{max} = 0{,}5\,F, \qquad (2.6.2)$$

где F – частота посылок зондирующего импульса МРЛ.

Для увеличения диапазона измерений $f_д$ желательно иметь высокие значения F. Однако при больших F невелико максимальное расстояние, при котором можно проводить доплеровские измерения ($R_{max} = c/2\,F_{max}$; где c – скорость распространения электромагнитных колебаний: $c = 3\cdot10^5$ км/с): при $F = 3000$ Гц, например, $R_{max} = 50$ км.

Максимальная разрешаемая дальность R_{max} и максимальная скорость v_{max} связаны соотношением

$$v_{max} = \frac{c}{8}\frac{\lambda}{R_{max}}. \qquad (2.6.3)$$

В табл. 2.6.1 приведены диапазоны v_{max} в зависимости от длины волны доплеровского МРЛ.

Для расширения диапазона однозначных измерений скорости разработан метод изменения межимпульсных интервалов (вобуляции). При использовании этого метода зондирование метеоцелей производится с помощью двух последовательностей равноотстоящих зондирующих импульсов с разными частотами (периодами) повторения F_2 и F_3. При этом чередование последовательностей зондирующих импульсов может быть произвольным.

Использование вобуляции позволяет увеличить величину однозначной скорости согласно формуле [5]

$$v_{max} = \pm\frac{\lambda F_1}{4(1 - F_1/F_2)}. \qquad (2.6.4)$$

Из табл. 2.6.1 видно, как резко (от 3 до 5 раз) возрастает v_{max} при использовании метода вобуляции.

Таблица 2.6.1

Диапазоны однозначного определения доплеровских скоростей v_{max} (м/с) в зависимости от частоты посылок F (Гц), длины волны λ (см) в обычном режиме работы МРЛ и в режиме с вобуляцией

F Гц	$R_{max} = c/2\,F$, км	Диапазон частот/Длина волны, см		
		S/10	C/5,4	X/3,2
		В обычном режиме		
$F_1 = 900$	165	±22,5	±12,1	±7,2
$F_2 = 1000$	150	±25	±13,5	±8
$F_3 = 1200$	125	±30	±16,2	±9,6
		В режиме с вобуляцией		
$\frac{F_1}{F_2} = \frac{900}{1200} = \frac{3}{4}$	125	±90	±48,6	±28,8
$\frac{F_2}{F_3} = \frac{1000}{1200} = \frac{4}{5}$	125	±125	±67,5	±40

При работе МРЛ в доплеровском режиме в результате сложной обработки фазовых соотношений отраженных сигналов получается информация о средней доплеровской скорости $\overline{v}_д$ и ширине спектра скоростей рассеивателей σ_v^2 в пределах импульсного объема [5, 7]. Доплеровский спектр отраженных от метеообразований сигналов представляет собой набор частот $2v_i/\lambda$ с амплитудой, пропорциональной Z.

Таким образом, в самом общем случае средняя доплеровская скорость равна средней скорости движения рассеивающих частиц, взвешенной по их эффективным площадям рассеяния. Для углов возвышения антенны МРЛ $\varepsilon \approx 0°$ она близка к скорости движения воздуха в направлении на МРЛ и от него. Ширина спектра является мерой дисперсии скорости в пределах импульсного объема, т.е. сдвига или турбулентности.

В доплеровском режиме работы МРЛ измеряют фазу отраженного сигнала по отношению к фазе сигнала, излученного передатчиком МРЛ. Для этого в приемнике имеются два смесителя. В одном из них сигнал стабилизированного гетеродина сдвигается по фазе на 90° (см. рис. 6.1.5 и 6.4.1). В каждом дискрете (бине) дальности, равном длине или части длины импульсного объема в радиальном направлении фазу определяют сдвигом отраженного сигнала на 90° для получения синфазной (I – in-

phase) и квадратурной (Q – quadrature) составляющих сигнала. В результате накопления отраженных сигналов в дискрете дальности и их последующей обработки измеряется средний сдвиг фазы, зависящий от соотношения между I и Q. Скорость изменения фазы равна частоте доплеровского смещения.

Измерение фазы – технически более простая задача, чем измерение сдвига частоты, который при обычных скоростях метеорологических целей является относительно малым по сравнению с частотой излучения МРЛ.

Во многих случаях доплеровский спектр можно считать гауссовым, так как распределение мощности в главном лепестке ДНА в виде параболоида близко к гауссовой функции (см. рис. 2.2.2б), и распределение скоростей частиц в турбулизированном воздухе обычно описывается этой же функцией.

В этих предположениях корреляционная функция $B(\tau)$, из которой преобразованием Фурье получается доплеровский спектр отраженных сигналов $P(f)$, записывается в виде

$$B(\tau) = \overline{P}_{\text{пр}} \exp\left(2i\pi f - 2\pi^2 \sigma_f^2 \tau^2\right). \qquad (2.6.5)$$

Нулевой момент доплеровского спектра $\overline{P}_{\text{пр}}$ представляет собой среднюю мощность принимаемого сигнала от импульсного объема:

$$\overline{P}_{\text{пр}} = \int_{-\infty}^{\infty} P(f)\,df. \qquad (2.6.6)$$

Первый момент доплеровского спектра $\bar{f}$ пропорционален средней доплеровской скорости совокупности частиц ($\bar{v}_{\text{д}} = f\lambda/2$)

$$\bar{f} = \frac{1}{2\pi\tau} \arg[B(\tau)]. \qquad (2.6.7)$$

Второй момент доплеровского спектра σ_f^2 определяет дисперсию скоростей частиц σ_v^2 в пределах импульсного объема ($\sigma_v^2 = \sigma_f^2\,\lambda/4$):

$$\sigma_f^2 = \frac{1}{2\pi^2\tau^2} \ln\left[|B(\tau)| / \overline{P}_{\text{пр}}\right]. \qquad (2.6.8)$$

Для метеорологической интерпретации отраженных сигналов используют обычно первые три момента.

Информация о временно́м и пространственном распределении $f_{\text{д}}$ и σ_f^2 от каждого импульсного объема при дальнейшей обработке с помощью специальных алгоритмов (см. подробнее главу 5) позволяет получать в радиусе обзора метеорологическую информацию о пространственно-временном распределении радиальных скоростей, сдвигов и порывов ветра, а также выделять зоны с наиболее опасными явлениями (смерч, разрушительные нисходящие потоки).

2.7. Поляризационные методы исследования метеообъектов

Различие формы и фазового состояния частиц гидрометеоров, их преимущественной ориентации в облаках и осадках позволяет получать дополнительную метеорологическую информацию на МРЛ, работающих в поляризационном режиме [10].

При дифференциальной отражаемости $Z_{DR} = 1$ выполняется одно из трех условий:

– частицы являются сферическими,

– несферические частицы обладают хаотичной ориентацией,

– направление преимущественной ориентации несферических частиц составляет 45° к вертикали.

Как уже отмечалось в п. 1.3, отличительной особенностью жидкокапельных гидрометеоров является высшая степень упорядоченности их ориентации и близость направления преимущественной ориентации к вертикали. Величина Z_{DR} в этом случае определяется главным образом несферичностью капель, которая, в свою очередь, определяется их размером. По измеренному значению Z_{DR} можно оценить среднюю форму капель и их средний размер. Если величина Z_{DR} будет измерена с точностью 0,1–0,2 дБ, это позволит примерно в 3 раза повысить точность измерения интенсивности осадков по сравнению с измерением только Z.

С помощью Z_{DR} можно идентифицировать градовые зоны в Cb. При усреднении по ансамблю частиц интегральное значение Z_{DR} оказывается слабо положительным для мелкого града и слабо отрицательным для крупного. При одном и том же значении Z для града и дождя Z_{DR} для града будет меньше, чем для дождя. По измеренным значениям Z и Z_{DR} в 10-сантиметровом диапазоне МРЛ вывод о наличии града можно сделать при выполнении неравенства

$$Z - f(Z_{DR}) > 0, \qquad (2.7.1)$$

в котором

$$f(Z_{DR}) = \begin{cases} 60 & \text{при} \quad Z_{DR} > 1{,}74 \text{ дБ}, \\ 19Z_{DR} + 27 & \text{при} \quad 0 < Z_{DR} < 1{,}74 \text{ дБ}, \\ 27 & \text{при} \quad Z_{DR} \le 0 1 < \text{дБ}. \end{cases}$$

Таким образом, если неравенство (2.7.1) выполняется, то это свидетельствует о наличии града, а если нет, то дождя.

Для кристаллических частиц в области сильно переохлажденных вершин облаков $Z_{DR} \ge 5$ дБ за счет сильной анизотропии и высокой степени упорядоченности ориентации кристаллов.

В снегопадах Z_{DR} меньше, чем в дождях, в силу малоупорядоченной ориентации снежинок и меньшего показателя преломления. Пример пространственного распределения Z и Z_{DR} в вертикальном сечении облака приведен на рис. 2.7.1 [10].

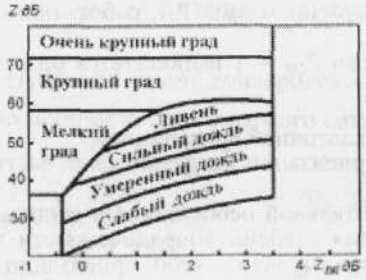

Рис. 2.7.1. Пример пространственного распределения радиолокационной отражаемости Z и дифференциальной отражаемости Z_{DR} в вертикальном сечении кучево-дождевого облака [10].

Отраженные от метеообъектов сигналы на вертикальной и горизонтальной поляризации различаются не только по мощности, но и по фазе. Разность фаз обусловлена тем, что в процессе отражения от несферических частиц волны вертикальной и горизонтальной поляризации получают различные фазовые добавки, и постоянные распространения горизонтально и вертикально поляризованных волн в анизотропной среде также различны.

Оценку разности фаз производят с помощью удельного дифференциального фазового сдвига K_{DP} (град/км)

$$K_{DP} = \frac{180\lambda}{\pi} \operatorname{Re} \iint [f_г(D) - f_в(D)] N(D) dD,$$

или

$$K_{DP} = \operatorname{Re}(K_г - K_в), \qquad (2.7.2)$$

где $f_г$ и $f_в$ – амплитуды прямого рассеяния при горизонтальной и вертикальной поляризации соответственно; $K_г$ и $K_в$ – постоянные распространения при горизонтальной и вертикальной поляризации соответственно при условии, что все частицы ориентированы вертикально и горизонтально, а волновой вектор облучаемой волны перпендикулярен оси вращения гидрометеоров.

Величина K_{DP} жестким образом связана с водностью и интенсивностью осадков по трассе. С помощью K_{DP} лучше, чем другими методами, можно выделить зоны града в Cb, осадки смешанного фазового состояния (дождь с градом). Для проведения фазовых измерений не требуется абсолютная калибровка МРЛ по мощности. С помощью K_{DP} можно оценивать полное ослабление радиоволн по трассе распространения(дБ/км), которое необходимо учитывать для коррекции измеренных значений Z и Z_{DR}.

Для гидрометеоров сферической формы отраженный сигнал на круговой поляризации полностью отсутствует, а вся мощность отраженного сигнала как бы перекачивается в его перекрестный компонент. Однако в силу несферичности гидрометеоров и влияния деполяризации при распространении в анизотропной среде полного подавления сигнала на круговой поляризации не происходит. Это особенно заметно на больших удалениях от МРЛ, когда эффекты распространения радиоволн накапливаются.

Уровень отраженного сигнала на круговой поляризации служит мерой несферичности отражающих частиц и их идентификации. Для этих задач используют понятие кругового поляризационного отношения, т.е. отношение мощностей согласного и перекрестного компонентов отраженного сигнала в круговом базисе:

$$CDR = \frac{\left\langle |S_{RR}|^2 \right\rangle}{\left\langle |S_{RL}|^2 \right\rangle} = \frac{\left\langle |S_{LL}|^2 \right\rangle}{\left\langle |S_{RL}|^2 \right\rangle}. \qquad (2.7.3)$$

Здесь индекс R используется для обозначения круговой поляризации правого вращения (right), а индекс L – для левого вращения (left).

Величина CDR очень чувствительна к изменению медианного диаметра D_0 или интенсивности дождя I. Из рис. 2.7.2 видно, что метеообъекты различных классов хорошо разделяются по совокупности параметров Z и CDR и степени упорядоченности ориентации гидрометеоров r_y.

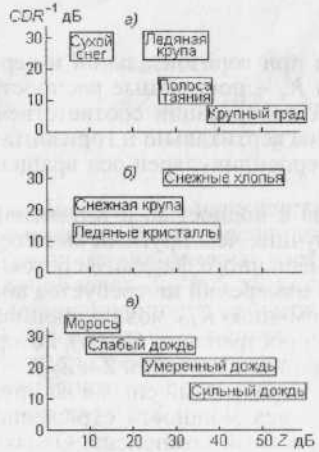

Рис. 2.7.2. Расположение различных метеообъектов на плоскости Z–CDR: *а)* $r_y < 0{,}3$; *б)* $0{,}3 < r_y < 0{,}6$; *в)* $0{,}6 < r_y < 0{,}9$ при разных значениях степени упорядоченности ориентации гидрометеоров r_y [10].

ГЛАВА 3

РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕТЕООБРАЗОВАНИЙ

3.1. Пространственная структура отражаемости Cb и Ns

На рис. 3.1.1 приведена типичная структура пространственного распределения отражаемости в ячейке Cb с градом. В верхней части рисунка справа представлен вертикальный профиль $Z_{э\,max}$ (h) дБZ, внизу – горизонтальный разрез ячейки Cb по линиям $H_в$ и H_{Z_m} (верхней границы зоны Z_{max}) на индикаторе кругового обзора.

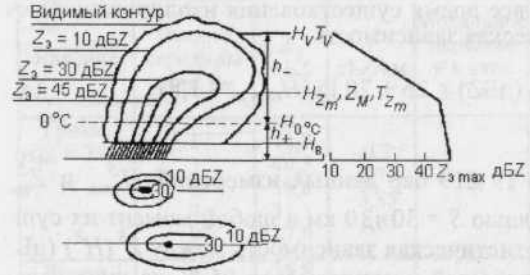

Рис. 3.1.1. Схема ячейки с градом [13].
Вверху – вертикальный профиль $Z_{э\,max}$ (h), внизу – горизонтальный разрез ячейки на индикаторе кругового обзора МРЛ по линии $H_в$ и линии H_{Z_m}; H_v, T_v – внешний контур, наблюдаемый на МРЛ, h_+ – слой от поверхности Земли до высоты нулевой изотермы $H_{0°C}$, h_- – слой от $H_{0°C}$ до верхней границы изолинии контура $Z_э = 10$ дБZ.

Зона, ограниченная контуром $Z_э = 45$ дБZ, называется «ядром» радиоэха Cb или зоной максимальной радиолокационной отражаемости Cb (Z_{max}). За величину Z_{max} обычно принимают максимальное значение отражаемости в «ядре» или в Cb.

Из рис. 3.1.1 видны следующие характерные особенности пространственного изменения отражаемости в отдельных конвективных ячейках не только с градом, но и с ливневыми осадками:

1) отражаемость практически не изменяется от поверхности Земли до уровня нулевой изотермы, а затем плавно убывает с ростом высоты. Это характерно для стадии зрелости ячеек Cb;

2) скорость убывания отражаемости выше уровня $H_{0°C}$ различна для града, гроз, ливней и обложных осадков.

В вертикальной плоскости убывание Z Cb описывается экспоненциальным законом:

$$Z = 10^{-\gamma h} Z_{\max},$$

где h – высота, отсчитываемая от центра зоны максимальной отражаемости $Z_{\max}$, γ – вертикальный градиент Z.

В горизонтальной плоскости отражаемость в пределах площади «среднего» ливня изменяется от центра к периферии также по экспоненциальному закону:

$$Z = Z_{\max}\, 10^{-\beta R},$$

где R – расстояние, отсчитываемое от центра ливня, β – горизонтальный градиент отражаемости.

Средняя горизонтальная протяженность зоны, в которой интенсивность осадков из Cb изменяется от 125 до 80 мм/ч, составляет от 1 до 3 км. С увеличением отражаемости на внешнем контуре радиоэха Cb на 6 дБZ средняя площадь радиоэха Cb возрастает примерно в 2 раза [7].

Высота верхней границы радиоэха Cb и $Z_{\max}$ тесно связаны между собой. В работе [9] по данным обработки изолированных Cb между $H_{\max}$ и $Z_{\max}$, зафиксированных за все время существования изолированной ячейки Cb, получена статистическая зависимость

$$Z_{\max\,яч}\ (дБZ) = 26 + 20 \lg (H_{\max\,яч} - 1{,}8)\,, \qquad (3.1.1)$$

где $H_{\max\,яч}$ – в км.

По данным обработки 19 219 пар данных измерений $H^S_{\max}$ и $Z^S_{\max}$ в ливнях и грозах над площадью $S = 30\times30$ км в любой момент их существования в [2] получена статистическая зависимость между $Z^S(H^S)$ (дБZ) – отражаемостью, соответствующей повторяемости 95 % на интегральной кривой повторяемости Z_i при H^S = const, и H^S (км):

$$Z^S(H^S)\ (дБZ) = 30{,}39 + 2{,}508\, H^S - 0{,}064\, H^{S2}. \qquad (3.1.2)$$

Результаты расчетов по формулам (3.1.1) и (3.1.2) приведены в табл. 3.1.1.

Таблица 3.1.1

H км	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$Z_{\max\,яч}$ дБZ	32,4	36,0	38,4	40,4	42,0	43,2	44,2	45,2	46,0
$Z^S(H^S)$ дБZ	39,4	41,3	43,1	44,8	46,4	47,8	49,1	50,2	51,3

Таким образом, с увеличением высоты радиоэха Cb возрастает $Z_{\max}$ как в ячейке Cb, так и над фиксированной площадью 30×30 км, когда одновременно может наблюдаться несколько ячеек.

Вертикальный градиент отражаемости γ (дБZ/км) рассчитывается по формуле

$$\gamma = \frac{\Delta Z_э}{\Delta h} = \frac{Z_э(h_{i+1}) - Z_э(h_i)}{h_{i+1} - h_i}, \qquad (3.1.3)$$

где h_i – расстояние от поверхности Земли до середины i-го слоя (км), в котором измерялась Z_i.

Абсолютные значения γ зависят от методов группировки данных в выборках и методах их получения и обработки.

Таблица 3.1.2

Изменение средней отражаемости $\overline{Z}_э$ (дБZ) с высотой и средние значения вертикального градиента $\overline{\gamma}$ (дБZ/км) в грозах, ливнях и обложных осадках [7]

Явление	Высота середины слоя, км	$\overline{Z}_э$ дБZ	$\overline{\gamma}$ дБZ/км	Модальное значение $\overline{\gamma}$ в слое 3–5 км	Среднее значение $\overline{\gamma}$ в слое 1–5 км	Медианное значение интенсивности осадков в выборке, мм/ч
Грозы, $n_{изм}$ = 3804	1 3 5 7 9	44,7 44,3 38,8 31,1 27,0	–0,2 –2,75 –3,85 –2,05	–3	–1,2	20
Ливни, $n_{изм}$ = 5682	1 3 5 7 9	35,8 33,6 24,6 18,1 12,2	–1,1 –4,5 –3,75 –2,45	–3	–2,24	6
Обложные осадки, $n_{изм}$ = 7464	1 3 5 7	27,6 24,1 17,75 13,7	–1,75 –3,17 –2,0	–6	–2,0	0,9

Таблица 3.1.3

Средние значения вертикального градиента отражаемости γ (дБZ/км) в зависимости от высоты радиоэха Cb H_{max} [5] $n_{изм}$ = 11 136

Высота середины слоя, км	H_{max} км			
	4–5	6–7	8–9	10–13
1–3	–0,65	–0,5	+0,15	+0,8
3–5	–1,7	–1,0	–2,25	–1,8
5–7	–	–1,25	–1,3	–0,8
7–9	–	–	–0,9	–1,05
1–5	–0,94	–1,0	–0,84	–0,4
1–7	–	–0,92	–0,97	–0,5
1–9	–	–	–0,95	–0,63

В табл. 3.1.2 приведено изменение средней отражаемости $Z_э$ с высотой и средние значения γ в грозах, ливнях и обложных осадках по данным измерений $Z_{э\,max}$ над площадью 30×30 км. В табл. 3.1.3 представлены данные измерения $Z_{э\,max}$ над площадью 5×5 км, сгруппированные по интервалам высот H_{max} в Cb [5].

Из табл. 3.1.2 и 3.1.3 следует, что с увеличением H_{max} и толщины слоя, в котором рассчитывается градиент, значение γ изменяется слабо. В стадии зрелости конвективной ячейки с $H \geq 9$ км $Z_{э\,max}$ практически не меняется с высотой.

Можно отметить общую закономерность: с увеличением степени опасности Cb (ливень–гроза–град) γ в слое выше H_0 уменьшается.

Во многих случаях расчет отражаемости у поверхности Земли Z_1 (дБZ) (середина слоя 1 км) можно проводить по формуле

$$Z_1 = Z_i - \bar{\gamma} h_i. \qquad (3.1.4)$$

Следует подчеркнуть, что приведенные сведения относятся к осредненным значениям вертикальных градиентов; их мгновенные значения зависят от стадии развития Cb, выбора зоны для их измерения в Cb, а также способов пространственного и временного осреднения при проведении измерений.

В обложных осадках (слоисто-дождевых облаках Ns) γ может значительно отличаться от γ в Cb за счет эффекта «яркой» полосы радиоэха. Яркой полосой радиоэха называют тонкий (до 300 м) слой с возрастающей отражаемостью ниже (на 250–300 м) уровня 0 °С. Яркая полоса представляет собой слой таяния, зону перехода от снега к дождю. Переход от снега в верхней части облака к яркой полосе определяется процессами таяния, разностью скоростей падения снежинок и капель, изменением формы отражающих частиц, влиянием процессов конденсации и дает общее увеличение отражаемости на 6,5 дБZ. За счет тех же процессов переход от яркой полосы к дождю дает уменьшение Z на 6 дБZ.

Яркая полоса радиоэха отмечается при вертикальных разрезах в обложных осадках и кучево-дождевых облаках на стадии распада. На индикаторах кругового обзора она наблюдается в виде яркого кольца, диаметр которого в однородных обложных осадках увеличивается с уменьшением угла места антенны МРЛ.

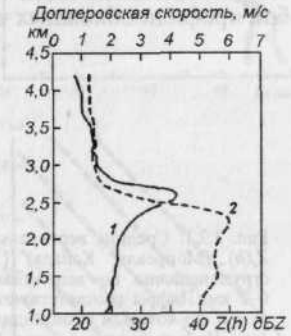

Рис. 3.1.2. Вертикальные профили отражаемости (*1*) и доплеровской скорости (*2*), измеренные доплеровским радиолокатором с вертикально направленным лучом [8].

Слабая яркая полоса в обложных осадках объясняется наличием конвекции (за счет конвективного перемешивания разрушается стратификация, при которой слой таяния хорошо выражен) или осреднением ДНА МРЛ при $R > 50$ км, особенно при ширине ДНА > 1°. Вертикальные профили $Z(h)$ и доплеровской скорости изображены на рис. 3.1.2 [8]. Вертикальный градиент отражаемости над яркой полосой (первый километр) изменяется от –7,5 до –12 дБ/км при среднем значении –9,6 дБ/км.

3.2. Статистические характеристики отражаемости и высоты верхней границы радиоэха облаков

В теплом влажном климате Cb и грозы наблюдаются в основном на фронтах, в то время как в сухом жарком климате грозы возникают в виде изолированных конвективных ячеек разной площади.

Известно, что наибольшая вероятность выпадения осадков приходится на суммарный дефицит точки росы 10–20 °С. Поэтому существует определенное сочетание температуры и влажности воздуха, оптимальное для развития конвективных явлений и гроз. Об этом необходимо помнить при сравнении радиолокационных характеристик Cb в разных регионах Земли.

3.2.1. Статистические характеристики отражаемости

Вертикальные профили $Z_э(h)$ (рис. 3.2.1) для района Монреаля, Канада [12], относятся к синоптическим ситуациям, обусловленным прохождением циклонов и хорошо выраженным в поле облачности фронтальных систем. Обращает внимание, что повторяемость $Z_э(h)$ следует в этом регионе в летние месяцы за повторяемостью интенсивности осадков. Профили с $Z_э < 30$ дБZ представляют собой профили обложных осадков.

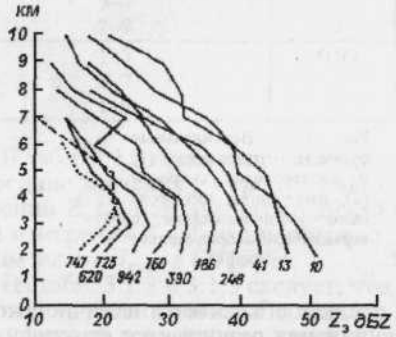

Рис. 3.2.1. Средние вертикальные профили $Z_э(h)$ (Монреаль, Канада) [12], которые сгруппированы по величинам $Z_э$ в слое 0–2 км. Цифры соответствуют числу измерений, по которым производилось осреднение. Повторяемость в слое 0–2 км $Z_э \leq$ 24 дБZ – 81 %, $Z_э$ от 30 до 40 дБZ – 17,6 %, свыше 40 дБZ – 1,4 %.

На рис. 3.2.2 приведены профили $Z_э(h)$ для Cb Атлантического побережья США в штатах Вирджиния–Мериленд [10, 11], полученные на радиолокаторе с $\lambda = 10{,}7$ см, установленном на о. Уоллопс. По данным радиолокационных наблюдений, конвективные ячейки разбивались на группы по значению их отражаемости Z в слое 0–2 км. В качестве вертикальной и горизонтальной границ ячеек была выбрана изолиния $Z_э$ = = 30 дБZ.

Из рис. 3.2.2 видно, что с увеличением Z_1 возрастает вертикальная протяженность зоны от поверхности Земли до уровня $H \geq H_{0°C}$, в которой Z мало изменяется с высотой. Профили $\overline{Z}(H)$ и $Z_{med}(H)$ практически неизменны до высоты 4–5 км (уровень нулевой изотермы в районе наблюдений).

На рис. 3.2.3 приведены линеаризованные вертикальные профили «ядра» отражаемости $Z_{эmax}$ для каждой группы ячеек через 5 дБZ. Выше уровней, которых достигли ячейки за 50 % времени их наблюдений, $Z(H)$ обозначены пунктиром. Средний градиент отражаемости равен –3,25 дБZ/км.

На рис. 3.2.4 приведена повторяемость $Z_{э\,max}$ ячеек в слое 0–2 км для всех наблюдавшихся 1141 ячейки. Наибольшая повторяемость приходится на интервал $Z_э$ = 50...55 дБZ.

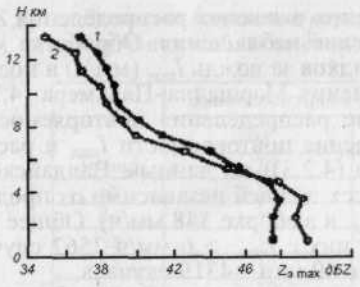

Рис. 3.2.2. Вертикальные профили среднего (1) и медианного (2) значений $Z_{э\,max}$ отражаемости конвективной ячейки для всех наблюдающихся ячеек [10].

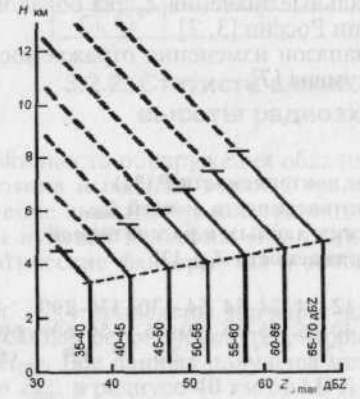

Рис. 3.2.3. Линеаризованные вертикальные профили отражаемости $Z_{э\,max}$ через 5 дБZ [10].

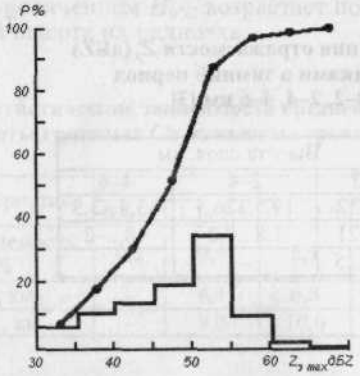

Рис. 3.2.4. Интегральное и дифференциальное распределение $Z_{э\,max}$ для интервала высот 0–2 км [10].

В градовых одноячейковых Cb $Z_э$ изменяется от 45 до 60 дБZ, в суперячейках – от 55 до 75 дБZ, в мультиячейковых – от 45 до 65 дБZ [7].

Наиболее достоверные сведения о законах распределения Z_{max} в осадках могут дать плювиографические наблюдения. Обработка максимальных значений интенсивности осадков за дождь I_{max} (мм/ч) и последующий расчет Z_{max} с помощью соотношения Маршалла–Пальмера (4.2.3) позволяют получить самые надежные распределения повторяемости Z_{max}. В табл. 3.2.1 приведено распределение повторяемости I_{max} и рассчитанной по I_{max} величины Z_{max} (формула (4.2.3)) по данным Валдайского ливнемерного куста за 5 лет [3] для всех дождей независимо от продолжительности (наибольшая величина I_{max} в выборке 348 мм/ч). Общее число случаев дождей составило 8274; из них с I_{max} > 6 мм/ч 2562 случая, с продолжительностью дождя не более 60 мин – 4319 случаев.

В табл. 3.2.2 приведены модальные значения $Z_э$ для облаков с осадками в зимний период на территории России [3, 7].

В табл. 3.2.3 представлен диапазон изменения отражаемости для облаков слоистообразных форм и тумана [7].

Таблица 3.2.1

Распределение повторяемости *P* (%) максимальной интенсивности дождей I_{max} по плювиографическим данным и рассчитанной по ним отражаемости Z_{max} [3]

I_{max} мм/ч	0,6–6	6–12	12–24	24–54	54–130	130–190	>190
Z_{max} дБZ	20–35	35–40	40–45	45–50	50–56	56–60	60–64
P %	69	12,0	7,0	7,2	2,8	1,9	0,1

Таблица 3.2.2

Модальные значения отражаемости $Z_э$ (дБZ) облаков с осадками в зимний период в слоях 0–2, 2–4, 4–6 км [3]

Форма облаков	Высота слоя, км		
	0–2	2–4	4–6
Cb	28...32	19,5...26,5	–3,3...3,3
Ns	17...21	1,8...8,2	–8...–2
St	–1,5...5	–	–

Таблица 3.2.3

Диапазон изменения отражаемости $Z_э$ (дБZ) для туманов и облаков слоистообразных форм [7]

	Эквивалентная отражаемость $Z_э$, дБZ		
	от	до	модальное
Туман	–70	–20	–40...–30
St	–30	0	–20...–10
Sc	–30	20	–20...–10
Ns	–30	40	–10...0
As	–30	20	–10...0
Ac	–30	30	0...10
Ci, Cs	–30	20	–10...0

3.2.2. Статистические характеристики высоты радиоэха облаков

Эффективность обнаружения облачности на МРЛ зависит от ее фазового состояния и высоты верхней границы. По этой причине приведем распределение высоты верхней границы радиоэха облаков в зависимости от высоты нулевой изотермы $H_{0°C}$ (км). Такое распределение учитывает как климатические факторы, так и особенности обнаружения облаков на МРЛ.

В табл. 3.2.4 приведены значения высоты верхней границы радиоэха грозовых Cb для европейской территории России (45–60° с.ш.) в зависимости от $H_{0°C}$. Все данные получены методом вертикальных разрезов через «ядро» Z_{max} в радиусе 40 км от МРЛ (2067 гроз). Из табл. 3.2.4 следует, что с увеличением $H_{0°C}$ возрастает повторяемость гроз, средняя и максимальная высота их радиоэха.

Таблица 3.2.4

Статистические зависимости средней ($H_{ср}$) и максимальной (H_{max}) высоты грозовых Cb от высоты уровня нулевой изотермы ($H_{0\ C}$) [7]

Характеристика	$H_{0°C}$ км						
	0,6–1	1,1–1,5	1,6–2,0	2,1–2,5	2,6–3,0	3,1–3,5	3,6–4,0
Повторяемость, %	0,2	0,9	8,9	13,8	35,3	33,9	7,0
$H_{ср}$ км	–	6,1	6,8	7,5	8,2	8,9	8,5
H_{max} км	–	9,0	10,0	12,0	13,0	14,0	14,0

В табл. 3.2.5 [1] представлена зависимость $H_{ср}$ и среднего квадратического отклонения σ_H от $H_{0°C}$ для радиоэха конвективной (РКО) и слоисто-

образной облачности (РСО). Таблица 3.2.5 составлена по данным четырехлетних наблюдений на МРЛ-2 гидрометобсерватории г. Минска. Все данные получены в радиусе 40 км от МРЛ методом вертикальных разрезов. Азимут разреза при РКО выбирался через зону Z_{max}, которая могла быть на любой высоте обнаруженного радиоэха Cb.

Как следует из табл. 3.2.5, отмечается общая закономерность увеличения $H_{ср}$ и σ_H с ростом $H_{0°C}$. С увеличением $H_{0°C}$ высота переохлажденной части ливневых Cb убывает от 2,8 до 1,6 км, а для гроз такой четкой зависимости не отмечается. Толщина переохлажденной части грозовых Cb изменяется от 4 до 4,5 км при $H_{0°C} \leq 2{,}5$ км и от 4,8 до 5,8 км при $H_{0°C} > 2{,}5$ км. В целом для РКО она изменяется от 2,2 до 3,3 км и имеет тенденцию к увеличению с ростом $H_{0°C}$. Высота верхней границы РСО зависит от $H_{0°C}$ не так явно. Для Ns и As–Ns толщина переохлажденной части убывает с ростом $H_{0°C}$. Для расчетов данные табл. 3.2.4 и 3.2.5 можно аппроксимировать следующими уравнениями [2]:

для грозовых Cb

$$H_{ср}\,(км) = 2{,}63 + 3{,}1\,H_{0°C} - 0{,}39\,H^2_{0°C} \qquad (3.2.1)$$

справедливо для

$$H_0 > 1{,}3\ км \quad \sigma_H = \pm(1{,}2...2{,}0)\ км;$$

для радиоэха конвективной облачности (РКО)

$$H_{ср}\,(км) = 2{,}0 + 1{,}15\,H_{0°C} + 0{,}024\,H^2_{0°C}, \qquad (3.2.2)$$

справедливо для

$$H_{0°C} > 0{,}3\ км \quad \sigma_H = \pm(0{,}15...2{,}0)\ км.$$

На рис. 3.2.5 представлены графики уравнений (3.2.1) и (3.2.2) для данных табл. 3.2.5.

Напомним, что переход от температуры воздуха $T_{приз}$ (°C) к высоте нулевой изотермы $H_{0°C}$ (км) можно провести в первом приближении, приняв вертикальный градиент температуры воздуха для стандартной атмосферы, равный 6,5 °C/км.

Таблица 3.2.5

Зависимость средних многолетних значений $H_{ср}$ (км) (числитель) и среднеквадратичных отклонений σ_H (км) (знаменатель) для РКО и РСО от высоты уровня нулевой изотермы $H_{0°C}$ [1]

Облака, явления	$H_{0°C}$ км								
	≤ 0,5	0,6–1,0	1,1–1,5	1,6–2,0	2,1–2,5	2,6–3,0	3,1–3,5	3,6–4,0	Число измерений $n_{изм}$
					РКО				
Конвективные облака без явлений	1,8 / 0,64	2,2 / 0,58	2,45 / 0,98	2,5 / 0,92	3,0 / 1,25	3,1 / 1,0	3,1 / 1,0	3,5 / –	416
Ливневый снег	2,8 / 1,3	3,5 / 0,91	2,9 / 1,0	–	–	–	–	–	1688
Ливни	3,1 / 1,32	3,0 / 1,10	3,3 / 1,23	3,8 / 1,32	4,0 / 1,3	4,6 / 1,6	5,2 / 1,8	5,4 / 1,5	6709
Грозы	5,0 / 1,04	4,5 / 0,65	5,5 / 1,19	6,2 / 1,12	6,6 / 1,35	7,7 / 2,2	8,1 / 1,6	9,6 / 1,2	1519
Град	6,3 / –	–	8,2 / –	4,6 / –	7,6 / 1,92	8,5 / 2,4	9,9 / 1,95	10,3 / 1,5	260
Σ	2,9 / 1,37	3,0 / 1,11	3,5 / 1,42	4,0 / 1,51	4,7 / 1,8	5,4 / 2,2	6,1 / 2,4	7,1 / 2,6	
$n_{изм}$	2213	938	924	1406	1845	1835	1268	217	10 644
					РСО				
Слоистообразная облачность нижнего яруса Sc–St	1,6 / 0,48	1,7 / 0,46	1,7 / 0,49	1,7 / 0,43	1,5 / 0,48	1,5 / 0,46	1,6 / 0,44	–	2190
Ns	3,0 / 0,85	3,1 / 0,94	3,7 / 0,50	3,6 / 0,57	3,6 / 0,62	3,9 / 0,42	4,0	–	646
As–Sc	3,9 / 0,88	3,9 / 1,05	4,1 / 0,89	4,5 / 1,01	4,5 / 1,14	5,0 / 0,97	4,8 / 1,16	–	2242
As–Ns	4,6 / 0,82	5,1 / 0,86	5,5 / 0,78	5,4 / 0,74	5,5 / 0,68	5,5 / 0,65	5,1 / 0,74	–	1874
Cs–As–Sc	6,1 / 0,52	–	–	7,8 / 0,38	7,5 / 0,72	8,0 / 1,2	7,5 / 0,64	9,0 / 1,26	230
Ci–As–Ns	6,4 / 0,76	6,6 / 1,28	7,3 / 0,57	7,5 / 0,60	7,6 / 0,55	7,8 / 0,7	8,3 / 1,01	10,4 / –	1161
As–Ac	4,9 / 1,05	4,9 / 1,0	5,2 / 0,93	5,2 / 0,94	5,3 / 0,90	5,3 / 0,79	5,4 / 0,80	5,8 / 0,57	3053
Ci–As–Ac	6,7 / 0,77	7,1 / 0,52	7,4 / 0,48	7,5 / 0,61	7,7 / 0,59	7,9 / 0,74	7,8 / 0,65	8,0 / 0,90	1720
Cs	6,8 / 0,83	7,8 / –	7,4 / 0,51	7,6 / 0,62	7,8 / 0,45	8,4 / 0,83	8,6 / 1,03	8,2 / –	250
Σ	3,8 / 1,84	4,6 / 1,68	4,8 / 1,81	5,5 / 1,67	5,9 / 1,78	6,3 / 1,77	6,4 / 2,14	7,5 / 1,67	
$n_{изм}$	6236	848	1097	1390	1338	1322	794	111	13136
					РКО + РСО				
Σ	3,6 / 1,8	3,8 / 1,6	4,2 / 1,8	4,7 / 1,8	5,2 / 1,9	5,8 / 2,1	6,2 / 2,3	7,3 / 2,4	
$n_{изм}$	8448	1786	2021	2796	3183	3157	2061	328	23782

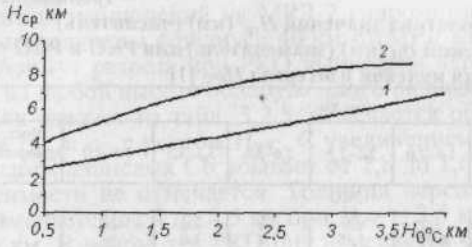

Рис. 3.2.5. Сглаженные зависимости между средней высотой ($H_{ср}$) верхней границы радиоэха кучево-дождевых облаков (*1*) и грозовых Cb (*2*) и высотой уровня нулевой изотермы $H_{0°C}$ (см. табл. 3.2.5).

3.2.3. Климатологические данные о высотах гроз по данным сети МРЛ

Разнообразие условий возникновения гроз отражает карта отклонений средней высоты радиоэха гроз на территории бывшего СССР (рис. 3.2.6) [4]. Исходным материалом для обработки послужили данные оперативных наблюдений сетевых МРЛ в радиусе 180 км, расположенных на территории бывшего СССР, за 1981–1985 гг.

Выделенные на рисунке элементарные площадки размером 5° широты на 10° долготы пронумерованы следующим образом: цифры вверху слева в каждом элементе площади определяют разделение по широте (1–7) и долготе (1–14). Всего таких элементов площадей 57.

Средняя высота радиоэха гроз над уровнем моря по всей территории за весь период наблюдений составила 8,9 км (по данным 287 475 измерений).

В середине каждой площадки (крупная цифра) приведено отклонение средней высоты радиоэха гроз по этому элементу площади от 8,9 км за весь период наблюдений. Цифра справа вверху указывает число гроз за грозовой сезон, высота радиоэха которых равна или превышает 10 км, нормированных на площадь 3600 км^2. Цифра справа внизу означает число гроз, нормированных на площадь 3600 км^2 за грозовой сезон, высота радиоэха которых превышает высоту нижней границы тропопаузы на 1 км.

Все отклонения от значения 8,9 км, равные или большие 0,1 км, можно считать достоверными на 5 %-ном уровне значимости.

Наибольшее число гроз (7,5 грозы на 3600 км^2) за грозовой сезон с верхней границей ≥ 10 км отмечалось на площадках 3.2, 3.3, 3.7, 4.1, 4.2, 4.7 и 5.2, а абсолютные максимумы (11,5) – на площадках 3.3 и 4.7 (Волго-Вятский район и юг Западной Сибири и предгорий Алтая). Все эти регионы относятся к климатическим зонам с влажным климатом и умеренно теплым и теплым летом.

Модальные значения отклонения средней высоты радиоэха гроз на элементарной площадке за любой год и за 5 лет от средней по территории совпадают и приходятся на градацию от –0,3 до 0,3 км; повторяемость их составляет 43,8 и 47,3 %.

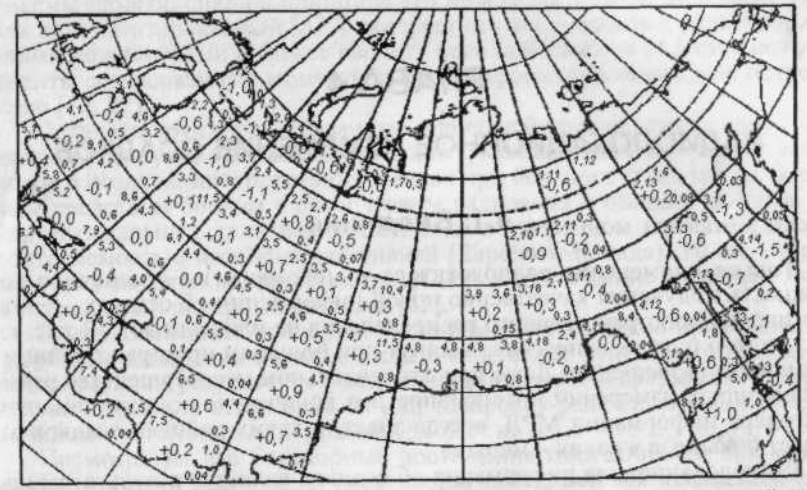

Рис. 3.2.6. Карта отклонений средней высоты радиоэха гроз от среднего значения по всей территории за весь период на 57 площадках для территории бывшего СССР за 1981–1985 гг. [4].

Для количественной оценки зависимости средней высоты радиоэха гроз за три летних месяца в радиусе 180 км от МРЛ $\langle \overline{H} \rangle$ от средней среднесуточной приземной температуры воздуха за те же сроки в дни с грозами $\langle \overline{T} \rangle$ по данным 19 639 измерений H на метеостанциях в том же радиусе получено следующее уравнение [6]:

$$\langle \overline{H} \rangle = 8{,}14 - 0{,}36\langle \overline{T} \rangle + 0{,}02\langle \overline{T} \rangle^2 . \qquad (3.2.3)$$

Возрастание $\langle \overline{T} \rangle$ на 1 °С приводит к увеличению $\langle \overline{H} \rangle$ примерно на 0,5 км. Из уравнения (3.2.3) следует, что $\langle \overline{H} \rangle$ = 8,94 км соответствует $\langle \overline{T} \rangle$ = = 20 °С и $\langle \overline{H} \rangle$ = 11,64 км –$\langle \overline{T} \rangle$ = 25 °С.

ГЛАВА 4

РАДИОЛОКАЦИОННОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ОСАДКОВ

4.1. Введение

Только применение радиолокатора в метеорологии обеспечило возможность получения качественно новой информации об осадках – общей картины их пространственного распределения на площади до 150 тыс. км^2 – из одного пункта за несколько минут при большом пространственном и временном разрешении. Даже при относительном несовершенстве радиолокационных измерений интенсивности и количества осадков синоптик, благодаря информации МРЛ, всегда знает, в каких районах осадков выпадает больше, а в каких – меньше.

Радиолокационная информация об осадках является результатом пространственного и временного осреднения (в импульсном объеме, объеме и площади измерений). Она зависит от характера колебаний осредняемых величин – характеристик выпадающих осадков – во времени и пространстве.

Общепринято [22, 28], что радиолокационное измерение осадков может производиться путем измерения их $Z_э$ при минимальном угле места антенны (от приземного слоя до $H_{0°C}$) или посредством измерения их $Z_{э\ max}$, наличие которого возможно на любом участке вертикального профиля $Z_э(h)$.

При измерении количества и интенсивности осадков МРЛ является относительным прибором, который нуждается в постоянной тарировке для перехода к абсолютным результатам, т.е. в определении коэффициентов согласования или перехода. Согласование проводилось по полусуточным и суточным данным об осадках наземной дождемерной сети. Коэффициенты согласования и перехода рассчитывались и по декадным, и по сезонным данным [4]. С появлением телеметрических дождемеров и объединением их информации с информацией МРЛ коэффициенты согласования могут определяться за 1 ч, за 3 ч и за дождь в целом [15, 20].

До начала 1990-х г. источниками наибольших погрешностей, иногда настолько больших, что они подрывали всякое доверие потребителей к радиолокационной информации об осадках, являлись некорректная калибровка аппаратуры МРЛ и нестабильность ее работы в процессе проведения измерений. Переход на твердотельные элементы при создании МРЛ, высокое качество изготовления и возросшие возможности вычислительной техники, которые позволяют обеспечить для решения задачи

радиолокационного измерения осадков необходимые быстродействие и объемы памяти, сняли в принципе эти проблемы. Сейчас во многих странах автоматизированный МРЛ измеряет осадки совместно с телеметрическими дождемерами и может вводить необходимые для расчетов коэффициенты согласования к моменту выдачи информации об осадках потребителю [15, 22].

Остались трудности, связанные с внешней средой: ввод поправок на мокрое РПУ, учет аномального распространения радиоволн и учет ослабления в осадках, интерпретация данных при больших углах места. Основным средством борьбы с ослаблением радиоволн в осадках является выбор оптимальных длин волн МРЛ: 5 см в умеренном климате с низкой повторяемостью интенсивных ливней (Европа и Канада), 10 см – в районах с их высокой повторяемостью (США и тропические регионы), 3 см – в умеренных и полярных широтах [22].

В неоптимальных условиях, когда измерения осадков проводятся посредством измерения отражаемости в слое выше нулевой изотермы, для интерпретации результатов измерений привлекают информацию о вертикальном профиле отражаемости или тарировку радиолокационных измерений по густой наземной дождемерной сети.

Несмотря на все бесспорные достижения последних 10 лет, общий вывод, который был сделан десятилетия назад, остался неизменным: автоматизированный МРЛ занижает в целом количество осадков по сравнению с данными наземной дождемерной сети. Однако достоинства, которые характерны для оперативных возможностей метода, позволяют потребителям мириться с этим недостатком информации МРЛ об осадках [28, 42, 43]. Специалисты по радиолокационной метеорологии разработали и опробовали к настоящему времени много радиолокационных методов измерения I и Q [28, 39]. В дальнейшем обсудим только те, которые применяются или находятся на стадии внедрения в оперативную практику на сети автоматизированных МРЛ.

В табл. 4.1.1 [28] дана экспертная оценка эффективности различных методов и средств по повышению точности измерений МРЛ для гидрологических наблюдений, а также прямо связанных с этим затрат. Улучшение оценивается как уменьшение дисперсии суточных сумм логарифма отношения суточных сумм осадков, полученных с помощью МРЛ и на дождемерной сети. При этом предполагается, что измерение осадков проводится современным некогерентным радиолокатором (без корректировки) по алгоритму $Z = AI^b$ и имеет дисперсию 100 %. Учитывается среднее улучшение за год по всей площади наблюдений на ровной местности.

При расчетах данных, приведенных в табл. 4.1.1, за осадки приняты летом дождь при $H_{0°C} < 3{,}5$ км, зимой снег и ширина ДНА, равная 1°. Дисперсии представляют собой средние ожидаемые значения для хороших оперативных условий в конкретном районе.

Дисперсия при комбинировании мероприятий (см. табл. 4.1.1, п. 8) не является суммой отдельных вкладов, а представляет собой меньшую величину, так как два мероприятия могут давать частично один и тот же

эффект (например, применение информации доплеровского МРЛ и ИСЗ для исключения эффектов аномального распространения радиоволн).

Затраты выражены в процентах от полной стоимости аппаратуры (аппаратное и программное обеспечение, эксплуатация, передача и отображение данных) и являются кумулятивными.

Таблица 4.1.1

Оценка уменьшения дисперсии и возможных затрат на радиолокационное измерение осадков относительно метеорологических измерений на некогерентном МРЛ (100 %) [28], работающем по алгоритму $Z = AI^b$

№ п/п	Мероприятия	Уменьшение дисперсии (%) в радиусе		Затраты, %
		до 30 км	до 200 км	
1	Корректировка данных некогерентного МРЛ по данным дождемерной сети в радиусе его обзора	30	20	5
2	Использование для введения поправок в измерения МРЛ данных о вертикальном профиле отражаемости	20	50	5
3	Измерения осадков на доплеровском МРЛ	10	20	30
4	Измерения осадков из космоса на ИСЗ	5	20	3
5	Ввод в измерения поправок с учетом распределений капель по размерам	25	10	3
6	Использование для измерения осадков поляризационных МРЛ	15	5	30
7	Использование для измерения осадков многоволнового радиолокатора	10	2	5
8	Комбинирование мероприятий (п. 1–4)	50	70	43

В п. 8 значение 70 % означает, что от общей дисперсии (100 %) остается всего 30 %. За такое уменьшение дисперсии необходимо заплатить дополнительно к общей стоимости 43 %. Таким образом, если использовать для корректировки данных МРЛ об осадках в радиусе обзора 200 км результаты измерений на дождемерной сети, учесть вертикальный профиль отражаемости в день наблюдений, проводить наблюдения на доплеровском МРЛ с исключением влияния сигналов, отраженных от местных предметов при нормальном и аномальном распространении радиоволн, привлекать для корректировки данных МРЛ информацию ИСЗ, то все перечисленные мероприятия позволят уменьшить дисперсию на 70 % по сравнению с измерениями I и Q осадков автоматизированным некогерентным МРЛ.

4.2. Радиолокационное измерение осадков в оптимальных условиях наблюдений

Физические предпосылки. Отражаемость Z, так же как и интенсивность осадков I, зависит от распределения капель по размерам. Выражение (2.1.5) можно переписать следующим образом:

$$Z = \sum_{i=1}^{N} \frac{D_i^6}{V_э} = \int_{D_{min}}^{D_{max}} N(D) D^6 dD, \qquad (4.2.1)$$

где $N(D)dD$ – число рассеивателей в интервале диаметров dD в единичном объеме $V_э$. Если сравнить формулу (4.2.1) с (1.2.1), то I пропорциональна моменту порядка 3,67 распределения капель по размерам, а Z пропорциональна шестому моменту. Если зависимость между медианным диаметром D_0 и I описывается формулой (1.3.1а), то связь между Z и I можно представить в виде

$$Z = AI^b. \qquad (4.2.2)$$

При $A = 200$ и $b = 1{,}6$ соотношение Z–I запишется в виде

$$Z_э = 200\, I^{1,6}. \qquad (4.2.3)$$

Зависимость (4.2.3) получена Маршаллом и Пальмером на основе аппроксимации экспериментальных микрофизических данных по распределению частиц в осадках. Однако сами коэффициенты A и b, также как и распределение $N(D)$, заметно меняются от одной зоны осадков к другой, внутри зоны осадков в зависимости от стадии развития Сb, а также в зависимости от типа осадков и синоптической ситуации, при которой образуются осадки. Экспериментальное определение A и b с помощью дисдрометра показывает, что на их изменчивость больше других факторов влияют [5]:

– таяние града, при котором размер образующихся капель в среднем больше, чем при таянии снега;

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

– сдвиг ветра, который сортирует капли осадков при их падении на поверхность Земли.

Эти процессы наряду с различной повторяемостью ливневых и обложных осадков в разных районах земного шара приводят и к большой

региональной изменчивости A и b.

При сравнении радиолокационных и наземных данных всегда приходится сталкиваться с разнородностью данных по Z. Она вызвана, в первую очередь, разными объемами измерения Z в оптическом методе (1 дм^3), $Z_э$ в импульсном объеме МРЛ (1 км^3) и дождемере (36 м^3) [42].

Погрешности измерения *Z*. Экспериментальные работы [36] показали, что $Z_э$ (по измерениям на МРЛ) и Z (по дисдрометру) связаны статистической зависимостью. Уравнение линейной регрессии имеет вид

$$\overline{Z} = 1{,}099\overline{Z}_э + 0{,}480 \qquad (4.2.4)$$

при коэффициенте корреляции, равном 0,82, и коэффициенте вариации, равном 69,6 %. Во всем диапазоне измерений значение средней разности $\overline{Z} - \overline{Z}_э$ составляет примерно 3 дБZ.

Если оценивать относительную погрешность измерения I (%) по формуле (4.2.3), то требования к точности измерения Z должны быть предельно высокие.

Таблица 4.2.1

Относительные ошибки определения интенсивности осадков, соответствующие ошибкам измерения осадков [19]

Ошибка измерения Z, дБZ	Ошибка определения I, %
0,5	7,5
1,0	16,0
2,0	33,0
3,0	53,0
4,0	77,0
5,0	105,0

При измерении $Z_э$ по уравнению (2.2.10) требования к точности определения потенциала МРЛ $П_м$ и поправок на ослабление не должны превосходить 2,0 дБ; только это обеспечит, как следует из табл. 4.2.1, относительную погрешность измерения I, равную 33 %.

Относительная средняя квадратическая ошибка определения $Z_э$ по уравнению (2.2.10):

$$\frac{\sqrt{(\Delta Z_э)^2}}{Z_э} = \left[\frac{\overline{(\Delta П)^2}}{П^2} + \frac{\overline{\left(\Delta \frac{P_{пр}}{P_ш}\right)^2}}{\left(\frac{P_{пр}}{P_ш}\right)^2} + 4\frac{\overline{(\Delta R)^2}}{R^2} + \frac{\overline{(\Delta K_{РПУ})^2}}{K^2_{РПУ}} + \frac{\overline{(\Delta \chi)^2}}{\chi^2}\right]^{1/2}. \qquad (4.2.5)$$

Если в обычных условиях наблюдений МРЛ ошибка абсолютных измерений $Z_э$ относительно истинного значения может составлять ±2 дБ, то в особых условиях, когда необходимо учитывать ослабление на РПУ и в атмосфере, она не может составлять менее 3 дБ.

Сравнение соотношений Z–I. Считают [25], что, используя соотношение (Z–I), оптимальное для района наблюдений и типа осадков, можно снизить дисперсию радиолокационных измерений I на 25 %.

Сравним между собой (табл. 4.2.2) три соотношения: $Z = 200\ I^{1,6}$ (формула (4.2.3)), $Z = 300\ I^{1,4}$ [15] с $I \geq 5$ мм/ч, по которому работает сеть NEXRAD (США), и $Z = 250\ I^{1,2}$ [37] для тропических осадков.

Таблица 4.2.2

Радиолокационная отражаемость *Z* (дБZ) в зависимости от интенсивности осадков *I* (мм/ч)

I мм/ч	$Z = 200\ I^{1,6}$	$Z = 300\ I^{1,4}$	$Z = 250\ I^{1,2}$
1	23	–	24
3	30	–	29,8
5	34,2	34,7	32,4
10	39,0	38,9	36,0
25	45,0	44,4	40,8
50	50,2	48,7	44,4
100	55,0	52,9	48,0
125	56,6	54,2	49,2
150	57,9	55,4	50,2
200	59,8	57,0	51,6

Из табл. 4.2.2 следует, что в регионах, где преобладают осадки из конвективных облаков, применение соотношений Z–I, отличных от (4.2.3), расширяет диапазон Z и делает шкалу Z (при $Z > 45$ дБZ) более плавной и более чувствительной к увеличению I.

С другой стороны, очевидно, что в регионах, где в радиусе обзора МРЛ могут одновременно наблюдаться ливневые и обложные осадки, соотношение Z–I (4.2.3) можно считать оптимальным при интерпретации радиолокационных измерений I. Это и объясняет его широкую распро-

страненность в практике радиолокационных измерений осадков.

Для исключения погрешностей, связанных с эффектом яркой полосы радиоэха, МРЛ должен измерять осадки таким образом, чтобы высота верхней границы ДНА МРЛ была меньше высоты нулевой изотермы. В табл. 4.2.3 приведены расчеты радиуса измерения осадков на МРЛ для этого оптимального режима измерения.

Таблица 4.2.3

Максимальный радиус R_{max} (км) измерения жидких осадков метеорологическим радиолокатором по отражаемости в зависимости от ширины его диаграммы направленности Θ, высоты нулевой изотермы $H_{0°C}$ при двух углах места антенны ε

Θ°	ε°	Высота нулевой изотермы $H_{0°C}$, км				
		0,5	1	2	3	4
0,5	0	40	70	120	150	180
	0,5	20	40	80	120	150
1,0	0	20	50	80	120	150
	0,5	15	35	65	95	120
1,5	0	20	30	60	90	120
	0,5	10	25	50	75	95

Порядок радиолокационных измерений осадков на автоматизированном МРЛ [27, 28].

1. Подготовка автоматизированного МРЛ к измерениям. Проводится калибровка приемно-измерительного тракта МРЛ. Задачей калибровки автоматизированного метеорологического радиолокатора является получение количественных соотношений между уровнем выходных сигналов МРЛ и отражаемостью. Калибровка производится путем измерения, регулирования и установки значений параметров МРЛ согласно технической документации с точностью, предусмотренной техническими условиями на радиолокатор.

Калибровка измерительных трактов производится с целью установления соответствия между мощностью сигналов на входе приемного устройства автоматизированного МРЛ с кодом на выходе амплитудно-цифрового преобразователя блока обработки.

Абсолютную калибровку радиолокатора производят с помощью сферы большого диаметра, выпущенной в свободный полет. Измерение эффективного поперечника рассеяния большой сферы позволяет определить потенциал МРЛ $П_м$.

Стабильность и сохранность калибровки в процессе измерений поддерживается работой специальных устройств, входящих в состав МРЛ. После проведения калибровки и определения $П_м$ для расчета $Z_э$ в вычислительный комплекс МРЛ вводятся все необходимые поправки на поглощение кислородом и водяным паром, на все известные потери, вызывающие смещение $Z_э$ на 1 дБZ и больше.

Производится обнуление всех значений отражаемости, которые ниже уровня шума. Устраняются помехи – местники и любые другие помехи до 10 дБZ с минимальным ухудшением (<2 дБZ) оценок отражаемости.

Самым распространенным методом исключения отражений от местных предметов («местников») в радиусе обзора является составление цифровой карты местников и ввод ее в ЭВМ измерительного комплекса. Карта местников содержит бит информации для элемента измерения всего объема обзора МРЛ. Она показывает, есть ли в элементе измерения местник. При проведении измерений $Z_э$ элементы с местниками исключаются. Наличие пустых мест, в которых измерения $Z_э$ не производятся, приводит к потере информации об осадках, особенно если местников много.

Карта местников создается в отсутствие осадков в радиусе обзора МРЛ по множеству ситуаций в разные сезоны года, включая ситуации с аномальным распространением радиоволн. По этой причине потери данных об осадках обычно превышают ожидаемые. Величина отраженного от местников сигнала не зависит от длины волны МРЛ и убывает с увеличением λ в осадках.

2. Выбор высоты слоя для измерения $Z_э$ в осадках. В зависимости от высоты $H_{0°C}$ высота слоя может изменяться от 0,5 до 3 км [27, 28]. Как правило, высота слоя для измерения $Z_э$ является компромиссом, который позволяет провести измерения как можно ближе к поверхности Земли и минимизировать отражения от местных предметов. Выбор высоты слоя измерения $Z_э$ определяет набор углов места антенны МРЛ, под которыми будут проводиться измерения $Z_э$.

Для примера на рис. 4.2.1 представлена геометрия сканирования антенны МРЛ и линии постоянных высот индикатора обзора постоянной высоты ИКО ПВ (CAPPI). Режим CAPPI дает возможность просмотра картины пространственного распределения отраженных сигналов на одной или нескольких постоянных высотах относительно поверхности Земли.

3. Выбор интервала Δt между измерениями Z. Интервал Δt не должен быть больше 15 мин, оптимальное значение Δt составляет 5–10 мин. Для дождей с высокой пространственной изменчивостью отражаемости Δt не должно превышать 5 мин.

4. Выбор элемента площади, над которым измеряют интенсивность осадков. Размеры элемента площади составляют от 1×1 км до 10×10 км. Оптимальным является размер 4×4 км; он определяется разрешающей способностью ДНА МРЛ в тангенциальном направлении при R_{max} для Θ = 1°. При любом выборе размера элемента площади: 1) структура осадков не должна смазываться, а изображаться близко к реальной; 2) по изменению отражаемости можно производить оценку радиуса репрезентативных дождемерных измерений.

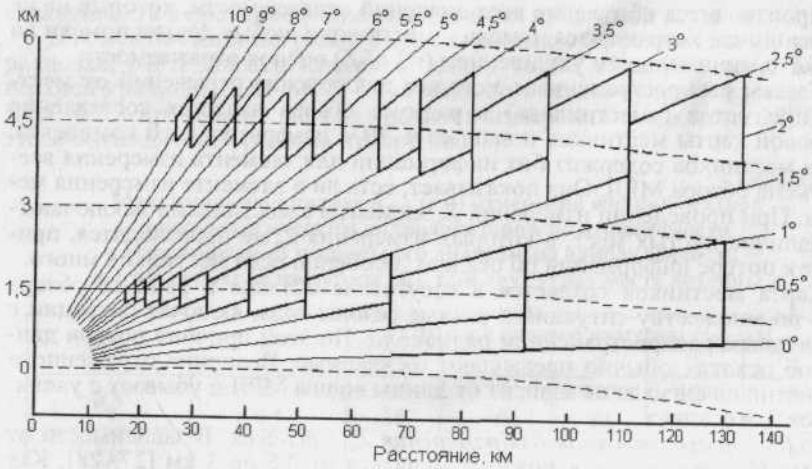

Рис. 4.2.1. Геометрия картины CAPPI (ИКО ПВ) на уровнях 1500 и 4500 м [41].

5. Выбор оптимального соотношения Z–I. Если ожидаются только осадки из конвективной облачности, то предпочтительно использовать соотношение $Z = 300\ I^{1,4}$, в других случаях – $Z = 200\ I^{1,6}$. Возможен вариант, когда до $Z = 45$ дБZ используется соотношение $Z = 200\ I^{1,6}$, а при $Z > 45$ дБZ – соотношение $Z = 300\ I^{1,4}$. Это не исключает применения других соотношений, если они базируются на репрезентативных экспериментальных данных, полученных для района наблюдений, например $Z = 250\ I^{1,5}$ [2].

В результате в каждый интервал Δt измерений $Z_э$ в пределах R_{max} получается информация о величине I_{max} в пределах выбранного элемента площади или средней интенсивности $I_{ср}$. Для получения $I_{ср}$, а также условного слоя осадков $Q_{усл}$ все процедуры, связанные с осреднением, должны проводиться по линейной шкале интенсивности осадков.

Условный слой осадков на элементе площади $Q_{усл}$ по данным МРЛ, который получается начиная со второго интервала наблюдений Δt, приводится к единице площади (1×1 км^2):

$$Q_{усл} = \frac{1}{S}\sum_{i}^{T} I_{ср\,i}\Delta t\,. \qquad (4.2.6)$$

Согласование радиолокационных и дождемерных данных. Просуммированное количество осадков по данным дождемера сравнивается с количеством осадков по данным МРЛ, отнесенным к единице площади

(1×1 км^2), в которой расположен дождемер. Могут сравниваться результаты прямых (P) и радиолокационных (WR) измерений количества (Q) и интенсивности (I) осадков. В первом случае коэффициент тарировки радиолокатора определяется следующим образом:

$$f_Q = \frac{\sum_{i=1}^{N} P_i}{\sum_{i=1}^{N} WR_i}\,. \qquad (4.2.7)$$

При сравнении значений интенсивности I назовем коэффициент f_I поправочным:

$$f_I = \frac{IP}{IWR}\,. \qquad (4.2.8)$$

Тарировка (калибровка) радиолокатора может производиться не только по одному МРЛ, но и по сети дождемеров.

При объединении радиолокационных и дождемерных данных принимаются некоторые или все следующие допущения [16, 25, 30, 31]:

1) дождемеры точно измеряют осадки в точке;

2) радиолокатор точно измеряет пространственную и временную изменчивость осадков в относительных единицах;

3) данные радиолокационных и дождемерных измерений представляют одну и ту же выборку для каждого дождемерного пункта;

4) результаты сравнения соответствующих радиолокационных и дождемерных выборок справедливы как между дождемерными пунктами, так и между интервалами выборок.

Первое допущение не выполняется только в случае сильного ветра и снега или при очень слабом дожде. Второе допущение может выполняться, если скорость падения капель и их распределение по размерам определяются простыми законами и нет проблем с аномальным распространением радиоволн, ослаблением радиоволн в осадках и газах атмосферы, калибровкой МРЛ по встроенным приборам и точечной цели. Третье допущение практически не выполнимо, а четвертое означает, что f_Q должно плавно изменяться в пространстве.

Краткое изложение методики сопоставления дождемерных и радиолокационных данных об осадках [30, 31] сводится к следующим операциям:

1) для каждого квадрата (1×1 или 2×2, или 4×4, или 5×5 км) рассчитывается коэффициент калибровки f_Q;

2) коэффициенты калибровки f_Q интерполируются по методу наименьших квадратов для образования непрерывного калибровочного поля;

наиболее надежные данные располагаются вблизи дождемеров;

3) калибровочное поле и поле осадков по МРЛ перемножаются и образуют комбинированное радиолокационно-дождемерное поле выпадения осадков, но только для тех квадратов, где f_Q находится в допустимых пределах;

4) часть площади квадратов, не охваченная калиброванной радиолокационной информацией, заполняется интерполированными данными дождемеров для закрытия комбинированного поля выпадения осадков.

Естественно, чтобы комбинировать результаты наблюдений, необходимо устранить все известные радиолокационные эффекты, приводящие к завышению результатов измерений $Z_э$. В первую очередь следует выбрать оптимальное соотношение $Z–I$, устранить эффекты «яркой» полосы и исключить аномально сильные сигналы от местных предметов. То же замечание относится и к данным дождемера: необходимо учесть эффекты сноса осадков ветром, орографические эффекты и изменение во времени f_Q.

Отдельной проблемой, которая решается в многочисленных исследованиях, является репрезентативность данных одного дождемера при различных типах осадков с учетом уменьшения информативности данных МРЛ по осадкам с удалением от МРЛ. В работах [30, 31] изложен метод калибровки данных МРЛ по данным дождемеров. Он включает в себя контроль за качеством значений f_Q и учет переменной плотности дождемеров с помощью процедуры объективного анализа.

Использование этой процедуры предполагает следующие основные этапы:

1) определение значений коэффициента согласования f_Q в каждом дождемерном пункте g;

2) проведение регрессионного анализа для определения зависимости от дальности $\lg(f_Q)$; в результате получается симметричное поле коэффициента согласования $f_Q(R)$, зависящее от дальности;

3) проверка качества каждого значения f_Q путем его сравнения с предсказанным моделью регрессии значением при той же дальности;

4) расчет расстояния между дождемерами $D(i, j)$ в каждой точке сетки i, j; определение поля фильтрующего параметра $k(i, j)$ для объективного анализа с использованием $D(i, j)$;

5) анализ отдельных значений коэффициента согласования с данными по сетке на основе объективного анализа; принимаются во внимание качество и фактическое расстояние между точками наблюдений; в результате получается проанализированное по пространству поле коэффициента согласования $f(i, j)$;

6) объединение полей $f(R)$ и $f(i, j)$ для получения конечного поля коэффициента согласования $\tilde{f}(i, j)$, где относительные веса слагающих полей определяются пространственной репрезентативностью $f(i, j)$;

7) умножение поля первичного радиолокационного измерения $WR(i, j)$ на конечное поле коэффициента согласования $\tilde{f}(i, j)$ для получения согласованных радиолокационных данных об осадках;

8) подстановка объективно проанализированного дождемерного поля в точки сетки, где отсутствуют радиолокационные данные.

Согласование путем умножения радиолокационного поля осадков на объективно проанализированное поле f_Q может быть оправданным, если согласуются радиолокационные и дождемерные выборки и это согласие можно распространить на окрестности отдельных дождемеров. В противном случае единственным путем улучшения радиолокационных оценок осадков с помощью дождемеров будет ликвидация смещения между двумя оценками. При этом стандартная погрешность дождемера должна быть меньше поправки на радиолокационное смещение.

Рассмотрим представленное в работе [14] обобщение результатов реализации проекта автоматизации управления канализационными сетями в департаменте Сен-Дени, Франция, в июле–августе 1982 г.

Для каждой плювиографической станции выбирались результаты прямых (IP) и радиолокационных (IWR) измерений интенсивности осадков и рассчитывался поправочный коэффициент f_I. В ходе эксперимента были проверены три метода:

1. Для корректировки использовался постоянный по полю поправочный коэффициент $f_I = \Sigma\, IP / \Sigma\, IWR$ и формула первичной оценки интенсивности дождя $Z = 200R^{1,6}$.

2. Рассчитывался параметр A, при котором значение Q, рассчитанное по формуле

$$Q = \sum_{i=1}^{i=n} IP_i \mid IP_i - (Z_i/A)^{1/b} \mid^2, \qquad (4.2.10)$$

минимально (i – номер точки сравнения данных МРЛ и плювиографа). Решение (4.2.10) позволяет увеличить вес больших интенсивностей.

3. В произвольной точке M_0 первичная оценка параметра калибровки $\tilde{P}_0$ производилась по формуле [14]

$$\tilde{P}_0 = \left(\sum_{k=1}^{k=n} W_{0k} P_k\right) \Big/ \sum_{k=1}^{k=n} W_{0k}, \qquad W_0 = \exp(-d_{0k}^2 / D^2), \qquad (4.2.11)$$

где P_k – параметр калибровки в контрольной точке k (для которой имеются данные прямых измерений), d_{0k} – расстояние между точками M_0 и k, D – параметр настройки. Полученная для каждой контрольной точки вели-

чина $\widetilde{P}_k$ может отличаться от P_k. Подобный прием применяется к разности $P_k - \widetilde{P}_k$, причем $D' = 2D$. Окончательно для точки M_0 получаем

$$P_0 = \widetilde{P}_0 + \left[\sum_{k=1}^{k=n} W'_{ok}\left(P_k - \widetilde{P}_k\right)\right] \Big/ \left(\sum_{k=1}^{k=n} W'_{ok}\right). \qquad (4.2.12)$$

Этим методом обрабатывается не сам коэффициент A, а величина $\lg A$. Сравнение описанных методов представлено на рис. 4.2.2, на котором параметр E является коэффициентом корреляции между величинами IP и IWR. Из рисунка видно, что для рассмотренных в ходе эксперимента дождей различные методы калибровки дают близкие результаты. Замечено, что если число станций меньше трех, вероятность ошибки калибровки резко возрастает.

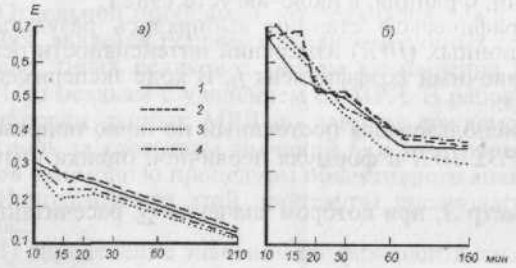

Рис. 4.2.2. Сравнение различных методов калибровки данных МРЛ, полученных при прохождении фронта (*а*) и для локальных грозовых конвективных ячеек (*б*) [14]. *1* – фактические значения, *2* – оптимизация lg *A*, *3* – метод Брандта, *4* – наиболее точная оптимизация.

Выявление систематической ошибки калибровки МРЛ. Радиолокационные и дождемерные данные о количестве и интенсивности осадков могут не совпадать (f_Q »1). Наиболее вероятной причиной такого расхождения является наличие систематической ошибки при калибровке МРЛ.

Из табл. 4.2.2 видно, что при интенсивности осадков $I \geq 50$ мм/ч ошибка радиолокационных измерений в 2 дБZ может привести к удвоению I. Для быстрого выявления систематических ошибок калибровки МРЛ только по результатам измерений отражаемости осадков можно применить подход, изложенный в [6]. Он основан на статистических закономерностях между I_{max}, $I_{ср}$, $\overline{Q}$ и Z_{max} за дождь по плювиографическим данным (см. табл. 1.2.1 и 1.2.2).

Используя соотношение (4.2.3), можно получить зависимость между средним количеством осадков $\overline{Q}$ за дождь длительностью меньше 1 ч и

максимальной отражаемостью за дождь Z_{max}, рассчитанной по данным плювиографических наблюдений по значениям максимальной интенсивности осадков I_{max}. Результаты расчетов приведены в табл. 4.2.4. Для отыскания зависимости $\overline{Q}(Z)$ по (4.2.3) для каждого значения I_{max} в выборке плювиографических измерений рассчитывалось $Z_{max\,i}$. Скользящее осреднение Q_i проводилось внутри интервала $Z_{max\,i}$ шириной ±0,5 дБZ и с шагом 1 дБZ.

Таблица 4.2.4

Зависимость между средним количеством осадков $\overline{Q}$ за дождь длительностью менее 1 ч и максимальным значением радиолокационной отражаемости $Z_{э\,max}$ [6]

$\overline{Q}$ мм	$Z_{э\,max}$ (дБZ)	Градация интенсивности	I_{max} мм/ч	$\langle\overline{Q}\rangle$ мм
0,26	21	Слабые	0,5–2,9	0,33
0,34	24			
0,43	27			
0,56	30			
0,73	33	Умеренные	3,0–25	1,2
0,97	36			
1,32	39			
1,85	42			
2,7	45	Сильные	25,1–60	4,2
4,17	48			
6,75	51			
11,6	54	Очень сильные	>60	15,0
21,5	57			

Анализ табл. 4.2.4 показывает, что величина $\overline{Q}$ мало меняется при изменении Z_{max} до 30 дБZ, а при дальнейшем увеличении Z_{max} до 42 дБZ значение $\overline{Q}$ возрастает в 3 раза. Таким образом, измерение Q при $Z \leq$ 27…30 дБZ вносит несущественный вклад в общее количество осадков в ливневых ситуациях. С помощью табл. 4.2.4 можно получить I_{max} и $\overline{Q}$ на элементе площади (начиная от 4×4 км), используя значение Z_{max}, измеренное в зоне радиоэха осадков за часовой интервал наблюдений на МРЛ в радиусе 90–120 км. С помощью табл. 4.2.4 и данных измерений отражаемости можно определять I и $\overline{Q}$ при обновлении информации МРЛ не каждые 5–10 мин, а 2–3 раза в час и легко обнаружить при этом экстре-

мумы I и Q в поле осадков.

Измерение за два часовых срока подряд $\overline{Q}$ = 15 мм в жидких осадках дает в умеренных широтах практически полумесячную норму осадков. Сопоставление радиолокационных и наземных данных об осадках позволяет быстро (за сутки) выявить систематическую ошибку калибровки МРЛ, если она имеется.

Второй способ выявления систематической ошибки – сравнение климатических данных об экстремальных значениях I и Q по данным наблюдений на метеостанциях в радиусе обзора с измеренными на МРЛ значениями [26]. Если с результате регулярных измерений Z_{max} получаются значения I и Q, близкие к экстремальным, то это свидетельствует о наличии систематической ошибки при калибровке МРЛ (в данном случае о завышении Z).

Для текущей оценки выскакивающих значений I можно использовать статистические зависимости между высотой верхней границы гроз и ливней $H_{гл}$, средним $I_{ср}$ и экстремальным (наибольшим) $I_{экс}$ значениями интенсивности осадков над площадью 30×30 км.

В [7] из сформированной выборки 19 219 пар значений Z–$H_{гл}$ по уравнению (3.1.2) и соотношению $Z = 275\ I^{1,4}$ проведен расчет $I_{экс}$ и их сравнение с $I_{ср}$. За $I_{экс}$ при заданном значении высоты гроз и ливней $H_{гл}$ принята интенсивность осадков

$$I_{экс} = I_{ср} + \sigma_{I_{H_{гл}}},$$

где $\sigma_{I_{H_{гл}}}$ – среднее квадратическое отклонение I при фиксированном значении высоты $H_{гл}$.

Величина $I_{экс}$ соответствует величине I на 95 %-ном уровне повторяемости в выборке $H_{гл}$ – Z. Наибольшая интенсивность осадков $I_{экс}$ может наблюдаться в любом месте квадрата 30×30 км и занимать площадь, равную разрешающей пространственной способности автоматизированного МРЛ, т.е. не менее 1 км × Θ°. Над дождемером $I_{экс}$ будет сохраняться не более 2,5 мин (см. табл. 1.2.3), а протяженность зоны $I_{экс}$ составит не более 5 км. Результаты расчетов представлены в табл. 4.2.5 и на рис. 4.2.3 [5].

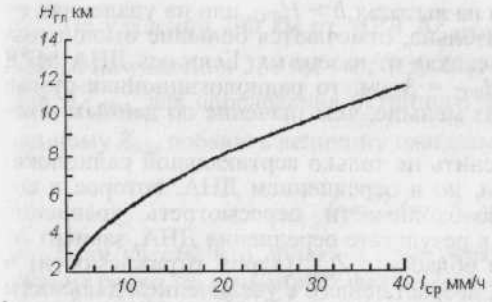

Рис. 4.2.3. Зависимость максимальной высоты радиоэха гроз и ливней ($H_{гл}$) от осредненной интенсивности осадков ($I_{ср}$) (12 481 измерение) [7].

Таблица 4.2.5

Оценка по данным МРЛ экстремальной ($I_{экс}$) и средней ($I_{ср}$) значений интенсивности осадков конвективного происхождения (грозы и ливни) в зависимости от высоты $H_{гл}$ радиоэха Cb над площадью квадрата 30×30 км

$H_{гл}$ км	Повторяемость (%) $H_{гл}$ в выборке	$I_{экс}$ мм/ч	$I_{ср}$ мм/ч
3	2,61	10	2,4
4–5	11,31	12	3,0
6–7	26,54	25	5,5
8–9	29,4	47	10,0
10–11	24,03	65	16,0
12–13	5,97	92	23,0
14–15	0,13	120	30,0

Примечание. $I_{экс}$ соответствует 95 %-ному уровню повторяемости в выборке I–$H_{гл}$ объемом 19 219 измерений.

Данные табл. 4.2.5 позволяют наглядно представить, в каких пределах изменяются $I_{экс}$ и $I_{ср}$ в грозах и ливнях в зависимости от их высоты. В частности, $I_{экс}$ превышает $I_{ср}$ в 3–6 раз в зависимости от высоты $H_{гл}$. Данные табл. 4.2.5 можно наряду с другими способами использовать для текущего критического контроля качества информации об осадках на МРЛ. Приведенные результаты позволяют это делать без привлечения климатической информации и данных, полученных с помощью дождемеров.

4.3. Радиолокационные измерения осадков в неоптимальных условиях

Об осреднении ДНА. Когда радиолокационные измерения проводятся

в области $H_{0°C}$ (слое таяния) или на высотах $h > H_{0°C}$, или на удалениях от МРЛ R, где величина ΘR значительна, отмечаются большие отклонения радиолокационных данных об осадках от наземных. Если ось ДНА МРЛ находится на высоте 5 км, а $H_{0°C} = 3$ км, то радиолокационная сумма осадков будет примерно в 10 раз меньше, чем значение по данным дождемеров.

Это занижение можно объяснить не только вертикальной радиолокационной структурой облачности, но и осреднением ДНА, которое в конечном итоге приводит к необходимости пересмотреть уравнение (2.2.10). Ошибка, возникающая в результате осреднения ДНА, зависит от соотношения между размерами области с Z_{max} (ядром отражаемости) и размерами импульсного объема, возрастающего с увеличением дальности в тангенциальном направлении. Кроме того, ошибка также зависит от вертикального градиента Z в объеме, где происходит измерение «осредненной» отражаемости.

При малых удалениях облака от МРЛ, когда линейные размеры ДНА (ΘR) меньше зоны неоднородности $r_н$ ($\Theta R < r_н$), и при однородной структуре облачности ($\gamma \to 0$) пространственного осреднения ДНА не происходит. В остальных ситуациях ($\Theta R > r_н$) осреднение ДНА областей с неравномерным распределением отражаемости всегда ведет к занижению значений Z_{max} в облаке.

Оценку ожидаемой ошибки $\Delta\tilde{Z}_{ДНА}$ (дБZ) можно проиллюстрировать с помощью рис. 4.3.1 [13] и следующей формулы:

$$\Delta\tilde{Z}_{ДНА} = 20\lg\frac{R\Theta}{r_н} + 10\lg\frac{\left(1-e^{-\gamma_в r_н}\right)}{\left(1-e^{-\gamma_в r_н \cdot 0{,}042R}\right)} + 10\lg\frac{\left(1-e^{-\beta_г r_н}\right)}{\left(1-e^{-\beta_г r_н \cdot 0{,}042R}\right)}, \quad (4.3.1)$$

где $\gamma_в$ и $\beta_г$ – вертикальный и горизонтальный градиенты отражаемости, Θ – ширина ДНА, одинаковая в обеих плоскостях.

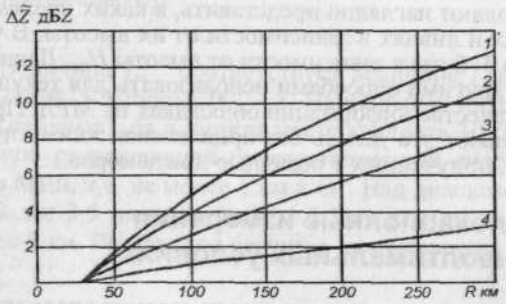

Рис. 4.3.1. Ошибки в определении величины Z как функции R и γ при $\Theta_0 = \varphi_0 = 44'$ и $r_н = 300$ м [13].

1 – для Cb с ливнем, $\gamma_в = 1$, $\beta_г = 2$; *2* – для Cb с грозой, $\gamma_в = 0{,}5$, $\beta_г = 2$; *3* – для Ns, $\gamma_в = 1$, $\beta_г = 0{,}5$; *4* – для As, $\gamma_в = 0{,}5$, $\beta_г = 0$.

На удалении 200 км от МРЛ $\Delta\tilde{Z}_{ДНА}$ может изменяться от 5,5 до 9,5 дБZ, а на удалении 250 км – от 7 до 11,5 дБZ. Исходя из методики расчетов $\Delta\tilde{Z}_{ДНА}$ для определения истинного значения $Z_{ист}$ необходимо к измеренному $Z_{изм}$ добавить величину ожидаемой ошибки:

$$Z_{ист} = Z_{изм} + \Delta\tilde{Z}_{ДНА}. \quad (4.3.2)$$

Если учесть, что облака в поле отражаемости однородными бывают крайне редко, то речь может фактически идти о более крутой зависимости Z от R, например $Z \approx R^{-3}$. К такому же эффекту занижения $Z_{ист}$ может привести неполное заполнение ДНА отражающими частицами на больших расстояниях. Причем величина коэффициента заполнения $K_З < 1$ может быть не только в вертикальной плоскости, но и в горизонтальной при осреднении отраженных сигналов по объему, превышающему импульсный.

Учет вертикального профиля. Условия измерения осадков при нарушении условий и допущений, принятых при выводе уравнения (2.2.10), называют в научной периодике неоптимальными. Они возникают вследствие больших углов закрытия, наличия экранирующих возвышенностей или высоких местных предметов, низких значений $H_{0°C}$, а также из-за необходимости получать радиолокационную информацию в условиях ограничений, связанных с кривизной Земли, при высоте радиотени, сравнимой с высотой $H_{0°C}$.

Главная причина погрешностей в неоптимальных условиях измерения (если исключить эффекты осреднения ДНА) – вертикальная неоднородность полей осадков (см. п. 3.1). Для повышения точности радиолокационных оценок осадков у поверхности Земли в неоптимальных условиях используют различные методы коррекции измеренных величин Z: прямую калибровку по дождемерам, непрямую калибровку по дождемерам и вертикальную экстраполяцию полей осадков [24, 27–29].

Для прямой калибровки используются экспериментально полученные отношения радиолокатор–дождемер. Непрямая калибровка основана на различных экспериментально выведенных уравнениях линейной и нелинейной регрессии. Для вертикальной экстраполяции используются вертикальные профили $Z_э(h)$ или статистические зависимости между значениями Z на разных уровнях высот.

Для оперативного применения в реальном времени, и особенно для измерения количества осадков в заданной точке за один час, по мнению авторов [24], наиболее пригоден метод вертикальной экстраполяции по синтетическим профилям $Z_э(h)$, поскольку при его использовании, как правило, нет необходимости в калибровке с помощью дождемеров. Алгоритм этого метода [24] можно записать следующим образом:

$$\tilde{Z}/Z_1 = \int Z(h + R\beta) f^2(\beta) d\beta, \qquad (4.3.3)$$

где $\tilde{Z}$ – отражаемость на наклонном удалении R на высоте h (вычисляется по радиолокационным измерениям согласно уравнению (2.2.10)); Z_1 – отражаемость у поверхности Земли; Z – промежуточный профиль отражаемости с нормализацией к земле; $f^2(\beta)$ – горизонтально проинтегрированная ДНА (на прием и передачу); β – угол вертикального интегрирования относительно оси ДНА. Таким образом, $\tilde{Z}$ является взвешенным по ДНА МРЛ вертикальным интегралом отражаемости (см. подробней п. 10.2).

Если известен вертикальный профиль $Z(h)$, то можно вычислить отражаемость у земли Z_1 (формула (3.1.4)) и через Z_1 и выбранное соотношение Z–I получить интенсивность осадков I_1.

Известны три способа получения истинного значения $Z(h)$:

фактически измеренные средние профили $\bar{Z}(h)$,
параметризованные синтетические профили,
локальные часовые синтетические профили относительно $H_{0°C}$.

Из п. 3.1 следует, что осредненные профили $Z(h)$ зависят от способа их формирования: по явлениям (грозы, ливни, обложные осадки) (см. табл. 3.1.2), по высоте верхней границы радиоэха Cb (см. табл. 3.1.3), по отражаемости в слое ниже нулевой изотермы (см. рис. 3.2.1 и 3.2.2).

Процедура радиолокационного измерения осадков в неоптимальных условиях предполагает сначала выбор вертикального профиля, а затем все остальные действия, описанные в п. 4.2. В ряде работ [28, 31] применен подход, при котором ежечасно получают профиль $Z(h)$ в зоне вокруг МРЛ и распространяют его на весь радиус измерений. После определения репрезентативного $Z(h)$ необходимо для каждого элемента площади вычислить высоту рельефа и высоту самого нижнего видимого на МРЛ местника, т.е. необходимо убедиться в отсутствии отражений от местных предметов и экранирования от них.

Применение линейной фильтрации Калмана к задаче измерения $Z(h)$ **[3].** Метод повышения точности измерения вертикального профиля радиолокационной отражаемости облака $Z(h)$ может быть основан на использовании процедуры фильтрации Калмана. Процедура позволяет получить минимум среднеквадратической ошибки при линейных оценках, а для гауссова распределения измеряемой величины – при любом классе оценок. Кроме того, алгоритм фильтрации Калмана обладает вычислительной устойчивостью к ошибкам в начальных данных.

Представим облако динамической системой со случайно изменяющимся одномерным фазовым вектором $Z(h)$. Предположим, что профиль $Z(h)$ измеряется дискретно с шагом по высоте Δh, выбираемым большим радиуса пространственной корреляции микрофизических характеристик облачной системы. Тогда известные уравнения состояния и наблюдения

[3], описывающие данную процедуру, будут иметь вид

$$Z(h_\nu) = \beta_\nu Z(h_{\nu-1}) + n_{0\nu}, \qquad (4.3.4)$$

$$\hat{Z}(h_\nu) = Z(h_\nu) + n_\nu. \qquad (4.3.5)$$

Здесь $Z(h_\nu)$ и $\hat{Z}(h_\nu)$ – фактическое и измеренное значения отражаемости на уровне h_ν; β_ν – переходный множитель, являющийся функцией высоты; $n_{0\nu}$ – гауссовская случайная величина, имеющая смысл флуктуации радиолокационной отражаемости метеоцели на высоте h_ν; n_ν – гауссовская случайная величина, описывающая ошибку МРЛ при измерении $Z(h_\nu)$.

Используя формулы (4.3.4) и (4.3.5), легко показать, что уравнения фильтра Калмана для измерения профиля радиолокационной отражаемости $Z(h)$ запишутся следующим образом:

$$\hat{Z}(h_\nu) = \beta_\nu \hat{Z}(h_{\nu-1}) + \left(\frac{R_\nu}{\sigma_{0\nu}^2}\right)\left[\hat{Z}(h_\nu) - \beta_\nu \hat{Z}(h_{\nu-1})\right], \qquad (4.3.6)$$

$$\frac{1}{R_\nu} = \frac{1}{\beta_{\nu-1}^2 R_{\nu-1} + \sigma_{0\nu}^2} + \frac{1}{\sigma_\nu^2}. \qquad (4.3.7)$$

Здесь $\hat{Z}(h_\nu)$ и $\hat{Z}(h_{\nu-1})$ – оценки отражаемости на высотах h_ν и $h_{\nu-1}$, оптимальные в указанном смысле; R_ν и $R_{\nu-1}$ – дисперсии оптимальных оценок на высотах h_ν и $h_{\nu-1}$; $\sigma_{0\nu}^2$ и σ_ν^2 – дисперсии гауссовых случайных величин $n_{0\nu}$ и n_ν соответственно.

Второе слагаемое в уравнении (4.3.6) является поправкой, т.е. разностью между значениями экстраполированной оценки $\hat{Z}_{\nu э}$ и фактически измеренной отражаемости $\hat{Z}_\nu$, умноженной на весовой коэффициент, который задается отношением дисперсии R_ν (т.е. меры ошибки) формируемой оценки $\hat{Z}_\nu$ и дисперсии σ_ν^2 случайной ошибки измерения величины Z на МРЛ. Выражение для R_ν задается уравнением (4.3.7). Из него следует, что ошибка оценки зависит от ошибки на прошлом шаге (учитывается значением $R_{\nu-1}$), точностных характеристик МРЛ (учитываются значениями σ_ν^2) и меры флуктуации измеряемой величины Z. Данная мера определяется дисперсией флуктуаций Z на уровне h_ν – $\sigma_{0\nu}^2$. Ясно, что вели-

чина $\sigma_{0\nu}^2$ непосредственно зависит от точности описания вертикального профиля $Z(h)$, т.е. от задания множителя β_ν. Анализ связи $\beta_\nu \to \sigma_{0\nu}^2 \to R_\nu$ и приводит к идее процедуры фильтрации адаптивной к физическому состоянию метеоцели. Для практической реализации фильтра надо задать «модельные» характеристики, т.е. функции β_ν и $\sigma_{0\nu}^2$, определить точность измерения Z на МРЛ (σ_ν^2) и сформировать граничные условия $\overline{Z}_0$, R_0.

Для определения вида множителя β_ν воспользуемся аппроксимационным представлением вертикального профиля радиолокационной отражаемости

$$Z(h) = 10^{-f(h)} Z_{\max}, \qquad (4.3.8)$$

где $f(h)$ – полином 3-й степени.

Поскольку измерения проводятся дискретно с шагом Δh, то из формулы (4.3.8) легко получить:

$$Z(h) = 10^{-g(h_{\nu-1},\Delta h)} Z(h_{\nu-1}), \qquad (4.3.9)$$

где $g(h_{\nu-1}, \Delta h)$ – полином, коэффициенты которого совпадают с коэффициентами в $f(h)$.

Тогда из формулы (4.3.9) находим

$$\beta_\nu \equiv 10^{-g(h_{\nu-1},\Delta h)}.$$

Таким образом, полученная рекуррентная процедура линейной фильтрации сводится к выполнению следующих операций:

1) по имеющейся с прошлого шага информации о $R_{\nu-1}$ (на первом шаге – по граничным условиям) и априорным сведениям о $\sigma_{0\nu}^2$, σ_ν^2 определяем дисперсию оптимальной оценки R_ν на данной высоте зондирования облака;

2) по имеющейся с прошлого шага оценке $\hat{Z}(h_{\nu-1})$ (на первом шаге – по граничным условиям) производим экстраполяцию величины радиолокационной отражаемости облака на следующий уровень:

$$Z_э(h_\nu) = \beta_\nu \hat{Z}(h_{\nu-1});$$

3) производим измерение $\hat{Z}(h_\nu)$ и на основании полученных значений величин $Z_э(h_\nu)$, $\hat{Z}(h_\nu)$, $R(h_\nu)$ вычисляем искомую оптимальную оценку

$\hat{Z}(h_\nu)$.

Для практической реализации процедуры фильтрации для облачных систем двух типов – Cb с грозами и Ns – необходимо задать:

– значения коэффициентов полинома $g(h_{\nu-1}, \Delta h)$;

– значения $\sigma_{0\nu}^2$, описывающие степень рассеяния истинных значений отражаемости $Z(h_\nu)$ относительно модельных характеристик;

– значения σ_ν^2.

Для определения σ_ν^2 примем величину относительной ошибки измерения lg $Z(h)$ равной 3 дБ.

На рис. 4.3.2 приведены результаты численных экспериментов по фильтрации профилей $Z(h)$ облачных систем двух указанных типов.

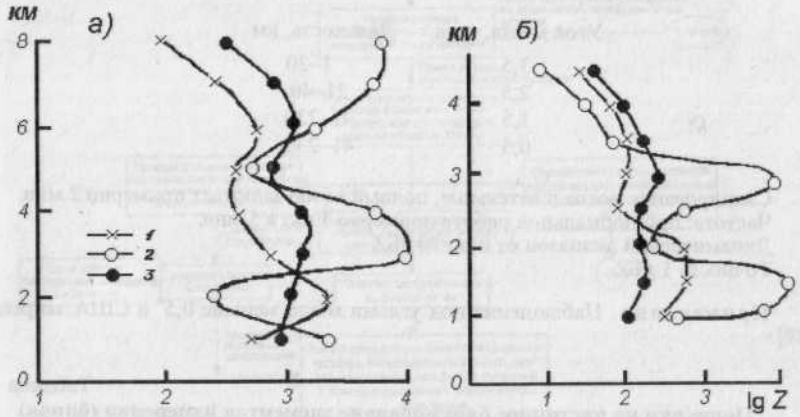

Рис. 4.3.2. Пример численного моделирования использования процедуры фильтрации при измерении профилей $Z(h)$ облачных систем Cb (*а*), Ns (*б*) ($\sigma_\nu = 0{,}5$).
1 – истинное значение $Z(h)$; *2* – измеренное с ошибками значение $Z(h)$; *3* – результаты после использования фильтрации [3].

4.4. Методика получения данных об осадках в системе NEXRAD (США)

Изложим методику, следуя работе [15]. Методика прошла оперативную проверку в течение более чем десятилетнего срока. Блок-схема этапов обработки данных об осадках приведена на рис. 4.4.1.

Входные данные по отражаемости. Особенности расчета $Z_э$ в сис-

теме NEXRAD заключаются в том, что он проводится всего для четырех углов места антенны и для одной высоты по всему радиусу измерений $Z_э$, равному 230 км (табл. 4.4.1).

Контроль качества по $Z_э$. Поправка на блокирование ДНА в элементе измерения рассчитывается по проценту блокирования при двустороннем прохождении радиоволн. В табл. 4.4.2 приведены поправки с шагом 1 дБZ.

Таблица 4.4.1

Характеристики входных данных по $Z_э$

Размер элемента измерения (бина) 1×1 км

Дальность от 1 до 230 км

Углы места: последовательный обзор на четырех малых углах места

Угол места, град.	Дальность, км
3,5	1–20
2,5	21–40
1,5	41–230
0,5	41–230

Сканирование последовательное, полный обзор занимает примерно 2 мин.

Частота: при нормальной работе примерно 1 раз в 5 мин.

Динамический диапазон от 0 до 70 дБZ

Точность 1 дБZ

Примечание. Наблюдения под углами места меньше 0,5° в США запрещены [37].

Таблица 4.4.2

Поправки на частичное блокирование элементов измерения (бинов)

Поправка, дБZ	0	1	2	3	4
Затенение, %	0–10	11–29	30–43	44–55	56–60

Поскольку коррекция элементов измерения (бинов), заблокированных больше чем на 60 %, может привести к большим ошибкам в оценках осадков, эти бины считаются заблокированными полностью. Если блокирование занимает по азимуту 2° или меньше, то значения заменяются радиальным средним пары соседних неполностью заблокированных значений на том же расстоянии.

При дальностях свыше 40 км используют значения Z при $\varepsilon = 0{,}5°$ и $\varepsilon = 1{,}5°$ или при их комбинации (см. ниже п. «Построение гибридного обзора»). Поскольку под самым малым углом наиболее вероятны большие помехи в условиях аномального распространения, вводится контроль за непрерывностью в пространстве, чтобы принять решение о том, когда

нужно исключить из обработки данные при $\varepsilon = 0{,}5°$. Когда при $\varepsilon = 0{,}5°$ наблюдаются интенсивные отражения, то часть радиоэха, не вошедшая при переходе на следующий угол возвышения, рассчитывается согласно рис. 4.4.2. Если эта часть больше приемлемого порога, то для построения гибридного обзора данные при $\varepsilon = 0{,}5°$ не используются.

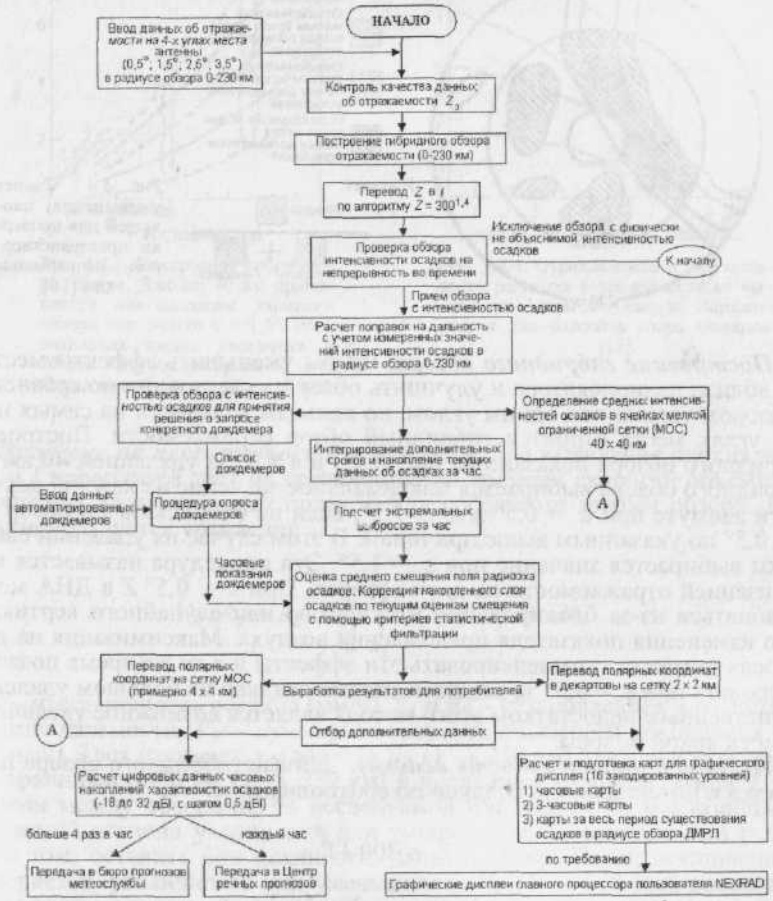

Рис. 4.4.1. Блок-схема системы обработки измерения интенсивности (I) и количества (слоя) осадков на ДМРЛ (NEXRAD) [15].

дБI = 10 lg (I/1 мм/ч).

Дополнительными этапами контроля качества являются обнуление изолированных значений и поиск с коррекцией экстремальных значений (выбросов).

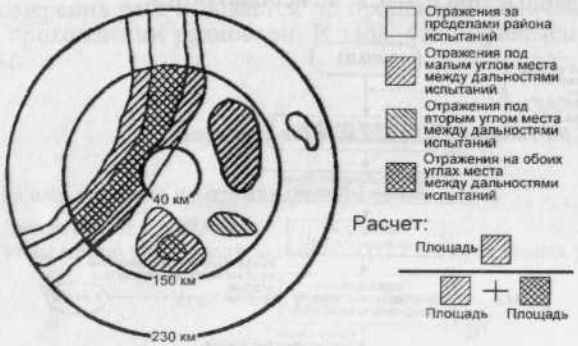

Рис. 4.4.2. Расчет уменьшения площадей для проверки пространственной непрерывности [15].

Построение гибридного обзора. Чтобы уменьшить эффекты местников вблизи радиолокатора и улучшить обзор на расстоянии по сравнению с обзором только под одним углом, по кольцам дальности на самых нижних углах места строится гибридный обзор отражаемости. Построение гибридного обзора показано на рис. 4.4.3 и 4.4.4. За удалением 40 км для гибридного обзора выбирается максимальное значение на каждой дальности и азимуте при $\varepsilon = 0{,}5°$ и $\varepsilon = 1{,}5°$, если не был исключен обзор при $\varepsilon = 0{,}5°$ по указанным выше причинам. В этом случае на удалении свыше 40 км выбирается значение при $\varepsilon = 1{,}5°$. Эта процедура называется максимизацией отражаемости на двух обзорах. При $\varepsilon = 0{,}5°$ Z в ДНА может ослабляться из-за блокирования местностью или случайного вертикального изменения показателя преломления воздуха. Максимизация на двух обзорах поможет скомпенсировать эти эффекты и в то же время позволит наблюдать при $\varepsilon = 0{,}5°$ за тонкими слоями осадков на большом удалении. Единственным недостатком этого метода является возможное увеличение области яркой полосы.

Перевод в интенсивность осадков. Данные гибридного обзора переводятся в интенсивность осадков по соотношению $Z - I$:

$$Z_э = 300\, I^{1,4},$$

где $Z_э$ – эквивалентная отражаемость в мм^6/м^3, а I – интенсивность осадков в мм/ч. Затем осредняются соседние значения 1×1 км и получается распределение интенсивности осадков по элементам 1×2 км. После этих расчетов полученные интенсивности осадков переводятся до ближайших 0,5 дБ I (дБI = 10 lg I/1 мм/ч).

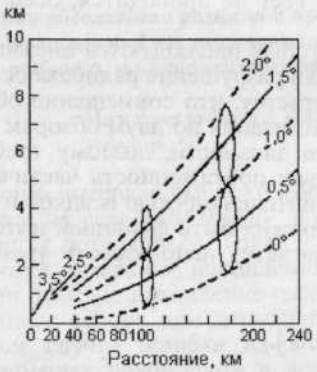

Рис. 4.4.3. Построение гибридного обзора. Дальше 40 км применяется максимизация двойного обзора или только $\varepsilon = 1{,}5°$. Вертикальная шкала увеличена в 20 раз. Рисунок построен на базе Стандартной атмосферы США [15].

Рис. 4.4.4. Отражаемость и интенсивность радиоэха в зависимости от высоты для Уоллопс-Айленда, Вирджиния, и для бассейна озера Онтарио [15].

Проверка на непрерывность во времени. Для выявления плохих данных о I проводится тест на постоянство во времени скорости объемного накопления воды по всему полю между соседними зонами обзора. Для этого используется уравнение

$$V_W(R_1 + R_2) = \int_0^{360} \int_{R_1}^{R_2} I \text{ (мм/ч)}\, dR \cdot d\theta,$$

где I – интенсивность осадков (мм/ч), R_1 и R_2 – установленная и расчетная границы дальности, V_W – суммарная скорость объемного накопления воды (мм/ч). Тест начинается с расчета V_W (1 → 230 км) для нового обзора I. Она сравнивается с V_W (1 → 230 км) в последнем хорошем обзоре I. По времени между обзорами, по исследуемой площади и по максимальной ожидаемой степени увеличения или уменьшения V_W принимается решение о том, оставить или исключить данный обзор. Перед исключением проверяется, увеличилась или уменьшилась V_W (1 → 230 км), поскольку районы осадков, попадая в поле обзора или уходя из него, могут вызвать изменения на наружной кромке. Внутренний радиус (R_1) определяется по времени между обзорами и максимальной скоростью переноса шторма по климатологическим данным. Если увеличение или уменьшение V_W (1 → R_1 < 230 км) тоже больше расчетного порога, то обзор считается плохим и

исключается из дальнейшей обработки. Тест не проводится, если время между обзорами превышает 15 мин.

Цель теста – удаление обзоров, в которых наблюдаются внезапные и физически не объяснимые образование или разрушение радиоэха осадков.

Поправка на расстояние. Предполагается, что совмещение обзоров на нескольких углах возвышения и максимизация по двум обзорам существенно снизят качество наблюдений по дальности, поэтому требуется ввод дополнительной поправки. Поскольку протяженность частично заполненной ДНА может коррелировать с интенсивностью осадков и с расстоянием, поправка на дальность тоже должна быть функцией интенсивности осадков I и расстояния R. Предлагается использовать уравнение поправки следующего вида:

$$I_{corr} = A\left[(I)^b R^c\right],$$

где A, b, c – коэффициенты, определяемые по местным данным. Эти коэффициенты меняются от сезона к сезону и от пункта к пункту. Начальные значения этих коэффициентов находятся по характеристикам ДНА, климатологическим данным и характеру подстилающей поверхности.

Получение условного слоя осадков. Каждый раз при обработке новой серии обзоров (примерно каждые 5 мин) рассчитываются новые часовые слои осадков (накопления) для выработки ежечасных и трехчасовых накопленных слоев. Рассчитываются также накопления между обзорами. Впоследствии они используются для получения суммарного слоя осадков по всему процессу выпадения осадков (шторму).

На первом этапе расчета ежечасных накоплений и между обзорами оцениваются накопления в период между обзорами по оценкам I в текущем обзоре и в самом хорошем последнем обзоре. На первый взгляд, кажется, что это можно сделать простым осреднением интенсивности осадков за два обзора в бине 1×2 км и умножением на время между ними. Однако с увеличением времени между обзорами быстро увеличивается и ошибка, связанная с этими оценками накопления, поскольку эти оценки используются для выработки продуктов по часовым накоплениям с высоким пространственным разрешением (в клетках сетки площадью от 4 до 16 км^2) (табл. 4.4.3).

Обычное время выборки (5 мин) может значительно растянуться при сбое системы или временной остановке. Поэтому процедуру измерения накоплений проводят таким образом, чтобы она давала информацию о накоплениях в период между обзорами продолжительностью больше 5 мин.

Максимальная случайная ошибка из-за увеличения интервала выборки составляет примерно 50 %. Поэтому максимальный интервал выборки, за который по простым средним рассчитываются накопления за дополнительный период, должен составлять 30 мин.

Таблица 4.4.3

Средняя абсолютная разница в процентах между часовыми накоплениями на площади 4×4 км, полученными в 5-минутные интервалы основной выборки, и накоплениями за длительные интервалы выборки [15]

Интервал выборки, мин. . .	10	15	30	60
Разница, %.	15	25	55	120

Когда интервал выборки превышает 30 мин, то лишнее время, приходящееся на середину между двумя периодами обновления информации, считается потерянным. Тогда до и после пропущенного периода рассчитываются отдельные накопления за добавочный период для периодов по 15 мин. Каждое накопление рассчитывается либо по началу, либо по концу одного обзора при допущении постоянства интенсивности дождя. В каждом случае ошибка из-за большого интервала выборки для этих 15-минутных накоплений в добавочный период не должна превышать 50 %. Затем один или два обзора с накоплениями за добавочный период, а также время начала и конца пропущенного периода, если он был, записываются для расчета часовых накоплений.

Если период между обзорами составляет более часа, то рассчитываются часовые накопления за самый последний полный час. В противном случае рассчитываются часовые накопления за час, заканчивающийся с текущим обзором.

Перед расчетом часовых накоплений проверяется длина пропущенных периодов, прошедших за данный час. Если пропущено более 10 мин, то часовое накопление не рассчитывается.

Часовые накопления рассчитываются путем сложения накоплений в группах обзоров с добавочным периодом за 1 час с частью тех, которые пересеклись с началом и концом часового периода.

Затем проверяются неоправданно высокие значения часовых накоплений (выбросы). Эти значения заменяются на интерполированные значения, если восемь соседних значений не являются выбросами. Эта проверка выполняется несмотря на то, что выбросы и так проверяются на наличие мгновенных значений отражаемости, так как сигналы от местников, проверенные всплески отражаемости, сохранявшие относительно высокий уровень большую часть часа, дают неправдоподобно большие часовые накопления слоя осадков.

Накопления между обзорами приравниваются к одиночным накоплениям в добавочные периоды, а если сделаны два обзора, то к сумме двух накоплений в добавочный период.

Согласование данных измерений дождемеров и радиолокатора. Несмотря на старание сохранить высокий уровень точности количественной оценки осадков по радиолокационным данным, эти оценки все равно содержат ошибки. Фактически ошибки могут составлять ±5 дБI (т.е. отличаться от истинной I в 3 раза) вследствие разных причин, и в частности из-за калибровки аппаратуры, аномального распространения, ослабления

на влажном колпаке антенны, неправильно подобранного соотношения *Z–I* для данной штормовой системы и др. Если некоторые из этих ошибок локализуются или зависят, допустим, от дальности, то другие часто создают мультипликативное смещение радиолокационной оценки осадков. Для исправления этих ошибок применяется процедура сопоставления дождемерных часовых значений осадков с соответствующими радиолокационными значениями и оценки радиолокационного среднего по полю мультипликативного смещения.

Процедура оценки смещения состоит в применении дискретного фильтра Калмана. Он предусматривает, чтобы среднее мультипликативное смещение проходило по пути случайного процесса, т.е. в равной мере возрастало или уменьшалось в последующий час. Лучшим прогнозом по этой модели на следующий час является просто лучшая текущая оценка. Если для определенного часового периода созданы достаточно сравнимые группы дождемерно-радиолокационных выборок, то по этим данным обновляется прогноз, составленный по последней оценке предыдущего часа. Новые данные используются также в процессе каждой оценки ковариационной матрицы ошибки измерений, которая, вообще говоря, служит мерой дождемерно-радиолокационных рядов как оценочная функция радиолокационного смещения.

В «ошибку» измерений входят три группы ошибок: 1) дождемерные, 2) радиолокационные и 3) «ошибка» выборки (из-за различия между точечной выборкой дождемера и пространственной выборкой радиолокатора). Все они в скрытом виде присутствуют в ковариации ошибки измерения.

Если для какого-то часового периода получено недостаточное число дождемерно-радиолокационных рядов, то отклонение прогноза от последнего часа становится новым значением текущего смещения, а новое значение отклонения прогноза приравнивается к значению текущего смещения. Дисперсия оценочной ошибки тоже возрастает каждый час вследствие дисперсии шума системы.

Если оценочные функции смещения распространяются на продолжительный период вперед (примерно на 24 ч), то они принимают долгосрочные значения в момент, когда за прошедший час отсутствуют значительные осадки. Это делается потому, что после увеличения времени без использования новых дождемерно-радиолокационных рядов неопределенность оценки любого смещения становится слишком большой и теряет какое-либо значение.

Получение и распространение результатов измерений (продуктов). По скорректированным группам текущего часа (или почасовым) и скорректированным группам накоплений между обзорами, полученным выше, вырабатываются следующие продукты:

1) часовой продукт осадков представляет собой суммы в течение часа или суммы за час и обновляется каждые 5 мин; этот продукт не производится, если в течение часа данные отсутствуют больше чем за 10 мин;

2) продукт трехчасовых осадков представляет собой трехчасовую

сумму за прошедшие 3 часа суток и обновляется 1 раз в час; он не вырабатывается, если отсутствуют данные больше чем за час, которые должны были использоваться при расчете сумм осадков;

3) продукт суммарных осадков шторма представляет собой суммарные накопления с последнего часового перерыва в осадках и обновляется примерно каждые 5 мин; этот продукт вырабатывается даже при пропуске нескольких периодов.

Дополнительные данные хранятся в течение двух часов и содержат следующее:

– общее число изолированных бинов, используемых для построения каждого гибридного обзора;

– общее число замененных и интерполированных выбросов, используемых для построения каждого гибридного обзора;

– частичное уменьшение площади по тесту непрерывности в пространстве для каждой гибридного обзора;

– отношение числа бинов на самом нижнем обзоре к общему числу бинов, используемых в максимизации по двум обзорам для каждого гибридного обзора;

– отметки качества данных по тесту непрерывности во времени для каждого обзора с интенсивностью осадков;

– мгновенные интенсивности осредненных по площади осадков раз в час для каждой развертки с интенсивностью осадков;

– общее число выбросов интерполированных часовых накоплений для каждого обзора с часовыми накоплениями;

– сроки пропущенных периодов;

– оценка смещения и дисперсия ее ошибки для каждого обзора с часовым накоплением;

– коэффициенты для переводной таблицы *Z–I*;

– показания дождемеров и накопления;

– показатели калибровки системы и ее рабочего состояния.

4.5. Радиолокационное измерение осадков в виде снега

Основные положения. Радиолокационное измерение осадков в виде снега имеет свои особенности, которые часто превращают оперативный процесс измерений и их интерпретацию в научно-исследовательскую работу.

При средней высоте радиоэха снегопада, равной 3–4 км, отмечается резкий спад вертикального профиля $Z(h)$ над слоем $H_{0°C}$ или, с высоты 100 м от поверхности Земли, что резко уменьшает радиус обнаружения снега на МРЛ по сравнению с жидкими осадками.

Снег может наблюдаться при $t < 0$ °C (сухой снег) и при $t \geq 0$ °C (тающий снег). Диэлектрическая проницаемость снежных хлопьев в процессе таяния увеличивается в 5 раз. Снег выпадает из облачных систем

As–Ns, As–Ns–Cb, As–St–Sc, в которых плотные облака среднего яруса хорошо обнаруживаются на МРЛ, однако снег из таких облаков не всегда достигает поверхности Земли.

И, наконец, при согласовании радиолокационных и наземных данных оказывается, что дождемеры с ветровой защитой улавливают примерно 70 % фактических осадков, а без ветровой защиты – 50 % [32]. Такие данные получены в среднем для всех случаев со снегопадом, а данные за ветреные дни с сухим снегом выглядят намного хуже. Поэтому при снегопаде ошибки дождемерных измерений, вызванные ветром, настолько велики, что введение согласования f_Q как в случае жидких осадков, не дает никакого улучшения.

В [40] для соотношения Z–I_c в снегопаде предложено следующее выражение:

$$Z = 1780\ I_c^{2,21}, \qquad (4.5.1)$$

где Z выражена в мм^6/м^3, а I_c – в мм/ч. Если Z выразить в дБZ, то (4.5.1) запишется в виде

$$Z = 32{,}5 + 22{,}1 \lg I_c. \qquad (4.5.2)$$

Для тающего снега

$$Z_э = 26 + 22 \lg I_c. \qquad (4.5.3)$$

Одному и тому же значению I будут соответствовать разные значения $Z_э$ для снегопадов ($Z_{эс}$) и дождей ($Z_{эд}$):

I мм/ч	1	10
$Z_{эд}$	23	39
$Z_{эс}$	26	48

Для устранения такой неоднозначности в [32] предложено следующее выражение:

$$I_c = \left(\frac{Z_э}{400}\right)^{1/2,2}. \qquad (4.5.4)$$

В [1] для снега при температуре воздуха $t < 0$ °С предлагается соотношение

$$Z = 5600\ I_c^{1,7}, \qquad (4.5.5)$$

а при $t \geq 0$ °С – соотношение

$$Z = 900\ I_c^{1,7}. \qquad (4.5.6)$$

Исследователи приходят к выводу, что для правильной оценки I_c необходимо знать $Z(h)$ для каждого элемента площади измерения, поскольку осреднение $Z(h)$ в снеге (рис. 4.5.1) может внести дополнительные ошибки. Оптимальные соотношения $Z_э$–I для снегопада в идеальном случае должны предусматривать изменение коэффициентов A и b в процессе таяния снега.

Проблемами измерения снега на МРЛ больше других занимаются специалисты Швеции и Финляндии. Это объясняется большим интересом к их работе со стороны дорожных служб. Изложим достижения финских специалистов, следуя их докладу в COST-75 [32].

Методика Финского метеорологического института (FMI) [32]. Алгоритм коррекции измерений в FMI основан на осредненной во времени отражаемости $Z(h)$, наблюдаемой вблизи МРЛ, в предположении, что наблюдаемый средний профиль $Z(h)$ в радиусе 40 км от МРЛ применим и для больших расстояний. Поправочным коэффициентом для измеренных значений в каждом бине дальности и под каждым углом места служит отношение величины $Z_э$ (дБZ) в профиле на уровне земли к сглаженному ДНА значению $Z_э$ (дБZ) наверху. Профили осредняются за короткие временные интервалы порядка 3 ч.

Использование $Z(h)$ для всех расстояний не принесет успеха, если профили горизонтально неоднородны (рис. 4.5.1 и 4.5.2). Один из возможных подходов – классифицировать профили по виду, находя их для каждого пункта из верхней, видимой части профиля. Это возможно для конвективных ситуаций с очень изменчивыми высотами верхней кромки облаков. Другой подход, особенно для прохождения фронтов, – использование численных моделей метеопрогноза (NWP) с большим разрешением для диагностики структуры радиоэха. Облачные и дождевые вода и лед еще не используются как переменные в оперативной северной модели с большим разрешением для ограниченной территории HIRLAM (см. п. 8.2.2). Тем не менее даже распределение влажности принесет большую пользу при оценке горизонтального распределения вертикальных профилей во фронтальных случаях. На рис. 4.5.4а представлены три полученных одновременно на трех радиолокаторах вертикальных профиля отражаемости перед приближающимся теплым фронтом, изображенном на рис. 4.5.2 и 4.5.3. На рис. 4.5.4б показана также передняя кромка влажной области на разных изобарических уровнях, по 12-часовому прогнозу HIRLAM. Используется допущение, что наблюдаемые профили постоянны вдоль изоплет влаги, и поэтому их можно интерполировать в каждую точку только перпендикулярно изоплетам.

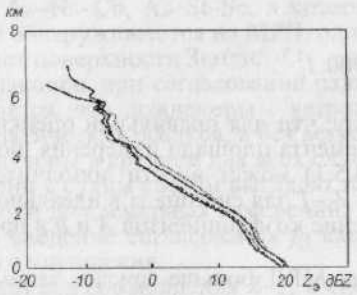

Рис. 4.5.1. Образец средних вертикальных профилей отражаемости в снегопаде.

Каждая кривая представляет осреднение по разным срокам – от мгновенной выборки до 3-часового среднего в радиусе 40 км от радиолокатора [32].

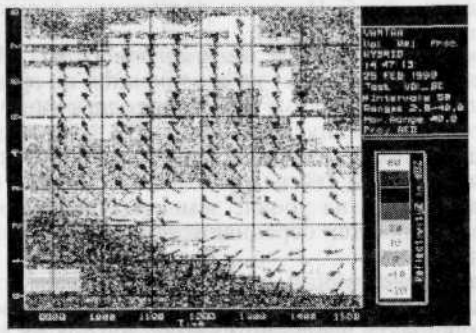

Рис. 4.5.2. Высотно-временной разрез теплого фронта, приближающегося к радиолокатору в Вантаа 25 февраля 1998 г. в срок с 9 до 15 ч UTC.

Фоном отображен эквивалентный коэффициент радиолокационной отражаемости (дБZ); горизонтальный ветер VVP обозначен традиционными флажками [32].

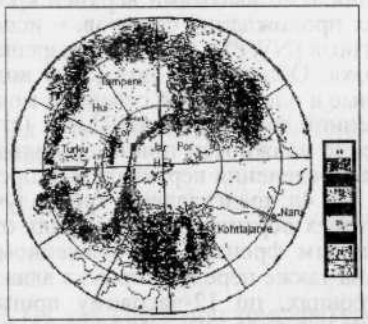

Рис. 4.5.3. Картина ИКО при минимальном угле места (фактически угол места равен 0,6°, а не значению на табло) на радиолокаторе в Вантаа за 25 февраля 1998 г. в 12 чUTC [32].

Коррекция по $Z(h)$ «сдвигает» радиолокационное значение с высоты обнаружения радиоэха к уровню земли. Чтобы исключить смещение интенсивности осадков на уровне земли из-за нелинейности соотношения Z–I_c, коррекцию профиля можно проводить с помощью профиля I_c. Однако использование постоянного соотношения Z–I_c для всех вертикальных уровней будет тоже грубым допущением. Это вызовет сдвиги в случаях, когда осадки тают на некоторой высоте. Сейчас в FMI проверяются поправки к профилям для значений $Z_э$. Для того чтобы получить интенсивности осадков в мм/ч по $Z_э$ в скорректированном профиле, надо знать фактические диэлектрические свойства гидрометеоров на уровне земли.

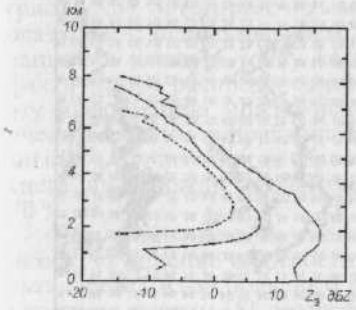

Рис. 4.5.4а. Вертикальные профили отражаемости дБZ, полученные одновременно на радиолокаторах в Аньяланкоски (ANJ), в Вантаа (VAN) и в Икаалинен (IKA) [32].

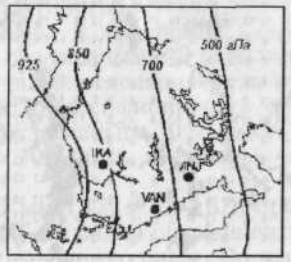

Рис. 4.5.4б. Передняя кромка области относительной влажности 95 % по 12-часовому прогнозу HIRLAM на изобарических уровнях 925, 850, 700 и 500 гПа в 12 ч UTC 25 февраля 1998 г.

Согласно статистическим испытаниям на основе данных синоптических и аэрологических наблюдений на станциях FMI, лучшими величинами для оценки наблюдаемой фазы служат влажность и температура. Вероятность дождя P можно оценивать, придавая значение 0 всем синоптическим наблюдениям с твердыми осадками (за исключением града), а 0,5 – всем наблюдениям со смесью дождя и снега и, наконец, значение 1 – всем наблюдениям с жидкими осадками. Естественно, вероятность выпадения снега будет равна 1–P. На основе данных 150 000 синоптических наблюдений за осадками в Финляндии с использованием дискриминантного анализа была рассчитана простая модель вероятности дождя как функция температуры (T °C) и влажности (RH %) на высоте 2 м:

$$P = \frac{1}{1 + \exp(22 - 2{,}7T - 0{,}20RH)}.$$

Из формулы видно, что в относительно сухих условиях испарение за счет охлаждения повышает вероятность снега при относительно высокой температуре. Снежные ливни не редкость даже при температуре около 5 °C, однако при той же температуре осадки внутри обширного фронтального Ns всегда будут выпадать в виде дождя.

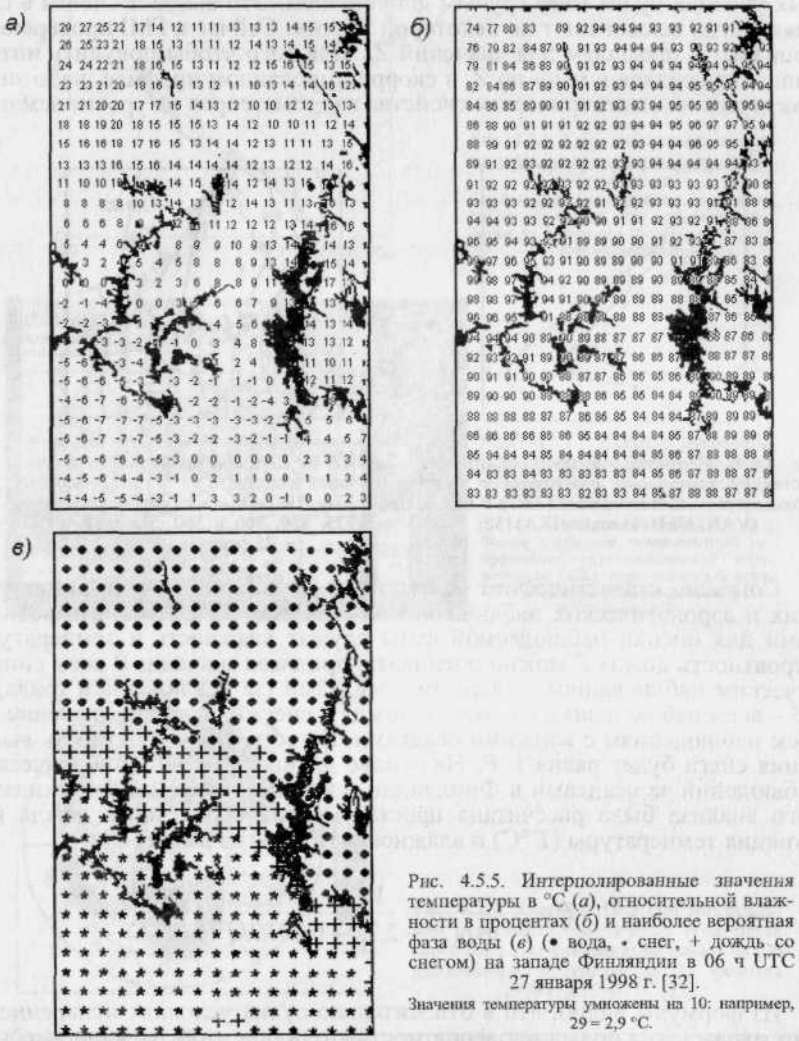

Рис. 4.5.5. Интерполированные значения температуры в °С (*а*), относительной влажности в процентах (*б*) и наиболее вероятная фаза воды (*в*) (• вода, • снег, + дождь со снегом) на западе Финляндии в 06 ч UTC 27 января 1998 г. [32].

Значения температуры умножены на 10: например, 29 = 2,9 °С.

Такую статистическую модель авторы [32] используют для анализа в реальном времени горизонтального распределения типа осадков – снег,

снег с дождем или дождь. Источниками важной информации при анализе в реальном времени водной фазы выпадающих осадков в горизонтальной плоскости на уровне земли служат синоптические и автоматические метеостанции и местная топография. Наблюдения за температурой и относительной влажностью на синоптических станциях интерполируются на сетку 10×10 км с помощью процедуры «cokriging» с известным трендом, найденным по обычному методу наименьших квадратов второго порядка (рис. 4.5.5). Затем рассчитываются доля воды в осадках, или «влажность осадков», с использованием модели вероятности, а также интерполированные в каждую точку сетки температура и влажность. Совместно с фактическим распределением осадков, полученным на радиолокаторах, эту информацию можно использовать для определения типа осадков с очень большим разрешением. Например, классифицировать «снег» мы можем в случаях, когда вероятность P дождя меньше 30 %, смесь дождя и снега, или «дождь со снегом» – при P = 30…70 %, и «дождь» – при P > 70 %.

При интенсивности снегопада I_c > 5 мм/ч ($Z_э$ = 25 дБZ) происходит резкое ухудшение видимости (до 500 м) и создается опасная ситуация на автодорогах из-за большого количества выпавшего снега. По климатологическим данным [5], такие ситуации, связанные со снегом из Cb (ливневый снег) и Ns, встречаются в 6,5 % случаев наблюдений. Снегопад умеренной интенсивности ($Z_э$ от 15 до 24 дБZ) отмечается в 18,8 % случаев. Таким образом, 25,3 % времени наблюдений за снегопадами в зимний сезон важны для эксплуатационников дорог и коммунальных служб городов.

Как следует из результатов, полученных в Финском метеорологическом институте [32], для извлечения максимальной пользы из информации МРЛ о снегопадах требуется привлечение любых достоверных данных, улучшающих качество метеорологической интерпретации радиолокационных измерений.

4.6. Эффективность радиолокационных измерений осадков

Потенциал современных МРЛ позволяет измерять осадки с минимальной интенсивностью от 0,1 до 0,5 мм/ч ($Z_э$ от 7 до 18 дБZ) в радиусе обзора 250 км. Ограничивающим фактором остается кривизна Земли и возрастающая с удалением от МРЛ область радиотени. Чтобы измерить, надо сначала обнаружить. Климатологические повторяемости разных типов осадков в районе установки МРЛ и высоты верхних границ облаков, из которых осадки выпадают, позволяют определить максимальный радиус обнаружения $R_{обн}$ осадков на МРЛ и размеры площади радиолокационных измерений.

В соответствии с [5], средняя высота радиоэха облаков, дающих снегопады, изменяется от 3,0 до 4,4 км ($R_{обн}$ от 100 до 160 км); обложные осадки – от 3,5 до 6,6 км ($R_{обн}$ от 120 до 200 км); конвективные осадки –

от 6 до 8 км ($R_{обн}$ от 200 до 250 км).

По оценкам [5], при наблюдениях на МРЛ с $П_м$ = 50 дБ площадь радиоэха конвективной и слоистообразной облачности с осадками ни в один срок не превышает 90 тыс. км^2.

На рис. 4.6.1 [5] приведена зависимость средней площади $\bar{S}$ радиоэха от его наибольшей высоты H_{max} в радиусе обзора МРЛ. Из рисунка следует, что, начиная с H_{max} > 3 км, увеличение H_{max} вдвое приводит к такому же увеличению $\bar{S}$. Покрытие экрана индикатора кругового обзора МРЛ радиоэхом $\bar{S}/\pi R^2$ при R = 300 км изменяется от 3,5 % при H_{max} = 1…3 км до 18 %, когда значение H_{max} достигает значения высоты тропопаузы.

Из табл. 3.2.5 следует, что повторяемость (процент сроков) средних значений высоты $H_{ср}$ радиоэха конвективной облачности (РКО) была следующей:

$H_{ср}$ км	≤ 3,0	3,1–4,0	4,1–5,0	5,1–6,0	6,1–7,0	>7,0
Повторяемость, %	29,6	21,9	17,3	17,2	11,9	2,1

Во многих публикациях [4, 9, 20–24, 27–29, 34, 35, 39, 42, 43] решается вопрос о необходимой точности радиолокационного метода измерения осадков и эффективности таких измерений с помощью радиолокатора и наземной дождемерной сети. Экономические аспекты при этом играют важную роль. Действительно, экономически выгодно измерять осадки радиолокатором и иметь минимальную сеть дождемеров в радиусе его измерений.

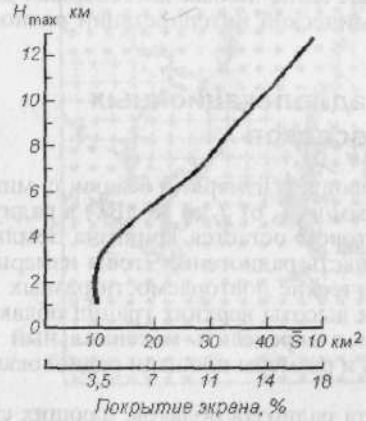

Рис. 4.6.1. Зависимость средней площади $\bar{S}$ радиоэха от его наибольшей высоты H_{max} в радиусе обзора 300 км (Белоруссия) [5].

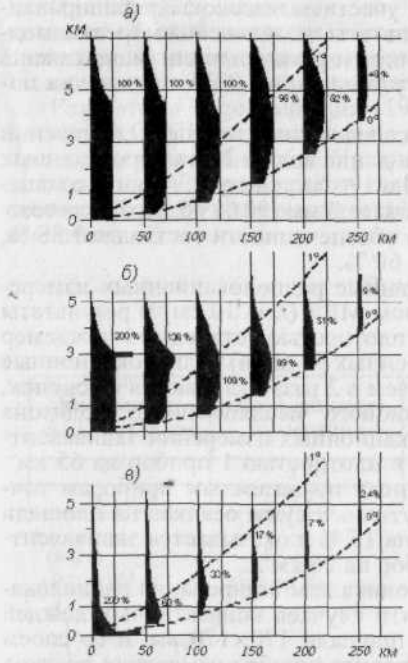

Рис. 4.6.2. Вертикальный профиль на разных удалениях от МРЛ для конвективных (*а*), обложных (*б*) осадков и снега с дождем на нижнем уровне (*в*).

Числа на рисунке означают % интенсивности осадков, измеренных по Z_{max} на вертикальном профиле $Z_x(h)$, по сравнению с наземными [27].

Требования, предъявляемые к информации об осадках при гидрологических прогнозах, изложены в [10]. Согласно [10], точность декадных сумм должна составлять 10 %, пространственное разрешение 500–1000 км^2. По оценкам гидрологов, точность декадных сумм осадков по данным осадкомерной сети составляет 60–70 %. В [9] показано, что осадкомерная сеть с плотностью один прибор на 100 км^2 характеризуется среднеквадратической ошибкой порядка 25 % при измерении среднего слоя осадков за сутки и порядка 12 % при измерении среднего слоя за декаду. Для площади 1000 км^2 ошибка измерения суточного слоя такой сетью составляет только 17 % и уменьшается до 9 % для декадного слоя.

Из рис. 4.6.2 следует, что при $R_{обн}$ > 100 км высота верхней границы радиоэха облаков с осадками становится определяющим фактором не только для их обнаружения, но и для измерения осадков. Таким образом, и площадь осадков, и их удаление от МРЛ существенно влияют на эффективность радиолокационного метода измерений осадков.

Большинство оценок точности радиолокационных измерений осадков до 1990 г. получены по результатам хорошо организованных и успешных

масштабных полевых экспериментов с участием высококвалифицированных исследователей. Однако их результаты в дальнейшем редко подтверждались, когда разработанные методы и рекомендации внедрялись в оперативную практику. Переломить эту тенденцию удалось только в последнее десятилетие XX века.

Из данных экспериментальных исследований точности измерений осадков радиолокационным методом на длине волны 3,2 см, проведенных специалистами ЦАО на Валдае [2, 4, 9] в 1967 г., следует, что для площади 100 км^2 и декадной суммы осадков более 2 мм (90 % общего количества осадков) значения ошибок 75 %-ной обеспеченности составляют 28 %, в то время как для отдельных дождей – 60 %.

В работе [43] (1975) приводятся данные радиолокационных измерений осадков на хорошо откалиброванном МРЛ (λ = 10 см) и результаты сравнения их с данными дождемеров с плотностью установки 1 дождемер на 2,6 км^2. В 80 % случаев (из рассмотренных 93 дней) радиолокационные оценки слоя осадков за сутки не более чем в 2 раза отличаются от оценок, полученных по площади мезомасштабного осадкомерного полигона (примерно 600 км^2). Точность радиолокационных измерений эквивалентна точности измерений наземной сети с плотностью 1 прибор на 65 км^2. При тарировке радиолокационных данных по наземным приборам точность радиолокационных измерений суточных сумм осадков на площади порядка 600 км^2 возрастает в среднем на 15 % и оказывается эквивалентной точности сети с плотностью 1 прибор на 26 км^2.

В работе [17] (1975) проверена методика комбинирования радиолокационных и наземных данных для девяти случаев конвективных дождей продолжительностью от 2 до 11 ч на площади 170×170 км^2 и со слоем осадков от 5,2 до 28,7 мм. При этом средняя ошибка измерения осадков на площади сетью осадкомеров с плотностью 1 прибор на 900 км^2 и 1 прибор на 1600 км^2 составила 21 и 24 % соответственно. Средняя ошибка радиолокационных измерений составила 52 %.

При корректировке данных радиолокационных измерений с помощью одного среднего для всей площади калибровочного множителя, полученного по данным наземных осадкомеров, средняя ошибка радиолокационной оценки слоя осадков за дождь снизилась до 18 %. При корректировке с помощью поля калибровочных множителей (1 прибор на 900 км^2) средняя ошибка радиолокационных измерений слоя осадков составила 13 %.

В работе [25] проведено сопоставление результатов радиолокационных и осадкомерных измерений осадков для 14 штормовых ситуаций в Оклахоме. На рис. 4.6.3 приведена зависимость отношения *G/R* толщины слоя воды, измеренного 65 осадкомерами и радиолокатором WSR 57 Национальной лаборатории сильных штормов в Оклахоме. Как следует из рис. 4.6.3, среднее значение отношения равно 1,38. В [25] отмечается, что средние дождемерно-радиолокационные оценки осадков более точны, чем только дождемерные на большой площади (29 000 км^2) с низкой плотностью дождемеров (не более 1 дождемера на 700 км^2) и в обложных осадках.

В работе [25] было показано, что точность измерения осадков увеличивается от 24 % при исключительно дождемерных измерениях до 14 % при радиолокационно-дождемерных измерениях в случае плотности сети 1 дождемер на 1600 км^2. Приведенные оценки можно продолжить.

Результаты сопоставления (1995) оперативных наблюдений на комплексе АКСОПРИ в Москве и на дождемерной сети в радиусе 100 км [8] представлены в табл. 4.6.1. Уравнение линейной регрессии между радиолокационным $P_{рл}$ по элементу площади 4×4 км и измеренным на метеостанции $P_{ст}$ суточным количеством осадков (от 06 ч СГВ до 06 ч СГВ) имеет вид

$$P_{рл} = AP_{ст} + B. \qquad (4.6.1)$$

Таблица 4.6.1

Удаление от АКСОПРИ, км	Коэффициент корреляции	Коэффициент регрессии		Число случаев
		A	*B*	
<50	0,78	0,71 ± 0,05	2,23 ± 0,47	135
50–100	0,77	0,47 ± 0,03	2,50 ± 0,5	192

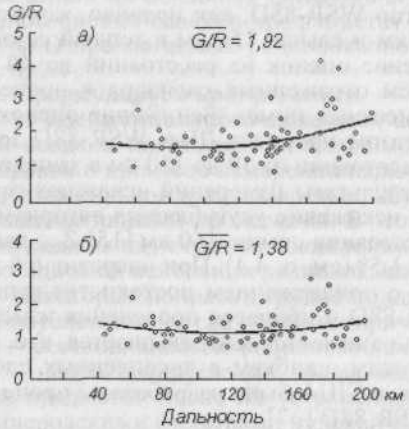

Рис. 4.6.3. Зависимость отношения G/R от дальности для радиолокационных измерений, которые были нескорректированы (а) и скорректированы (б) на ослабление в атмосфере, на ослабление в осадках и на смещение, обусловленное градиентом отражаемости [25].

G/R – отношение толщины слоя осадков за 24 ч, измеренного осадкомером и радиолокатором в точке расположения осадкомера. Относительная дисперсия – выраженное в процентах отношение среднеквадратического отклонения к среднему значению – составила 38 % (*а*) и 92 % (*б*).

В работе [8] авторы делают следующий вывод: количество осадков по автоматизированным радиолокационным данным оказывается систематически ниже, чем по наземным дождемерным. Смещенность радиолокационных данных по отношению к дождемерным объясняется двумя причинами [8]: разными масштабами пространственного осреднения (разнородность) и наличием затухания радиоволн, которое прогрессивно увели-

чивается с расстоянием.

Для любого соотношения Z–I коэффициент корреляции между результатами радиолокационного и наземного методов измерений (если сравнивать полусуточные и суточные слои осадков по данным МРЛ и сети дождемеров) равен 0,68–0,78. Наибольшие расхождения отмечаются при выпадении сильных осадков (I > 30 мм/ч). Здесь возникают две проблемы: во-первых, осадки с интенсивностью I_{max}, которую регистрирует МРЛ, могут не выпасть над плювиографом и, во-вторых, очень сильные и сильные осадки часто сопровождаются градом. Более подробная информация о радиолокационных способах выявления града в зоне осадков представлена в главе 5.

Существуют разные мнения о приемлемой относительной разнице между результатами радиолокационных и дождемерных измерений осадков. Считается, что для точечных измерений она должна быть порядка 30 %, а для водосбора на площади не менее 600 км^2 – 25 % [16].

В докладе по результатам работы оперативной сети NEXRAD в COST-75 [37] отмечается, что алгоритмы (см. п. 4.4) работы системы измерения осадков признаются удовлетворительными, даже несмотря на многочисленные случаи, когда оценки оказываются заниженными. Синоптиков выручает в таких обстоятельствах постоянное использование данных телеметрических дождемеров, которые позволяют получить в реальном времени представление о районах ливней с большими значениями интенсивности осадков. Радиолокатор WSR-88D, как правило, занижает оценки дождя на расстоянии до 40 км и свыше 150 км в теплый сезон и свыше 100 км в холодный. Занижение оценок на расстоянии до 40 км объясняется частичным пропаданием отраженных сигналов в процессе применения фильтров подавления местных помех. Занижение оценок за пределами 150 км является результатом пропуска ДНА WSR-88D зоны осадков из-за кривизны Земли. На расстоянии от 50 до 150 км в зависимости от высоты нулевой изотермы результаты измерений искажают отражения от яркой полосы. Последнее искажение усугубляется алгоритмом оценки осадков на WSR-88D: на расстоянии свыше 150 км [15] Z_{max} измеряется на углах места $\varepsilon = 0{,}5°$ и $\varepsilon = 1{,}5°$ (см. п. 4.4). При оперативной работе не удалось избежать проблем с поддержанием постоянства калибровки измерительных трактов WSR-88D в процессе проведения измерений [37]. В результате отражаемость занижается или завышается, что, естественно, приводит к систематическим ошибкам в накопленных слоях осадков. Для решения этой проблемы в США были разработаны процедуры более тщательной калибровки WSR-88D [37].

Однако наиболее важным в работе [37] является вывод, основанный на опыте десятилетних оперативных радиолокационных измерений осадков, который заключается в признании факта, что «измерение осадков надо считать проблемой многопараметрической оценки, которая должна учитывать структуру наблюдаемых штормов, спутниковые данные, наземные наблюдения, скорость и направление перемещения осадкообразующих систем, их удаление от МРЛ и другие факторы». Создаваемая

для многопараметрической оценки экспертная система поможет выдавать исходные продукты для вероятностных прогнозов, которые, как утверждают в [37], полезней одной радиолокационной информации об осадках. Такие вероятностные прогнозы с использованием результатов многопараметрических измерений осадков обеспечат надежные и относительно краткосрочные прогнозы опасных явлений погоды, связанных с осадками. Краткосрочные прогнозы будут созданы на основании численных моделей, максимально учитывающих местные условия и рассчитываемых в реальном времени в каждом пункте установки NEXRAD.

Анализ достижений радиолокационных измерений осадков на Европейском континенте в рамках COST-75 [33, 38] на первый план выдвинул проблему калибровки и технического обслуживания самого метеорологического радиолокатора.

В процессе выполнения COST-75 было продемонстрировано, что стабильность грамотно эксплуатируемых МРЛ при нормальной работе составляет 0,2 дБZ, что соответствует примерно 3 % погрешности измерения осадков (см. табл. 4.2.1). По утверждению авторов [33], если автоматизированные МРЛ правильно откалиброваны и надлежащим образом эксплуатируются, погрешностями, которые вносит в измерение $Z_э$ аппаратура, можно пренебречь по сравнению с другими известными источниками ошибок радиолокационного метода (см. п. 2.5 и 4.2). В [33] в качестве одной из основных ближайших задач радиолокационной количественной оценки осадков предлагается добиться точности намного меньше 30 %. О предлагаемых радиолокационных методах решения этой задачи см. п. 2.7.

Сформулируем краткие итоги.

1. Изложение многочисленных аспектов радиолокационных измерений осадков показывает необходимость обязательной процедуры ввода поправок в процессе измерений параметров объекта. Сам объект характеризуется сильной изменчивостью, обусловленной быстро развивающимися конвективными процессами. В этой ситуации правильней считать, что речь должна идти о радиолокационной оценке интенсивности и количества осадков на основании радиолокационных измерений их отражаемости.

Некоторые поправки трудно поддаются оценке, и в частности поправки, обусловленные следующими причинами:

– нестабильностью радиолокационной аппаратуры;

– непрогнозируемыми, вновь возникающими отражениями от местных предметов после их устранения «выкалыванием» или подавлением доплеровскими фильтрами нулевой скорости;

– отклонениями условий распространения дециметровых волн от нормальных;

– водяной пленкой на колпаке радиопрозрачного укрытия антенны МРЛ, зависящей от интенсивности осадков;

– осреднением диаграммой направленности антенны МРЛ неоднородностей отражаемости за пределами 100-километровой зоны МРЛ;

– ежедневным учетом особенностей вертикального профиля отражае-

мости в радиусе обзора МРЛ;

– ослаблением радиоволн в сильных осадках.

Борьба разработчиков радиолокационной аппаратуры и авторов практических методов ее применения с возможностью завышения результатов радиолокационных измерений количества осадков привела в целом к обратному результату. Можно надеяться, что постоянное обобщение опыта радиолокационных оперативных измерений осадков в США и Европе и разработка новых радиолокационных методов измерений позволят в ближайшие годы найти более достоверные и убедительные зависимости между Z_e, I и Q с учетом удаления зон измеряемых осадков от МРЛ.

2. Количественные радиолокационные оценки осадков становятся качественным продуктом для потребителя только после калибровки их по дождемерам, размещенным в радиусе обзора МРЛ.

Совмещение радиолокационных и дождемерных данных является бесспорно наилучшим методом измерения осадков, поскольку для заданной территории никому не известна ни истинная сумма осадков, ни точность осадкомерной сети.

3. Совмещение радиолокационных и дождемерных данных экономически выгодней, чем содержание густой осадкомерной сети (плотностью не меньше одного дождемера на 100 км^2).

4. Наличие телеметрических дождемеров и калибровка по ним информации автоматизированных МРЛ в процессе измерений позволяют использовать в оперативной работе прогностических служб радиолокационные оценки осадков за 1 ч, за 3 ч и за дождь. При отсутствии телеметрических дождемеров данные МРЛ об осадках могут быть репрезентативны за сутки и декаду.

ГЛАВА 5

РАДИОЛОКАЦИОННОЕ ШТОРМОПОВЕЩЕНИЕ И КРИТЕРИИ ОПАСНЫХ ЯВЛЕНИЙ ПОГОДЫ

5.1. Введение

Первые низкопотенциальные радиолокаторы, которые поступили радиометеорологам от военных после Второй мировой войны, могли обнаруживать только кучево-дождевые облака с опасными явлениями. Больше десятилетия ушло на их модернизацию и разработку простейших измерительных схем, которые помогли извлекать информацию не только из высоты радиоэха, но и из результатов измерений отраженных от облаков сигналов. Однако возможность наблюдать появление опасных явлений в мезомасштабе, рассчитывать скорость и направление их перемещения и предупреждать о них потребителей надолго (до запуска метеорологических искусственных спутников Земли) позволили МРЛ занять лидирующее положение в штормовом оповещении.

Метеорологический радиолокатор уже шестое десятилетие является незаменимым прибором для обнаружения явлений, которыми сопровождаются кучево-дождевые облака, – гроза, град, ливни и ливневый снег («снежные заряды»), а также связанных с ними шквалов, смерчей и сдвигов ветра. Для их распознавания по радиолокационным характеристикам Cb не требуется такой точности измерения отраженных сигналов, как при измерении осадков, поскольку опасные явления возникают при достижении Cb определенной стадии развития и существуют длительное время. Наиболее мощные конвективные облака, которые дают интенсивные осадки (более 5 мм/ч), сопровождаются опасными явлениями, без своевременной информации о которых трудно обеспечить безопасность полетов воздушного транспорта, а в определенных ситуациях и безопасность населения, а также функционирование коммунальных служб и организаций, производственная деятельность которых зависит от погодных условий.

К настоящему времени можно выделить девять видов опасных явлений, при наблюдении, обнаружении и распознавании которых использование МРЛ наиболее полезно:

1) шквал (скорость ветра при порывах >25 м/с),
2) смерч (торнадо),
3) сильный ливень (30 мм/ч),
4) сильный дождь (50 мм за 12 ч),

5) продолжительные дожди (100 мм за двое или трое суток),
6) крупный град (диаметр градин 20 мм и более),
7) сильный снегопад (20 мм и более за 12 ч),
8) наводнения,
9) тропические циклоны.

По крайней мере шесть опасных явлений из этого списка связаны с грозами. В научной периодике США наиболее опасными считаются грозы, сопровождающиеся градом (диаметром более 1,9 см), штормовым ветром (≥25 м/с) и смерчами (торнадо) [3].

Грозы, существенно осложняющие полеты (продолжающиеся над пунктом более часа и сопровождающиеся порывами ветра более 8 м/с и выпадением осадков более 5 мм), возможны лишь при температуре на уровне верхней границы конвективного облака ниже –27 °С, мощности облака более 480 гПа и максимальной скорости конвективного потока более 10 м/с [4].

Метеорологические некогерентные радиолокаторы определяют опасные явления по косвенным признакам – измерениям высоты радиоэха и отражаемости Cb – и принимают решение с помощью радиолокационных критериев опасности. При неавтоматизированных наблюдениях на МРЛ возникала проблема субъективности операторов МРЛ, которые завышали степень опасности явлений. Автоматизация процессов наблюдений позволила устранить этот недостаток.

Потребителю информация МРЛ поступает в терминах «град», «гроза», «ливень», которые ему понятны и степень опасности которых он хорошо представляет.

Тем не менее нельзя признать радиолокационную информацию об опасных явлениях адекватной общепринятой метеорологической. По результатам применения радиолокационных критериев можно говорить не о граде, а о градоопасном Cb и грозовом облаке с градом, не о грозе, а о грозоопасном облаке и ливневом дожде с грозой, не о ливне, а о негрозоопасном конвективном облаке и негрозовом ливне.

Сопоставление радиолокационной информации об опасных явлениях с данными наземных наблюдений позволило установить степень соответствия радиолокационной классификации, принятой в метеорологии, и оценить ее оправдываемость.

Обширный класс опасных для авиации метеоявлений может быть выявлен на основе прямых измерений радиальной скорости на доплеровском МРЛ. К таким явлениям, в первую очередь, относятся смерч и сдвиг ветра (фронт порывистости и микрошквал) вблизи поверхности Земли, который может создавать значительную опасность при взлете и посадке самолета.

Использование доплеровских характеристик отраженного сигнала позволяет определять зоны турбулентности в Cb, а также зоны восходящих и нисходящих потоков. С применением поляризационных МРЛ появилась возможность не только надежно выделять градовые Cb, но и определять в них положение зоны градовых частиц.

5.2. Критерии грозоопасности

Пороговые критерии. В процессе развития Cu cong и их перехода в Cb вершины достигают высоты изотермы –22 °С – уровня массовой кристаллизации капель. При превышении этого уровня кучево-дождевое облако может стать грозоопасным и грозовым. В Cb создаются условия для разделения зарядов и их нейтрализации разрядом – молнией. Высота изотермы –22 °С $H_{-22°C}$, так же как и высота нулевой изотермы, зависит от атмосферных условий в районе наблюдений и может изменяться в широких пределах (см. табл. 3.2.4 и 3.2.5) [1, 4]. Только в 7,4 % случаев в наблюдаемых грозах максимальная высота верхней границы их радиоэха $H_{max} < H_{-22°C}$, среднее же значение разности $H_{max} - H_{-22°C} = 2{,}9$ км [4]. Общепринято [1, 4, 10], что высота грозы является доминирующим фактором, определяющим ее электрическую активность.

В соответствии с высотой (H) верхней границы радиоэха грозы считаются слабыми ($H < 7$ км), сильными ($H \geq 10$ км) и разрушительными ($H \geq 15...16$ км). Однако при быстро меняющихся внешних и внутренних условиях развития кучево-дождевого облака пользоваться только критерием, определяемым высотой, не следует из-за высокого уровня ложных тревог и превращения негрозоопасных Cb в грозовые.

Более надежным представляется применение пороговых критериев, связывающих тем или иным образом высоту радиоэха Cb и его отражаемость Z (максимальную во всем объеме облака или в одном из его характерных слоев). Пороговый критерий $Y = H \lg Z_3$, где H – максимальная высота радиоэха Cb (км), а $\lg Z_3 = 0{,}1\,(Z_{э3} - 18)$ – значение отражаемости в слое на 2–2,5 км выше уровня нулевой изотермы $H_{0°C}$, был предложен Е.М. Сальманом и его сотрудниками в 1965 г. [4, 6] для сети МРЛ штормоповещения Гидрометслужбы. При $Y > 15$ 90 % кучево-дождевых облаков относятся к грозовым по данным наземных визуальных наблюдений. В этой формуле величина $\lg Z_3$ имеет характер масштабной поправки, которая оценивает вклад отражаемости в слое 4–6 км в оценку грозоопасности Cb.

В 1978 г. Маршалл и Радхакант [28] предложили пороговый критерий гроз: 35 дБZ в слое на высоте 6 км. При высоте грозы $H = 9$ км $Y = 15{,}3$ км.

Статистические критерии. Дальнейшее усовершенствование критерия Y заключается в учете данных аэрологического зондирования в пункте установки МРЛ и привлечении к обработке данных и принятию решения о степени опасности Cb техники квадратичного дискриминантного анализа на статистических главных компонентах [2, 4, 5]. Для построения единой дискриминантной функции были использованы характеристики 8673 грозовых и 2333 ливневых радиоэха и данные о высоте изотерм –22 °С в синхронные с радиолокационными наблюдениями сроки. Суммарная ошибка распознавания гроз и ливней при использовании дискриминантной функции не превышает 12,6 % при минимальном числе нераспознанных гроз 3,9 %. Подчеркнем, что решения принимаются с

$Y = H \lg Z_3 > 15$ км 90% Cb is gros

учетом результатов аэрологического зондирования в пункте, расположенном не далее 100 км от МРЛ. За базу для сравнения приняты синхронные наблюдения за грозой на наземных метеостанциях.

Практический опыт использования техники квадратичного дискриминантного анализа, в частности необходимость учета зоны неопределенности, или, точнее, ширины доверительного интервала вокруг дискриминирующей поверхности ($U = 0$) (рис. 5.2.1), позволил более точно определить правила распознавания. Они приведены на рис. 5.2.2.

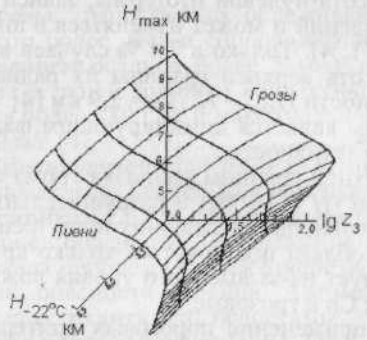

Рис. 5.2.1. Квадратичная дискриминантная функция $U(H_{max}, \lg Z_3, H_{-22°C}) = 0$ [4].

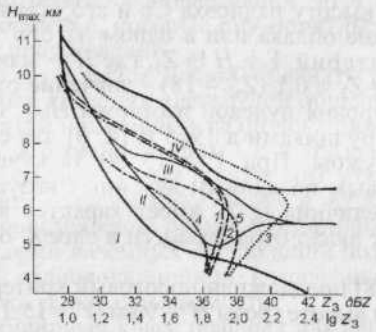

Рис. 5.2.2. Соотношение повторяемости гроз и ливней в пространстве параметров H_{max}, $\lg Z_3$ по зонам *I–V* (сплошные линии – границы зон) и зависимость квадратичной дискриминантной функции U (H_{max}, $\lg Z_3$, $H_{-22°C}$) единой обучающей выборки от $H_{-22°C}$ [4].

1) $H_{-22°C}$ = 6,6 км; 2) 6 км; 3) 5 км; 4) 5,2 км; 5) 5,5 км.

Зона	*I*	*II*	*III*	*IV*	*V*
$Y = H \lg Z_3$	9	9–10	10–12	12–13	>13
Ливни, %	90	70	50	30	10
Грозы, %	10	30	50	70	90

Все грозы с $Y \geq 13...15$ и $H_{-22°C} \geq 5{,}5$ км обозначаются для потребителей значком К – гроза (вероятность распознавания не менее 90 %), все радиоэхо конвективной облачности с $Y \leq 7$–9 соответствуют ливням (∇). В

зонах *II–IV* можно применять комбинированный метод распознавания. В зоне между $Y > 9$ и $U = 0$ определяются грозы (К) (вероятность меньше 70 %), в зоне между $U = 0$ и $Y < 13$ – также грозы – К) (вероятность 70–80 %, кривые *1* и *2*). Для слабых гроз при $U = 0$ и $H_{-22°C} \leq 5{,}5$ км (кривые *4* и *5*) правила решения изменяются: при $Y < H_{-22°C} \lg Z_{3min}$ определяются ливни ∇; между Y и $U = 0$ – грозы (К) от $U = 0$ до $Y < 13...15$ – грозы К); при $Y >$ 13…15 – грозы К. Под слабыми грозами понимаются грозы с невысокой электрической активностью.

5.3. Вертикально проинтегрированная водность (VIL) и критерии опасности Cb

В США Грин и Кларк [26] предложили новый инструмент для определения районов, занятых опасными конвективными явлениями, – вертикально проинтегрированную водность (vertically integrated liquid water content, или сокращенно VIL). Как показал Элвандер (1975) и Дональдсон (1975) [23], VIL – один из лучших индикаторов сильных гроз, который можно выявить обычным МРЛ. Этот вывод подтвержден и десятилетним опытом использования критерия VIL в оперативной работе NEXRAD [37].

VIL измеряется в кг/м^2, обозначается буквой M^* и рассчитывается по формуле

$$M^* = 3{,}44 \cdot 10^{-6} \sum_{i=1}^{\infty} \left[(Z_i + Z_{i+1})/2 \right]^{4/7} \Delta h, \qquad (5.3.1)$$

где Z_i – отражаемость на i-м уровне штормоопасного облака, Δh – разница высот между i-м и $(i + 1)$-м уровнями Cb. Таким образом, M^* оценивает массу жидкой воды на единицу площади в столбе по всей вертикальной протяженности Cb по данным о фактическом изменении отражаемости. Вычисления M^* прекращаются, когда $Z_{i+1} = 0$. Обычно $\Delta h = 1$ км.

Для точного расчета VIL, видимо, необходимо производить измерения интенсивности отраженных сигналов не более чем через 2 км; предполагается, что самый высокий уровень Z составляет 61,5 дБZ. Операция расчета VIL, как нетрудно заметить из формулы, легко автоматизируется.

Изучение в США объективных связей между опасными явлениями погоды и численными параметрами отражаемости привели к разработке статистических уравнений регрессии, связывающих вероятность опасных явлений погоды (severe weather probability – SWP) для грозовых Cb и VIL [36]:

$$SWP = 0{,}07 + 25{,}49\,(SVG\,20) + 0{,}75\,(VSIZE) - 12{,}64\,(SVG\,15) + 0{,}04\,(VWGT) - 8{,}78\,(SVG\,25). \quad (5.3.2)$$

Обозначения VSIZE, SVG15, SVG20 и SVG25 относятся к областям ячейки, в которых значение параметров VIL превышает 2, 15, 20 и 25 кг/м^2 соответственно, а VWGT относится к максимальному значению VIL в ячейке.

Площадь ячейки, соответствующая каждому из этих предикторов, определяется подсчетом числа квадратов размером 4×4 морские мили, в которых значение VIL превышает пороговое для данного предиктора. Специалисты США на основании использования критериев SWP и VIL сделали вывод, что их применение привело к снижению тенденции преувеличения опасности, которая свойственна всем субъективным методам предупреждения. Это, безусловно, очень важно, поскольку стоимость мероприятий по спасению при ложной тревоге часто соизмерима с ущербом, причиняемым самим опасным явлением. В [37] отмечается, что VIL является одним из самых важных критериев в NEXRAD.

Кроме SWP и VIL в NEXRAD используются критерии, основанные на выявленных особенностях физических процессов в градовых Cb. В частности, выделение области слабого радиоэха в сочетании с экстремальными для конкретного наблюдения значениями высоты радиоэха Cb (см. рис. 1.1.3).

К дополнительным признакам потенциальной опасности можно отнести наличие повышенной дивергенции радиальных скоростей вблизи вершины Cb [7, 42] при доплеровских измерениях.

5.4. Радиолокационные критерии града

Существует несколько методов обнаружения града в облаках [10, 12].

1. *Вероятностный метод.* Установлено, что обычно град выпадает из облаков с высотой верхней границы более 8–10 км, температура верхней кромки радиоэха которых составляет от –2° до –30 °С, с большой радиолокационной отражаемостью, большой высотой зон повышенной отражаемости и т.д. При увеличении указанных параметров возрастает и вероятность града. Только измерение всего набора радиолокационных характеристик повышает вероятность обнаружения града.

При использовании вероятностного метода обнаружения градовых облаков на основе определения трех облачных параметров – максимальной радиолокационной отражаемости, температуры верхней кромки радиоэха и температуры верхней кромки зоны повышенной отражаемости – вероятность града рассчитывается по следующему выражению:

$$P_г = \frac{1}{1 + \prod_{i=1}^{n} \frac{\rho_н(\xi_i)}{\rho_г(\xi_i)}}, \quad (5.4.1)$$

где $\rho_н(\xi_i)$ и $\rho_г(\xi_i)$ – условные плотности распределения параметра ξ_i в неградовом и градовом облаках соответственно, n – число параметров.

Если вероятность больше 0,5, то облако считается градовым. Надежность этого метода составляет примерно 95–98 %.

С развитием градового облака вероятность града увеличивается до единицы, а затем, с распадом облака, уменьшается. Момент перехода кучево-дождевого облака в градовое определяется моментом перехода верхней кромки зоны повышенной отражаемости через высоту уровня изотермы –10, –15 °С.

2. *Двухволновый метод.* При увеличении размеров гидрометеоров отражаемость Z увеличивается таким образом, что соотношение отражаемостей Z на двух разных длинах волн (например, 3,2 и 10 см) постоянно и равняется примерно 100 для мелких частиц, а при появлении крупных частиц града резко уменьшается в 10–100 раз [12]:

для осадков

$$\frac{\eta_{3,2}}{\eta_{10,0}} = \frac{\lambda_{10}^4}{\lambda_{3,2}^4} \approx 100,$$

для града при $D_3 = 1{,}5$ см

$$\frac{\eta_{3,2}}{\eta_{10}} = \frac{6{,}7 \cdot 10^{-7}\, ND_3^{2,1}}{3{,}8 \cdot 10^{-8}\, ND_3^{5,4}} \approx 5...10,$$

где D_3 – средний кубический диаметр спектра градин; при гамма-распределении $D_{max} = 2\,D_3$.

Величина этого соотношения не зависит от интенсивности осадков и может использоваться как индикатор града. Двухволновые методы обнаружения града в облаках базируются на упомянутых различиях частотной зависимости рассеяния радиоволн гидрометеорами разных размеров. К основным требованиям при использовании такого метода относятся одинаковый размер ширины ДНА МРЛ и пространственное совпадение зондирующих импульсов, что реализовано в одном из режимов работы МРЛ-5. Для практического применения метода требуется измерение мощности радиоэха, а значит, и точная калибровка радиолокатора. Абсолютную калибровку можно заменить относительной калибровкой по дождю, так как разница между отражаемостями на ближней к МРЛ кромке дождя прак-

тически постоянна и не зависит от его интенсивности, резко уменьшаясь только при появлении града.

Обнаружение градовых ячеек, основанное на разнице отраженных сигналов на индикаторах, производится с помощью устройства, извлекающего сигнал одного канала из сигнала другого канала на выходе логарифмических усилителей, имеющих одинаковые характеристики. На индикаторах ИКО и ИДВ град выглядит темным на фоне одинаковой яркости дождящей части облака.

Разностный метод позволяет при непрерывном сканировании отделять метеоцели от местников, обнаруживать градовые облака и видеть распределение градовых ячеек, а также устанавливать районы градобитий.

3. *Однозначный критерий.* Критерий града, основанный на измерениях высоты и отражаемости «ядра» радиоэха конвективных облаков, описан в работе [41]. Град на земле регистрируется тогда, когда отражаемость нижней части «ядра» составляет $Z_э \geq 46$ дБZ (см. рис. 3.1.1), а высота верхней кромки его $H_{гр}$ превышает уровень нулевой изотермы на 1,4 км:

$$H_{гр} > H_{0°C} + 1{,}4 \text{ км при } Z_э \geq 46 \text{ дБZ}. \qquad (5.4.2)$$

Однозначным критерием града, не зависящим от высоты кучево-дождевого облака, служит наличие «ядер» отражаемости $Z_э > 58$ дБZ.

При автоматизированных наблюдениях может быть использован кибернетический метод распознавания опасных явлений, основанный на теории идентификации изображений [14, 15]. Метеообъекты будут представлены физически обоснованным комплексом параметров радиолокационного сигнала, образующих набор характеристик. Это позволит синтезировать систему иерархической классификации более высокого качества, оперативно более надежную, чем ее подсистема. Иерархия этой системы определяется таким образом, что на первом уровне принимаются элементарные решения о характере Cb, а на втором уровне эти решения взвешиваются и синтезируется правило комплексного решения, основанное на принципах голосования.

Аналогичный подход с выбором комплексных параметров можно найти в ряде публикаций, связанных с принципами идентификации опасных явлений в системе NEXRAD [24, 25, 34, 43, 44].

5.5. Критерии опасных явлений для доплеровских МРЛ

5.5.1. Физическое обоснование критериев

Общие положения. Опасные для авиации метеорологические явления могут быть обнаружены с помощью доплеровских метеорологических РЛС. В первую очередь, это явления, связанные со сдвигом ветра

вблизи поверхности Земли, которые могут создавать значительную опасность при взлете и посадке самолета. Наиболее опасными из них являются фронт порывистости (gust front) и микрошквал (microburst) (см. рис. 1.1.4 и табл. 1.1.2). Эти явления могут быть идентифицированы по особенностям пространственного распределения радиальных доплеровских скоростей на одном-двух азимутальных разрезах, выполненных при малых углах места [7, 9].

Фронт порывистости. Фронт порывистости представляет собой передний фронт холодного воздуха из грозового облака (см. рис. 1.1.4). Фронт порывистости, как правило, имеет форму тонкой длинной линии и может существовать довольно продолжительное время. Алгоритм и критерии автоматизированного распознавания фронта порывистости разрабатывались в работах [22, 28, 38, 40]. Основная идея алгоритма состоит в поиске линий радиальной конвергенции в поле доплеровских скоростей. Метод предусматривает анализ двух азимутальных разрезов при углах места 0,5 и 1,0°. При этом вдоль каждого радиального луча осуществляется поиск сегментов, где радиальный градиент доплеровской скорости превышает пороговое значение 4 м/с на 1 км, а изменение доплеровской скорости на базе 4 км превышает 10 м/с. При сопоставлении таких сегментов на соседних лучах ряд сегментов может быть объединен в некоторую фигуру или область при условии, что по азимуту сегменты разнесены не более чем на 2,2°, а по дальности – не более чем на 2 км. Если в такую область попадает не менее пяти сегментов, ее геометрический размер превышает 5 км и эта область идентифицируется на обоих углах места, то делается вывод о присутствии в ней фронта порывистости. Алгоритм был подвергнут испытаниям в зоне аэропорта г. Денвера, Колорадо, в 1988 г. Испытания дали следующие результаты: вероятность обнаружения фронтов порывистости составила 78 %, вероятность ложной тревоги – 2,4 %. При этом вероятность правильного прогноза за 10 мин равнялась 95 %, а за 20 мин – 85 % [28].

Микрошквал. В отличие от фронта порывистости микрошквал представляет собой локальное непродолжительное явление, также связанное с растеканием локального нисходящего потока из области конвективного облака (см. табл. 1.1.2).

При реализации алгоритма и критериев автоматизированного распознавания микрошквалов осуществляется поиск области повышенной дивергенции в поле доплеровских скоростей на азимутальном разрезе при минимальном угле места (обычно 0,5°). Согласно простейшей версии алгоритма вывод о существовании микрошквала делается при наличии разности радиальных скоростей, превышающих 10 м/с, на базе 4 км и при условии, что данный порог превышается на двух последовательных обзорах. В более совершенной версии алгоритма анализируется не только разность доплеровских скоростей вблизи поверхности Земли, но и особенности структуры облака на более высоких уровнях: наличие конвергенции вращения, а также опускание ядра отражаемости Z_{max} могут служить дополнительными признаками, повышающими эффективность

распознавания микрошквала. (Зоны конвергенции – области сходимости потоков воздуха.) Микрошквал обнаруживается по наличию характерных изодоп в небольшом пространстве (2–5 км). Испытания алгоритма распознавания микрошквалов [27] дали также хороший результат. Сравнение результатов автоматизированного распознавания микрошквалов с соответствующими данными, полученными обученными операторами-радиометеорологами, данными анемометрической системы определения сдвига ветра LLWSAS (low level wind shear alert system) и данными наземной сети метеодатчиков показало, что вероятность правильного обнаружения составляет 90 % и вероятность ложной тревоги – 5 % [20].

Турбулентность. Другим источником опасности для самолетовождения не только при взлете и посадке самолета, но и при полете на эшелоне на больших высотах является повышенная турбулентность. В работах [16, 21] анализируется метод оценки турбулентности по ширине доплеровского спектра скоростей отраженного сигнала при вычитании вклада градиента среднего ветра в пределах импульсного объема. Метод также дает неплохие результаты при сравнении с данными о перегрузках и вертикальных порывах скорости на самолетах. Аналогичный подход к решению данной проблемы, предусматривающий оценку ширины спектра огибающей отраженного сигнала применительно к некогерентным МРЛС, предложен в [8].

Смерч (торнадо). Алгоритмы автоматического обнаружения торнадо и мезоциклона на основе анализа поля доплеровских скоростей, разработанные в NSSL в середине 1990-х г., вошли как составная часть в программное обеспечение доплеровского радиолокатора WSR-88D [9, 25].

Если размеры горизонтального сечения вихря превышают размеры рассеивающего объема МРЛ, то при наблюдении смерча одиночным доплеровским МРЛ в азимутальном разрезе в сечении, перпендикулярном оси вихря, идентифицируются две близко расположенные области с очень большими значениями положительной и отрицательной доплеровской скорости. Если размеры рассеивающего объема МРЛ превышают размеры вихря, то наличие смерча проявляется либо в ярко выраженной двухмодальности доплеровского спектра, либо в очень большой ширине спектра радиолокационного сигнала [7].

Как правило, размер смерча меньше размера радиолокационного объема и отражаемость области смерча сравнительно невелика. Поэтому непосредственное обнаружение самого смерча затруднительно даже с помощью доплеровского МРЛ. Однако есть возможность идентифицировать предшествующую смерчу в Cb область мезоциклона с повышенной скоростью циркуляции воздуха, размеры которой превышают размеры смерча и составляют по данным американских исследователей 2–15 км (рис. 5.5.1) [18].

Вращение в облаках успешно распознается после азимутального сканирования и вычитания из полученного поля скоростей средней доплеровской скорости. При наличии вращения результирующая карта доплеровских скоростей представляет собой картину, в одной части которой скорости положительны, а в другой – отрицательны.

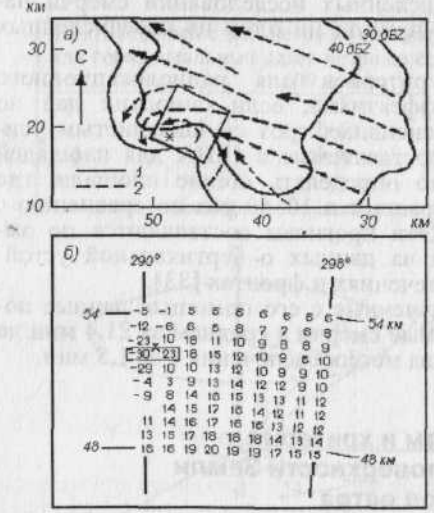

Рис. 5.5.1. Пример использования доплеровского радиолокатора для обнаружения смерча (торнадо) в США [18].
а – распределение радиолокационной отражаемости Z, (дБZ) в грозе (*1*) и воздушные течения на нижнем уровне (*2*) по данным доплеровских измерений; *б* – развертка сектора (показанного на рис. *а*), на которой представлено распределение значений средней доплеровской скорости (м/с) в направлении на МРЛ и от него внутри ячейки с пространственным разрешением 600 м.

Следует отметить, что ни ширина спектра, ни сдвиг ветра не могут по отдельности быть надежными признаками смерча, так как для турбулентных зон в Cb также характерна большая ширина спектра отраженных сигналов. Наличие же характерных признаков мезоциклона с крюкообразным радиоэхом является наиболее надежным признаком при распознавании смерча на доплеровском МРЛ.

Как показывает практика распознавания смерчей (торнадо) на обычных некогерентных МРЛ [11], смерчи можно обнаружить в сравнительно редких случаях, когда радиоэхо Cb сопровождается характерным крюкообразным отростком, а нижняя граница ДНА МРЛ находится ниже уровня 1–2 км, т.е. до расстояний 90–120 км. Для идентификации РКО, сопровождаемого смерчем, на некогерентных МРЛ используются следующие признаки:

– наличие циклонического вращения РКО или одной из его частей;

– наличие в РКО крюка, горизонтальные размеры которого могут составлять до 16 км, высота – 10,7–12,2 км, а время существования – от нескольких минут до часа;

– наличие РКО, высота которого на 3 км и более превышает высоту тропопаузы и максимальная отражаемость которого $Z_э$ составляет 53–58 дБZ;

– слияние радиэха Cb с грозами при скорости перемещения, превышающей 65 км/ч, – смерч при этом образуется в U-образной впадине радиоэха.

Однако по результатам многочисленных исследований смерчи наблюдались и в тех Cb, которым не присущ ни один из перечисленных признаков.

Применение перечисленных критериев для радиолокационного обнаружения смерчей наиболее эффективно, если синоптик дал по территории прогноз появления интенсивных гроз со шквалистым усилением ветра. Прогнозы смерчей, составляемые в США для площадей 200×400 км, позволяют эффективно определять общие площади, где вероятность появления смерчей возрастает в 10–50 раз по сравнению с климатологической вероятностью. Эти прогнозы составляются по эмпирическим правилам, основанным на данных о вертикальной устойчивости, поле влажности, струйных течениях и фронтах [33].

Во время испытаний ДМРЛ полученные с его помощью данные позволили предсказывать разрушительные смерчи в среднем за 21,4 мин до их возникновения, а обычные средства метеообеспечения – за 1,5 мин.

5.5.2. Алгоритм и критерии сильного ветра у поверхности Земли и сдвигов ветра

Сильный ветер у поверхности Земли представляет значительную опасность при взлете и посадке самолетов. Он распознается по большому значению средней радиальной доплеровской скорости, измеренной при малых углах места антенны. По рекомендациям ВМО, порогом опасного ветра является значение 12 м/с, поэтому если при измерении радиальной скорости в приземном слое (на низких углах места) было получено значение более 12 м/с, то выдается предупреждение об опасности. Опасные скорости ветра и их градиенты обнаруживаются в радиусе 100 км с вероятностью 95 % [37].

Очень опасным фактором для авиации является сдвиг ветра. Классификация ИКАО сдвига ветра приведена в табл. 5.5.1.

На рис. 5.5.2 и 5.5.3 показаны геометрические соотношения для расчета сдвигов ветра при наличии карты радиальных доплеровских скоростей и ширины спектра в горизонтальных сечениях, которые являются исходными для дальнейших расчетов [7, 9].

Таблица 5.5.1

Градации сдвига ветра по классификации ИКАО

Вертикальный сдвиг ветра на единицу измерения 30 м. или горизонтальный сдвиг ветра на единицу измерения 600 м, м/с	Характеристика сдвига ветра
0–2	Слабый
2–4	Умеренный
4–6	Сильный
> 6	Очень сильный (опасный)

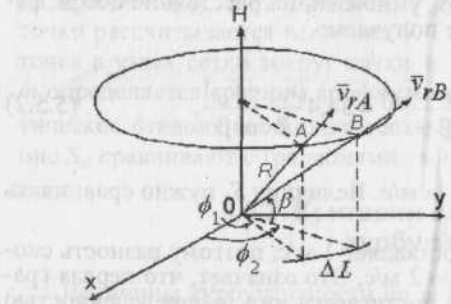

Рис. 5.5.2. Геометрические соотношения для расчета горизонтального сдвига ветра.

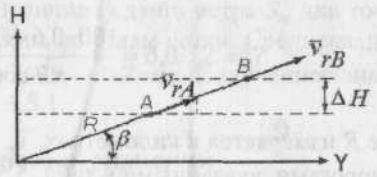

Рис. 5.5.3. Геометрические соотношения для расчета вертикального сдвига ветра.

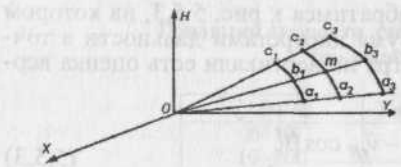

Рис. 5.5.4. Геометрические соотношения для расчета общего сдвига ветра.

Для расчета горизонтального сдвига ветра обратимся к рис. 5.5.2, из которого найдем разность радиальных скоростей ветра для двух соседних положений луча *OA* и *OB*. В дискрете дальности на луче *OA* на расстоянии *R* от радиолокатора измеряется скорость $\bar{v}_{rA}$, на луче *OB* на том же расстоянии – скорость $\bar{v}_{rB}$. Длина дуги между точками измерения равна R cos β (β – угол наклона антенны), и ее можно принять равной расстоянию между точками *A* и *B* в силу малости разности азимутов соседних лучей φ_1 и φ_2. Разность скоростей равна $\bar{v}_{rA} - \bar{v}_{rB}$ и включает в себя разность не только горизонтальных, но и вертикальных скоростей в этих

точках. Для определения совокупной опасности не следует выделять чистый вклад горизонтального градиента. Поэтому за оценку горизонтального градиента принимаем величину $S_г$:

$$S_г = \frac{|\Delta \bar{v}_r|}{\Delta L} = \frac{|\bar{v}_{rA} - \bar{v}_{rB}|}{R\cos|\varphi_1 - \varphi_2|}, \qquad (5.5.1)$$

где R – расстояние до дискретов дальности в точках A и B. Для соседних положений луча антенны $|\varphi_1 - \varphi_2| = 1° = \pi/180$ рад.

Чтобы сравнить полученное значение $S_г$ с порогами для сдвигов ветра, указанных в табл. 5.5.1, нужно $S_г$ умножить на расстояние 600 м, рекомендованное ИКАО. В результате получаем:

$$S_1 = S_г \cdot 0{,}6 = \frac{180 \cdot 0{,}6 \cdot |\bar{v}_{rA} - \bar{v}_{rB}|}{\pi R \cos\beta} = 34{,}4\frac{|\bar{v}_{rA} - \bar{v}_{rB}|}{R\cos\beta}, \qquad (5.5.2)$$

где R измеряется в километрах, $\bar{v}_r$ – в м/с. Величину S_1 нужно сравнивать с порогами, указанными в табл. 5.5.1.

Точность измерения скорости составляет 1 м/с, поэтому разность скоростей ветра измеряется с точностью 2 м/с. Это означает, что первая градация сдвига ветра (см. табл. 5.5.1) достигается уже неопределенностью измерений. Поэтому для получения более надежной оценки необходимо усреднение величины по числу измерений.

Для расчета вертикального сдвига обратимся к рис. 5.5.3, на котором изображен радиолокационный луч с двумя дискретами дальности в точках A и B. Разность горизонтального ветра по вертикали есть оценка вертикального сдвига ветра $S_в$:

$$S_в = \frac{|\bar{v}_{rA}\cos\beta - \bar{v}_{rB}\cos\beta|}{\Delta H}, \qquad (5.5.3)$$

где ΔH – разность высот между точками A и B: $\Delta H = \Delta L \sin\beta$, ΔL – расстояние между A и B по лучу радиолокатора. Чтобы сравнить вычисленное значение с табличными, ее нужно умножить на расстояние 30 м, рекомендованное ИКАО. Следовательно,

$$S_2 = S_в \cdot 0{,}03 = \frac{|\bar{v}_{rA} - \bar{v}_{rB}| \cdot 0{,}03\,\mathrm{ctg}\,\beta}{\Delta L}. \qquad (5.5.4)$$

Величина S_1 описывает горизонтальный сдвиг, величина S_2 – вертикальный. Максимальная из этих двух величин и принимается за величину

сдвига ветра S:

$$S = \max\{S_1, S_2\}. \qquad (5.5.5)$$

Эта величина S должна сравниваться с градациями табл. 5.5.1. Однако, поскольку погрешность измерения S_1 и S_2 составляет 2 м/с, то нужно провести усреднение величины S по дискретам дальности.

На рис. 5.5.4 приведена схема расчета сдвига ветра для точки m. Рассчитываются S_1 и S_2 на трех соседних лучах с центральным, проходящим через точку m. Вычисляются горизонтальные сдвиги ветра для дуг a_1b_1, b_1c_1, a_2m, mc_2, a_3b_3, b_3c_3 (шесть величин) и вертикальные сдвиги ветра на интервалах a_1a_2, a_2a_3, b_1m, mb_3, c_1c_2, c_2c_3 (шесть величин). Для каждой точки рассчитывается величина S. Таких значений будет девять по числу точек в узлах сетки вокруг точки m. Величина сдвига ветра S_m для точки m определяется средним арифметическим по узлам сетки. Среднеквадратическое отклонение оценки составит $2/\sqrt{9} = 0{,}7$ м/с. Полученное значение S_m сравнивают с градациями табл. 5.5.1.

5.5.3. Критерии опасных значений турбулентности

Величины турбулентности по воздействию на самолет по рекомендации ИКАО разделяются на четыре группы [7, 9, 29]:

Таблица 5.5.2

Градации скорости диссипации турбулентной энергии (по рекомендации ИКАО)

ξ см^2/с	Характеристика турбулентности
0–10	Слабая
10–100	Умеренная
100–400	Сильная
> 400	Очень сильная (опасная)

Скорость диссипации турбулентной энергии ξ рассчитывается на основе турбулентного вклада $\sigma_Т$ в ширину спектра скоростей рассеивателей σ_v. Как известно [7],

$$\sigma_v^2 = \sigma_г^2 + \sigma_{св}^2 + \sigma_т^2 + \sigma_{шл}^2, \qquad (5.5.6)$$

где члены в правой части описывают вклад, обусловленный гравитационным падением частиц ($\sigma_г$), сдвигом ветра ($\sigma_{св}$), турбулентностью ($\sigma_т$) и эффектом ширины луча ($\sigma_{шл}$) соответственно. Последним слагаемым

можно пренебречь. Величина $\sigma_г$ вычисляется по значению отражаемости Z:

$$\sigma_г^2 = 0{,}045 Z^{0{,}16} \sin^2 \beta. \qquad (5.5.7)$$

Величина сдвига ветра обусловлена вертикальным и горизонтальным сдвигами ветра:

$$\sigma_{СВ}^2 = \left(S_г^2 + S_в^2\right)/12, \qquad (5.5.8)$$

Таким образом,

$$\sigma_Т^2 = \sigma_v^2 - \sigma_г^2 - \left(S_г^2 + S_в^2\right)/12. \qquad (5.5.9)$$

Величина σ_v измеряется в данном дискрете дальности, а величины $\sigma_г$, $S_г$ и $S_в$ рассчитываются по формулам (5.5.1), (5.5.3) и (5.5.7).

Переход от полученных значений $\sigma_Т$ к величинам ξ производится по формулам:

$$\xi = \begin{cases} \dfrac{1{,}3\sigma_Т^3}{a(1-\gamma/15)^{2/3}} & \text{при } a > b \quad \left(\gamma = 1 - \dfrac{b^2}{a^2}\right), \\ \dfrac{1{,}3\sigma_Т^3}{b(1-\lambda/15)^{2/3}} & \text{при } a < b \quad \left(\gamma = 1 - \dfrac{a^2}{b^2}\right), \end{cases} \qquad (5.5.10)$$

где a и b – размеры импульсного объема в данном отрезке дальности: $a = R\,\Omega$, $b = c\tau/2$; R – расстояние до отрезка дальности, Ω – телесный угол диаграммы антенны, c – скорость света, τ – длительность зондирующего импульса.

Полученные значения ξ сравниваются с градациями табл. 5.5.2, и, таким образом, определяется, насколько опасна турбулентность.

5.5.4. Алгоритм расчета вертикального профиля скорости ветра

В обложных осадках можно получить вертикальный профиль скорости ветра (значение и направление) с помощью метода конического сечения, реализуемого одним доплеровским радиолокатором. В зарубежной литературе метод получил название VAD (*velocity–azimuth–display*) [7, 9].

Метод позволяет получить вертикальный профиль горизонтального ветра и горизонтальную дивергенцию. Идея метода состоит в том, что в

предположении неизменности скорости и направления ветра (или линейного изменения составляющих ветра) в любом горизонтальном сечении, охваченными образующими наклонного конического сечения, зависимость радиальной скорости от азимута будет описываться синусоидой, параметры которой связаны с модулем и направлением ветра.

При ряде очень строгих допущений вычисляются горизонтальные составляющие скорости ветра v_0 и u_0, а также его абсолютная величина $|v|$ и направление $\arg v$:

$$u_0 = b_1/\cos\beta, \qquad (5.5.11)$$

$$v_0 = a_1/\cos\beta, \qquad (5.5.12)$$

$$|v| = \sqrt{u_0^2 + v_0^2}, \qquad (5.5.13)$$

$$\arg v = \operatorname{arctg}(b_1/a_1). \qquad (5.5.14)$$

Горизонтальная дивергенция ветра D вычисляется по формуле

$$D = \frac{a_0 + 2v_г \sin\beta}{R\cos^2\beta}. \qquad (5.5.15)$$

Операции с исходным массивом данных для каждого круга, т.е. для каждой фиксированной высоты $H = R\sin\beta$, определяют первые три коэффициента ряда Фурье (данные интерполируются полиномом со степенью 7):

$$a_0 = \frac{2}{N}\sum_{i=1}^{N} \tilde{v}_n; \quad a_1 = \frac{2}{N}\sum_{i=1}^{N} \tilde{v}_n \cos\varphi; \quad b_1 = \frac{2}{N}\sum_{i=1}^{N} \tilde{v}_n \sin\varphi,$$

где $N = 360$ – число отсчетов по азимуту.

5.6. Критерии опасных явлений для поляризационных МРЛ

Применение радиолокаторов с двойной поляризацией в оперативной работе началось сравнительно недавно. Они внедряются, в первую очередь, в тех регионах, где ожидают значительного выигрыша от применения двойной поляризации с точки зрения распознавания опасных явлений.

При совместном измерении $Z_э$ и Z_{DR} можно достаточно четко идентифицировать зоны града, где большим значениям Z соответствуют близкие к нулю или даже отрицательные значения Z_{DR} (см. п. 2.7, рис. 2.7.1). В интенсивных осадках большие значения $Z_э$ сопровождаются большими положительными значениями Z_{DR} [13, 30].

В ряде работ [19, 27, 35, 39] делаются выводы о том, что величина дифференциальной отражаемости Z_{DR} может быть использована для определения восходящих и нисходящих потоков в облаках и осадках. При этом восходящие потоки, выносящие крупные жидкие капли выше нулевой изотермы, характеризуются положительным значением Z_{DR} выше слоя таяния, а нисходящие потоки, содержащие твердые гидрометеоры ниже нулевой изотермы, могут быть связаны с близкими к нулю или отрицательными значениями Z_{DR}. В первом случае переохлажденные капли могут служить источником опасного обледенения самолета, а во втором интенсивный нисходящий поток создает угрозу возникновения микрошквала вблизи поверхности Земли.

5.7. Эффективность радиолокационных критериев опасной погоды

Оперативное применение критериев опасной погоды на сети NEXRAD существенно улучшило краткосрочные прогнозы сильных гроз, смерчей и паводков [37]. Повысились, в первую очередь, их заблаговременность и объективность самой информации.

Первое место по практическому применению занимает критерий VIL. Этот критерий признан синоптиками самым полезным для распознавания штормов, с которыми могут быть связаны опасные явления погоды, и в частности разрушительный град.

Как известно из многочисленных публикаций 15-летней давности [17, 23, 25], одним из стимулирующих факторов, ускоривших внедрение WSR-88D в оперативную практику, была потребность в обнаружении торнадо. По результатам оперативного применения NEXRAD [37] был сделан вывод, что диаметр смерчей мал по сравнению с шириной ДНА WSR-88D; исключение составляют большие торнадо на близком расстоянии. Хотя опасные явления погоды, и в частности торнадо, часто связаны со штормами, в которых существуют мезоциклоны, меньше половины таких штормов представляют опасность. Наблюдалось много случаев с опасной погодой и торнадо, связанных со штормами, в которых не обнаруживались суперячейки Cb.

Кроме алгоритмов распознавания мезоциклонов и смерчей на WSR-88D, работающих в доплеровском режиме, применяется только один алгоритм с профилем ветра – VAD (в обложных осадках и при ясном небе). На радиолокаторах TDWR (5 см, $\theta = 0{,}5°$) (см. табл. 6.1.2), расположенных в аэропортах, автоматизированная система обеспечивает своевременное и однозначное предупреждение авиадиспетчера и летного состава об опасных сдвигах ветра и микрошквалах на глиссаде [32]. Вероятность обнаружения микрошквалов оценивается в 95 %. Однако, по мнению авторов [37], TDWR реализует не весь свой потенциал.

Применение критериев (см. п. 5.2) позволило довести оправдываемость гроз (%) при сопоставлении с наземными данными до 94–98 % в радиусе 50 км от МРЛ-5 и до 90–94 % в радиусе 200 км при средних значениях оправдываемости 95 % и 92 % соответственно.

Дальнейшее усовершенствование систем обработки автоматизированных МРЛ позволит разработать новые критерии опасных явлений, с помощью которых можно будет выявлять прогностические возможности радиолокационной метеоинформации.

ГЛАВА 6

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ СТАНЦИИ

6.1. Основные параметры МРЛ

6.1.1. Основные требования к МРЛ

Облака и осадки как метеорологические цели имеют следующие особенности:

значительные вертикальные и горизонтальные размеры (пространственно протяженные цели);

малая скорость перемещения (от 1 до 70 км/ч) (в отличие от самолетов);

значительная пространственно-временная изменчивость внутренней и внешней структуры кучево-дождевых облаков (например, изменение над площадью 5×5 км высоты верхней границы радиоэха Cb составляет в 80 % случаев ±0,1 км/мин, а в 20 % случаев более ±0,2 км/мин, а изменение отражаемости в 85 % случаев ±2 дБZ/мин, в 15 % случаев > ±2 дБZ/км);

большой диапазон изменения отражаемости при одном цикле наблюдений в радиусе максимального обзора (предельно до 100 дБZ).

Метеорологический радиолокатор предназначен для обнаружения метеорологических целей и оперативного представления количественной информации о них потребителю. Поэтому МРЛ являются одновременно и информационно-измерительными системами.

В процессе оперативной работы требуется постоянный контроль функционирования таких систем и мониторинг их основных параметров: импульсной мощности, излучаемой передатчиком, чувствительности приемника, сохранения калибровочных характеристик приемно-измерительного тракта (стабильности).

В радиусе своего обзора МРЛ осуществляет:

обнаружение облаков и связанных с ними опасных явлений;

их распознавание по заданным алгоритмам и по необходимой потребителю классификации или общепринятым типам явлений;

определение для каждого явления местоположения, геометрических размеров, интенсивности, скорости и направления движения, тенденции развития;

измерение интенсивности и количества осадков в оптимальных условиях (т.е. в радиусе обзора, при котором верхняя граница ДНА МРЛ находится ниже высоты уровня нулевой изотермы) и неоптимальных условиях;

определение высоты нулевой изотермы внутри слоисто-дождевых облаков и в кучево-дождевых облаках в стадии распада;

определение доплеровских скоростей в облаках и осадках;

определение фазового состояния отражающих объектов.

Периодичность обновления информации МРЛ в радиусе обзора меняется в широких пределах, но для подавляющего большинства потребителей она составляет от 3 до 15 мин.

Точность измерения высоты верхней границы облаков определяется шириной ДНА МРЛ и потенциалом МРЛ.

Точность измерения отражаемости и доплеровских скоростей определяется принятыми системами обработки и калибровки приемно-измерительных трактов МРЛ.

Вероятность радиолокационного обнаружения облаков и осадков зависит от потенциала МРЛ, физико-географических условий и величины углов закрытия антенны МРЛ в месте его установки.

По результатам многих исследований [5] радиус действия МРЛ-2 и МРЛ-5 при вероятности обнаружения метеообъектов не менее 95 % находится в следующих диапазонах:

150–200 км – Cb с грозой и градом, кучев-дождевые

90–120 км – Cb с ливневым дождем и снегом,

50 км – Cu cong. без осадков, кучев.

120 км – слоисто-дождевые облака летом,

60 км – слоисто-дождевые облака зимой,

до 60 км – обложные моросящие осадки летом,

до 30 км – обложные моросящие осадки зимой,

до 20 км – облака всех форм без осадков.

Эти данные получены для равнинных районов России. Изменение климатической повторяемости облаков и осадков в других физико-географических районах может привести к увеличению или уменьшению радиуса действия МРЛ.

При увеличении потенциала МРЛ (см. формулу (2.2.8)) увеличивается и его радиус обнаружения. Максимальный радиус обнаружения на МРЛ-2 и МРЛ-5 определяется радиусом развертки индикатора кругового обзора 300 км.

Ограничивающими факторами обнаружения являются эффекты кривизны Земли (увеличение с удалением от МРЛ зоны радиотени), увеличение с расстоянием минимально принимаемых отраженных сигналов и ослабление радиоволн в осадках и газах атмосферы.

Дисперсия оценки среднего уровня сигнала на выходе логарифмического приемника, пропорционального величине 10 lg |Z|, при усреднении по K_1 независимым посылкам (отсчетам) описывается выражением

$$\sigma_z^2 = \sigma_{\lg}^2 / K_1.$$

На самом деле, как правило, приходится иметь дело с частично коррелированными последовательными отсчетами. Величину K_1 следует понимать как эквивалентное число независимых отсчетов в пределах временной реализации отраженного сигнала, состоящей из K отсчетов ($K_1 < K$). Время декорреляции отраженных от метеообразований сигналов составляет от 3 до 15 мс [3]. При требуемой точности оценки $\sigma_Z = 1$ дБ получаем $K_1 = 30...32$ ($\sigma_Z = 5{,}6/\sqrt{K_1} \le 1$дБ).

Общепринято, что при условии пространственной однородности радиоэха недостаток усреднения во времени при получении оценки Z можно компенсировать дополнительным осреднением по пространству. Поэтому в автоматизированных МРЛ обработка отраженных сигналов проводится с их одновременным осреднением по времени и пространству.

Рассмотрим, с какой точностью величина 10 lg |Z| характеризует отражаемость на площади 4×4 км в слое 1–2 км по вертикали при частоте посылок МРЛ 250 Гц, ширине ДНА θ = 1° и скорости вращения антенны 6 об/мин. Одновременно вдоль радиолокационного луча обрабатывается 1000 бинов дальности при протяженности каждого бина (строба) 250 м. Число посылок в стробе (осреднение во времени) составляет восемь. Вдоль луча на расстоянии 4 км находятся 16 стробов, что дает 16×8 = 128 независимых отсчетов сигнала, а с учетом ДНА их общее число в квадрате 4×4 км составляет 128×4/θR. Оценка σ_Z по квадрату 4×4 км в зависимости от удаления квадрата от МРЛ R приведена в табл. 6.1.1.

Таблица 6.1.1

Оценка σ_Z по квадрату 4×4 км в зависимости от удаления R квадрата от МРЛ

	R км							
	1	10	20	50	100	150	200	250
(θR) км	0,017	0,17	0,34	0,85	1,7	2,55	3,4	4,25
M = 4 км/θR		23,5	11,8	4,7	2,35	1,56	1,18	0,94
K = 128 M		3008	1510	600	300	200	150	120
$\sigma_Z = 5{,}6$ дБ/$\sqrt{K}$		0,1	0,14	0,23	0,33	0,4	0,43	0,51

Таким образом, во всем диапазоне дальности R величина $K_1 > 32$, что обеспечивает требуемую точность оценки 10 lg|Z| на площади 4×4 км.

6.1.2.2. Обязательные этапы автоматизированной обработки

Существуют три обязательных этапа обработки при автоматизации радиолокационных метеонаблюдений, которые могут быть реализованы как техническими, так и программными средствами [3–6]:

1) режим обзора пространства, первичная обработка сигналов, обеспечивающая измерение параметров радиоэха и выдачу для дальнейшей обработки по алгоритмам;

2) формирование с помощью алгоритмов оптимального объема радиолокационных характеристик метеообразований путем метеорологической интерпретации первичных (базовых) радиолокационных данных, измерения интенсивности и количества осадков;

3) представление выходной информации (продуктов) потребителям, совмещение ее с другими видами метеоинформации и хранение радиолокационных данных в течение заданного срока.

В каждой конкретной аппаратуре эти обязательные этапы могут выполняться по-разному, но главное, они должны гарантировать результаты с точностью, существенно не ухудшающей тактико-технические характеристики неавтоматизированных МРЛ.

Обязательным требованием к аппаратуре автоматизации является наличие дистанционной системы встроенного контроля основных параметров МРЛ и системы калибровки. Задачей калибровки является получение количественных соотношений между уровнем выходных сигналов и отражаемостью метеоцелей. При калибровке приемно-измерительного тракта автоматизированного МРЛ с помощью высокочастотного сигнал-генератора устанавливается соответствие между мощностью сигналов на входе приемного устройства МРЛ и кодом на выходе АЦП (аналого-цифрового преобразователя) блока обработки. Образец такой калибровочной кривой приведен на рис. 6.1.3. Кроме такой калибровки, необходимы абсолютные калибровки МРЛ по большой сфере и по Солнцу.

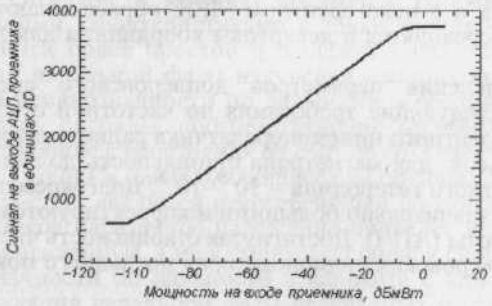

Рис. 6.1.3. Сигнал с выхода АЦП приемника в единицах A/D (аналог-цифра) как функция мощности, вводимой для калибровки сигнал-генератором на вход приемника в направленный ответвитель [8]. Верхний предел динамического диапазона RN (A/D = 596) = –99,2 дБмВт; минимальная чувствительность МРЛ (нижняя граница динамического диапазона) RS (A/D = 3817) = –4,8 дБмВт; среднее квадратическое отклонение σ = 5,87 (A/D) (–80/–20 дБмВт).

6.1.2. Автоматизация некогерентных МРЛ

6.1.2.1. Физические основы

Для автоматизированной обработки отраженных сигналов необходимо аналоговую информацию перевести в цифровую. С этой целью весь сканируемый МРЛ объем пространства делят на элементарные ячейки (бины, или иначе дискреты дальности). Нижний предел бина равен импульсному объему (см. формулу (2.2.1)), т.е. он ограничен шириной ДНА МРЛ и половиной длительности зондирующего импульса. Для уменьшения количества цифровых данных по нескольким элементам дальности можно построить ячейку дальности. На рис. 6.1.1 [9] показано, как сектор в 1° делится на элементы дальности, объединенные в ячейки дальности, что в общем образует полярную ячейку дальности, размер которой определяет начальное разрешение. Чем больше удаление от МРЛ, тем крупнее ячейки. Это имеет значение при переходе от полярных координат к прямоугольным, в которых ячейки имеют одинаковый размер на всех удалениях от МРЛ.

Рис. 6.1.1. Ячейка дальности и азимутальный сектор [9].

Принятый сигнал осредняется по дальности в нескольких последовательных элементах дальности и образует ячейку дальности. Полученный результат для ячейки с осреднением по дальности снова осредняется по азимуту путем последовательных измерений при движении антенны примерно на одну ДНА. Первоначальное осреднение по дальности может осуществляться аппаратурой или компьютерной программой, а осреднение по азимуту (т.е. по времени) – компьютерной программой [9].

Типовая функциональная схема системы автоматизации МРЛ приведена на рис. 6.1.2 [9].

Принятый на антенну МРЛ высокочастотный сигнал от метеообразования после преобразований в приемном тракте МРЛ осредняется по дальности и по азимуту при вращении антенны МРЛ. Осреднение отраженных сигналов и расчет отражаемости Z происходят на элементе дальности ΔR по площади, равной

$$\Delta R\,\theta = \Delta R(\omega\, t/360),$$

где θ – ширина ДНА, ω – скорость вращения антенны. Затем эти результаты измерения Z переводятся из полярных координат в декартовые, при этом сторона квадрата может устанавливаться на 1, 2, 4 или 5 км, а разрешение по вертикали приниматься равным 0,5, 1 или 2 км. Измеренная по изложенному алгоритму отражаемость Z над квадратом выбранных размеров переводится по заданному соотношению Z–I в интенсивность осадков, которая и нужна потребителям.

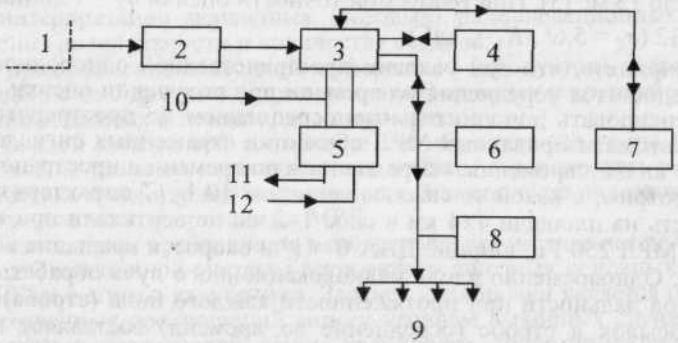

Рис. 6.1.2. Типовая функциональная схема системы автоматизации МРЛ [9].
1 – выход логарифмического приемника МРЛ; *2* – блок предварительного интегрирования и осреднения; *3* – ЭВМ; *4* – блок записи данных для архивации; *5* – блок сопряжения ЭВМ (интерфейс) с системой управления антенной МРЛ; *6* – телетайп или видеоконтрольное устройство; *7* – сеть дистанционных плювиографов для калибровки радиолокационной информации; *8* – дисплеи; *9* – к дисплеям, печатающим устройствам или другим ЭВМ; *10* – сигнал от блока синхронизации МРЛ; *11, 12* – сигналы от антенны и для управления антенной МРЛ.

Во всем динамическом диапазоне отраженных сигналов (до 100 дБ) требуемая точность оценки радиолокационной отражаемости Z должна составлять 1 дБ. Рассмотрим на конкретном примере, как эта точность достигается.

В достаточном для практического применения приближении отраженный от метеообразований радиолокационный сигнал представляет собой стационарный нормальный случайный процесс $Z(t) = X(t) + iY(t)$, где $X(t)$ и $Y(t)$ – его квадратурные составляющие, $\overline{X} = \overline{Y} = 0$, $\overline{X^2} = \overline{Y^2} = \sigma^2$.

После логарифмического преобразования в приемнике МРЛ математическое ожидание $10 \lg \overline{P} = -2{,}5$ дБ, где $\overline{P} = 2\,\sigma^2$ – средняя мощность отраженного сигнала, а среднеквадратическое отклонение $\sigma_{\lg}$ не зависит от мощности сигнала и равно 5,6 дБ [6] (см. подробней п. 10.1.1).

Известно много схем автоматизации МРЛ, их обзор приведен в [1, 2, 5]. Возможности автоматизации возрастали с увеличением быстродействия и объема памяти ЭВМ [3, 5]. В результате сейчас и первичная, и вторичная обработка, как правило, производятся на ЭВМ.

6.1.3. Доплеровские (когерентные) МРЛ

Для реализации оперативной возможности получать информацию на основании доплеровского сдвига частот и применять ее для решения прогностических задач было преодолено много трудностей научного и технического характера. В результате были сформулированы требования к точности измерений и диапазонам измеряемых величин, разработана аппаратура, алгоритмы первичной и вторичной обработки [3, 4, 6].

Параметры доплеровского спектра метеообразований нужно измерять в каждом дискрете дальности протяженностью 50–250 м. Измеряемая скорость должна перекрывать интервал ±50 м/с, в котором заключено большинство значений скорости ветра в метеообразованиях. Динамический диапазон измеряемых отраженных сигналов, как и при некогерентной обработке, достигает 100 дБ.

На удалениях до 100 км от МРЛ и при отношении сигнал/шум более 3 дБ допустимая точность определения радиальной скорости не должна превосходить 0,25 м/с, а ширина спектра скоростей не должна превышать 1 м/с при $\sigma_Z = 1$ дБ, т.е. $\sigma_v \leq 1$ м/с.

Как и в некогерентных МРЛ, первичная обработка сигналов в доплеровском радиолокаторе осуществляется в каждом дискрете дальности радиолокационного луча и производится с целью измерения параметров спектра радиоэха облаков и осадков. В процессе обработки должна быть устранена неоднозначность измерения расстояний и скоростей, возникающая при импульсной работе радиолокатора, а также наложения сигналов от разных дальностей, возникающие в протяженных метеообразованиях. Однако, в первую очередь, необходимо устранить сигналы от местных предметов.

Полученные в дискрете дальности параметры доплеровского спектра (рис. 6.1.4) [16], так же как и в некогерентном МРЛ, обрабатываются в полярной ячейке и затем переводятся в декартовы координаты для дальнейшего анализа.

Для надежного определения параметров доплеровского спектра должны удовлетворяться следующие требования по частотной стабильности основных узлов когерентного приемопередатчика радиолокатора за период повторения импульсов: для магнетрона стабильность должна составлять 10^{-6}–10^{-5}, для местного гетеродина – 10^{-9}–10^{-8}. Долговременные уходы частоты могут быть значительно большими и корректируются системой автоподстройки частоты (АПЧ). Достигнутая стабильность частоты приемопередатчика на доплеровских радиолокаторах последнего поколения составляет 10^{-9}.

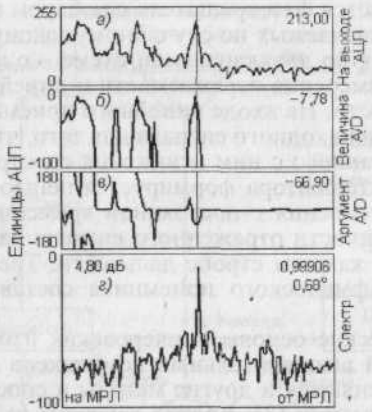

Рис. 6.1.4. Спектральные графики мишени-«мачты» на удалении 10 км для анализа фазового шума радиолокатора.
а–в – выборки *IQ* с выхода АЦП (*A/D*, величины и аргумента), *г* – спектр быстрого преобразования Фурье для 128 точек в бине дальности, показанном на рис. *а–в*. Фазовый шум – в правом верхнем углу рис. *г*. Величины флуктуируют и приближаются к флуктуациям клистрона [16].

Существуют две схемы обеспечения когерентности в доплеровских РЛС. Одна из них предполагает использование в качестве передатчика усилительного клистрона, причем начальная фаза излучаемых импульсов является детерминированной величиной, а стабильность частоты обеспечивается высокостабильным кварцевым генератором в составе возбудителя (схема с истинной когерентностью). Согласно второй схеме, передающее устройство представляет собой магнетрон, начальная фаза излучения которого является случайной. Для обеспечения когерентности случайная начальная фаза навязывается когерентному гетеродину, который как бы сохраняет ее до прихода отраженного сигнала. Эта схема получила название схемы с псевдокогерентностью.

Первая схема обеспечивает лучшую частотную стабильность всей когерентной системы и больший динамический диапазон в спектральной области, что способствует уменьшению аппаратурных погрешностей измерения скорости и позволяет добиться высокой эффективности режекции сигналов от местных предметов. Вторая схема обладает несколько худшими характеристиками с точки зрения частотной стабильности, но является более простой и дешевой в реализации. Кроме этого, случайность начальной фазы излучения импульсов благоприятствует устранению неоднозначности по дальности в режиме измерения скоростей, поскольку сигналы, соответствующие второму интервалу дальности, т.е. приходящие с расстояния от $c/2F$ до c/F (где c – скорость света, F – частота посылок) и накладывающиеся на сигналы с первого интервала дальности 0–$c/2F$, являются некогерентным по отношению к ним. Следовательно, такое паразитное наложение приведет лишь к уменьшению отношения сигнал/шум, а не к смещению оценок скорости. Для устранения неоднозначности по дальности в варианте с клистроном предусматривается модуляция начальной фазы излучаемых импульсов по случайному зако-

ну, для чего в цепь клистрона включается фазовращатель с набором фиксированных фазовых задержек, переключаемых по случайному закону.

Приемник радиолокатора строится по двухканальной схеме – с логарифмическим усилителем в канале измерения отражаемости и линейным усилителем в канале измерения скорости. На входе линейного приемника предусмотрена ступенчатая аттенюация входного сигнала для того, чтобы избежать ограничения сигнала и связанного с ним искажения спектральных оценок. Управляющий сигнал аттенюатора формируется цепью быстрой автоматической регулировки усиления с постоянной времени порядка 1 мкс по среднему уровню мощности отраженного сигнала на выходе логарифмического приемника в каждом стробе дальности. Требуемый динамический диапазон логарифмического приемника составляет 90 дБ, а линейного приемника – 80 дБ.

В п. 2.6 кратко изложены физические основы доплеровских измерений. В зависимости от возможностей вычислительных комплексов первичной и вторичной обработки применяются и другие методы и способы получения доплеровской метеоинформации [3]. Кратко изложим их физические принципы, которые необходимы для понимания материала, изложенного далее, в п. 6.3 и 6.5.

Наиболее распространенным методом оперативной оценки средней доплеровской скорости является автоковариационный метод, или метод парных импульсов (pulse-pair). Процессор парных импульсов (или пульс-парный процессор) выполняет расчет двух первых моментов доплеровского спектра на основе оценки значения автокорреляционной функции при величине запаздывания T_s. Для прямых расчетов средней доплеровской скорости используют быстрое преобразование Фурье (БПФ, или FFT – английская аббревиатура) для дискретных отраженных сигналов в элементе разрешения по дальности.

Сравнение этих двух методов показывает, что метод парных импульсов дает несмещенную оценку средней доплеровской частоты. При широких спектрах точность метода Фурье выше, а при узких спектрах лучшие оценки дает метод парных импульсов. Как правило, в современных доплеровских МРЛ заложены возможности обработки отраженных сигналов по обоим методам.

Для подавления отраженных сигналов от местных предметов широко используется фильтрация; наиболее распространенным является трехполюсный эллиптический фильтр. Уровень подавления «местников» этим фильтром достигает 50 дБ, когда в качестве передатчика используют клистрон, и 25–30 дБ при использовании магнетрона. Могут применяться и процедуры фильтрации с привлечением других проверенных методов борьбы с местниками. Измерения отражаемости и скорости можно проводить на радиолокаторах при их попеременной работе на двух частотах посылок. На низкой частоте посылок измеряют отражаемость, на более высокой частоте – скорость.

На рис. 6.1.5 приведена схема приемника доплеровского радиолокатора Plessey 45-C [11].

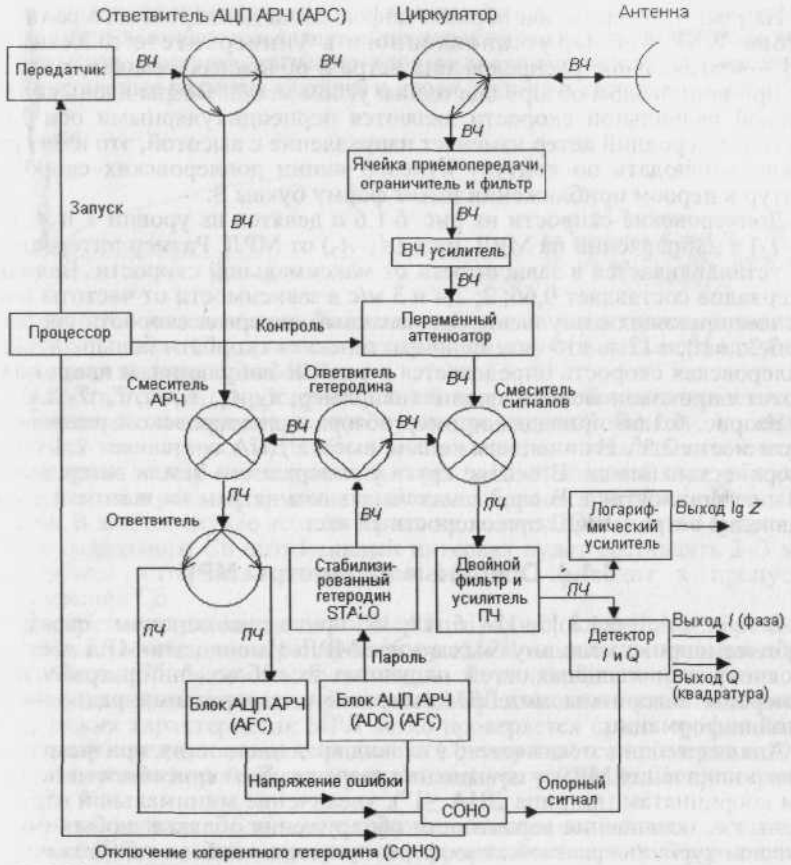

Рис. 6.1.5. Схема приемно-измерительного тракта доплеровского метеорологического радиолокатора Plessey 45C [11].

ВЧ – высокочастотный сигнал (номинал 5,625 ГГц); ПЧ – промежуточная частота (номинал 30 МГц); смеситель – выход ПЧ представляет разницу частот двух входов ПЧ; ответвитель – делитель ВЧ сигнала; циркулятор – направляет излучаемый импульс на антенну и отраженные сигналы на приемник; AFC – автоматическая регулировка частоты (АРЧ) – поддерживает частоту гетеродина на 30 МГц ниже частоты передатчика; ADC (AFC) – аналого-цифровой преобразователь (АЦП) – преобразует входные данные о напряжении ошибки для настройки стабилизированного гетеродина на точную ПЧ, пароль цифрового выхода задает частоту стабилизированного гетеродина; *STALO – стабилизированный гетеродин или ВЧ генератор с цифровым управлением; СОНО – когерентный гетеродин*, используемый в качестве генератора опорного сигнала для детектора I и Q; I и Q – фазовая и квадратурная составляющие по отношению к опорному сигналу СОНО.

Более подробная информация о первичной и вторичной обработке отраженных сигналов по алгоритмам доплеровской обработки представлена в [3], а также в п. 6.3–6.5.

На рис. 6.1.6 приведен образец информации доплеровского радиолокатора WSR-81C-D, установленного в университете г. Хельсинки [17] – вертикальное распределение ветра в обложных осадках, полученное при коническом обзоре под одним углом места. Ветры вдоль контура нулевой радиальной скорости являются перпендикулярными оси ДНА. Поскольку средний ветер изменяет направление с высотой, это изменение можно наблюдать по контуру нулевой линии доплеровских скоростей. Контур в первом приближении имеет форму буквы S.

Доплеровские скорости на рис. 6.1.6 *а* делятся на уровни *T* и *A*; пять (T_1–T_5) в направлении на МРЛ, пять (A_1–A_5) от МРЛ. Размер интервалов *A* и *T* устанавливается в зависимости от максимальной скорости. Величина интервалов составляет 0,66; 2; 2,4 и 3 м/с в зависимости от частоты посылок зондирующих импульсов. Однозначный интервал скорости составляет ±3,3; ±10; ±12 и ±15 м/с. Если фактическая скорость больше этой, то доплеровская скорость определяется в режиме вобуляции, и цвета повторяются с противоположного конца (например, A_3, A_4, A_5, T_5, T_4, T_3,...).

На рис. 6.1.6б приведен пример обзора в доплеровском режиме под углом места 2,5°. На внешнем кольце высота ДНА составляет 2,4 км над поверхностью Земли. В центре круга у поверхности Земли ветер направлен с северо-востока. В слое с максимальным ветром на высоте 1 км направление ветра с ВЮВ при скорости 18 м/с.

6.1.4. Основные параметры МРЛ

В табл. 6.1.1–6.1.3 [5, 12–15, 18, 19] приведены основные параметры наиболее широко используемых в мире МРЛ. Именно эти МРЛ составляли основу национальных сетей, на данных их наблюдений разработаны и проверены алгоритмы метеорологической интерпретации радиолокационной информации.

Анализ таблиц показывает, что основная тенденция при разработке нового поколения МРЛ – повышение разрешающей способности по угловым координатам (ширина ДНА ≤1°), увеличение минимальной отражаемости, т.е. повышение вероятности обнаружения облаков любых форм и даже зон турбулизованной атмосферы при ясном небе, а также обеспечение доплеровского режима работы МРЛ в радиусе 100–120 км. В таблицы не вошли характеристики поляриметрических МРЛ, которые будут рассмотрены в последней главе.

Необходимо отметить, что применение МРЛ в метеорологии, при котором их информация не искажает площадь осадков и высоту радиоэха Cb, начинается с потенциала 267 дБ, рассчитанного в единицах СИ. Z_{min} (дБZ) на удалении 50 км составляет не менее 5 дБZ. На рис. 6.1.7 приведена зависимость $Z_{min}(R)$ для этого значения потенциала. Легко увидеть, что все МРЛ, параметры которых приведены в табл. 6.1.1–6.1.3, удовлетворяют этим требованиям.

Максимальную дальность обнаружения атмосферного явления рассчитывают по уравнению (2.2.10) с учетом ширины ДНА, зависимости

Z_{min} от удаления и высоты явления над поверхностью Земли. При этом задаются или выбираются физические характеристики атмосферных явлений (высота радиоэха, размеры ядра радиолокационной отражаемости, горизонтальные размеры явлений и слоев жидких и твердых осадков).

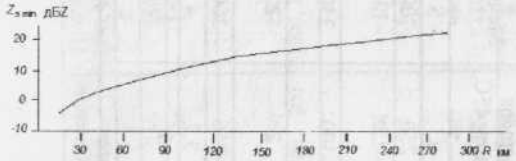

Рис. 6.1.7. Зависимость Z_{min} от удаления *R* при $П_м$ = 267 дБ ($Z_{э\,min}$ = 5 дБZ на *R* = = 50 км).

С учетом изменчивости радиолокационных характеристик явлений, сопровождающих Cb, при анализе необходимо учитывать периодичность обновления информации МРЛ.

В соответствии с пространственной и временной изменчивостью радиолокационных характеристик кучево-дождевых облаков и осадков (наиболее изменчивых метеообъектов) в качестве оптимального интервала времени между последовательными радиолокационными обзорами пространства в режиме кругового обзора выбирается интервал, равный 5–10 мин. В любом случае этот интервал не должен превышать 15 мин. Для обзора отдельного Cb оптимальный интервал будет составлять 2–3 мин. Увеличение интервала за пределы 15 мин приводит к пропускам обнаружения Cb.

Дискретность площади для измерения радиолокационных характеристик облаков и осадков в радиусе обзора МРЛ не должна превышать размера квадрата 5×5 км. Как будет видно из дальнейшего изложения, все эти требования на автоматизированных МРЛ выполняются. Стабильность технических характеристик МРЛ легко проверяется при оперативных наблюдениях: средняя площадь радиоэха Cb сокращается примерно в 10 раз при увеличении порога $Z_э$ на внешнем контуре радиоэха Cb примерно на 15 дБZ.

В приведенных таблицах не отражена важная особенность нового поколения МРЛ – наличие программ интерпретации первичных радиолокационных измерений, в которых использованы последние достижения по радиолокационной метеорологии. Рынок таких программ реально существует и влияет на унификацию продуктов автоматизированных МРЛ [12, 14, 18].

Все МРЛ нового поколения обеспечивают доплеровский режим измерений, хотя практическое применение доплеровской информации по разным причинам отстает от заложенных в обработку возможностей.

Таблица 6.1.1

Метеорологические радиолокаторы, разработанные до 1980 г.

Основные параметры	МРЛ-2	МРЛ-5		WSR-74C	WSR-74S	Siemens Plessey 45C	Melodi	Rodin
		Канал I	Канал II					
Полоса частот	X	X	S	C	S	C	S	C
Импульсная мощность, кВт	215	250	800	250	500	250	700	250
Минимально принимаемая мощность, дБ/Вт	–132	–137	–140	–134	–134	–138	–136	–142
Частота повторения зондирующих импульсов, Гц	300	250	250	259	162	300	250	330
Длительность зондирующего импульса, мкс	1; 2	1; 2	1; 2	3	1; 4	2	2	2
Рабочий радиус, км	300	300	300	400	400	256	300	300
Диаметр антенны, м	3,0	4,5	4,5	2,7	3,6	3,7	4	3
Ширина диаграммы направленности на уровне 3 дБ, град.	0,8	0,45	1,5	1,5	2,0	1	1,8	1,3

Таблица 6.1.2

Доплеровские метеорологические радиолокаторы, разработанные в период с 1980 по 1990 г.

Основные параметры	WSR-88D* (EEC, USA)		WSR-82D (EEC, USA)		Ericsson Radar (Electronics AB, Sweden		TDWR ** (EEC, USA)	Mitsubishi (Japan)
Полоса частот	S	C	X	C	C	S	C	C
Импульсная мощность, кВт	550	250	180	250	250	250	250	250
Минимально принимаемая мощность, дБ/Вт	–136	–136	–136	–138	–136	–136	–136	–136
Частота повторения зондирующих импульсов (Гц) в режиме: интенсивность скорость	250 600–934	250 700–1200	250 1500–2000	250 1200	250 900, 1200	250 900, 1200	250 1000, 1900	280 1120
Длительность зондирующего импульса (мкс) в режиме: интенсивность скорость	2 0,8–0,9	2 0,8–0,9	2 0,25–0,5	2 0,5	2 0,5	2 0,5	2 0,8–0,9	2 0,52
Рабочий радиус (км) в режиме: интенсивность скорость	450 120 (230)	450 120	256 60	400 125	300 125	480 120	480 120	400 128
Диаметр антенны, м	3,7–8,2	1,8–6,1	0,9–2,4	4,3	4,2	4,2	6	3
Ширина диаграммы направленности на уровне 3 дБ, град.	2,1–1,0	2,1–0,7	2,5–1,0	1	0,8	1,6	0,55	1,4–1,5
Однозначно определяемая доплеровская скорость, м/с	±50 (120 км) ±32 (230 км)	±32	±32	±48	±48	±48	±40	±16
Z_{min} (дБZ) на удалении 50 км (порог обнаружения равен уровню шумов)	–8	–	–	–	–	–	–	–

*Weather Surveillance Radar – 1988 Doppler

**Terminal Doppler Weather Radar

Таблица 6.1.3

Доплеровские метеорологические радиолокаторы, разработанные после 1990 г.

Основные параметры	Требования COST-73 на ДМРЛ малой мощности (1989 г.)	Meteor 500 C (Gematronic, Germany)	DWSR 8500 S	DWSR 2500 C	DWSR 2500 C/K	Требования к новому поколению ДМРЛ в Канаде (1998 г.)
			Enterprise Electronic Corporation, USA			
Полоса частот	C	C	S	C	C	C
Импульсная мощность, кВт	250	250	850	250	250	250
Минимально принимаемая мощность, дБ/Вт	–144	–142 (2,0 мкс) –138 (0,8 мкс)	–143 (2,0 мкс) –140 (0,8 мкс)	–143 (2,0 мкс) –140 (0,8 мкс)	–143 (2,0 мкс) –140 (0,8 мкс)	–140
Частота повторения зондирующих импульсов (Гц) в режиме:						
интенсивность	–	250	250	250	250	50
скорость	900, 1200	1200	623, 700, 934	786, 885, 1180	786, 885, 1180	1200
Длительность зондирующего импульса (мкс) в режиме:						
интенсивность		2,0	2,0	2,0	2,0	2,0; 5; 10
скорость	0,5	0,83	0,8	0,8	0,8	0,8
Рабочий радиус (км) в режиме:						
интенсивность		500	480	480	480	
скорость	120	125	120	120	120	120
Диаметр антенны, м	4,2	4,2	8,2	4,2	4,2	6,1
Ширина диаграммы направленности на уровне 3 дБ, град.	0,9	1,0	1,0	1,0	1,0	0,65
Однозначно определяемая доплеровская скорость, м/с	±48	±48	±25, ±50, ±75	±16, ±32,±48	±16, ±32,±48	±48
Динамический диапазон приемника, дБ	> 85	80	90	90	90	80
Уровень первого бокового лепестка по отношению к главному, дБ	–27	–28...–30	≥ –25	≥ –25	≥ –25	≥ –27
Z_{min} (дБZ) на удалении 50 км (порог обнаружения равен уровню шумов)		–13,6	–10,5	–11,4	–12,56	–15,4

6.2. Автоматизированный метеорологический радиолокационный комплекс «Метеоячейка»

6.2.1. Назначение

Автоматизированный метеорологический радиолокационный комплекс (АМРК) «Метеоячейка» предназначен для автоматизации метеорологического радиолокатора МРЛ-5 с целью обеспечения аэропортов и автоматизированных систем управления воздушным движением информацией об облачности и связанных с ней опасных явлениях погоды (сильные ливни, грозы, град, шквал) с высокой надежностью и оперативностью в наиболее удобном для потребителя виде. АМРК имеет повышенную помехозащищенность и позволяет эксплуатировать МРЛ в условиях аэропорта при дистанционном режиме управления с использованием обычных кроссовых линий связи.

Многолетний опыт эксплуатации сети АМРК в различных физико-географических условиях (от Санкт-Петербурга до Южно-Сахалинска и от Перми до Адлера) показал высокую надежность работы комплекса и высокое качество получаемой информации при обеспечении различных потребителей, и в первую очередь авиации.

6.2.2. Состав

Автоматизированный метеорологический радиолокационный комплекс «Метеоячейка» состоит из двухволнового радиолокатора МРЛ-5 и средств автоматизации получения, обработки и передачи радиолокационной информации. Типовая схема АМРК приведена на рис. 6.2.1.

В состав оборудования АМРК «Метеоячейка» входят:

метеорологический радиолокатор МРЛ-5,

комплект технических средств автоматизации получения информации,

центральная система АМРК (ЦС),

специализированные рабочие станции потребителей информации.

АМРК является пространственно распределенной системой управления МРЛ. Центральная система по команде оператора при работе в штатном режиме или по таймеру при работе в автоматическом режиме формирует комплексные управляющие команды, которые по каналу связи передаются в УПО–ДМ.

Устройство предварительной обработки сигналов дистанционное (УПО–ДМ) устанавливается в аппаратной кабине МРЛ. УПО–ДМ является специализированной ЭВМ, непосредственно управляющей МРЛ и выполняющей всю предварительную обработку и сжатие информации. По окончании сеанса наблюдений полученные данные передаются в центральную систему, где выполняются их анализ, архивация, визуализация и передача потребителям.

В процессе работы АМРК производит постоянный контроль всех устройств, входящих в его состав, и при необходимости формирует предупреждающие сообщения для оператора. Такое распределение функций

управления и обработки данных позволяет размещать центральную систему АМРК на любом удалении от МРЛ. Как показала практика, такой распределенный вариант установки является типовым. Единственное требование – обеспечение скорости обмена по линии связи не ниже 4800 бит/с. Таким образом, при наличии обычной телефонной линии связи оператор может управлять МРЛ, который удален от него на десятки или сотни километров так же, как и при размещении центральной системы в здании МРЛ.

Специальное программное обеспечение АМРК «Метеоячейка» реализовано в виде комплекта 32-разрядных приложений, работающих под управлением ОС Windows NT 4.0 в локальной вычислительной сети (ЛВС). Рабочие станции могут работать также в среде Windows 95/98/2000.

Информация с любого АМРК может передаваться в любую организацию Росгидромета по сети АСПД (сеть МЕКОМ) с использованием протокола TCP/IP-socket в коде BUFR, в том числе в любые центры объединения радиолокационной информации. Решение о передаче данных конкретному потребителю принимает владелец информации.

6.2.3. Устройство предварительной обработки

Устройство предварительной обработки сигналов УПО–ДМ, являющееся составной частью АМРК «Метеоячейка», обеспечивает выполнение следующих функций:

дистанционное управление и контроль МРЛ-5 по телефонной линии связи;

регистрацию, обработку и накопление данных, поступающих из приемников I и II каналов МРЛ-5;

передачу накопленной информации по линии связи в центральную систему;

диагностику всех устройств, входящих в состав УПО–ДМ.

Конструктивно УПО–ДМ состоит из кабинета-стойки стандарта 19 дюймов, основной и резервной секций обработки на базе высоконадежных промышленных ЭВМ, оптопанели для защиты от молниевых разрядов, устройства коммутации сигналов и комплекта модемов.

6.2.4. Центральная система АМРК

Основной задачей центральной системы является управление работой МРЛ, анализ и интерпретация полученных результатов измерений и передача данных потребителям в необходимом объеме.

Программное обеспечение центральной системы выполнено на базе Windows NT 4.0.

Комплект технических средств центральной системы включает в себя основную и резервную ПЭВМ, устройство бесперебойного питания, коммутатор каналов, модемную стойку и коммуникационную секцию с защитой от молниевых разрядов, которые размещаются в кабинете-стойке стандарта 19 дюймов.

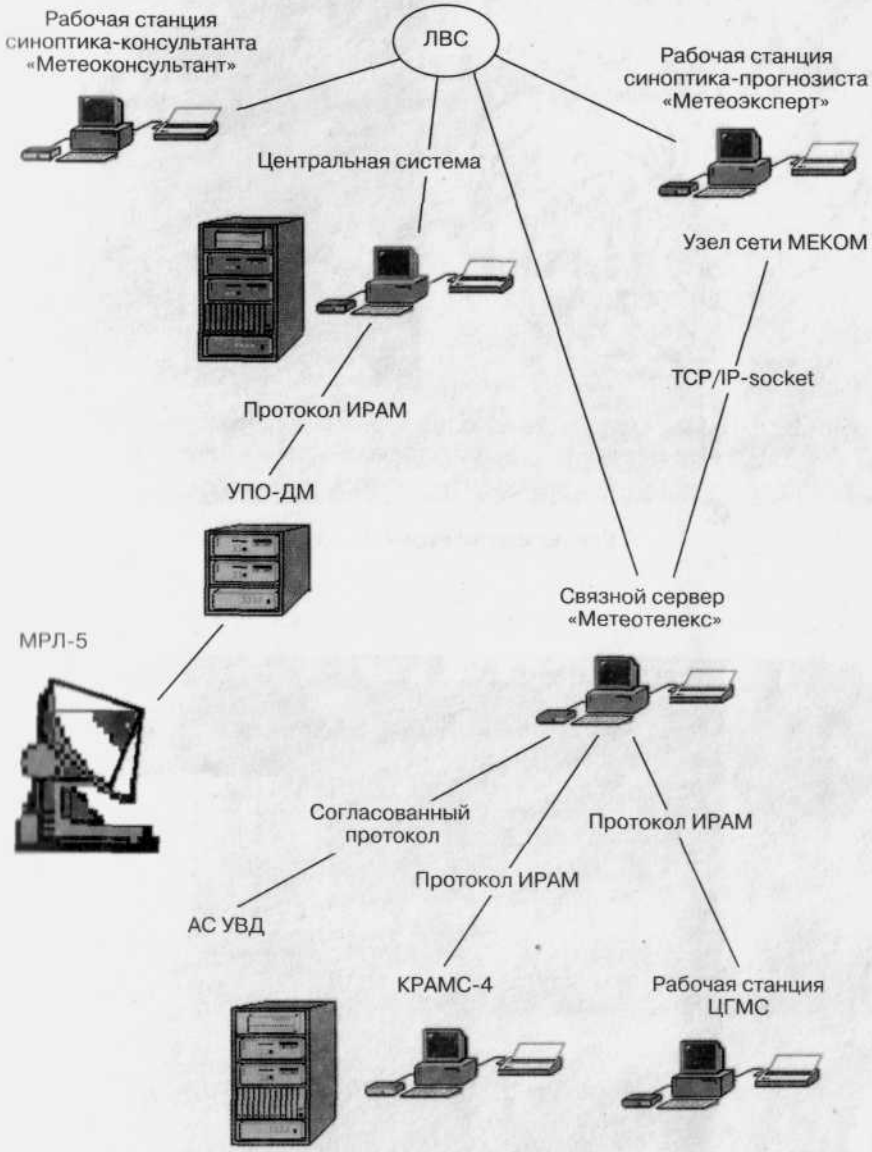

Рис. 6.2.1. Структурная схема АМРК «Метеоячейка»

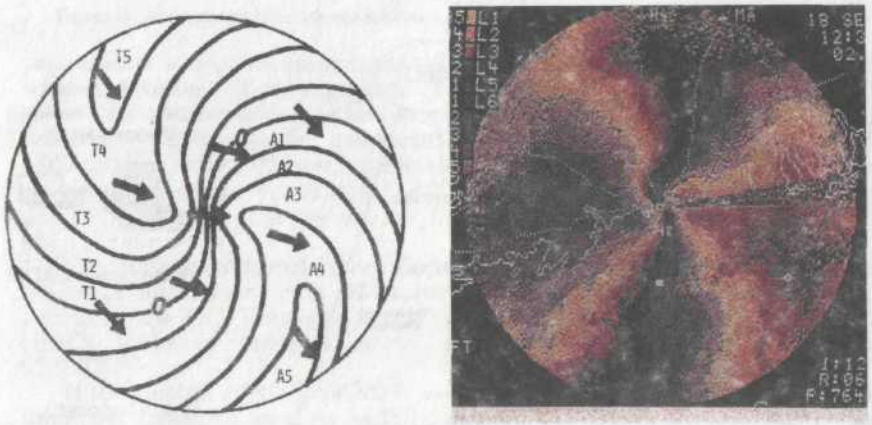

Рис. 6.1.6. Примеры распределения доплеровских скоростей при круговом обзоре под одним углом места (конический обзор) [17].

Пояснения см. в тексте.

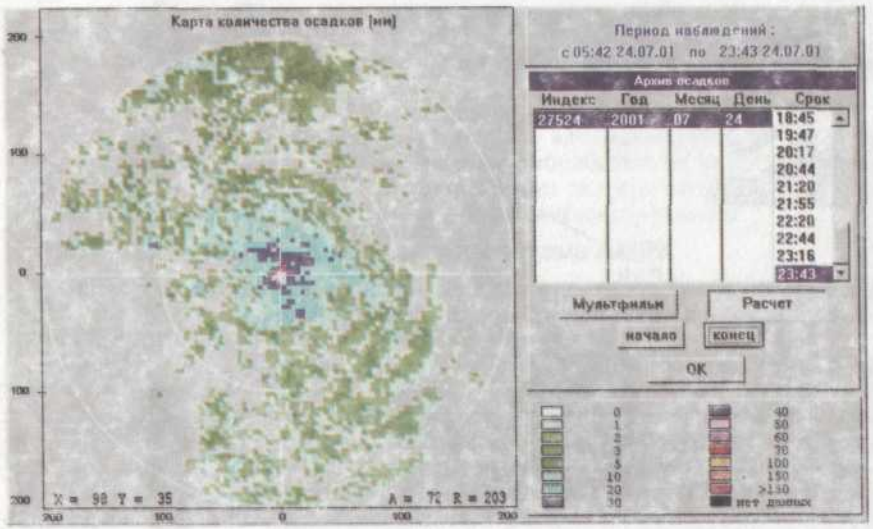

Рис. 6.2.2. Карта количества осадков за заданный интервал времени (с 5 ч 42 мин по 23 ч 43 мин 27 июля 2001 г.).

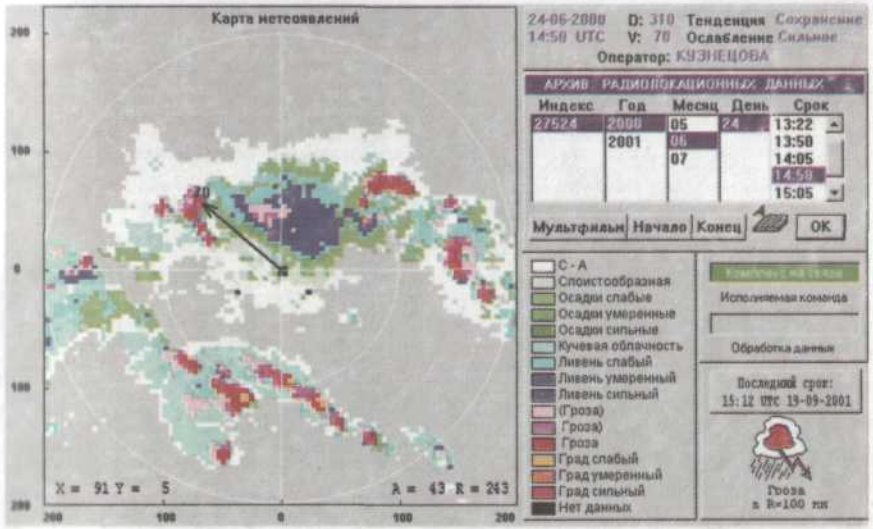

Рис. 6.2.3. Карта метеоявлений.

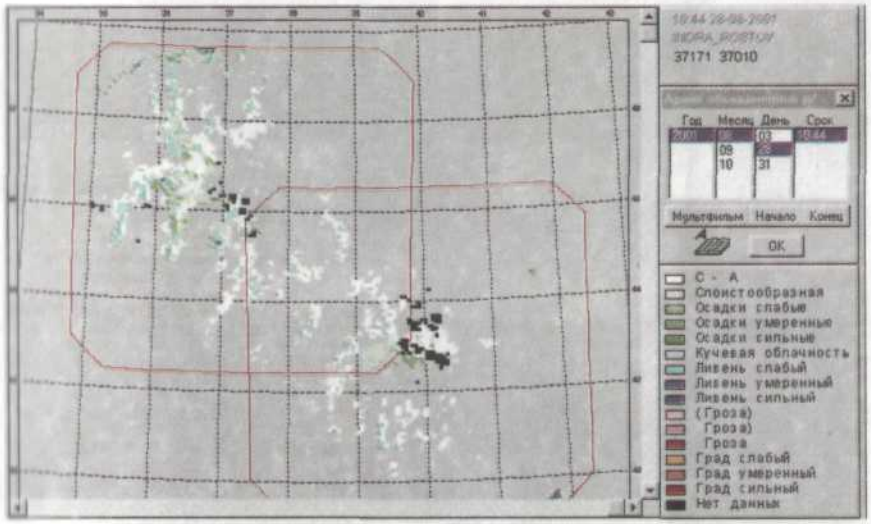

Рис. 6.2.4. Совмещенная карта метеоявлений (данные получены с АМРК «Метеоячейка» Адлера и Анапы).

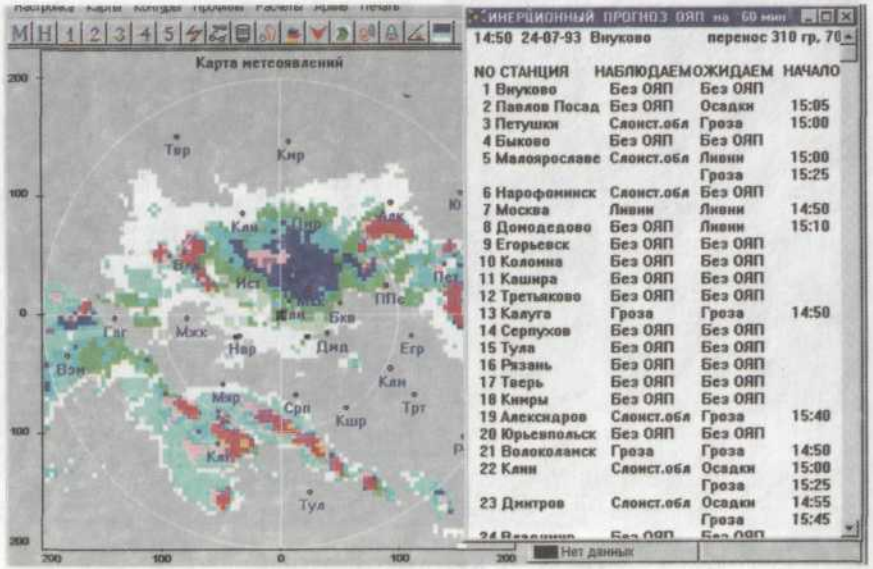

Рис. 6.2.5. Инерционный прогноз для метеостаций.

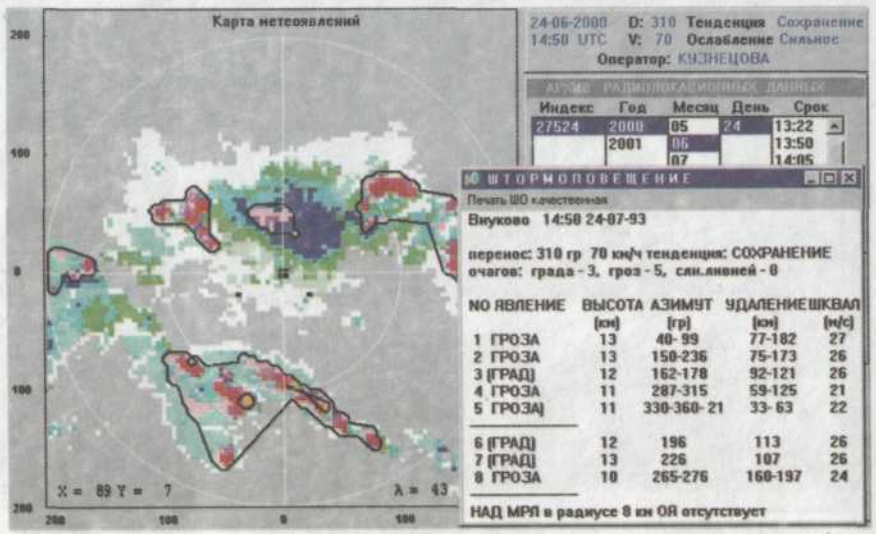

Рис. 6.2.6. Таблица штормоповещения.

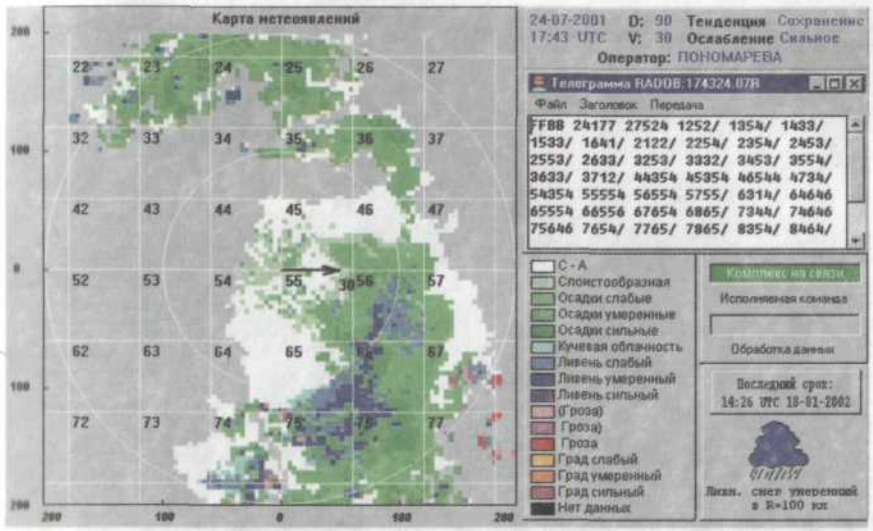

Рис. 6.2.7. Образец телеграммы в коде RADOB.

Рис. 6.2.8. Журнал регистрации событий АМРК «Метеоячейка».

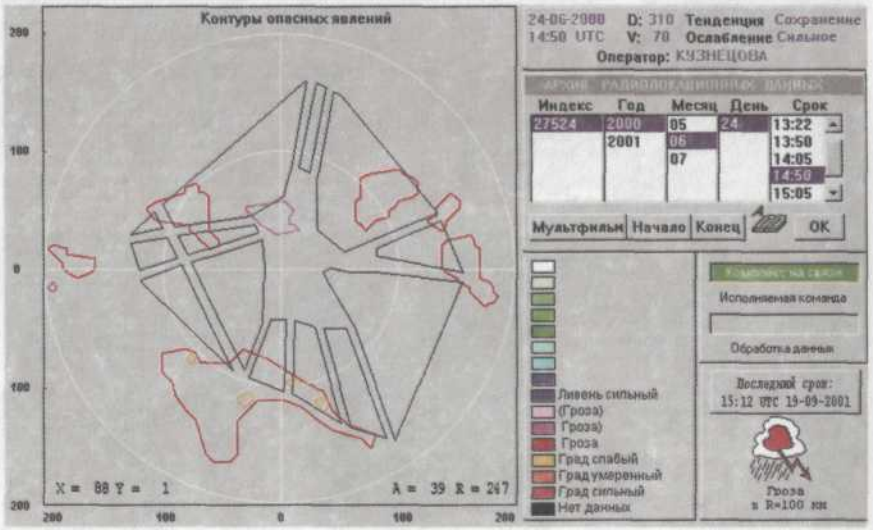

Рис. 6.2.9. Карта контуров опасных явлений с планом воздушной зоны.

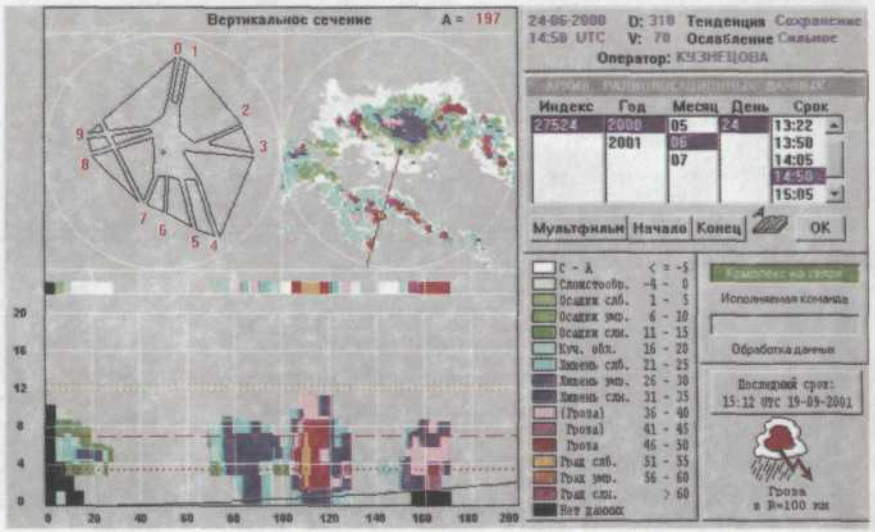

Рис. 6.2.10. Вертикальное сечение по выбранному азимуту (A = 197°).

6.2.5. Специализированные рабочие станции

В состав АМРК может входить различный набор специализированных рабочих станций. Конкретная конфигурация определяется заказчиком. Передача данных от центральной системы на рабочие станции может выполняться по локальной вычислительной сети или по телефонным каналам связи. Рабочие станции отличаются друг от друга объемом и формой представления информации. В настоящее время на сети АМРК работают следующие специализированные рабочие станции:

рабочая станция синоптика-консультанта летного состава,

рабочая станция синоптика-консультанта диспетчерского состава (синоптика РЦ),

рабочая станция синоптика-прогнозиста АМСГ (АМЦ),

рабочая станция синоптика-прогнозиста ЦГМС,

рабочая станция руководителя полетов АС УВД,

рабочая станция техника-метеоролога АМСГ,

рабочая станция оперативного дежурного МЧС.

При большом числе рабочих станций передача данных выполняется через связной сервер «МетеоТелекс». Специальное программное обеспечение связного сервера АМРК позволяет одновременно работать с 18 каналами связи, включая скоростные каналы с протоколом TCP/IP-socket.

6.2.6. Функциональные возможности АМРК «Метеоячейка»

1. АМРК «Метеоячейка» обеспечивает пространственное разрешение 128×128 элементов по горизонтали и 15 слоев по вертикали. Размер элемента пространственного разрешения по горизонтали составляет от 1 до 4 км, по вертикали – от 0,5 до 1,5 км. Разрешение в стандартном режиме штормоповещения – 100×100 элементов по горизонтали с размером элемента 4×4 км и 11 слоев по вертикали с толщиной слоя 1 км.

2. Согласно техническим условиям на АМРК, стандартный режим работы АМРК автоматический с интервалом от 10 до 180 мин.

3. Интенсивность осадков на АМРК измеряется в каждый срок наблюдений и отображается для потребителей по элементам площади 4×4 км. Стандартные градации интенсивности осадков приведены в табл. 6.2.1.

При наличии специальных требований заказчика градации настраиваются в соответствии с этими требованиями.

4. Предусмотрен расчет количества осадков за любой выбранный интервал времени. 15 градаций количества осадков (мм) заданы в следующих интервалах:

• ≤ 0,5 • 0,6–1,0 • 1,1–2,0 • 2,1–3,0 • 3,1–5,0 • 5,1–10,0 • 10,1–20,0 • 20,1–30,0 • 30,1–40,0 • 40,1–50,0 • 50,1–60,0 • 60,1–70,0 • 70,1–100,0 • 100,1–150,0 • > 150,0.

Таблица 6.2.1

Стандартные градации интенсивности осадков

Жидкие осадки		Твердые осадки	
мм/ч	интенсивность	мм/ч	интенсивность
0,5–2,9	Слабые	0,02–0,1	Слабые
3,0–25,0	Умеренные	0,11–1,0	Умеренные
25,1–140,0	Сильные	> 1,0	Сильные
> 140,0	Очень сильные		

Программное обеспечение предусматривает возможность использования любых вариантов градации как по интенсивности, так и по количеству осадков в соответствии с требованиями потребителей информации АМРК.

Сумма осадков рассчитывается за любой заданный интервал времени по указанным выше градациям для элементов площади 4×4 км, например за 1, 3, 6, 12 ч и т.д. Функция расчета количества осадков предусмотрена как на центральной системе АМРК «Метеоячейка», так и на рабочих станциях (рис. 6.2.2).

5. Определяется максимальная для каждой ячейки представления высота верхней границы радиоэха с дискретностью 250 м в диапазоне 0–20 000 м.

6. На каждой рабочей станции АМРК «Метеоячейка» пользователь имеет возможность получить распределение радиолокационной отражаемости по 11 горизонтальным сечениям с шагом 1 км для каждой ячейки 4×4 км для территории 400×400 км.

7. Явления погоды и формы облачности определяются на АМРК «Метеоячейка» по заданным алгоритмам распознавания. Алгоритмы настраиваются отдельно для каждого пункта установки по результатам сопоставления радиолокационной и наземной информации. Основная настройка алгоритмов выполняется в течение первого года эксплуатации. В процессе дальнейшей эксплуатации ежегодно оценивается качество распознавания и при необходимости выполняется корректировка алгоритмов.

Контроль оправдываемости распознавания опасных явлений погоды выполняет инженер-радиометеоролог АМРК путем сопоставления радиолокационной и наземной информации.

В результате применения алгоритмов распознавания информация об опасных явлениях и формах облачности отображается на экране ПЭВМ в виде карты метеоявлений (рис. 6.2.3).

Метеоявления отображаются по 16 градациям и зависят от сезона наблюдений и вида осадков. Например, для летнего сезона наблюдений и жидких осадков используются следующие градации метеоявлений: 1) облачность верхнего и среднего яруса С–А, 2) слоистообразная облачность, 3) осадки слабые, 4) осадки умеренные, 5) осадки сильные, 6) кучевая облачность, 7) ливень слабый, 8) ливень умеренный, 9) ливень сильный,

10) гроза с вероятностью 30–70 %, 11) гроза с вероятностью до 90 %, 12) гроза с вероятностью >90 %, 13) град слабый, 14) град умеренный, 15) град сильный, 16) отсутствие радиоэха. При выводе карты метеоявлений выделяются зоны шквалистого усиления ветра со скоростью более 15 м/с.

8. После каждого цикла наблюдений на основе одного из вариантов кросскорреляционного метода (см. главу 8) производится расчет скорости и направления перемещения облачной системы. Для достоверного расчета этих характеристик период между сроками наблюдений не должен превышать 30 мин.

9. Большое разнообразие требований потребителей информации АМРК к формам ее представления и средствам доставки обусловило большое количество форматов представления данных МРЛ. В настоящее время данные могут быть переданы потребителям в следующих форматах.

Цифровой формат представления данных. Для передачи данных потребителям может быть использован один из следующих кодов:

код RADOB для передачи в центр сбора с целью составления стыкованных карт МРЛ;

код BUFR для передачи по сети Росгидромета потребителям;

код, согласованный с заказчиком, для передачи в автоматизированные системы управления воздушным движением;

код ИРАМ для передачи на рабочие станции АМРК.

Графический формат представления данных для просмотра на экране ПЭВМ. Любые формы представления информации на экране рабочей станции АМРК могут быть переданы потребителям в виде изображений в одном из следующих форматов:

формате BMP для передачи и последующего просмотра данных АМРК «Метеоячейка» любыми стандартными программными средствами, используемыми в среде ОС Windows 95/98/NT/2000;

формате T4 для передачи и просмотра при наличии специального программного обеспечения.

Графический формат представления данных для вывода на печать. Любые формы представления информации как на экране центральной системы АМРК «Метеоячейка», так и на экране рабочей станции АМРК могут быть напечатаны на матричном, струйном или цветном лазерном принтере в следующем виде:

поле соответствующего вида информации (метеоявлений, отражаемости, высоты верхней границы радиоэха, интенсивности осадков и т.д.);

бланк-карта МРЛ.

10. Для передачи данных потребителям используются следующие протоколы передачи данных.

Внутренний протокол ИРАМ, обеспечивающий передачу информации по телефонным линиям связи с гарантированной доставкой данных. Скорость передачи определяется качеством линий связи. Этот протокол

используется при передаче радиолокационной информации с центральной системы АМРК на рабочие станции пользователей.

Телеграфный протокол, обеспечивающий передачу информации по телеграфным линиям связи. Скорость передачи составляет 50 или 100 бод. Этот протокол используется при передаче радиолокационной информации в коде RADOB с центральной системы АМРК «Метеоячейка» в сеть АСПД Росгидромета.

Протокол TCP/IP-socket для передачи данных по ведомственной сети МЕКОМ Росгидромета.

Протоколы для передачи данных в автоматизированные системы управления воздушным движением.

11. Циркулярная передача данных и передача данных по запросу (режим «запрос–ответ») используются для передачи данных на рабочие станции пользователей.

12. Разработано программное обеспечение для построения «стыкованных карт» МРЛ (карта метеоявлений приведена на рис. 6.2.4) по территории Северо-Кавказского районного центра УВД «Стрела» на специализированной рабочей станции АМРК «Метеоячейка», предназначенной для получения радиолокационных данных от различных МРЛ и их последующего объединения.

13. Вся информация АМРК «Метеоячейка» может быть использована для проведения контроля за активными воздействиями в районе установки МРЛ-5. Такой режим работы применяется на АМРК в Кишиневе с 1996 г. противоградовой службой Республики Молдова.

14. АМРК «Метеоячейка» обеспечивает дистанционное управление работой МРЛ с использованием аэродромных кроссовых линий связи при удалении центральной системы от МРЛ на любое необходимое расстояние.

15. Согласно требованиям НМО ГА-95, в АМРК реализован режим архивации радиолокационных данных на жестком диске ПЭВМ за период от 30 дней и более. Архив используется инженером-радиометеорологом АМРК «Метеоячейка» для дальнейшей работы (например, для сопоставления данных наземных метеостанций об опасных явлениях с данными АМРК с целью определения оправдываемости опасных явлений по АМРК для оценки работы комплекса). Режим архивации реализован также на рабочих станциях АМРК «Метеоячейка», с тем чтобы потребитель радиолокационной информации сам принял решение о необходимости использования данных для решения своих конкретных задач.

Как на центральной системе АМРК, так и на ее рабочих станциях реализован режим удаления архивов по мере необходимости.

Срок хранения архива реально ограничен только объемом жесткого диска ПЭВМ.

16. На рабочих станциях АМРК реализована возможность просмотра текущего прогноза и штормовых предупреждений, поступивших по каналам связи. Кроме того, АМРК обеспечивает:

на рабочих станциях (например, у синоптика-консультанта или синоптика-прогнозиста) возможность получения текущего прогноза погоды для заданных пунктов в виде таблицы со списком метеостанций, расположенных в радиусе 200 км от МРЛ (рис. 6.2.5). В прогнозе указывается время начала или окончания осадков любой интенсивности или других опасных явлений погоды (ливень, гроза, град, шквал) по требованию потребителей;

построение таблицы «Штормоповещение», в которой в полярных координатах указывается местоположение очагов опасных явлений погоды, расположенных в радиусе 200 км от МРЛ (рис. 6.2.6); вывод текста штормпредупреждений по данным АМРК для синоптиков АМСГ; вывод текстов прогнозов, штормовых оповещений и предупреждений в кодовых формах TAF, SPECI, WAREP, SIGMET, AIREP.

17. На рабочей станции синоптика-прогнозиста реализована возможность просмотра текущего штормового состояния региона в виде карты, обновляющейся в режиме поступления штормовой информации по каналам связи, и данных штормового кольца в виде текстов телеграмм. Эта информация дополняет радиолокационные данные и обеспечивает необходимую полноту и оперативность штормовой информации.

Для расчета оправдываемости ряда расчетных методов прогноза используются радиолокационные данные наряду с другими доступными видами информации.

Важное место в повышении эффективности гидрометеорологического обеспечения занимает сверхкраткосрочное (до 6 ч) прогнозирование. Радиолокационные данные, обладающие высоким пространственно-временным разрешением, используются для решения задач обнаружения и слежения за полями осадков и опасными явлениями погоды, связанными с кучево-дождевой облачностью.

Для прогноза возникновения и оценки тенденции развития существующих локальных опасных явлений погоды подсеточного масштаба на рабочей станции синоптика-прогнозиста «МетеоЭксперт» имеется возможность прогнозирования таких явлений, как грозы, град, шквал, обледенение, туман, гололед, низкая облачность, ветер, температура, осадки с использованием численных моделей пограничного слоя атмосферы и конвективного облака. При этом в качестве исходных данных могут использоваться как фактические данные, так и прогностические поля метеорологических величин, полученные по результатам расчетов с использованием региональной модели.

6.2.7. Дополнительные возможности

АМРК «Метеоячейка» как метеооборудование аэропорта и одновременно система для единой многофункциональной сети автоматизированных МРЛ Росгидромета обеспечивает:

проведение автоматизированной калибровки измерительных трактов комплекса «Метеоячейка»;

возможность постоянного контроля параметров АМРК в допусковом режиме, что является особенно актуальным при дистанционном управле-

нии МРЛ;

постоянное информирование справочной системы о сбоях при работе комплекса, что позволяет оперативно реагировать и устранять неполадки в работе АМРК «Метеоячейка»;

при необходимости оперативное изменение параметров обзора, таких как угол места на любом обороте, число оборотов антенны при обзоре, скорость по азимуту при обзоре и многих других;

автоматический расчет и ввод поправок на ослабление радиоволн в осадках и газах атмосферы;

контроль с центральной системы АМРК за передачей и поступлением радиолокационных данных на абонентские пункты независимо от их удаления от центральной системы АМРК;

реализацию функции вывода на печать бланк-карты МРЛ за любой срок наблюдений с различными «подложками» (план воздушной зоны, рельеф местности, метеостанции, административная карта) на ЦС АМРК и на абонентских пунктах;

архивацию телеграмм в коде RADOB (рис. 6.2.7);

автоматическое заполнение «Журнала регистрации событий АМРК «Метеоячейка», в котором фиксируются все действия штата МРЛ и контрольная информация функционирования комплекса; журнал, так же как и радиолокационный архив, хранится не менее 30 сут; его можно просмотреть при анализе неисправностей и для контроля работы операторов АМРК (рис. 6.2.8);

ввод данных метеостанций об опасных явлениях погоды и сопоставление данных ГМС об опасных явлениях с данными АМРК;

вывод на печать результатов сопоставления;

запись и дополнение файла местников в реальном времени, а также его корректировка по архивным данным;

определение видимости в зоне осадков, приближающейся к аэропорту;

вывод контуров опасных явлений погоды на экран ПЭВМ (рис. 6.2.9);

вывод карты скорости шквалов;

вывод карты вертикального сечения радиоэха в заданном азимуте или по выбранной воздушной трассе (рис. 6.2.10);

вывод карты обледенения в заданном азимуте или по выбранной трассе;

программное обеспечение для исключения помех от работающих наземных и самолетных РЛС.

В табл. 6.2.2 приведены технические характеристики АМРК «Метеоячейка».

Таблица 6.2.2

Технические характеристики АМРК «Метеоячейка»

Технические характеристики	Единица измерения	Пределы измерения
Обзор пространства		
Продолжительность цикла обзора	мин	7
Скорость вращения антенны	об/мин	6 ± 0,5
Число углов обзора в цикле (от 0 до 85°)		42
Точность установки вертикального угла	градусы	по ТУ на МРЛ-5
Автоматическое включение и выключение МРЛ-5 в режиме «Дежурство»		Предусмотрено
Преобразование радиолокационных сигналов		
Число разрядов АЦП		8
Уровень видеосигнала на входе АЦП	В	0,0–2,5
Амплитуда импульса синхронизации	В	4
Протяженность элементарных ячеек дальности	м	250
Число интервалов дальности		1024
Шаг интегрирования по дальности	м	1000
Число осредняемых импульсов в режиме 2 мкс		8
Точность измерения параметров облаков		
Радиолокационная отражаемость не более	дБ	±1
Точность измерения дальности	м	±250
Время измерения параметров комплекса	с	1
Вертикальный профиль измеряемых параметров в любом азимуте и по трассам		Предусмотрено
Отображение горизонтальных сечений		
Число слоев по высоте		12 (11+H_{max})
Число основных цветовых градаций		16
Масштаб изображения	км	200, 100
Время вывода матрицы 100×100 ячеек	с	1 ± 0,5
Отображение вертикальных сечений		
Шаг по азимуту	градусы	1,0
Число цветовых градаций		16
Время вывода	с	1
Время перехода от одного сечения к другому	с	1
Распознавание явлений погоды		
Число категорий (гроза, град, ливень, обложные осадки, облака, шквал, смерч)		10
Время отображения карты явления погоды	с	1
Оправдываемость распознавания явлений погоды по сравнению с данными наземных метеостанций	%	Не ниже 90
Определение скорости и направления перемещения зон опасных явлений		Предусмотрено

Продолжение табл. 6.2.2

Режим измерения осадков		
Интенсивность осадков по 19 градациям		Каждый цикл обзора
Накопленный слой осадков за интервал	ч	1, 3, 6, 12 и далее любой
Возможность изменения алгоритмов измерения осадков		Предусмотрена
Контроль за эффективностью активных воздействий		
Оценка изменения радиолокационных параметров облачности в районе и в процессе воздействия		Предусмотрена
Документирование и архивация информации		
Архивация радиолокационной информации		Предусмотрена на срок не менее 30 сут
Возможность работы с архивом данных		Предусмотрена в любое удобное для оператора время
Вывод на печать необходимой информации		Предусмотрен
Режим анимации		Предусмотрен за любой срок

6.3. Обзорный доплеровский метеорологический радиолокатор WSR-88D Nexrad

Приведенные здесь сведения о WSR-88D основаны на многочисленных публикациях в зарубежной и отечественной научной периодике [4, 5, 10, 13, 15, 18]. Основные его характеристики приведены в табл. 6.1.2.

WSR-88D-S (weather surveillance radar – 1988 Doppler) разработан и изготовляется фирмой Enterprise Electronic Corporation (EEC) в США. WSR-88D с длиной волны 10,7 см (полоса *S*) является основным радиолокатором оперативной сети, созданной по национальной программе США NEXRAD. Он поставляется на сеть NEXRAD с 1991 г.

В отличие от других МРЛ, разработанных до 1988 г., WSR-88D предназначен для наблюдений и при ясном (безоблачном) небе. Таким образом, его по праву можно назвать первым всепогодным МРЛ.

Энергетические параметры WSR-88D его разработчики определяли исходя из требований регистрации отраженных сигналов от ясного неба в ближней зоне от радиолокатора в пределах пограничного слоя.

В WSR-88D для зондирования ясного неба используется зондирующий импульс длительностью 2 мкс. Такая длительность наряду с сужением полосы приемника обеспечивает энергетический выигрыш порядка 10 дБ, а с учетом длительного когерентного накопления в процессе медленного сканирования антенны суммарный выигрыш составляет 20–25 дБ по сравнению с основным режимом работы WSR-88D.

Отражение в обратном направлении происходит на турбулентных неоднородностях показателя преломления воздуха с пространственным масштабом, равным половине длины волны излучения. Если половина длины волны излучения меньше внутреннего масштаба турбулентности, то обратного рассеяния на этой длине волны практически не происходит. Таким образом, для объяснения отражений от ясного неба привлекается известный в оптике принцип Вульфа–Брэгга (принцип дифракционной решетки).

Удельная эффективная площадь рассеяния (ЭПР) η турбулентных неоднородностей выражается формулой [3]

$$\eta(\lambda) = 0{,}38\, C_n^2 \lambda^{-1/3}, \qquad (6.3.1)$$

где λ – длина волны, C_n^2 – структурная постоянная показателя преломления воздуха (м$^{-2/3}$). Оценка величины η для λ = 10,7 см приведена в табл. 6.3.1 [3].

Таблица 6.3.1

Характерные значения удельной ЭПР η и отражаемости Z для турбулизованных зон различной интенсивности [3] на λ = 10,7 см

Интенсивность турбулентности	C_n^2 м$^{-2/3}$	η м$^{-1}$	Z (дБZ)
Слабая	$6\cdot10^{-17}$	$4{,}79\cdot10^{-17}$	–46,4
Умеренная	$2\cdot10^{-15}$	$1{,}60\cdot10^{-15}$	–31,2
Сильная	$3\cdot10^{-13}$	$2{,}39\cdot10^{-13}$	–9,4

Из таблицы видно, что отражаемость зон сильной турбулентности ясного неба по порядку соответствует отражаемости слаборазвитых облаков без осадков.

Однако опыт практического применения WSR-88D [18] показал, что в теплый сезон в чистом воздухе доминирует рассеяние, обусловленное насекомыми, переносимыми ветром. В этих ситуациях отраженный сигнал находится в диапазоне от –5 до 20 дБZ, а иногда в линиях конвергенции превышает 30 дБZ. Для дневного времени и температуры воздуха выше 10 °С, при которой начинается активность насекомых, отраженный сигнал от ясного неба можно использовать для оценки ветра. Векторы ветра получаются примерно через каждые 7 км.

6.3.1. Структура WSR-88D

WSR-88D состоит из трех основных составных частей: метеорологической радиолокационной станции (МРЛ), командно-диспетчерского пункта (КДП) и абонентских пунктов удаленных пользователей (АПУП) (рис. 6.3.1).

В свою очередь в состав МРЛС входят антенно-волноводная система, приемопередатчик, а также аппаратура первичной обработки радиолокационной информации. МРЛС является полностью автоматизированной необслуживаемой составной частью комплекса, управляемой дистанционно с КДП. Антенна с радиопрозрачным укрытием может монтироваться на вышке, башне или крыше здания. Приемопередатчик с аппаратурой первичной обработки размещается в специальном контейнере, который может транспортироваться и перемещаться на открытой местности вне помещения. КДП МРЛС размещается в здании и соединяется с МРЛС высокоскоростной линией связи, в качестве которой может быть использован высокочастотный кабель, оптоволоконная или радиорелейная линия. Основной составной частью КДП является ЭВМ, в функции которой входят управление радиолокатором и тестирование работы комплекса, прием и вторичная обработка радиолокационной информации, представление результатов обработки на цветных индикаторах, архивация и передача информации удаленным пользователям. Удаленные пользователи, оснащенные персональными компьютерами, могут получать интересующую их информацию в интерактивном режиме с КДП по телефонной линии связи.

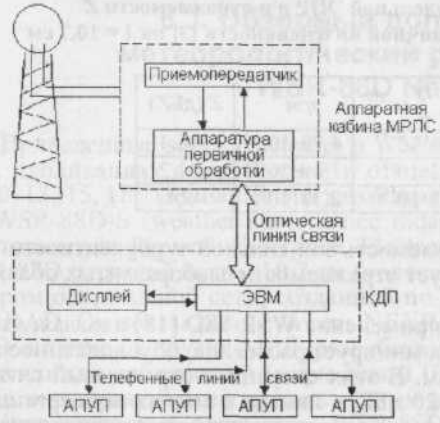

Рис. 6.3.1 Функциональная схема доплеровского автоматизированного радиолокационного комплекса [5].

Скорост изм. чр R < 120 км.; однозн. изм. ск ±50 м/с

6.3.2. Основные технические характеристики

Режим работы и схемы обработки. *Дальность действия WSR-88D* в режиме измерения радиолокационной отражаемости составляет 450 км, хотя термин «измерение» на таких удалениях, когда пространственное разрешение составляет 8 км, а интервал высот до 16 км находится в зоне геометрической тени за счет кривизны Земли, не вполне соответствует действительности. Более правильно было бы говорить об обнаружении очень мощных гроз. О количественных измерениях можно говорить в диапазоне дальности 256 км. Дальность действия в режиме измерения скорости составляет 120 км. Точность измерения скорости в пределах 1 м/с гарантируется лишь на расстоянии до 110–120 км, а на больших расстояниях достоверность информации, получаемой в канале скорости, существенно ниже.

Интервал однозначного измерения скорости составляет ±50 м/с, что вполне достаточно для обнаружения самых сильных шквалов и подавляющего большинства смерчей.

Среднеквадратическая погрешность определения отражаемости σ_Z = = 1 дБ. Среднеквадратическая погрешность определения радиальной скорости и ширины спектра скоростей при отношении сигнал/шум более 3 дБ равна 1 м/с.

Аппаратура первичной обработки (АПО) обеспечивает обработку сигнала в следующих трех режимах радиолокационного обзора:

1) в режиме измерения отражаемости при быстром темпе обзора пространства (~ 6 об/мин);

2) в режиме измерения отражаемости, средней скорости и ширины спектра при умеренном темпе обзора (~ 2 об/мин);

3) в режиме измерения отражаемости, средней скорости и ширины спектра при медленном темпе обзора (~ 0,1…0,2 об/мин) для работы по слабым сигналам от гидрометеоров и ясного неба.

Во всех трех случаях может происходить как азимутальное, так и угломестное сканирование антенным лучом с вышеуказанными скоростями.

АПО предназначена для оценки радиолокационной отражаемости Z, средней доплеровской скорости $v_д$ и среднеквадратической ширины доплеровского спектра скоростей σ_v в сферической системе координат с разрешением 250 м×1° в темпе поступления информации. Измерение отражаемости происходит в интервале дальностей до 256 км с разрешением по лучу 0,25 км и в интервале дальностей 512 км с разрешением по лучу 0,5 км; таким образом, число обрабатываемых элементов дальности по лучу при измерении отражаемости составляет 1024. Измерение $v_д$ и σ_v осуществляется до удалений 128 км с разрешением 0,25 км, т.е. в 512 каналах дальности. В АПО обеспечивается расчет отношения сигнал/шум, устранение неоднозначности по скорости, подавление сигналов местных предметов, формирование управляющего сигнала быстродействующего АРУ.

В состав АПО входят как аппаратные, так и программные средства обработки. К аппаратным средствам относятся цифровой интегратор, осуществляющий осреднение огибающей отраженного сигнала на выходе логарифмического приемника в канале измерения отражаемости, и модифицированный пульспарный процессор, действующий в канале измерения скорости и предназначенный для оценки компонентов комплексного межпериодного коэффициента корреляции в соответствии со схемой метода парных импульсов [3], а также для оценки нескольких гармоник доплеровского спектра вблизи нулевой частоты. К программным средствам относится совокупность микропроцессоров, обеспечивающих расчет моментов доплеровского спектра на основе комплексного коэффициента корреляции с учетом режекции сигналов от местных предметов и устранения неоднозначности по скоростям.

Вычислительный комплекс КДП обеспечивает прием, накопление и вторичную обработку метеорологической радиолокационной информации, классификацию метеоявлений по типам, контроль за режимом обзора пространства, архивацию результатов классификации метеоявлений, документирование результатов классификации, проверку работоспособности и тестирование комплекса, выдачу метеорологической информации внешним потребителям.

Всю совокупность информационных продуктов, образующихся на выходе системы вторичной обработки, можно условно подразделить на базовые и производные.

К базовым продуктам относятся карты радиолокационной отражаемости, радиальной скорости и ширины спектра в любом заданном горизонтальном, вертикальном или коническом сечениях. Это тот минимальный объем информации, который требуется на выходе автоматизированного доплеровского метеорологического радиолокатора. Получение базового информационного продукта предусматривает преобразование сферических координат в декартовы, расфасовку информации, поступающей из АПО, в стандартные ячейки представления, осреднение Z, v, σ_v в пределах ячеек представления и формирование из объемного массива первичных данных любого сечения, отображаемого на цветном индикаторе КДП.

Производные продукты – это информация, получаемая путем обработки объемного массива данных об отражаемости, радиальной скорости и ширине доплеровского спектра с целью формирования критериев опасности явлений и оценки метеорологических параметров, предназначенных непосредственно для использования потребителем. Перечень производных информационных продуктов и объем соответствующего математического обеспечения могут наращиваться в зависимости от конкретных нужд потребителя, возможностей ЭВМ КДП, степени проработанности алгоритмов, конкретных климатических особенностей региона и т.п.

Процесс вторичной обработки радиолокационной доплеровской информации разделяют на несколько стадий. В наиболее интенсивном по потоку информации доплеровском режиме обзора информация на КДП поступает порциями – примерно 2 кбайт каждые 90 мс, что соответствует

накоплению данных на одном луче с пространственным разрешением по дальности 250 м и по азимуту 1°. Обзор пространства осуществляется последовательно при 14 углах места (0,5; 1,5; 2,5; 3,5; 4,5; 5,5; 6,5; 8; 9,5; 11,5; 13,5; 15,5; 17,5 и 19,5°), что занимает 7 мин при скорости вращения 2 об/мин.

На первой стадии вторичной обработки происходит преобразование сферических координат в декартовы и расфасовка информации в стандартные декартовы ячейки представления, а также расчет радиальных и азимутальных градиентов радиальных доплеровских скоростей $\partial v/\partial r$ и $\partial v/\partial\theta$ как разности значений v в соседних элементах разрешения по дальности и по азимуту. Аналогичные операции производятся для второго луча и так далее по мере обзора пространства. Таким образом, в процессе обзора осуществляется текущее осреднение величин Z, v, σ_v, $\partial v/\partial r$, $\partial v/\partial\theta$ по элементам разрешения, оказавшимся в пределах стандартных декартовых ячеек разрешения. При этом часть первичной информации о радиальных скоростях сохраняют в сферической системе координат, по крайней мере для одного из азимутальных разрезов, поскольку впоследствии для реализации некоторых алгоритмов, например VAD, удобнее работать в сферической системе координат.

На второй стадии вторичной обработки формируются производные информационные продукты. Карты высоты радиоэха, максимальной отражаемости, осадков получаются путем обработки объемного массива данных о радиолокационной отражаемости на декартовой сетке аналогично тому, как это делается в системах автоматизированной обработки данных некогерентного метеорологического радиолокатора.

Режекция сигналов местных предметов в канале скоростей, осуществляемая в WSR-88D во втором и третьем режимах, позволяет заметно повысить точность измерения осадков при использовании известного соотношения Z–I (где I – интенсивность осадков), по крайней мере в тех элементах разрешения, где отношение мощности сигнала от местных предметов к мощности сигнала, отраженного от метеообъекта, не превышает 20 дБ. Скорость и направление перемещения зон радиоэха определяется по объемному массиву данных об отражаемости путем корреляционного анализа изображений, снятых в последовательные моменты времени. При этом наличие информации о доплеровских скоростях может повысить качество диагноза и сверхкраткосрочного прогноза перемещения облаков или зон, связанных с опасными явлениями.

Особенности WSR-88D. Обзорный доплеровский метеорологический радиолокатор WSR-88D разработан с учетом оперативного опыта успешной работы с серийными метеорологическими радиолокаторами WSR-74 и WSR-81, которые были установлены более чем в 60 странах мира. Он сделан полностью на полупроводниках, за исключением магнетрона, тиратрона и ЭЛТ, и обеспечивает чрезвычайно высокие надежность и работоспособность [13]. Радиолокатор WSR-88D отличается следующими особенностями:

доплеровский режим и режим измерения интенсивности;

автоматическое тестирование работы;
подробное диагностическое тестирование рабочих характеристик;
программируемая чувствительность к дождю, льду и снегу;
подавление местников до –27 дБ;
шесть калиброванных интенсивностей дождя с выбором цвета по желанию пользователя;
девять калиброванных значений скорости от 0 до ±50 м/с в режиме вобуляции или от 0 до ±16 м/с на одной частоте посылок;
шесть калиброванных значений турбулентности.

Приемопередатчик. В передатчике использован долговечный коаксиальный магнетрон, вырабатывающий микроволновую энергию большой мощности, излучаемую радиолокатором. Частота излучения легко устанавливается кнопкой настройки.

Процессор видеосигнала. Видеопроцессор в цифровом виде обрабатывает логарифмические видеосигналы и сигналы с выхода приемопередатчика с определением фазы I и квадратуры Q. Для получения сигналов интенсивности дождя в логарифмический видеосигнал вводится поправка на дальность (временная автоматическая регулировка усиления, ВАРУ). Видеосигналы I и Q обрабатываются методом пульспарной обработки импульсов, в результате чего получается средняя скорость и ширина спектра скоростей в нужных районах. При этом производится подавление местников по принципу нулевой скорости путем выбора фильтров потребителем.

Узел управления. Узел управления состоит из индикатора АД (амплитуда–дальность), блока управления радиолокатором и блока питания. В блоке управления радиолокатором размещена вся электронная схема управления антенной, приемопередатчиком и контроля за сигналами системы, а именно тока магнетрона, высокого напряжения, давления в волноводе, блокировки и обработки видеосигнала. Работа узла управления контролируется с помощью меню процессором радиолокационного изображения.

Для повышения чувствительности приемник имеет усилитель промежуточной частоты (30 МГц) с низким уровнем шума, смеситель, стабилизированный и когерентный гетеродины для обработки доплеровских сигналов, двухканальные усилители промежуточной частоты с логарифмической и линейной характеристиками. Система может быть укомплектована модулем BiTE (Built-in Test Equipment) для мониторинга состояния системы с генераторами стандартных сигналов.

Процессор радиолокационного изображения. Этот процессор представляет собой настольный блок с цветным ТВ монитором 19 дюймов. Простые панели управления обеспечивают простоту работы и минимум обслуживания. Этот удобный для пользователя дисплей является основным рабочим местом на WSR-88D. С помощью джойстика оператор может устанавливать курсор на экранное меню и выбирать любой рабочий режим и требуемую функцию дисплея. Этот блок обладает максимальной гибкостью и обеспечивает любой необходимый режим работы.

Интерактивная система обработки радиолокационной информации (IRIS). В большинстве случаев метеорологу требуется объемное сканирование пространства со специальной обработкой изображения. Для этого на радиолокаторах WSR-88D может применяться система IRIS. Модульная структура программных средств IRIS позволяет комбинировать программные средства по желанию пользователя. IRIS управляет радиолокатором, обеспечивает интерфейс и реально-временное представление информации. Такие базовые параметры, как средняя скорость, отражаемость и ширина спектра, автоматически выводятся на экран и записываются на диск. Для анализа информации может применяться режим воспроизведения. Модуль генератора продуктов выдает на экран пользователя необходимую для работы информацию. Аппаратные и программные средства системы IRIS созданы по принципу узлов радиолокационной сети.

Антенна и радиопрозрачное укрытие. В целях повышения надежности и экономии антенна WSR-88D закрывается отлитым из стекловолокна колпаком. Колпак защищает от ветровой и ледяной нагрузки, а также от различных веществ, содержащихся в окружающей среде. Для обеспечения легкости и долговечности антенная колонка сделана из анодированного литого алюминия. Это уменьшает нагрузку на привод, на вышку, а значит, повышает надежность и снижает требования к размещению.

Технические характеристики WSR-88DS (не вошедшие в табл. 6.1.2).

Поляризация – линейная горизонтальная
Движение по азимуту от –2 до 90° при скорости 0–15 °/с
Точность ±0,2°
Рабочие режимы – ручное, автоматическое или с участием компьютера
Выходной сигнал приемника:
логарифмический (для интенсивности) 78 дБ и выше
линейный (доплеровский режим) сигналы I и Q 26–80 дБ с АРУ.
Доплеровский режим:
обработка ИКО и ИДВ методом парных импульсов
частота выборки $N \times 125$ м.
Расширение диапазона измеряемых скоростей – метод двойной ЧПИ.

6.3.3. Перечень алгоритмов и выходных продуктов WSR-88D

Схема преобразования данных. WSR-88D является в равной степени и процессором сигналов, и доплеровским радиолокатором. В подсистему вторичной обработки входит параллельный компьютер на 3280 знаков с центральным блоком обработки на 6,1 млн команд в секунду, который можно расширить при необходимости до трех таких блоков.

Обработка и архивация информации в WSR-88D многоуровневая (рис. 6.3.2) [10].

Базовые данные (или продукты первого уровня) получаются на станции сбора радиолокационных данных (RDA). Система RDA преобразует принятый сигнал в отражаемость, радиальную скорость и спектральную ширину в полярных координатах, а также архивирует эти данные на эксабайтовую ленту. Данные в полярных координатах называют продуктами второго уровня. После этого данные второго уровня передаются в генератор радиолокационных продуктов (RPG), где производятся графические продукты (третьего уровня) для их отображения в Национальной метеослужбе и передачи коммерческим поставщикам данных, а также для архивации в Национальном климатическом центре.

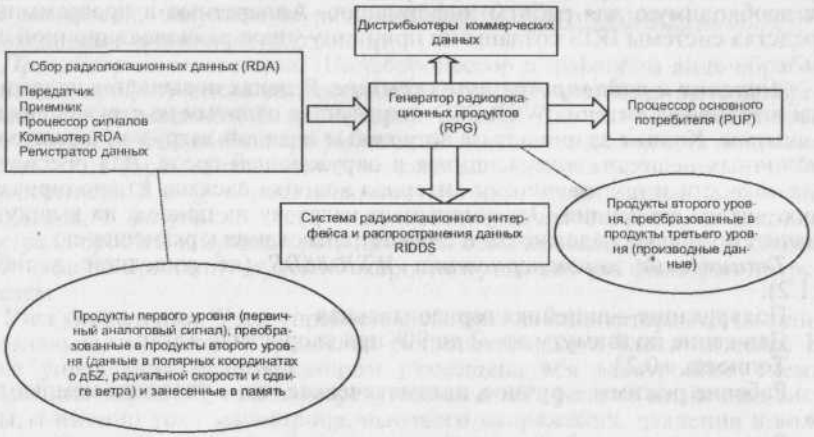

Рис. 6.3.2. Схема преобразования данных WSR-88D из данных первого уровня в данные второго уровня [10] для обработки и архивации.

Национальная лаборатория сильных штормов разработала систему радиолокационного интерфейса и распространения данных (RIDDS) как средство доступа к радиолокационным данным второго уровня и параллельного производства продуктов третьего уровня в RPG. Рабочая станция RIDDS передает каждую пачку данных второго уровня в кольцевой буфер, где формируются пакеты из нескольких пачек радиолокационных данных, затем сжимаются и ставятся в очередь на передачу. Данные передаются по линии на рабочую станцию, где разворачиваются и снова собираются в объемы второго уровня. Рабочая станция, предназначенная для обработки и представления радиолокационных объемов, копирует последние файлы второго уровня с диска и преобразует их в универсальный формат. На этом этапе алгоритм автоматического контроля качества удаляет отражения от местных предметов и корректирует смещенные скорости.

И, наконец, отредактированные данные об отражаемости и радиальной скорости билинейно интерполируются на декартову сетку (2×2×0,5 км) программой NCAR SPRINT и преобразуются в NetCDF (общий формат сетевых данных).

***Метеорологические алгоритмы, реализованные в WSR-88D*:**

1) выделение части шторма, 2) определение центроидов штормов, 3) сопровождение шторма, 4) прогноз местонахождения шторма, 5) структура шторма, 6) град, 7) мезоциклон, 8) вершины радиоэха, 9) вертикально проинтегрированная водность (VIL), 10) вероятность опасных явлений погоды, 11) сдвиг ветра, 12) индикация скорости и азимута (VAD), 13) турбулентность, 14) объемная обработка скорости (OOC), 15) предварительная обработка осадков, 16) интенсивность осадков, 17) накопление осадков, 18) критконтроль данных по осадкам, 19) признак вихря торнадо (ПВТ), 20) результаты по осадкам, 21) фронт порывов ветра, 22) поперечный ветер, 23) конвергенция/дивергенция, 24) ИКО ПВ: отражаемость и скорость, 25) потенциал наводнения.

Получаемые на WSR-88D результаты наблюдений и обработки по алгоритмам (продукты).

Основные (базовые) продукты: 1) карты отражаемости, 2) карты скорости, 3) карты ширины спектра.

Производные продукты: 4) общий сдвиг ветра, 5) контур общего сдвига ветра, 6) вершины радиоэха, 7) контур вершин радиоэха, 8) общая отражаемость, 9) контур общей отражаемости, 10) общая отражаемость слоя, 11) турбулентность слоя, 12) индекс града, 13) мезоциклон, 14) признак вихря торнадо (ПВТ), 15) структура шторма, 16) данные сопровождения шторма, 17) область слабого радиоэха («пачка слоев отражаемости»), 18) ветер на дисплее «скорость/азимут», 19) график на дисплее «скорость/азимут», 20) комбинированный момент, 21) относительная скорость шторма, 22) отображение анализа опасных явлений погоды, 23) вероятность опасных явлений погоды, 24) вертикально проинтегрированная водность (VIL), 25) накопление осадков за 1 ч, 26) накопление осадков за 3 ч, 27) общее накопление осадков за шторм, 28) поперечник.

Буквенно-цифровые продукты: 29) сообщение об опасном явлении погоды, 30) сообщение обычным текстом, 31) сообщение радиолокационным кодом.

Производные продукты матрицы данных: 32) метеоданные, опасные для авиации; 33) радиальные данные по отражаемости; 34) радиальные данные по скорости; 35) цифровые радиолокационные оценки осадков за 1 ч.

6.4. Метеорологический доплеровский радиолокатор METEOR 500 C фирмы Gematronic GmbH

Опыт практического применения доплеровских МРЛ позволил разра-

ботчикам предложить метеорологам ДМРЛ нового поколения. В них в полной мере учтен опыт эксплуатационников, практиков-метеорологов и достижения в радиоэлектронике последнего десятилетия. Из широкого спектра ДМРЛ нового поколения остановимся подробней на двух (METEOR 500 C и DSWR-2500 C/K), проспекты которых, подготовленные фирмами-изготовителями из Европы и США, позволяют сделать это с наибольшей информативностью для читателя.

6.4.1. Общая структура и основные характеристики

Метеорологический доплеровский радиолокатор METEOR 500 C состоит из следующих основных подсистем (рис. 6.4.1) [7, 14]:

антенная система CLP10 с большой точностью позиционирования;

магнетронный передатчик мощностью 250 кВт, управляемый твердотельным двухимпульсным модулятором, и ВЧ приемник с низким коэффициентом шума;

процессор сигналов ASPEN® DRX – цифровой приемник и процессор сигналов;

система управления DIRAC для сбора и контроля за параметрами ДМРЛ и радиолокационными данными, созданная на базе современной технологии управления и автоматизации;

программа RAINBOW® для создания выходных продуктов на основе последних достижений в радиолокационной метеорологии, функционирующая под управлением ОС Unix.

Основные рабочие характеристики ДМРЛ METEOR 500 C

Доплеровский режим	
Длительность импульса	0,83 мкс
Частота следования импульсов	250–1200 Гц
Индекс вобуляции	3/2, 4/3, 5/4
Разрешение по дальности и углу	125 м, ≤1°
Радиус действия	125 км
Диапазон измерения скорости	±47,8 м/с
Чувствительность на входе логарифмического узкополосного усилителя	≤ –138 дБ/Вт
Минимальная отражаемость на расстоянии 50 км	≤ –5,8 дБZ
Подавление местных помех	как правило, ≥45 дБ
Режим отражаемости	
Длительность импульса	2 мкс
Частота следования импульсов	250–550 Гц
Разрешение по дальности и углу	300 м, ≤1,0°
Максимальная дальность	≥500 км
Чувствительность (MDDS) на входе логарифмического узкополосного усилителя	≤ –142 дБ/Вт
Минимальная отражаемость на расстоянии 50 км	≤ –13,6 дБZ
Подавление местных помех	как правило, ≥45 дБ
Спецификации антенны	
Рабочая частота	5,42–5,82 ГГц
Поляризация	линейная, горизонтальная
Максимум ширины луча ДНА в точках 3 дБ	1,0°
Коэффициент усиления параболической антенны	минимум 44,5 дБ; как правило, 45 дБ
Первый уровень бокового лепестка по азимуту и углу места	максимум –28 дБ; как правило, –30 дБ
Разделение кроссполяризации	максимум –30 дБ
Диаметр отражателя (зеркала)	4,2 м
Угловой диапазон по азимуту	от 0 до 360° непрерывно
Угловой диапазон по углу места	от –3 до +180°
Скорость по азимуту и углу места	от 1 до 36 °/с
Ускорение по азимуту и углу места	максимум 20 °/с^2
Точность наведения	±0,1°
Время перехода на 2° и точность	1,5 с; ±0,1°
Характеристики радиопрозрачного укрытия антенны:	
Тип и форма секций	сэндвич, апельсиновая корка
Соединения секций	с наложением краев
Диаметр	6,7 м
Потери при передаче	максимум 0,3 дБ (в одну сторону)
Устойчивость к ветру	максимум 95 м/с
Приемопередатчик	
Пиковая мощность импульса	≥250 кВт на выходе передатчика
Коэффициент шума приемника	≤2 дБ
Эффективная ширина полосы импульсов 2 мкс	0,6 МГц ±5 %, согласованный фильтр
Эффективная ширина полосы импульсов 0,83 мкс	1,5 МГц ±10 %, согласованный фильтр
Эффективный динамический диапазон	95 дБ

Радиопрозрачное укрытие антенны представляет собой сферическую конструкцию без плоскостей, вторгающихся в полезную площадь обтекателя или создающих систематические отражения. Поверхность обтекателя гидрофобна и устойчива к солнечному облучению, пыли, граду и ветру с песком.

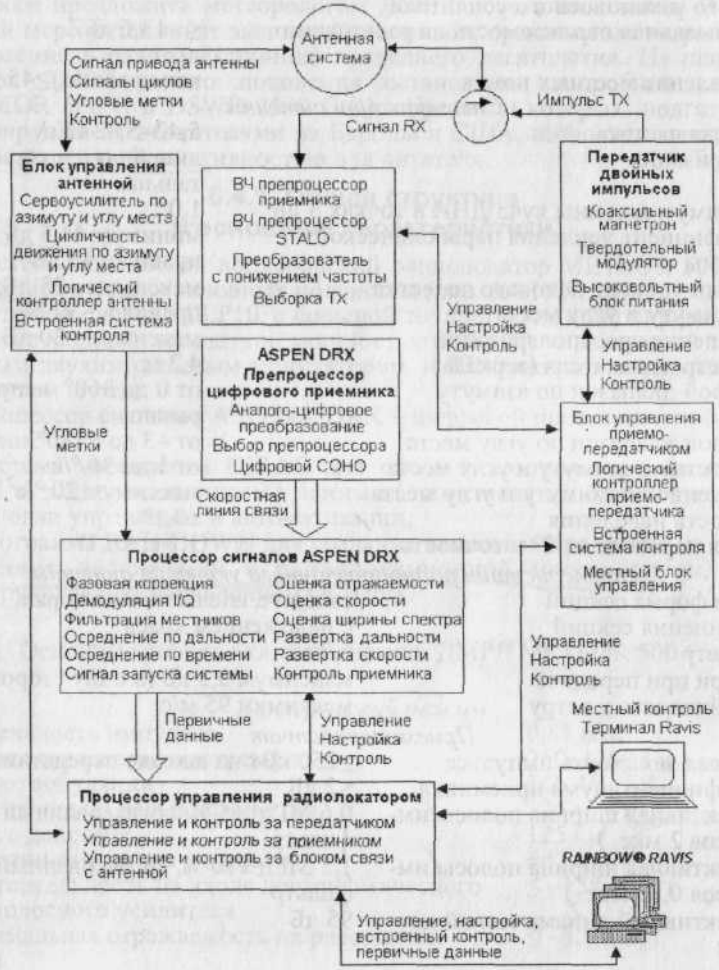

Рис. 6.4.1. Метеорологический доплеровский радиолокатор METEOR 500 C [14].

Радиопрозрачное укрытие антенны устанавливается на крыше здания или на вышке, снабжается молниеотводом и сигнальными фонарями согласно спецификации ICAO. Обтекатель укрепляется на металлическом

кольце, забетонированном в фундамент здания или установленном на металлической платформе вышки.

Передающая система состоит из коаксиального магнетрона и твердотельного модулятора с двойным импульсом. Модулятор выдает на катод коаксиального магнетрона импульс высокого напряжения. Когда превышается пороговое напряжение генерации, в лампе начинается микроволновая генерация. Энергия СВЧ колебаний из резонатора лампы отводится на антенну. Расчетная долговечность коаксиального магнетрона – около 50 000 ч.

Твердотельный модулятор состоит из конденсаторного устройства, стабилизатора зарядного напряжения, твердотельной коммутационной сборки и преобразователя импульсов.

Приемник представляет собой цифровой супергетеродин. В него входят ВЧ блок, блок цифровой выборки ПЧ и подсистема когерентного гетеродина. ВЧ блок соединен напрямую с антенным переключателем. Он усиливает принятые сигналы посредством малошумящего усилителя и преобразует их в промежуточную частоту, используя сигнал стабильного гетеродина.

Поскольку заключительный этап когерентного преобразования – фазовое сравнение – и демодуляция комплексной полосы частот (демодуляция *I/Q*) выполняются процессором сигналов, аналоговая часть приемника значительно упрощается. Благодаря большому динамическому диапазону цифрового преобразователя ПЧ логарифмический канал приемника становится ненужным.

Уменьшение уровня шума получается также за счет фильтрации полосы пропускания цифрового, а не аналогового сигнала. Эта процедура уменьшает шум квантования, вносимый аналого-цифровыми преобразователями.

6.4.2. Процессор сигналов ASPEN® DRX

Процессор сигналов ASPEN® DRX, или цифровой приемник и процессор сигналов, обеспечивает интеллектуальную связь между ВЧ аппаратурой (приемник, передатчик и антенная система) и системой генерации радиолокационных продуктов и их отображения (см. рис. 6.4.1).

Процессор сигналов ASPEN® DRX представляет собой программируемый цифровой приемник, объединенный с высококачественными цифровыми процессорами обработки сигнала с плавающей запятой, производящими обработку сигналов в реальном времени и выполняющими контрольные функции для радиолокационных приложений.

Блок ASPEN® DRX обеспечивает выполнение всех функций цифрового приемника, а также работу трех процессоров сигнала SHARC.

Процессор сигналов имеет два канала квантования ПЧ, охватывающих динамический диапазон свыше 95 дБ (до точки сжатия 1 дБ). На ка-

ждом канале имеется программируемый цифровой демодулятор и фильтр нижних частот, работающие на частоте 40 МГц. Фильтр FIR имеет до 256 режимов, по которым с большой точностью устанавливается полоса пропускания ПЧ.

Кроме того, ASPEN® DRX управляет вспомогательной системой фазовой модуляции передатчика в клистронных системах для выделения отражений предыдущего зондирования, отслеживает углы антенны для синхронизации групп данных и блокирования излучения в заданных секторах, а также управляет системой дополнительной настройки.

Блок ASPEN® DRX способен выполнять сжатие импульсов. Эта опция добавляет комплексные поперечные фильтры для отфильтрованных данных *I*/*Q* полосы видеочастот. Можно использовать до 128 комплексных отводов с интервалами 104 нс и получить разные схемы сжатия импульсов.

Плата цифровой обработки сигналов COTS VME представляет собой ряд процессоров SHARC и интерфейс двухпортовой памяти с шиной VME. Плату можно сконфигурировать с одним из 18 процессоров SHARC при максимуме 2,52 GFLOP вычислительной мощности, чего достаточно для любых условий обработки радиолокационных сигналов в будущем, и все они заключены в одной ячейке VME.

В своей основной конфигурации плата DSP содержит два чипа SHARC DSP, которые дают системе ASPEN® DRX в общей сложности 585 MFLOP вычислительной мощности. Этой вычислительной мощности достаточно для разных условий доплеровской обработки 2000 дискретов дальности при ЧСИ 1000 Гц. К плате DSP можно добавить до двух дочерних плат SHARC или другие интерфейсные модули для особых целей.

Такая конфигурация масштабируется от недоплеровской обработки сигналов только по отражаемости до полной доплеровской обработки сигналов с двойной поляризацией с извлечением отражений второго прохода и быстрой перестройкой частоты.

Обработка канала *I*/*Q* начинается с фильтрации местных помех. Имеется 16 фильтров, включая дополнительные фильтры для пользователя. Фильтры могут дополнительно программироваться по дальности или по дальности/азимуту/углу места (режим фильтрации по карте местных помех).

Затем процессор сигналов вычисляет отсчеты автоковариационной функции с интервалами R0, R1 и R2. При желании эти отсчеты интегрируются по дальности и азимуту, а затем процессор сигналов методом парных импульсов определяет мощность сигнала, среднюю скорость и ширину спектра. Оценки мощности сигнала корректируются на местные помехи путем сравнения мощности фильтрованных и нефильтрованных временных серий.

Gematronic DIRAC – это интегральная модульная конструкция, содержащая необходимое число сенсоров, осуществляющих и испытательные функции. DIRAC реализует функциональные возможности контроллера подсистем, программных модулей главного процессора управления

либо функционирует как специальный блок интерфейса человек–машина в зависимости от модели системы. Связи внутри подсистем осуществляются с помощью процессорной полевой шины PROFIBUS.

DIRAC позволяет использовать преимущества распределенных узлов управления, которые связаны между собой через TCP/IP, PROFIBUS или другой имеющийся протокол. Эта межузловая и межпроцессорная связь реализуется с помощью языка управления радиолокатором Gematronic (RCL) и мастера почтовой связи (PM).

BiTE поддерживает DIRAC в мониторинге радиолокационной системы, ее настройке, обнаружении неисправностей и в последующей защите системы. Поддерживаются также разнообразные процедуры тестирования и изолирования сбоев.

6.4.3. Управление и контроль работы радиолокатора

Все управление метеорологическим радиолокатором осуществляет радиолокационный менеджер RAINBOW® (рис. 6.4.2).

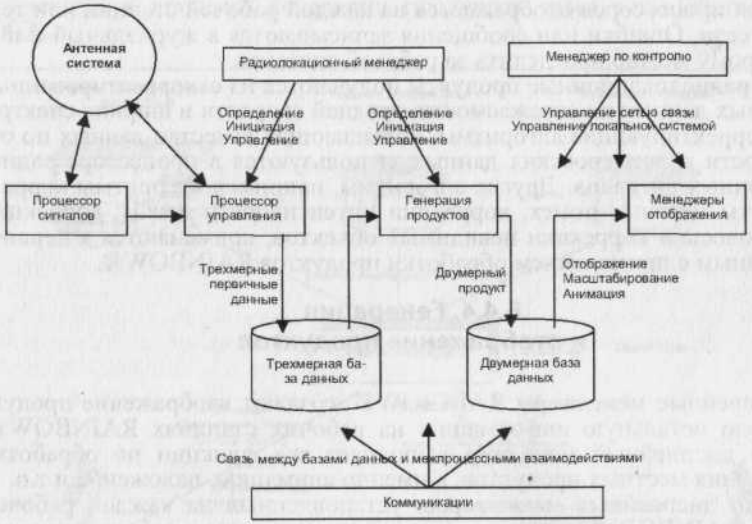

Рис. 6.4.2. Оперативная блок-схема RAINBOW® [14].

Для решения большого числа разных задач концепция обработки данных RAINBOW® при наличии процессоров на радиолокационных станциях и рабочих станций RAINBOW®, объединенных в сеть, легко конфигурируется с помощью планшетов и удовлетворяет запросы потребителей.

Нужные параметры сканирования задаются в планшете заданий на сканирование. Можно выбрать ИКО, ИДВ или сканирование объема.

Продукты, которые должны получаться из первичных данных, указываются в планшетах заказа продуктов. В этом планшете содержатся все важные параметры, которые необходимы системе для генерации продукта, а именно дальность, высота, параметры интегрирования, диапазон данных и т.д. После заполнения планшета параметры продуктов сохраняются по названию и могут быть получены в любое время.

Конфигурируемый планировщик позволяет составить временной список процессов получения продукта, которые можно запустить в указанное время. После генерации продукты передаются в указанное место, например в окно рабочей станции, на сетевой узел, в архив и т.д., а потом могут обрабатываться.

После того как все нужные продукты определены в деталях и внесены в расписание, система автоматически генерирует, распространяет и отображает нужные метеорологические, гидрологические продукты, продукты по сдвигу ветра, по предупреждению или прогнозу наводнения.

Текущее BiTE состояние метеорологического радиолокатора и его онсайтовых процессоров отображается на каждой рабочей станции или терминале сети. Ошибки или сообщения записываются в журнальный файл, по которому можно проследить за работой системы.

Все радиолокационные продукты получаются из откорректированных первичных данных по отражаемости, средней скорости и ширине спектра. Одни корректирующие алгоритмы, повышающие качество данных по отражаемости и доплеровских данных, используются в процессоре радиолокационных сигналов. Другие алгоритмы, например алгоритмы коррекции карты местных помех, коррекции интенсивности дождя, коррекции яркой полосы и коррекции невидимых объектов, применяются к первичным данным с применением обработки продуктов RAINBOW®.

6.4.4. Генерация и отображение продуктов

Дисплейные менеджеры RAINBOW® создают изображение продуктов и всю остальную информацию на рабочих станциях RAINBOW®. Каждый дисплейный менеджер выполняет все функции по обработке изображения местных продуктов, а именно анимацию, наложение и т.п.

Число дисплейных менеджеров, установленных на каждой рабочей станции RAINBOW® и на сети, ограничивается только рабочими характеристиками этих станций и составляет, как правило, от 5 до 10 на станцию. Пользователь может интерактивно работать с продуктами на месте с помощью рабочей станции RAINBOW® совершенно разными путями. Для этого служат следующие инструменты обработки изображения и продуктов:

крупный план, панорамирование, анимация для просмотра;

выбор цветовой палитры;

пороговый уровень для исключения явлений низкого уровня;

обозначение уровней данных разными цветами (дисплей изоуровней);

выбор параметров соотношения Z–I и класса осадков;

отбор параметров накопленных осадков;

анимация с выбором числа, временнóго интервала и типа продукта;

выбор наложения, ландшафта, текста, контуров;

текст, аннотация, справочник по вызову пользователя;

географическое положение, расстояние и направление от радиолокатора;

системная информация, звуковое предупреждение и пиктограммное сообщение об ошибках.

6.4.5. Конфигурация сети

Передача данных с процессора управления радиолокатором в систему RAINBOW® и на удаленные компьютеры осуществляется с помощью интерфейса Ethernet по протоколу TCP/IP. В частности, первичный материал подвергается процессу генерации продуктов через сеть Ethernet (рис. 6.4.3).

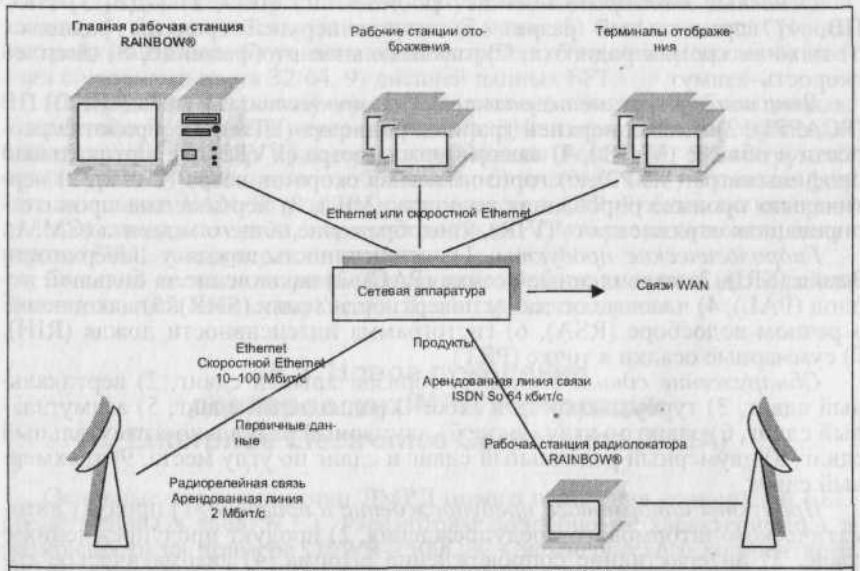

Рис. 6.4.3. Варианты передачи данных [14].

Возможны две конфигурации связи радиолокационной системы с удаленной станцией: связь с большой скоростью передачи данных более 1 Мбит/с и связь с малой скоростью передачи данных. Передача данных с большой скоростью может производиться по оптоволоконной линии, по микроволновой линии T1/E1 или по сопоставимой арендуемой линии. Такая связь позволяет передавать первичные данные в удаленные места.

Связь с низкой скоростью передачи данных обеспечивается, как правило, модемом и стандартной телефонной линией. Из-за низкой скорости передачи передаваться могут только до конца обработанные метеопродукты, так как они имеют сравнительно небольшой цифровой размер. Поэтому нужна радиолокационная рабочая станция для генерации продуктов на месте.

Аппаратура Ethernet и протокол TCP/IP обеспечивают большую гибкость. Для создания и интеграции больших сетей, состоящих из разных метеорологических датчиков (от дождемеров до спутниковых приемников), может быть использована уже существующая инфраструктура Ethernet.

6.4.6. Продукты и алгоритмы

Основные метеорологические продукты: 1) ИКО, 2) ИДВ, 3) ИКО ПВ, 4) вертикальный разрез, 5) высота верхней границы радиоэха, 6) нижняя кромка радиоэха, 7) максимальное отображение, 8) дисплей скорость–азимут.

Дополнительные метеорологические продукты: 1) псевдоИКО ПВ (PCAPPI), 2) высота верхней границы радиоэха (ETH), 3) обработка скорости в объеме (VVP1), 4) вывод флажка ветра (VVP2), 5) вертикальный профиль ветра (VVP2), 6) горизонтальная скорость ветра (UWT), 7) вертикально проинтегрированная водность (VIL), 8) вертикально проинтегрированная отражаемость (VIR), 9) отображение общего момента (CMM).

Гидрологические продукты: 1) интенсивность дождя у поверхности Земли (SRI), 2) накопленные осадки (PAC), 3) накопление за большой период (PAL), 4) часовые осадки у поверхности Земли (SHR), 5) накопление в речном водосборе (RSA), 6) гистограмма интенсивности дождя (RIH), 7) суммарные осадки в точке (PRT).

Обнаружение сдвига ветра: 1) горизонтальный сдвиг, 2) вертикальный сдвиг, 3) турбулентность в слое, 4) радиальный сдвиг, 5) азимутальный сдвиг, 6) сдвиг по углу места, 7) двумерный радиально-азимутальный сдвиг, 8) двумерный радиальный сдвиг и сдвиг по углу места, 9) трехмерный сдвиг.

Продукты штормового предупреждение и прогноза: 1) продукт автоматического штормового предупреждения, 2) продукт предупреждения о граде, 3) интерактивное сопровождение шторма, 4) автоматическое сопровождение шторма, 5) прогноз дождя, 6) сопровождение и наукастинг дождя.

Обнаружение и анализ метеорологических явлений: 1) предсказание сдвига ветра, 2) обнаружение микровзрыва, 3) обнаружение фронта порывистости, 4) алгоритм обнаружения мезоциклона.

Алгоритмы пред- и постобработки: 1) поправка на кривизну Земли, 2) поправка на ослабление в дожде, 3) обнаружение и поправка на яркую полосу, 4) поправка на блокирование луча, 5) поправка на незаполненный луч, 6) поправка на трехмерную карту местных помех, 7) офлайновый редактор трехмерной карты местных помех, 8) поправка на динамичные помехи, 9) статистический фильтр местных помех, 10) фильтр помех на карте дальности, 11) поправка на выбираемую дальность, 12) поправка на распространение волн, 13) выделение радиоэха второго прохода.

Системы координат и проекции: 1) полярный стереографический север и юг, 2) универсальный поперечный меркатор (UTM), 3) Гаусс–Крюгер, 4) меркатор.

Сети с другими датчиками: 1) SDUS, PDUS, MDD, 2) наложение данных радиолокатора на данные спутника, 3) обнаружение молний, 4) обработка и отображение дождемерных данных, 5) наложение дождемерных данных, 6) интерактивная настройка дождемера и *Z–I* радиолокатора.

Операционные утилиты: 1) кодирование и декодирование FM 94 BUFR, 2) сторожевое расписание, 3) условное расписание для опасной погоды, 4) быстродействующее простое меню, 5) отслеживание Солнца, настройка антенны, 6) утилита автонастройки, 7) монитор задач, 8) дисплей с уровнями цвета 32/64, 9) дисплей данных FFT.

Инструменты и расширения: 1) утилита-администратор базы данных, 2) архивное хранение и иерархия поиска, 3) интегрированный файловый менеджер, 4) драйвер принтера со шрифтами PostScript, 5) инструмент конфигурации удаленного отображения, 6) дисплей GIF, 7) сжатие данных для связи WAN, 8) утилита распределения FTP, 9) связь по интернету: связь между точками, передача данных FTP, пересылка почты, документы HTML на серверах интернета.

Сеть из нескольких радиолокаторов: 1) блок сетевого интерфейса, 2) центральный блок супервизора, 3) составные продукты.

6.5. Новое поколение доплеровских МРЛ корпорации Enterprise Electronics Corporation (США)

Основные характеристики ДМРЛ нового поколения корпорации EEC представлены в табл. 6.1.3. Рассмотрим подробно их характеристики и возможности на примере DSWR-2500C/K – коммерческого когерентного ДМРЛ в полосе *C*. В описании приведены сведения, содержащиеся в рекламных проспектах EEC [12].

6.5.1. DSWR-2500C/K

Радиолокатор DSWR-2500C/K предназначен для решения следующих задач:

точного анализа погоды;

обнаружения сдвига ветра и предупреждения о нем, обнаружения фронтов порывистости, метеопредупреждения на высотах полета;

точного прогнозирования погоды;

предупреждения о наводнении и паводке;

измерения сумм осадков на большой территории;

измерения сумм осадков в речных и дренажных бассейнах.

В состав DSWR-2500C/K входят антенная система с герметичным планетарным приводом пьедестала и бесщеточными приводными моторами; клистронный передатчик с прецизионным твердотельным высоковольтным модулятором с требуемой стабильностью и пиковой излучаемой мощностью 250 кВт; цифровой или аналоговый (по выбору покупателя) приемник; блок мониторинга состояния системы BiTE 2100 и набор систем полнофункционального управления системой и отображения получаемой информации.

DSWR-2500C/K обеспечивает подавление местных помех. Доплеровская обработка удаляет с экрана радиолокатора все ложные отражения и местные помехи, оставляя четкую картину дождя и ветра на самых больших удалениях. Архитектура усилителя мощности позволяет кодировать излучаемый импульс для идентификации повторных отражений.

В DSWR-2500C/K применен твердотельный модулятор, вырабатывающий импульс > 47 кВ для клистронной лампы. Высоковольтный блок создает импульсы, достаточные для генерации ВЧ импульсов длительностью 0,8 и 2,0 мкс.

В DSWR-2500 C/K имеются:

компьютерная система анализа и отображения данных *EDGE* (Enterprise Doppler graphics environment),

программа управления радиолокатором и отображения выходной первичной информации *RADSYS 3000*,

рабочие станции (абонентские пункты) *Weather Windows*.

Подсистема BiTE 2100 – это стандартный блок, обеспечивающий полный мониторинг состояния системы для операторов и облегчающий работу обслуживающего персонала. Этим целям служат графический интерфейс пользователя, управление меню (сенсорное или мышью), сенсорная автоматическая настройка системы, автоматическое аудио и визуальное предупреждение на всех оперативных станциях, процессор Pentium PC и операционная система MS Windows 9x или Windows NT. Обработка и управление с помощью BiTE – это одна из функций системы управления и отображения обслуживания RADSYS 3000.

RADSYS 3000 обеспечивает все функции управления радиолокатором и получение информации в реальном времени. Программа RADSYS 3000 полностью совместима с системой обработки первичных данных EEC

EDGE и обеспечивает возможность параллельно обработке данных выполнять отображение на экране в реальном времени первичной информации с выхода приемника. Реализованы режимы ИКО, ИДВ и режим секторного сканирования.

DSWR-2500C/K требует минимального времени и затрат на техническое обслуживание.

Технические характеристики

Частота передатчика	5600–5650 МГц
Однозначное определение максимальной скорости:	
без вобуляции	≈35 миль/ч (16 м/с)
с вобуляцией 3:2	≈70 миль/ч (32 м/с)
с вобуляцией 4:3	≈105 миль/ч (48 м/с)
Подавление местных помех	минимум –50 дБ
Тип клистрона	VKC8387
Тип модулятора тока луча	твердотельный катодный генератор импульсов
Частота следования импульсов:	
для режима *интенсивность*	250 Гц
для режима *скорость*	786, 885 или 1180 Гц
Точность определения фазы	<0,18°
Стабильность частоты	<1 части в 10^{-9}
Длительность импульса	0,8 и 2,0 мкс
Пиковая мощность	минимум 250 кВт
Коэффициент шума на входе приемника	≤3 дБ
Смесители	сбалансированные коаксиальные
Задающий генератор	синтезатор частоты с AFC (АПЧ)
Промежуточная частота	30 МГц

	Аналоговый приемник	*Цифровой приемник EDRP-8*
Процессор сигналов	ESP-7	(Enterprise digital receiver processor)
Усилители ПЧ	Логарифмический и линейный	Не нужны
Ширина полосы ПЧ		
0,8 мкс	1,5 МГц ±250 кГц	1,5 МГц ±250 кГц
2,0 мкс	0,750 МГц ±250 кГц	0,750 МГц ±250 кГц
Динамический диапазон		
логарифмический	≥90 дБ	≥100 дБ
линейный	60–90 дБ при AGC	≥100 дБ
Чувствительность		

0,8 мкс	–110 дБмВт	–110 дБмВт
2,0 мкс	–113 дБмВт	–113 дБмВт
Типы видеосигналов		
интенсивность	Логарифмический	Величина отражаемости, определяемая процессором EDRP-8
скорость	*I* (синфазная) и *Q* (с фазовым сдвигом)	Цифровая *I* & *Q*
Тип отражателя	Парабола с твердой поверхностью	
Рупорный облучатель	Стандартный прямоугольный	
Возможные диаметры антенны	Ширина луча	Коэффициент усиления антенны
12′ (3,22 м)	1,10° ± 0,10°	44 дБ
14′ (4,27 м)	1,00° ± 0,10°	45 дБ
20′ (6,10 м)	0,65° ± 0,10°	48 дБ
25′ (7,62 м)	0,55° ± 0,10°	50 дБ
Поляризация	Линейная горизонтальная, дополнительно двойная поляризация	
Боковые лепестки	≤ –25 дБ относительно основного лепестка	
Ускорение/замедление по азимуту	>15 °/с^2	
Вращение по азимуту	Непрерывно 360° по часовой стрелке или против часовой стрелки	
Точность и разрешение по азимуту и углу места	±0,1°	
Сканирование по углу места	от –2 до 90°	
Скорость движения по углу места в ручном и автоматическом режиме	от 0 до 15 °/с; до 5 сканирований в минуту	
Устройства безопасности	безопасные переключатели и блокировка дверей	
Сервоусилитель	твердотельный широтно-импульсный двухосный модулятор постоянного тока с регулируемым напряжением	

Процессор радиолокационных сигналов (RSP) EDRP-8 рассчитывает из цифровых *I* и *Q* сигналов среднюю скорость, ширину спектра, откорректированную и неоткорректированную отражаемость. Аналоговые сигналы преобразуются в цифровую форму тремя скоростными 12-битными аналого-цифровыми преобразователями.

Для ослабления сигналов от местных предметов на 50 дБ и более применяется эллиптический БИХ-фильтр четвертого порядка.

6.5.2. Программа управления радиолокатором и отображения RADSYS 3000™

Программа RADSYS 3000™ обеспечивает выполнение следующих функций:

Управление радиолокатором:

обзор, объем, сектор, точка, послойное сканирование; управление по азимуту и углу места;

дальность: для отражаемости на 30, 60, 120, 240 и 480 км, для скорости на 30, 60 и 120 км;

тип данных: отражаемость, скорость, турбулентность;

продукты: ИКО, ИДВ и ИКО ПВ; высота верхней границы радиоэха, максимум в столбе и анимация;

фоновые карты: административная и топографическая.

Отображение:

32-бит цветная графика;

разрешающая способность продукта 768×768 элементов;

просмотр, перемещение, масштабирование 16×200 м на экране;

субменю с вытеснением нижней строки, «укажи и клюнь»;

выходные данные: кодирующие устройства NTSC, PAL или HDTV; TIF, BMP, JPEG и другие форматы файлов;

дистанционное управление всеми функциями;

усовершенствованный мониторинг технического состояния системы BiTE;

архивация данных: различные форматы, включая NCAR UF;

автоматическая калибровка системы.

Аппаратура RADSYS:

процессор Pentium II,

128 MB SDRAM,

накопитель на жестких дисках 8 Гбайт,

ускоритель трехмерной видеокарты,

считывающее устройство CDROM,

CD-RW,

клавиатура,

мышь,

два последовательных порта,

порт Ethernet,

монитор 21 дюйм.

6.5.3. Программа управления радиолокатором и анализа данных EDGE™

EDGE™ представляет собой полнофункциональную программу анализа и отображения данных на базе UNIX и одновременно программу

управления радиолокатором с многофункциональными, удобными для пользователя инструментами обработки.

Радиолокационные программы EDGE™ обладают способностью к адаптации в необычных или меняющихся обстоятельствах.

EDGE™ разработана в виде модулей, пригодных для работы в распределенных сетях.

EDGE™ имеет программу гарантийного обслуживания в компьютерной промышленности с самой полной технической поддержкой по всему миру.

Аппаратура EDGE™:
128 Мбайт памяти RAM,
2 Гбайта накопителя на жестких дисках,
привод цифровой четырехмиллиметровой аудиоленты,
CDROM,
графический акселератор,
порт для сети Ethernet,
операционная система DEC UNIX,
цветной монитор 21 дюйм (1280×1024).

Функциональные характеристики аппаратуры EDGE™:
все функции управления радиолокатором;
модульная конструкция по стандартам OPEN UNIX;
управление видеопроцессором доплеровского радиолокатора;
мониторинг состояния радиолокатора в реальном времени;
полный обзор пространства;
32 цвета для отображения радиолокационных данных;
меню оператора с функцией «укажи и клюнь»;
просмотр изображения, перемещение и масштабирование;
время на анимацию;
географические карты на дисплее;
дистанционное управление и отображение;
контроль и мониторинг BiTE;
готовность сети (Ethernet Wire or Fiber Optics);
разрешающая способность дисплея 1280×1024 элементов;
стандарт графики 8 матриц (дополнительно можно 24 матрицы);
операционная система UNIX;
графический интерфейс пользователя;
поддерживает стандартные протоколы коммуникаций: TCP/IP, PPP, Frame relay, x.25, ISDN, T1, E1, FDDI;
динамичная автоматическая настройка системы (с помощью BiTE);
выход на цветной принтер;
продукты автоматического предупреждения;
скорость коммуникаций от 9,6 Кбайт/с до 100 Мбайт/с.

Стандартные продукты EDGE™:
индикатор кругового обзора PPI,
индикатор кругового обзора на постоянной высоте CAPPI,

индикатор дальность–высота RHI,
отражаемость на малой высоте BASE,
высота максимальной отражаемости Z HMAXZ,
средняя отражаемость в слое LRA,
максимум в столбе с горизонтальной проекцией максимума CMAX,
вертикально проинтегрированная водность VIL,
стандартный и трехмерный продукт высот радиоэха ETOPS,
накопленные осадки ACM,
вертикальный разрез по произвольному азимуту XSEC,
отображение вертикального распределения скорости по азимуту VAD,
индикаторы ИКО, ИДВ, сектор и типа «А» для работы в реальном времени поступления радиолокационной информации SURV.

Дополнительные продукты EDGE™:
ветер в пограничном слое MVVP/TVAD,
обнаружение яркой полосы BRIGHT,
перемещение шторма VECTOR,
слежение за штормом и предупреждение о его начале TRACK,
текстовое предупреждение об опасной погоде ALERT,
вероятность града HAILP,
карта местных отражений (трехмерная статическая карта) CLUTTER.

Гидрологические продукты:
дождемер GAGE,
водосбор SUBC,
предупреждение о наводнении FLOOD.

Продукты и особенности обнаружения сдвига ветра:
в лицензию на обработку сдвига ветра входят: горизонтальный сдвиг (радиальный), суммарный сдвиг (радиальный и азимутальный), вертикальный разрез скорости, сдвиг на ИКО ПВ SHEAR;
общая карта моментов CMM;
обнаружение фронта порывистости, микровзрывов, мезоциклона, алгоритм GUST.

Продукты в режиме двойной поляризации:
продукты ИКО/ИДВ/ИКО ПВ ZDR,
классификация гидрометеоров HMC,
продукт по сигналу о граде HAIL.

6.6. Выводы

Сравнение параметров и принятых технических решений в МРЛ нового и предыдущего поколений позволяет сделать следующие выводы.

1. Зарубежные фирмы производят доплеровские МРЛ, не обслуживаемые в месте их установки, в любом диапазоне частот (*X, C* и *S*) как на магнетронах, так и на клистронах.

2. Резко возросла эксплуатационная надежность МРЛ. Гарантированные сроки службы магнетронов и усилительных клистронов превосходят

50 000 ч. Вместо газоразрядных тиратронов в передатчиках МРЛ используются импульсные модуляторы на базе твердотельных приборов с гарантированным сроком службы, превышающим 50 000 ч. Системы управления приводом антенны МРЛ переведены на твердотельные устройства, которые не требуют обслуживания.

3. В доплеровских МРЛ нового поколения используются цифровые приемники (усилитель СВЧ – двухканальный квадратурный смеситель с фазовым подавлением зеркального канала приема), которые позволили расширить динамический диапазон до 95–100 дБ и осуществлять цифровую обработку сигналов на промежуточной частоте. В результате появилась возможность проводить обработку информации в каждом дискрете дальности, равном или меньшем длительности зондирующего импульса МРЛ, с нумерацией и хранением в памяти ЭВМ каждого дискрета дальности, а также реализацией в МРЛ как пульспарной обработки сигналов, так и быстрого преобразования Фурье.

4. Новые типы гетеродинов, или первичных возбудителей (в МРЛ – на клистроне), обеспечивают работу генератора стабильной частоты не хуже 10^{-6} Гц/с.

5. Разработаны многослойные радиопрозрачные укрытия с водоотталкивающей поверхностью, которая не позволяет образоваться водяной пленке во время интенсивных осадков и минимизирует эффекты ослабления радиоволн в таких ситуациях.

6. Быстродействие и объем памяти применяемой в МРЛ нового поколения вычислительной техники, высокий уровень специального программного обеспечения и быстродействующие каналы связи дают возможность реализовать любые алгоритмы первичной и вторичной обработки и обслуживать практически неограниченное число потребителей на любом удалении от МРЛ.

ГЛАВА 7

ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ И ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ НАЦИОНАЛЬНЫХ СЕТЕЙ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ МРЛ

7.1. Сети неавтоматизированных МРЛ

Ограничения и недостатки радиолокационных метеорологических наблюдений (см. п. 2.5) снижают их эффективность при оперативной работе и могут привести к неправильной интерпретации метеорологической обстановки. Кроме того, для синоптика информация одного МРЛ позволяет анализировать ход атмосферных процессов только в мезомасштабе. Это заведомо снижает заблаговременность и точность прогноза опасных явлений, связанных с прохождением атмосферных фронтов.

Минимизировать недостатки информации одного МРЛ и расширить возможности использования радиолокационной информации в синоптическом масштабе позволяет сеть МРЛ. Сети МРЛ во всех странах создавались в районах наибольшей повторяемости опасных явлений. Это можно показать на примере территории США (рис. 7.1.1а и 7.1.1б).

Наибольшая плотность сети WSR-57 и WSR-74S Национальной метеослужбы США достигается в тех регионах, где наиболее велико число дней с грозой.

При размещении МРЛ на сети и обосновании экономических аспектов неизбежно приходится решать вопрос о размерах зон перекрытия. В них наблюдения за опасным явлением ведутся с нескольких точек обзора. Это позволяет при анализе характеристик явления исключить или существенно уменьшить влияние ограничений, связанных с ослаблением радиоволн в осадках и удалением опасного явления от МРЛ. Например, размещение 128 МРЛ на территории США обеспечило перекрытие зоны обзора одного (центрального) МРЛ (200 м. миль) с зонами обзора девяти соседних МРЛ [27].

По результатам наблюдений на сети МРЛ составлялась стыкованная (композитная) карта для территории США в полярной стереографической проекции. При синоптическом анализе она совмещалась со спутниковыми изображениями облачности и данными других видов метеонаблюдений.

Плотность сети МРЛ, обеспечивая сплошное перекрытие территории, существенно зависит от характера решаемых задач. Наименьшая плот-

ность сети МРЛ требуется для надежного обнаружения летних Cb и связанных с ними явлений, наибольшая – для обнаружения мелкокапельной слоистообразной облачности, не дающей осадков.

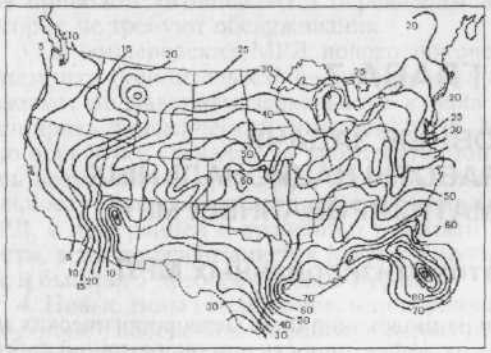

Рис. 7.1.1а. Повторяемость числа дней с грозой по территории США [45].

Рис. 7.1.1б. Распределение МРЛ Национальной метеослужбы по территории США [27] до создания сети NEXRAD.

При обосновании концепции размещения МРЛ на территории СССР учитывалось, что наиболее опасные конвективные явления возникают летом, поэтому оптимальное расстояние между соседними МРЛ на сети было выбрано равным 300 км. Это значение равно максимальному радиусу обнаружения или удвоенному радиусу 100 %-ного обнаружения опасных явлений на МРЛ-1 и МРЛ-2 [1]. Расстояние 300 км с учетом рельефа местности при размещении МРЛ могло изменяться в пределах ±20 %.

С учетом метеорологической эффективности МРЛ, необходимости получения в первую очередь радиолокационной информации об опасных явлениях погоды и, наконец, экономической целесообразности Госкомгидрометом СССР были приняты следующие принципы размещения МРЛ на оперативной сети штормового оповещения и метеообеспечения авиации [3].

1. В качестве первичного (основного) звена системы радиолокационного штормоповещения была принята зональная гидрометобсерватория (ЗГМО). Поэтому в каждой ЗГМО, где бы она территориально ни находилась, должен был устанавливаться МРЛ.

2. Сплошное перекрытие основных промышленных и сельскохозяйственных районов и авиатрасс с интенсивной грозовой деятельностью.

3. Дискретное перекрытие остальной территории СССР:

установка МРЛ в аэропортах первого класса, специально предназначенных для оперативного обслуживания аэропорта;

установка МРЛ в наиболее крупных городах для обеспечения города штормовой информацией.

Сеть МРЛ Госкомгидромета СССР к 1990 г. состояла из 120 МРЛ, которые работали по единой методике [3, 8, 9]. Наблюдения проводились в синоптические и дополнительные сроки (при возникновении опасных явлений) и с таким расчетом, чтобы синоптики смогли получать и использовать радиолокационную информацию при составлении очередного прогноза и подготовке штормового оповещения.

Для передачи информации МРЛ в прогностические центры по телефонным и телеграфным каналам связи использовался код RADOB [4]. Стыкованная карта сети МРЛ составлялась и составляется на ЭВМ в масштабе, который соответствует масштабу синоптических карт, по ячейкам представления 60×60 км [10, 11]. На рис. 7.1.2 приведен фрагмент образца стыкованной карты данных МРЛ по европейской части территории бывшего СССР [3].

Информация в зонах перекрытия дублируется несколькими МРЛ, при этом она может быть не всегда однозначной. Выбор наиболее достоверной информации в зоне перекрытия осуществляется по следующему правилу: *пространственной ячейке представления данных (60×60 км) приписывается наиболее опасное метеоявление (определенное на МРЛ по физико-статистическим критериям), если соседние МРЛ дают разные типы метеоявлений для выбранной ячейки, или явление с более мощными характеристиками, если соседние МРЛ дают один тип метеоявления* [2].

Возможен и другой вариант сбора данных МРЛ: весь регион разделяется на непересекающиеся зоны ответственности, закрепленные за каждым МРЛ. В этом случае для стыкованной карты должна учитываться и анализироваться только информация, принадлежащая зоне ответственности конкретного МРЛ. Данные за пределами зоны ответственности не используются. Этот вариант из-за отсутствия зон перекрытия и дублирования информации снижает достоверность и надежность получения информации в случае выхода из строя одного из МРЛ. По этой причине он и не использовался.

Периодичность обновления стыкованной карты сети неавтоматизированных МРЛ один раз в три часа устраивала не всех потребителей. Работы по автоматизации процессов наблюдения на МРЛ, созданию региональных сетей автоматизированных МРЛ и составлению стыкованных

карт по региону сначала раз в час, затем каждые 30 мин и, наконец, каждые 15 мин заняли в общей сложности три десятилетия. В процессе выполнения этих работ были разработаны и проверены алгоритмы распознавания опасных явлений, способы передачи и стыковки информации, оценены в оперативном режиме достоверность и точность автоматизированной радиолокационной метеорологической информации.

Рис. 7.1.2. Образец стыкованной карты данных МРЛ по европейской части территории бывшего СССР [3].

Все это вместе взятое было важной предпосылкой создания полностью автоматизированных МРЛ и их сетей в национальных масштабах.

7.2. Многофункциональная метеорологическая автоматизированная радиолокационная сеть (МАРС)

7.2.1. Задачи МАРС

В мире резко возросло число потребителей, чья успешная производственная деятельность зависит от своевременного получения качественной радиолокационной метеорологической информации в сложных погодных условиях. Высокий уровень радиолокационной и вычислительной техники, достигнутый к последнему десятилетию прошлого века, техническая революция в приеме и передаче информации, опыт работы, накопленный тремя поколениями радиометеорологов на частично автоматизированных или полностью автоматизированных МРЛ в разных регионах Земли, позволили сформулировать требования к многофункциональной метеорологической автоматизированной радиолокационной сети (МАРС) [7]. Под многофункциональностью понимается синхронная работа всех сетевых радиолокаторов по единой программе наблюдений и обработке на основе базовых измерений и алгоритмов выходных информационных продуктов, которые удовлетворяют запросы всех потребителей как отдельного МРЛ, так и сети в целом.

МАРС предназначена для следующих целей:

- штормового оповещения населения и организаций на новом качественном уровне, т.е. создания автоматизированной технологии текущего прогноза опасных стихийных явлений с целью многократного повышения его оперативности и качества;
- организации метеообеспечения гражданской и ведомственной авиации в соответствии с требованиями, предъявляемыми автоматизированными системами управления воздушным движением как по территории, так и в каждом аэропорту;
- измерения интенсивности и количества осадков по территориям для использования в метеорологических и гидрологических прогнозах наводнений;
- доведения информации непосредственно до инженерных служб коммунального хозяйства администрации городов, с целью полного и оперативного ее использования при организации работ и контроле состояния городских, пригородных и междугородных транспортных магистралей, особенно федерального (общенационального) значения;
- повышения качества работы эколого-прогностических центров по чрезвычайным ситуациям;
- повышения уровня метеообеспечения административных органов путем создания на рабочих местах абонентских пунктов потребителей информации МАРС;

• перевода на качественно новый уровень обслуживания любых потребителей и в первую очередь тех, производственная деятельность которых существенно зависит от гидрометеорологических условий.

Обслуживание потребителей МАРС на договорных началах (только такой подход снижает эксплуатационные расходы государства на содержание МАРС) возможно лишь при безоговорочном выполнении их требований к формам, срокам, регулярности и достоверности метеоинформации, которая позволяет им принимать решения, способствующие минимизации ущерба от погодных условий, или приносить прибыль. Это означает, что метеоинформация должна быть доставлена на рабочее место потребителя в удобной для принятия решений форме и содержать рекомендации практического характера.

7.2.2. О концепции создания МАРС

Автоматизированный МРЛ – дорогостоящее оборудование, которое требует больших затрат как при его установке на позиции, так и при ежегодной круглосуточной эксплуатации. Для минимизации и справедливого распределения финансовых затрат среди основных инвесторов – потребителей информации в государственном масштабе разрабатывается концепция создания сети МРЛ по территории страны.

В концепции представлены следующие вопросы.

• Требования потенциальных инвесторов и потребителей информации (главных – представляющих государство, и всех остальных).

• Определение приоритетов, решаемых сетью.

В зависимости от повторяемости опасных явлений, интенсивных осадков и ценности информации МАРС для минимизации ущерба в каждой стране устанавливают приоритеты задач (изменения порядковых номеров в перечне задач МАРС). Например, в США приоритетным является обнаружение торнадо и стихийных гидрометеорологических явлений, в Великобритании – гидрологический прогноз, в России – штормовое оповещение об опасных стихийных явлениях и метеорологическое обеспечение авиации (из-за редкой сети наземных метеостанций и больших территорий).

• Климатологические аспекты (повторяемость опасных явлений и интенсивных осадков по территории).

• Социально-экономические факторы (учет распределения плотности населения и важнейших народнохозяйственных объектов по территории страны).

• Выбор высоты уровня единого радиолокационного поля страны (ни одно атмосферное явление, верхняя граница которого этот уровень превышает, не будет пропущено при радиолокационных наблюдениях).

• Основные принципы сбора информации и распространения ее потребителям.

• Источники финансирования.

• Технико-экономическое обоснование концепции.

После всестороннего обсуждения и утверждения концепции на государственном уровне, а также выбора зон сплошного перекрытия основным критерием при выборе конкретных пунктов для размещения МРЛ и конкретной позиции в каждом из утвержденных пунктов является минимизация экономических затрат.

Анализируя опыт создания МАРС в развитых странах, необходимо отметить ряд общих подходов [23, 24, 31]:

1) предпосылка создания: возникновение настоятельной необходимости использования радиолокационной метеорологической информации об опасных явлениях и осадках для решения народнохозяйственных задач;

2) понимание обязательности системного подхода при создании МАРС;

3) решение вопросов финансирования МАРС по возможности на самом высоком государственном уровне (федеральном, межведомственном, ведомственном);

4) в зависимости от объема выделенных средств выбор пути создания МАРС – «революционного» или «эволюционного».

7.2.3. Пути создания сети и приоритеты

Самым ярким (но не единственным) примером «революционного» пути создания МАРС является реализация проекта NEXRAD в США [31], а «эволюционного» – создание МАРС в Западной Европе [22, 24] (см. п. 7.8).

1. МАРС NEXRAD создавался по федеральной целевой программе США с конца 1970-х г. тремя федеральными ведомствами: министерством торговли (национальная метеослужба), министерством обороны (авиационная метеослужба и группа морской океанографии) и министерством перевозок (федеральное авиационное управление – ФАУ) [31].

Каждое из перечисленных ведомств сформулировало свои требования к МАРС NEXRAD.

• Министерство торговли, Национальное управление по океанам и атмосфере (НУОА), Национальная метеослужба отвечают за подготовку предупреждений об опасных явлениях и наводнениях, а также за прогнозы для авиации общего назначения и за метеорологические рекомендации по защите жизни и имущества.

Ключевое требование – универсальность, надежность и эффективность применения для раннего и точного обнаружения опасных явлений.

• Министерство перевозок, ФАУ отвечают за безопасное эффективное использование воздушного пространства.

Ключевое требование – высоконадежная дружественная система (для АСУВД ГА) для получения информации о штормовых условиях на маршруте полета воздушных судов и о потенциально опасной локальной турбулентности без дополнительной нагрузки на диспетчерский состав УВД.

• Министерство обороны (командование ВВС США по авиационному метеорологическому обслуживанию и океанографии) отвечает за информацию и предупреждение вооруженных сил для повышения безопасности полетов и за оказание помощи в принятии решений.

Ключевое требование – NEXRAD должен быть надежной, простой в эксплуатации конструкцией, способной выполнять различные военные задачи с участием сотрудников различных специальностей и квалификации.

Суть концепции NEXRAD состояла в разработке и поставке однотипной радиолокационной системы, отвечающей минимальным запросам всех трех ведомств, и их объединении в МАРС.

Все три ведомства в техническом задании на проектирование отметили важность полной автоматизации NEXRAD, который должен обеспечить новое качество радиолокационных метеонаблюдений: дистанционное измерение характеристик осадков и оптически чистого пограничного слоя атмосферы, обработку в реальном времени, передачу и представление на дисплеях цифровых данных на основе проверенных в оперативной практике и усовершенствованных алгоритмов анализа.

Радиолокатор NEXRAD (им оказался в результате конкурсной разработки WSR-88D) должен был повсеместно заменить 56 WSR-57 и WSR-74S на существующей радиолокационной сети НМС и 73 МРЛ (в основном WSR-74C) сети местного штормового оповещения.

В 1988 г. после разработки и всесторонних испытаний WSR-88D Конгресс США санкционировал модернизацию и реструктуризацию Национальной метеослужбы и выделил для этой цели достаточные финансовые средства [31].

2. МАРС Западной Европы. Ее создание проводилось постепенно, по мере появления финансовых возможностей. В этой ситуации в каждой стране до момента функционирования МАРС в полном объеме были расставлены приоритеты с учетом ценности и первоочередности информации автоматизированных МРЛ (они приведены в соответствии с анализом Newsome [41] на семинаре COST-73).

Австрия

1. Метеорологическое обеспечение авиации.
2. Штормовое оповещение и краткосрочный прогноз.
3. Активные воздействия на град (наведение на градоопасные облака небольших самолетов с реагентами).
4. Метеообеспечение дорожного транспорта.
5. Показ опасной погоды по телевидению.

Бельгия

1. Измерение осадков и гидрологический прогноз речного и городского стока.
2. Краткосрочный прогноз начала и окончания осадков.

Великобритания

1. Измерение осадков и гидрологический прогноз паводков на реках с низкими берегами и регулирование работы канализационных систем в городах.
2. Повышение качества метеопрогноза прохождения фронтальных систем, сроков начала и окончания осадков.
3. Совмещение с данными ИСЗ Meteosat.
4. Метеообеспечение дорожного транспорта и эксплуатации дорог.
5. Показ радиолокационных карт осадков по телевидению.

Германия

1. Краткосрочный прогноз погоды.
2. Гидрологический прогноз паводков и наводнений.

Дания

1. Метеообеспечение авиации.
2. Полномасштабное метеорологическое обслуживание фермеров прогнозами осадков.

Испания

1. Штормовое оповещение об опасных явлениях погоды, особенно в прибрежных районах страны.

Италия

1. Метеообеспечение авиации.
2. Метеообеспечение сельскохозяйственных работ.
3. Активные воздействия на град (выявление потенциально опасных градовых зон).

Нидерланды

1. Гидрология стока, регулирование работы городских канализационных систем.
2. Строительство.
3. Обслуживание эксплуатационных служб автодорог.

Норвегия

1. Краткосрочное прогнозирование опасных явлений и осадков.
2. Метеообеспечение автодорог.

Португалия

1. Управление водными ресурсами и уменьшение ущерба от опасных наводнений.
2. Метеообеспечение авиации.

Финляндия

1. Измерение осадков.
2. Метеообеспечение дорог (особенно в зимний период).
3. Штормовое оповещение населения об опасных явлениях погоды.

Франция

1. Метеорологический прогноз опасных явлений.
2. Совмещение с информацией ИСЗ.
3. Гидрологический прогноз для бассейнов рек и городского канализационного хозяйства.

Швейцария

1. Метеообеспечение авиации.
2. Штормовое оповещение об опасных явлениях погоды местных вла-

стей и полиции.

3. Метеообеспечение дорог (особенно в зимний период).

4. Расчет потоков на горных реках.

Швеция

1. Метеообеспечение авиации.

2. Разработка адвективных моделей краткосрочного прогноза.

3. Штормовое оповещение о летних грозах.

4. Метеообеспечение дорожного транспорта в зимних условиях об интенсивности и количестве снега, вызов снегоуборочной техники.

5. Метеообеспечение сельского хозяйства в рамках метеоинформационной системы PROMIS 600.

В каждой стране Западной Европы МАРС создавалась на базе отечественных МРЛ или МРЛ всемирно известных фирм. Системы автоматизации (особенно в первое время) разрабатывались под приоритетные задачи; использовались свои методы кодирования и распознавания передаваемой информации.

Участие всех стран Западной Европы в исследовательских проектах ВМО для Европы COST-72, COST-73 и COST-75 позволило унифицировать требования по каждому аспекту функционирования МАРС и создать в конечном итоге международную сеть МАРС в Европе.

В этом условно названном «эволюционным» пути создания МАРС унификация проведена на уровне обмена информацией с помощью единого международного кода BUFR 94M и протоколов информационного обмена ВМО, а технические средства и национальные приоритеты выбирались самими участниками проектов COST.

В табл. 7.2.1 приведена концептуальная схема распределения информации автоматизированных МРЛ в Западной Европе [24, 51].

7.2.4. Выбор уровня для единого радиолокационного поля МАРС

Выбор высоты уровня единого радиолокационного поля страны, которое обеспечат диаграммы направленности антенн МРЛ МАРС с учетом радиорефракции и высоты размещения МРЛ над уровнем их установки, определяет число МРЛ МАРС и их удаление друг от друга.

Если высота нижней границы ДНА МРЛ при нулевых углах места антенны равна 1,35 км, то в соответствии с формулами (2.3.1) и (2.3.2) соседние МРЛ должны быть размещены на расстоянии 300 км друг от друга. Если работа будет происходить при угле места 0,5°, то это расстояние не будет превосходить 200 км.

Сеть NEXRAD должна обеспечивать почти непрерывное перекрытие территории США на высоте 3 км (10 000 футов) над уровнем установки для обнаружения сильных штормов и других опасных метеоявлений [31] (см. рис. 7.4.1). В Западной Европе эта высота выбрана равной 1,5 км [22] (см. рис. 7.8.4).

Таблица 7.2.1

Концептуальная схема распределения информации автоматизированных МРЛ в Западной Европе (COST-72) [24, 51]

Национальный уровень	Метеорологическая или гидрометеорологическая служба				
Региональный уровень	Региональные органы водного хозяйства	Крупные города с пригородами	Транспорт: дорожный, рельсовый, морской и воздушный	Производство гидроэлектроэнергии	Прочее
Функции	Управление водохранилищами, управление реками, водоснабжение и водораспределение, предупреждение о наводнениях (прогноз)	Дренирование земли, эксплуатация магистральных коллекторов, предупреждение о наводнениях (прогноз)	Неблагоприятные условия (прогноз) для дорожного, рельсового, морского и воздушного транспорта, штормовое предупреждение (прогноз) для морского и воздушного транспорта, управление самолетами	Неблагоприятные условия (прогноз)	
Местный уровень	Центр управления реками и водохранилищами, полиция (предупреждение о наводнении – прогноз)	Населенные пункты, органы местного управления, полиция (предупреждение о наводнении – прогноз)	Управление воздушным движением, организации железнодорожных перевозок, автомобильные организации, береговая охрана	Центры управления операциями	Строительная промышленность, сельское хозяйство, садоводство

Таблица 7.2.2

Требования потребителей. Проект для Западной Европы (COST-72) [24, 51]

Требования	Потребители информации								
	Метеорологическая служба		Гидрологическая служба			Сельское хозяйство		Транспорт	Строительство
	Гидрометцентр	Гидрометобсерватория	Центр управления бассейнами рек	Управление городскими коллекторами	Производство гидроэлектроэнергии	Общее земледелие	Садоводство	Администрация, ведающая дорожным и ж/д транспортом	Крупные проектные конторы
Масштабы исследования	Региональные, национальные	Областные, региональные	Бассейн реки	Территория города	Бассейн реки	Региональные	Локальные	Региональные	Локальные
Разрешающая способность по площади, км	50	2	50	2	50	50	2	50	2
Аномальные метеорологические условия, длительные и интенсивные осадки									
*Сведения о КО**:									
частота передачи	1 ч	5 мин	15 мин	5 мин	30 мин	1 ч	1 ч	1 ч	1 ч
	Интегрированные суммарные количества за период времени между передачами сведений								
период времени, за который определяется суммарное КО									
разрешение данных о КО									
число уровней интенсивности осадков, мм/ч	6 (отобрано из 127)	127	25	25	25	8	8	8	8
шкала, мм (суммарное КО)	0–25,0 с приращением по 1 мм					0–25,0 с приращением по 3,0 мм			
Прогноз выпадения осадков									
частота сообщений, ч	1	1	6	6	6	12	12	12	12
период прогноза, ч	36	6	72	24	36	24	24	24	24

Продолжение табл. 7.2.2

Временнóе разрешение сообщений о прогнозах, ч	первые 6 ч – 1 ч, далее – 6 ч	1	6	6	6	12	12	12	12
	Обычные метеорологические условия								
Сведения о КО: частота передачи, ч	1	12	6	6		12	12	12	12
	Интегрированные суммарные количества за период времени между передачами сведений								
период времени, за который определяется суммарное КО									
разрешение данных о КО									
число уровней интенсивности, мм/ч	6 (отобрано из 127)		12	12	12	3	3	3	3
шкала, мм/ч	0–25,0 с приращением в зависимости от выбора уровней*	0–25,0 с приращением по 2 мм				0–25,0 с приращением по 8 мм			
Прогноз выпадения осадков									
частота сообщений о прогнозах	1 ч	15 мин	15 мин	15 мин	30 мин	3 ч	3 ч	1 ч	1 ч
период прогноза	36 ч	3 ч	3 ч	1 ч	24 ч	3 ч	3 ч	3 ч	3 ч
временное разрешение сообщений о прогнозах	первые 6 ч – 1 ч, далее – 6 ч	5 мин	15 мин	15 мин	30 мин	1 ч	1 ч	1 ч	1 ч

*КО – количество осадков.

7.2.5. Требования потребителей МАРС

Многолетние исследования в рамках проектов COST-72 и COST-73 позволили обобщить требования потенциальных потребителей к радиолокационной метеорологической информации (табл. 7.2.2) [20]. Требования составлены для обычных и аномальных метеорологических условий для МАРС, приоритетом которой является измерение осадков. Анализ требований основных потребителей МАРС России приведен в табл. 7.2.3 [7].

Таблица 7.2.3

Основные потребители (отрасли народного хозяйства) информации, получаемой от МРЛ, и основные требования потребителей к радиолокационной информации [7]

Отрасль народного хозяйства	Потребители информации	Требования потребителей		
		Разрешающая способность по площади, км^2	Частота передачи сведений о количестве осадков, мин	Разрешение данных об осадках – число градаций интенсивности, мм/ч
Гражданская авиация	Синоптики АМСГ, АМЦ, службы УВД, АС УВД аэропортов и районов	4; 16	5; 15	6
Росгидромет (прогностические подразделения)	Гидрометцентр РФ	50; 100	60; 180	6
	Гидрометобсерватория	2	5; 15	30
	ЦГМС	50; 100	60	6
Сельское хозяйство	Диспетчерская служба, отдельные хозяйства, фермеры	50 2	60 15	6 30
Энергетика и связь	Подразделения обслуживания ГЭС, ЛЭП, линии связи (радиорелейные и через ИСЗ)	50	30	30
Транспорт	Администрации дорожного, железнодорожного, речного и прибрежного морского транспорта	50	60	8
Коммунальное хозяйство	Управление коммунальным хозяйством больших городов, управление городскими коллекторами	2	5	25
Лесное хозяйство	Служба защиты от лесных пожаров	2; 50	По запросу	6 или 15

Строительство	Администрация, ведающая работами на открытых строительных площадках, проведение взрывных работ	2; 50	По запросу	6 или 15

Примечание. Для всех потребителей под сведениями об опасных и стихийных явлениях подразумеваются сведения о граде, грозах, интенсивных ливнях, шквалах, смерчах.

Концепция МАРС в России предлагает такой объем выходной информации с каждого автоматизированного МРЛ, который позволяет выработать рекомендации потребителю в виде следующих фактических и прогностических карт:

опасных явлений, связанных с грозоопасностью, градоопасностью, шквалами, смерчами, мезоциклонами в поле облаков, повышенной турбулентностью, повышенными значениями сдвига ветра;

высоты облаков и максимальных значений отражаемости, интенсивности осадков и суммарного слоя осадков за различные промежутки времени;

радиолокационной отражаемости, радиальной скорости и ширины спектра скорости в любых горизонтальных и вертикальных сечениях.

Каждая карта должна сопровождаться текстом в терминах и определениях, согласованных с потребителями.

7.2.6. Выбор географического пункта для установки МРЛ

При создании сети NEXRAD выбранные пункты должны были удовлетворять следующим критериям [31]:

- максимальное приближение к существующим или планируемым региональным прогностическим центрам;
- максимальное приближение МРЛ (до 30 км) к аэропорту либо размещение МРЛ в высокоприоритетных аэропортах (национального или регионального значения) или рядом с авиабазами МО;
- разумное перекрытие радиусов обзора МРЛ в зонах высокой повторяемости опасных явлений, связанных с облачностью;
- соответствие высоты уровня единого радиолокационного поля двух соседних МРЛ;
- разумная минимизация числа МРЛ, необходимых для создания единой многофункциональной МАРС.

После выбора пункта размещения МРЛ необходимо решить проблемы, связанные с выбором по конкретной позиции в пункте (особенно те из них, которые требуют обязательного согласования с другими ведомствами).

7.2.7. Выбор позиции под МРЛ

Выбор позиции для размещения МРЛ является наиболее ответственным этапом, предшествующим строительным работам на выбранной позиции. При выборе позиции надо сразу свыкнуться с мыслью, что идеального места для размещения МРЛ не существует и придется идти на принятие компромиссных решений [8, 21].

Для устранения отраженных сигналов от местных предметов по боковым лепесткам наилучшей позицией для МРЛ был бы одиночный холм с кратером. Глубина кратера должна быть такой, чтобы антенна МРЛ могла смотреть прямо над его кромкой.

Раньше требования к выбору позиции различались для МРЛ штормового оповещения и МРЛ, предназначенного для измерения осадков, обслуживаемого и необслуживаемого.

В режиме штормового оповещения МРЛ должен получать информацию в максимальном радиусе обзора, т. е. работать под малыми углами места по всем азимутам и в любом случае в тех азимутах, откуда приходят наиболее опасные явления. В режиме штормового оповещения максимальная дальность обнаружения на МРЛ должна составлять в средних широтах 200–250 км. На этих удалениях нижняя граница ДНА при угле места 0° находится на высоте 2,25–3,75 км над уровнем антенны МРЛ.

При измерении осадков требования к максимальному радиусу действия остаются, однако угол места не должен превышать 0,3–0,5° при минимальном числе отражений от местных предметов. При этом необходимо учитывать ширину ДНА МРЛ и высоту нулевой изотермы в пункте размещения. В умеренных широтах при ширине ДНА 1° и угле места 0° максимальный радиус действия МРЛ не может превышать 100 км.

МРЛ, не обслуживаемый в месте установки, дает значительно большие возможности при выборе позиции. Она должна обеспечить периодическое посещение МРЛ и наличие электроэнергии, снимая вопросы о необходимости всех требований, возникающих в случае присутствия на МРЛ постоянного обслуживающего персонала.

Для штормового оповещения МРЛ обычно располагался на аэродроме или в прогностическом центре. Если не требовалась установка антенны на очень высокую вышку для обеспечения обзора по горизонту, а антенна МРЛ размещалась на здании аэропорта, то в этом случае стоимость установки была минимальна.

При выборе позиций МРЛ МАРС требования становятся более жесткими, а затраты на оборудование позиции значительными. По существу выбор позиции для МРЛ состоит из трех этапов. На первом этапе происходит начальная оценка места. При этом получается карта для поиска оптимального места с учетом сооружений, принадлежащих государству.

Затем, на втором этапе, происходит выбор места и завершается его предварительное изучение (анализ радиолокационного обзора, географической и оперативной пригодности, дорог и коммунальных служб).

На третьем этапе возможные позиции сводятся до одной-двух. На эти

позиции снова выезжают и уже детально оценивают оптимальность выбранной позиции.

Как отмечается в [31], процесс поиска, проведения анализа и получения земли под МРЛ может занять 44 месяца. Сеть NEXRAD спроектирована таким образом, чтобы соседний МРЛ мог обнаруживать шторм, проходящий над МРЛ в сторону соседней станции.

Позиция для установки МРЛ МАРС должна удовлетворять следующим требованиям [8, 9, 21, 31].

1. Следует обеспечить максимальный радиус действия МРЛ, для чего во всех направлениях кругового обзора углы закрытия антенны МРЛ не должны превосходить 0,5°.

2. Необходимо обеспечить наилучшие условия обзора в секторах, через которые проходят авиатрассы.

3. В радиусе 500 м от выбираемой позиции должны отсутствовать высокие местные предметы (здания, линии электропередачи, железнодорожные насыпи и пр.).

Прокомментируем перечисленные требования.

Углы закрытия не должны превышать половины ширины диаграммы направленности антенны МРЛ или быть нулевыми. Более высокие углы закрытия, особенно если они отмечаются в азимутах прихода в выбранный пункт наиболее опасных стихийных явлений, резко уменьшают метеорологическую эффективность МРЛ за счет низкой достоверности его информации или резкого уменьшения заблаговременности их прогноза ввиду позднего обнаружения явлений МРЛ.

Высокие углы закрытия антенны МРЛ в отдельных азимутах или секторах приводят к расширению зоны ответственности соседнего МРЛ единой сети. Чтобы оценить приемлемость углов закрытия, необходимо построить зоны пересечения диаграмм направленности МРЛ с учетом углов закрытия в каждом из соседних пунктов. Неправильный выбор места установки МРЛ может привести к потере информации об опасных явлениях над важными для потребителя районами. Примеры таких построений приведены на рис. 7.2.1, где один МРЛ (слева) работает при нулевых углах закрытия, а второй (справа) – при $\varepsilon = 1{,}5°$. В зоне радиотени получение радиолокационных характеристик невозможно (на рис. 7.2.1 зона радиотени заштрихована).

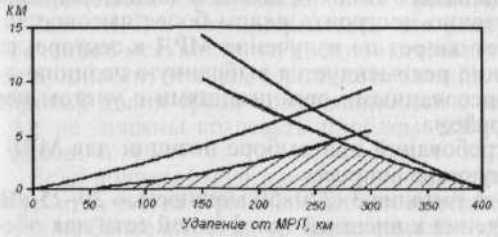

Рис. 7.2.1. Размер зоны радиотени двух соседних МРЛ, работающих под углами закрытия 0° (слева) и 1,5° (справа).

4. Выбираемая позиция должна исключать возможность возникновения взаимных помех радиолокационных станций, несущие частоты которых близки к диапазону излучения МРЛ. Для оценки электромагнитной совместимости размещаемого МРЛ с работающими в пункте радиолокационными системами требуется пройти экспертизу и получить разрешение от региональной комиссии по радиочастотам. Вопрос об электромагнитной совместимости, как правило, приходится решать одновременно с вопросами по минимизации стоимости на прокладку коммуникаций и выбору позиции с минимальными углами закрытия.

5. Позиция должна соответствовать требованиям по технике безопасности и строго соответствовать границам санитарно-защитной зоны (см. рис. 2.5.4).

В целях обеспечения санитарных норм и соблюдения правил защиты населения от электромагнитных полей, создаваемых МРЛ, выбор позиции для МРЛ следует производить в соответствии с действующими санитарными нормами и методическими указаниями по определению электромагнитной обстановки в местах размещения МРЛ: «Временные санитарные нормы и правила защиты населения от воздействия электромагнитных полей, создаваемых радиотехническими объектами» № 2963-84; методические указания «Контроль и нормализация электромагнитной обстановки, создаваемой метеорологическими радиолокаторами» (Л.: Гидрометеоиздат, 1990).

До обращения в местные органы санэпиднадзора можно примерно рассчитать удаление МРЛ от ближайших построек, где возможно облучение людей. Оно определяется так называемым рэлеевским расстоянием $R_{рр}$ – расстоянием, на котором формируется ДНА МРЛ: $R_{рр} = \dfrac{D^2_{Ант}}{1{,}22 \cdot 2\lambda}$, где $D_{ант}$ – диаметр параболоида антенны, а λ – длина волны МРЛ. $R_{рр} = 0{,}2\ R_{фр}$ (см. п. 2.2). При ширине ДНА = 1° на λ = 3,2 см $R_{рр}$ = 123 м, на λ = 5,6 см $R_{рр}$ = 110 м, на λ = 10 см $R_{рр}$ = 225 м.

Удаление МРЛ от жилых объектов не может быть меньше $R_{рр}$. На самом деле оно гораздо больше (в 5–10 раз) – в зависимости от установленного Минздравом предельно допустимого уровня излучения. С этой точки зрения размещение МРЛ на самых высоких домах в жилых кварталах всегда таит опасность. Достаточно построить рядом более высокое здание, как немедленно последует запрет на излучение МРЛ в секторе, где оно находится. По этой причине рекомендуется выбранную позицию согласовать с местными заинтересованными организациями с учетом перспективных планов развития района.

Помимо перечисленных требований при выборе позиции для МРЛ в каждом случае решаются следующие вопросы:

удобство подводки силового питания 3×220×50 мощностью 20–25 кВт, а также возможность подключения к внешней телефонной сети для обеспечения передачи оперативной информации;

для обслуживаемого МРЛ обеспечение максимума технических и эксплуатационных удобств (подъездные пути, бытовые условия для обслуживающего персонала и т.д.).

В некоторых местах размещения МРЛ в соответствии с изложенными требованиями встречаются следующие трудности:

орографические особенности местности не позволяют установить станцию в непосредственной близости от потребителя,

большая насыщенность местности современными радиолокационными средствами вызывает взаимные помехи,

невозможно соблюсти требуемые нормы санитарно-защитной зоны.

В соответствии с изложенным выше станция может устанавливаться на удалении от потребителя, если по местным условиям выбрать позицию ближе невозможно. Метеорологическая информация в этом случае передается с помощью линий связи. Стоимость размещения МРЛ при этом резко возрастает, особенно если необходимо построить дороги.

6. Необходимо отдельно выделить требование об обязательной хорошей защите МРЛ от молний. Молния может причинить большой ущерб МРЛ (аппаратуре, зданию, кабельному хозяйству). Опыт внедрения NEXRAD показал это.

7. При необходимости и возможности разделения передающего и приемного устройств МРЛ необходимо учитывать, что увеличение длины волновода приводит к заметным потерям потенциала МРЛ. Обычно изготовители не рекомендуют, чтобы длина волновода превышала 15 м, а предельным считается значение 30 м. В среднем потери электромагнитной энергии в волноводе составляют 0,13 дБ/м при λ = 3 см, 0,06 дБ/м при λ = 5,6 см и 0,03 дБ/м при λ = 10 см.

В практическом плане для выбора позиции требуется теодолит, который необходимо установить на высоте размещения антенны МРЛ. С его помощью надо составить график углов закрытия горизонта через 1° от 0 до 360°. График следует нанести на подробную карту топографических съемок местности, желательно оцифрованную, которую лучше всего иметь в компьютере. С помощью карты и графика можно оценить наличие и высоту местников, высоту зон радиотени в каждом азимуте через 1°.

Одновременно можно оценить, какое число местников может быть подавлено с помощью задействованной на МРЛ системы подавления местников (маска-карта, доплеровский режим).

Если МРЛ будет применяться для измерения осадков в условиях пересеченной местности, то предпочтительнее иметь свободное поле обзора над долинами, чем над вершинами холмов. Если бассейны рек состоят из широких долин среди возвышенностей с небольшим наклоном, то местники не должны создавать проблем для радиолокационного измерения осадков.

Если долины узкие и возвышенности имеют крутые склоны, что чаще всего отмечается в районах частых наводнений, то измерять осадки придется на более высоких уровнях, заметно удаленных по вертикали от мес-

та выпадения осадков. Общее правило при выборе места установки с учетом конкретного бассейна: МРЛ необходимо устанавливать на краю бассейна.

7.2.8. Эксплуатация МРЛ МАРС

При обосновании концепции МАРС необходимо учитывать эксплуатационные расходы и порядок эксплуатации МРЛ [8, 9, 21]. Неприятная традиция при вводе МРЛ в эксплуатацию (пока обслуживающий его персонал не получил устойчивые навыки работы и не приобрел требуемой квалификации) – жалобы (обычно несправедливые) на плохую работу МРЛ. В то же время изначально ясно, что автоматизированный МРЛ является не только самым сложным, но и самым дорогостоящим оборудованием гидрометслужбы и уже только поэтому требует обслуживания по самому высокому стандарту.

Регламентные работы должны проводиться регулярно в соответствии с рекомендациями изготовителя и разработчика МРЛ. Это позволяет на ранней стадии обнаружить начинающиеся изменения характеристик МРЛ или отказ.

Механические работы (не реже двух раз в год) заключаются в основном в чистке колец токосъемника и смазке моторов антенной системы.

Контроль за работой приемника должен проводиться еженедельно, пока не будет достигнута стабильность и точность, предусмотренные техническими условиями на МРЛ.

Критерием надлежащей эксплуатации МРЛ является достижение и превышение средней наработки на отказ для данного типа радиолокационной аппаратуры.

Технический ресурс МРЛ при круглосуточной и непрерывной работе составляет 15 лет. NEXRAD проектировался на 20 лет. Опыт показывает, что 20 лет – это достижимый срок для большинства грамотно эксплуатируемых МРЛ.

На устранение технической неисправности на МРЛ, укомплектованном запасным имуществом, уходит не более трех часов, на замену механических деталей – не более трех дней.

На МРЛ без обслуживающего персонала необходим автоматический мониторинг технического состояния. Самый надежный мониторинг достигается включением небольших сенсоров в контролируемые системы МРЛ. Надежность любой системы автоматического мониторинга должна быть на порядок выше надежности аппаратуры, которую она контролирует. Подробней об этом в п. 7.3.

Наиболее прогрессивный способ технического обслуживания автоматизированного МРЛ заключается в найме специализированной фирмы. Трудозатраты на обслуживание автоматизированного МРЛ, работающего в непрерывном режиме, оцениваются международными экспертами в 0,5–1 квалифицированного работника.

Несмотря на относительно небольшие трудозатраты на техническое

обслуживание МРЛ, надо иметь в распоряжении не менее пяти человек. По требованиям техники безопасности на МРЛ должно находиться не менее двух специалистов, особенно если требуется не обычная проверка технических параметров, а выполнение работ, связанных с высоким напряжением.

Ежегодные эксплуатационные расходы на автоматизированный МРЛ следует планировать исходя из 0,06–0,20 его заводской стоимости.

7.3. Автоматизированная сеть МРЛ Великобритании

7.3.1. Состав сети

Основная задача интегрированной сети оперативных МРЛ Великобритании – производить количественные измерения осадков у поверхности Земли для текущего прогнозирования наводнений и краткосрочного прогноза погоды [23– 25].

Сеть состоит из 12 МРЛ фирмы Siemens-Plessey (Plessey 45-C), выпущенных в разные годы. МРЛ Plessey 45-C обеспечивают круглосуточную работу в отсутствие обслуживающего персонала и совмещены с телеметрическими дождемерами в радиусе обзора. Размещение МРЛ на сети (рис. 7.3.1) [48] позволяет создать единое радиолокационное поле над территорией страны на уровне 1,5 км над поверхностью Земли.

Сеть создавалась на протяжении нескольких лет начиная с 1983 г. при долевом участии в финансировании установок заинтересованных ведомств и объединении их усилий при проведении работ. Отметим, что такой подход характерен почти для всех стран.

В Великобритании в создании сети МРЛ приняли участие [29]: девять из десяти управлений водными ресурсами (Water Authorities) в Англии и Уэлсе, Совет графства Девон (Devon County Council), дирекция Военно-морской океанографии и метеорологии (Directorate of Naval Oceanography and Meteorology), министерство сельского хозяйства, рыбного промысла и продовольствия (Ministry of Agriculture, Fisheries and Food) и департаменты окружающей среды и сельского хозяйства Северной Ирландии (Departments of the Environment and of Agriculture for Northern Ireland).

7.3.2. Получение и передача информации

МРЛ на оперативной сети работают круглосуточно циклами по 5 мин. Данные получаются при круговом обзоре на четырех углах места (0,5; 1,5; 2,5; 4,0°), а затем обрабатываются для получения количественных данных об осадках в квадратах сетки 2×2 км в радиусе 75 км и 5×5 км в радиусе 210 км в декартовых координатах. Кроме производства стандартных данных, компьютер МРЛ рассчитывает суммарные осадки для 200 водосборов.

В Великобритании существуют климатологическая и синоптическая сети дождемеров. На первой среднее расстояние между дождемерами составляет около 8 км, на второй – 40 км. Радиолокационные данные калибруются в реальном времени по небольшому числу специальных поверочных дождемеров, установленных в районах, где можно ожидать наивысшей точности измерения осадков на МРЛ. Подгоночные поля суточных сумм осадков по данным МРЛ составляются по данным дождемеров синоптической сети.

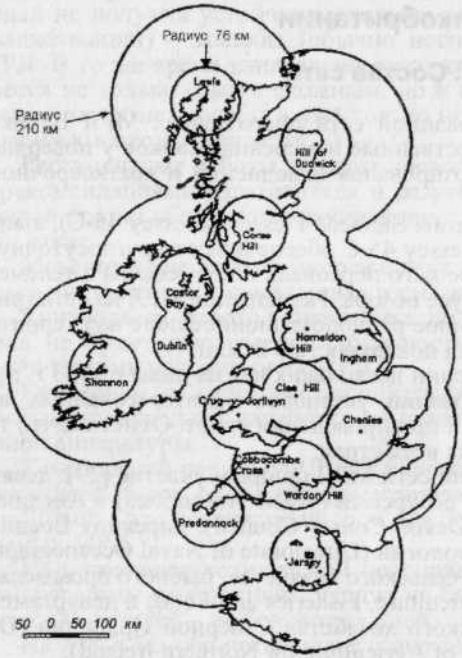

Рис. 7.3.1. Сеть метеорологических радиолокаторов Великобритании и Ирландии. Данные двух радиолокаторов Республики Ирландии и одного радиолокатора в штате Джерси дополняют эту сеть [48]. Жирными точками указаны местоположения радиолокаторов.

Некоторым местным потребителям требуется дополнительное сканирование по углу места в выбранных азимутах. Согласно оперативным требованиям, получение информации на 12 МРЛ не должно быть ниже 93 % в любой месяц (эквивалентно потере данных почти за два полных дня) [48].

Стандартные данные и данные для водосборов с каждого МРЛ передаются местным потребителям – управлениям водными ресурсами и прогностическим центрам; через каждые 15 мин стандартные данные передаются на центральный компьютер сети МРЛ Великобритании Radarnet (см. рис. 7.3.2 [24] и 7.3.3 [51]).

Специальное программное обеспечение на компьютерах МРЛ работает в операционной системе реального времени RSXII-M и решает следующие задачи:

управление антенной;

контроль за работой аппаратуры и выявление ошибок;

аналого-цифровое преобразование, ввод и осреднение радиолокационных сигналов;

удаление местников (по карте местников);

коррекция на затенение, дальность и ослабление;

перевод отражаемости Z в интенсивность осадков I;

выявление яркой полосы;

преобразование полярных координат в декартовы;

инфиллинг (infilling) (ввод данных, полученных на больших углах места, в картину радиоэха при минимальном угле места);

опрос телеметрических дождемеров;

согласование радиолокационных и дождемерных данных;

интеграция водосборов;

архивация данных;

передача данных местным потребителям и на центральный компьютер сети МРЛ (Radarnet).

7.3.3. Центр сбора

Центральному компьютеру сети МРЛ, который размещен в главном центре коммуникаций в штабе метеослужбы Великобритании в Брэкнелле, присвоено название Radarnet (рис. 7.3.2 и 7.3.3). Каждые 15 мин Radarnet собирает данные со всех МРЛ и составляет общую (композитную) картину. Композитная картина и полученные из нее продукты затем передаются разными средствами потребителям в Великобритании, Бельгии, Ирландии и Франции.

Radarnet состоит из двух процессоров (основного и резервного), каждый емкостью 2 мегабайта и с двумя дисками по 10 мегабайт.

Каждая система имеет 16-канальный препроцессор синхронной связи для приема данных от МРЛ Великобритании и 22 асинхронных канала и 8 портов с использованием протокола X.25, которые используются для приема данных из других европейских стран и для передачи продуктов. Эти системы связаны также с сетью DECNET через Ethernet, связывающий большинство компьютеров метеослужбы. Все данные Radarnet архивируются.

Почти вся оперативная программа в Radarnet работает по строгому временному графику в соответствии с запуском задач по временной очередности. Это обеспечивает четкий и гибкий контроль всей системы и предотвращает ее перегрузку в период большой занятости. Кроме того, это позволяет вводить в систему новые задачи. Недостаток ее в том, что увеличивается время подготовки и передачи радиолокационных изображений, потому что каждая задача должна вставляться в график при том

условии, что предыдущие задачи решались за максимум отведенного им времени.

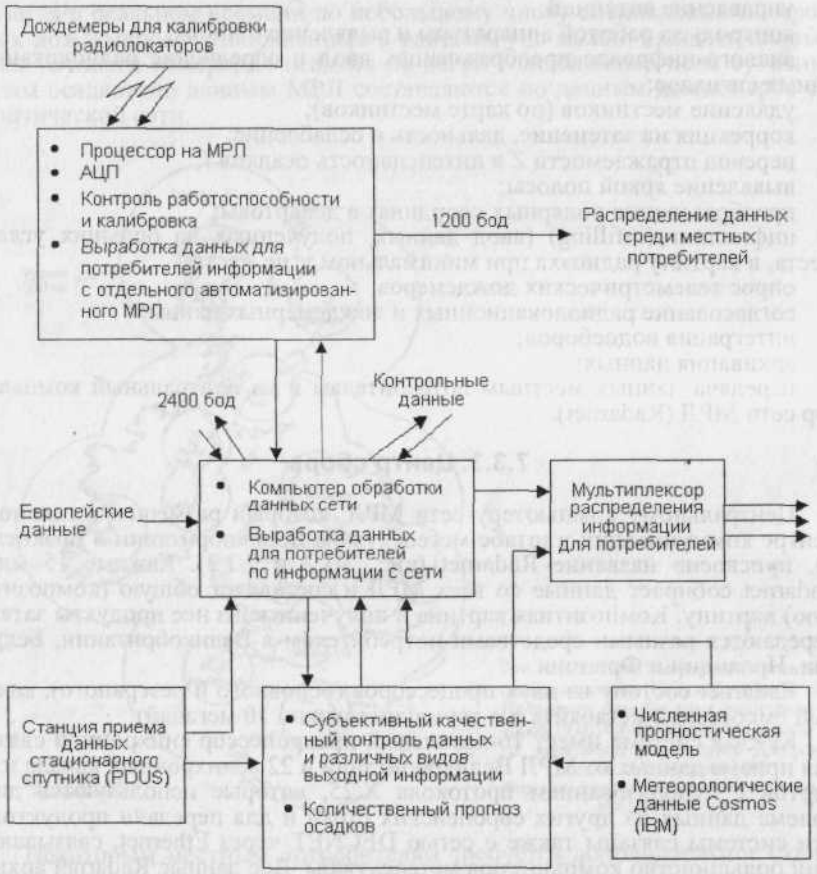

Рис. 7.3.2. Система обработки и распределения информации, основанной на данных сети автоматизированных МРЛ [24].

Каждые 15 мин в отведенное временное окно все МРЛ передают в Radarnet последнее изображение. После сбора данных со всех МРЛ сети или когда приходит время перерыва, составляется общая картина 256×256 квадратов по 5 км, охватывающая Великобританию. В каждом квадрате общей картины содержатся данные только одного МРЛ, данные перекрывающихся МРЛ не усредняются. В каждом 5-километровом квадрате дается карта с указанием иерархии МРЛ, соответствующая «качеству покрытия» (quality of coverage). Опыт показывает, что обычно МРЛ дает наибольшее покрытие, если его ДНА находится как можно ниже над определенной точкой. Данные «самого хорошего» МРЛ включаются в композитную картину, но если данных с него нет, то выбираются данные следующего «самого хорошего» МРЛ. Карты иерархии создаются автоматически путем вычисления центра тяжести всех радиолокационных лучей по 5-километровым квадратам с учетом детально рассчитанных радиолокационных горизонтов, ДНА и других факторов. Поясним последнее положение.

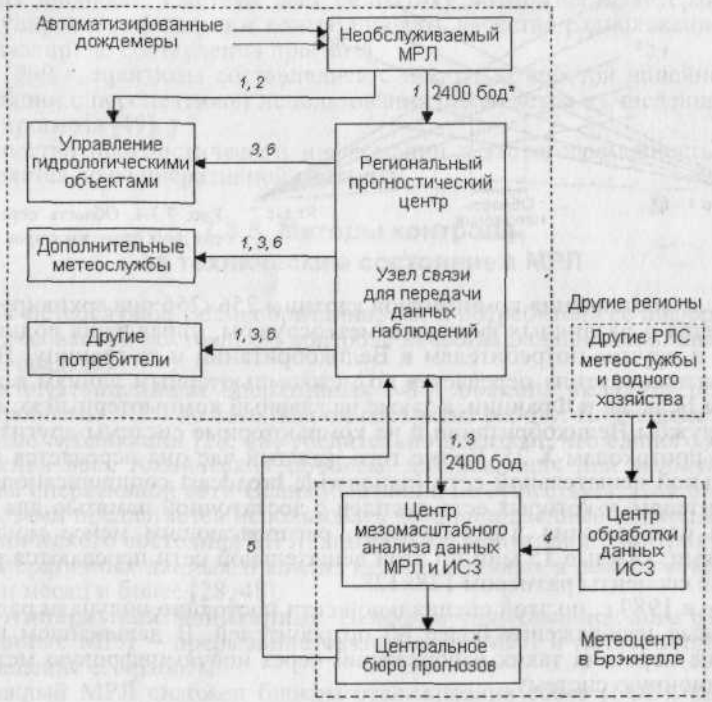

Рис. 7.3.3. Функциональная схема взаимодействия автоматизированной радиолокационной, спутниковой наземной и гидрологической информации в проекте COST-72 [8].

1 – данные МРЛ одного региона (через 1 мин после наблюдений без качественного контроля), *2* – суммарные результаты по второстепенным водосборам, *3* – прошедшие качественный контроль данные МРЛ и ИСЗ об осадках.

*Скорости передачи данных указаны минимальные, сейчас они в несколько раз превосходят 2400 бод.

Зона обзора одного МРЛ Великобритании определена в 210 км. МРЛ, расположенные на удалении 420 км друг от друга, имеют общие зоны обзора. Если разница между высотами осей двух лучей находится на расстоянии, равном 0,25° ширины ДНА, то квадрат 5×5 км (пиксел) считается общим для каждой пары МРЛ (рис. 7.3.4) [48]. Составляется карта всех пикселов, общих для каждой пары МРЛ (на самом деле составляются две карты, связывающие площадь перекрытия с координатами МРЛ). Карты составляются один раз и используются вместе с оперативными радиолокационными данными в центре сбора.

Рис. 7.3.4. Область перекрытия двух радиолокаторов [48].

После составления композитной картины 256×256 она архивируется и передается в различных формах в метеослужбы, управления водных ресурсов и другим потребителям в Великобритании и за границу. Полная композитная картина передается по межкомпьютерным линиям в метеослужбы Бельгии и Франции, а также на главный компьютерный комплекс метеослужбы Великобритании и на компьютерные системы других станций по протоколам X.25. Кроме того, каждый час она передается по национальной вещательной сети (nationwide broadcast communications) тем потребителям, у которых есть дисплеи с достаточной памятью для ее записи и отображения. Потребителям, располагающим менее мощными дисплеями, каждые 15 мин по этой вещательной сети передаются региональные сегменты размером 128×128.

Уже в 1989 г. по этой специальной сети постоянно получали радиолокационные изображения более 80 потребителей. В дальнейшем предусмотрена передача таких изображений через новую цифровую метеоинформационную систему.

7.3.4. Система FRONTIERS (Nimrod)

После приема первичных радиолокационных изображений с отдельных МРЛ они направляются в единую компьютерную систему FRONTIERS (Nimrod), где подготавливаются сводные, проверяемые по качеству картины и прогнозы, и затем передаются снова в Radarnet для

передачи в COSMOS, OASYS и в национальную вещательную сеть в виде региональных сегментов 128×128.

Проверенные на качество картины, передаваемые в COSMOS, вводятся в мезомасштабную цифровую прогностическую модель вместе с дождемерными данными из климатологической базы данных об осадках и передаются в BBC для показа ежедневных прогнозов погоды.

Концепция FRONTIERS (с 1981 г.) – оптимизированный прогноз осадков методами интерактивного получения радиолокационных и спутниковых данных [18]. FRONTIERS – компьютерная система, обеспечивающая синоптика всей необходимой информацией для подготовки краткосрочных прогнозов осадков. Информация представляется в ней на цветных дисплеях. Система дает синоптику возможность интерактивно манипулировать данными и контролировать качество радиолокационных изображений до составления прогноза.

В 1989 г. прогнозы составлялись с помощью простой линейной интерполяции с перспективой использования полей ветра из численных моделей прогноза [49].

Качество прогностической информации с заблаговременностью 3 ч проверяется до ее оперативной рассылки.

7.3.5. Методы контроля за техническим состоянием МРЛ

Как метеослужба Великобритании, так и потребители ее информации заинтересованы в постоянном контроле качества радиолокационных данных об осадках.

Эксплуатационники оперативных МРЛ обязаны выявлять технические проблемы МРЛ до того, как он прекратит работу. Подробные и объективные публикации [28, 48] убедительно показали, что единого метода выявления всех технических проблем, возникающих при эксплуатации МРЛ на оперативной сети Великобритании, не существует. Поэтому специалистами предлагается использовать комбинированный подход к оценке технического состояния МРЛ: аппаратный мониторинг, контроль качества оперативных данных и анализ качества данных в реальном времени за один месяц и более [28, 48].

1. Аппаратный мониторинг. Наиболее типичные причины отсутствия данных МРЛ – прерывание связи между МРЛ и потребителем или прекращение его работы.

Каждый МРЛ снабжен блоком отслеживания сбоев (БОС), который является регистрирующим устройством на базе ПЭВМ. БОС отслеживает работу наиболее важных узлов МРЛ и вспомогательных устройств (ток магнетрона, напряжение гетеродина, стабильность электропитания). Эти параметры проверяются каждые 10 с и выдаются на монитор ПЭВМ.

Если контролируемый параметр выходит за пределы допуска, на экране появляется сигнал тревоги и в метеослужбу в Брэкнелле отправляется уведомляющее сообщение по Met WAN (большой сети метеослужбы).

Это сообщение уведомляет круглосуточного дежурного Центра контроля в Брэкнелле, что МРЛ требует вмешательства специалиста, и туда направляется радиоинженер.

Значения всех параметров, измеренных блоком отслеживания сбоев, автоматически переустанавливаются каждые 10 мин, чтобы сразу были видны сбои МРЛ. В 50 минут каждого часа БОС отправляет сообщение в Центр контроля о нормальном функционировании.

В случае сбоя магнетрона БОС выдает сигнал местной переустановки для повторного запуска магнетрона. В случае неудачи с интервалом 15 с задаются еще два перезапуска. Если и они оказываются неудачными, система ждет следующей инициализации БОС в 50 мин, когда поступит новый сигнал переустановки тока магнетрона.

Особый случай представляет сбой в питании фидера, когда магнетрон не работает в первые 5 мин после запуска. Это препятствует переустановке тока магнетрона в течение 5 мин. В данной ситуации приемник продолжает работать, а процессор МРЛ выдает данные, содержащие в основном нулевые интенсивности, за исключением некоторых пикселов, смешанных с шумом или помехами от других МРЛ.

Компьютер Radarnet, принимающий все данные МРЛ, перед их обработкой в Nimrod автоматически игнорирует группы данных со всеми нулевыми интенсивностями, но если нет примеси шума, то данные будут восприниматься как реальные. При этом может сложиться впечатление, что данные нескольких МРЛ были объединены и получилась одна общая картина с большими площадями дождя, фактически отсутствующими и сходными с большими площадями фронтальной структуры осадков.

Интенсивность дождя, измеряемая в районах перекрытия двух МРЛ, можно сравнить сразу после поступления данных в Nimrod и узнать, правильно ли работает передатчик МРЛ. Радиолокационные данные всех МРЛ обрабатываются в Nimrod каждые 15 мин для удаления местников в нормальных и аномальных условиях распространения радиоволн, затем рассчитывается интенсивность осадков в каждом перекрывающемся районе (суммирование 5-километровых пикселов в мм/ч).

Если интенсивность дождя, измеренная МРЛ в районе совмещения ДНА двух МРЛ, меньше 1,56 мм/ч и интенсивность осадков на расстоянии 210 км меньше 3,12 мм/ч, то можно констатировать, что МРЛ обнаруживает мало осадков и что система Nimrod продолжает сравнивать районы перекрытия двух МРЛ. Это означает, что тест на сбой передатчика производится только тогда, когда МРЛ не обнаружил большого количества осадков.

Следующее условие тестирования заключается в проверке обнаружения в зоне перекрытия МРЛ интенсивности осадков более 3,12 мм/ч и больше 20 «мокрых» пикселов в том же районе пересечения ДНА. Если МРЛ прошел все эти проверки на двух перекрывающихся районах, то появляется сомнение в правильной работе передатчика, о чем выдается сообщение и заносится в файл журнала. В итоге данные одного МРЛ не будут включены в общую карту Nimrod Великобритании.

В то же время при сравнении районов на предмет сбоев передатчика можно проверить внезапные изменения чувствительности МРЛ. Для каждого МРЛ определяются накопленные осадки (т.е. сумма по всем 5-километровым пикселам в мм/ч) и пространственная протяженность зон осадков (число «мокрых» пикселов), которые сравниваются с теми же характеристиками, полученными за предыдущие 15 мин. Внезапное изменение интенсивности осадков и их пространственной протяженности показывает, что в работе МРЛ произошло какое-то изменение. Когда в работе МРЛ происходит такое ступенчатое изменение, никакие меры не принимаются, только делается пометка в журнале сбоев. Эту информацию изучают потом, и она будет первым сигналом, что у аппаратуры МРЛ появились проблемы. Таким образом, метод выявления изменений чувствительности полезен для получения сведений о рабочих характеристиках МРЛ, но, по мнению авторов [48], недостаточно надежен для удаления рядов данных из общей карты Nimrod Великобритании.

2. Выявление скрытых дефектов. Рассмотренные выше методы полезны для исключения передачи ошибочных данных потребителям. Однако многолетний опыт показывает, что более скрытые проблемы МРЛ могут существовать незамеченными продолжительное время. Для их выявления можно использовать оперативные данные об осадках из районов перекрытия двух МРЛ за длительные периоды времени.

Полученные при таком сопоставлении тренды технических характеристик МРЛ (и среднемесячных соотношений измеренных осадков в областях пространства, общих для двух или нескольких МРЛ) часто однозначно указывают на спад основных параметров МРЛ, разгоризонтирование или нарушение ориентирования МРЛ в процессе эксплуатации.

С момента организации сети МРЛ для выявления скрытых изменений параметров МРЛ каждые три месяца анализируются обобщенные данные измерений по небольшому числу часовых дождемеров и дождемеров, которые снимают показания один раз в сутки [19]. Для решения этой задачи можно использовать и одновременные измерения осадков на МРЛ и с помощью дождемеров. Опыт такого анализа показал, что для исключения ненужных подгонок требуется, чтобы выполнялись строгие критерии сопоставления данных [48].

Пригодными считаются только те результаты сопоставления, которые пройдут следующие тесты:

дождемер должен находиться не дальше 100 км от МРЛ;

МРЛ должен регистрировать накопленный слой осадков, превышающий 0,2 мм в пикселе, где установлен дождемер;

осадки должны выпадать в этом пикселе в течение часа;

дождемер не должен быть в списке недоступных.

Для исключения ошибок, связанных с чувствительностью МРЛ, данные МРЛ сначала подвергаются качественной проверке и корректировке на эффекты яркой полосы, дальности, орографических осадков и др.

Согласование проводится раз в неделю, но только при выполнении следующих условий:

после предыдущего согласования проведено больше 50 нормальных радиолокационно-дождемерных сравнений;

неопределенность фактора совместимости находится в приемлемых границах;

фактор совместимости существенно отличается от действовавшего ранее.

Несмотря на эти предосторожности, неизбежно остается неопределенность фактора совместимости. Она ограничена приемлемым уровнем, и временной ряд факторов служит мерой стабильности настройки МРЛ, особенно когда сравниваются временные ряды разных МРЛ. В [48] отмечается, что согласование по дождемерам нельзя считать удовлетворительным, если речь идет о долговременных вариациях чувствительности МРЛ. Проблемы стабильности МРЛ надо выявлять в момент их возникновения.

В [48] на основании многолетнего опыта эксплуатации МРЛ на оперативной сети для обеспечения гарантированного качества радиолокационных данных об осадках рекомендуется применять онлайновый мониторинг аппаратуры, автоматизированный реально-временной контроль качества и офлайновые методы диагностики и ослабления эффектов ограничений радиолокационных методов.

Методы, работающие в реальном времени, как правило, позволяют обнаружить только большие ошибки, а методы долгосрочной оценки качества должны применяться для выявления скрытых ошибок смещения измерения осадков. Эти методы необходимо объединить, и даже такое объединение требует постоянных посещений МРЛ радиотехническим персоналом.

3. Анализ надежности СВЧ элементов аппаратуры. Исследования радиотехнического персонала, проведенные на МРЛ, показали [28] связь резких изменений интенсивности осадков с небольшими изменениями тока магнетрона МРЛ и изменением напряжения на устройстве автоматического контроля частоты. При этом была выявлена техническая причина – резкое ухудшение спектра магнетрона из-за изменений сверхвысокого напряжения питания. При плохом спектре магнетрона на величину отраженного сигнала влияет нестабильность работы узкополосного фильтра по промежуточной частоте приемника.

При непрерывной работе МРЛ спектр магнетрона постепенно ухудшается, и типичный срок годности магнетрона составляет примерно год (а не несколько лет, как гарантируют его производители).

В приемнике слабым звеном Plessey 45C оказался блок преобразователя и ограничитель, который защищает приемник от мощных радиочастотных сигналов, которые поступают через антенну. «Просачивание» в приемник СВЧ энергии приводит к увеличению коэффициента шума и, следовательно, к уменьшению чувствительности МРЛ.

Более частой (чем предусмотрено регламентом) проверки с помощью анализатора спектра требует система автоматической регулировки частоты. Фильтр согласования приемника на промежуточной частоте вместо

номинальной полосы 750 кГц (по точкам 3 дБ) имеет на ряде МРЛ меньшее значение (до 650 кГц). Столь узкая полоса делает работу АРЧ критичной и в предельных случаях приводит к занижению интенсивности осадков на 85 %.

Плохая работа осушителя волновода при наличии в волноводе влаги может привести к односторонней потере в волноводе в 17 дБ.

Как рекомендуют авторы [28], для предотвращения плохой работы осушителя волновода на каждом МРЛ надо установить датчики точки росы. Они будут контролировать воздух, накачиваемый в волновод. Точка росы будет автоматически регистрироваться компьютерами, которые уже есть на каждом МРЛ. Когда точка росы превысит заданный уровень, будет выдан сигнал тревоги. (В Великобритании неисправные осушители волноводов возвращаются изготовителю для ремонта из-за невозможности провести его на МРЛ.)

Несвоевременная или редкая профилактика механических систем МРЛ может приводить к рассогласованию антенны по углу места и возникновению ошибки в юстировке антенны МРЛ по азимуту. Явным признаком последнего служит увеличение числа местников, когда радиолокационные отражения от осадков сдвигаются относительно карты местников, или смещение местных предметов относительно географической привязки.

Заключительная фраза работы [28] актуальна всегда, хотя авторы адресуют ее эксплуатационникам и изготовителям радиолокационной аппаратуры: «Важней всего то, что никогда нельзя верить тому, что обречено на правоту. Лучше тебя никто ничего не сделает, и кто знает, что ты можешь найти сам».

Очевидно, что обеспечение оперативной работы автоматизированных сетей необслуживаемых в месте установки МРЛ требует постоянных усилий добросовестных и высококвалифицированных специалистов.

7.4. Сеть NEXRAD США

7.4.1. Состав сети

Сеть NEXRAD США – образцовый пример единой многофункциональной сети, которая предназначена для одновременного получения информации, удовлетворяющей требованиям штормового оповещения, метеообеспечения авиации и измерения осадков.

Как уже отмечалось, сеть NEXRAD создавалась по глубоко продуманной и всесторонне проверенной концепции за счет федерального бюджета [31, 47]. Разработанный в процессе реализации концепции доплеровский радиолокатор WSR-88D обеспечил *качественный* скачок в проведении автоматизированных метеорологических радиолокационных наблюдений в любых погодных условиях – от чистой атмосферы до случаев прохождения ураганов. Своевременно выполненные трудоемкие работы по выбору и подготовке позиций для размещения WSR-88D позво-

лили в короткий срок (с 1991 по 1997 г.) установить 138 WSR-88D в 48 штатах континентальной части США, семь установок на Аляске, а также разместить WSR-88D в Пуэрто-Рико и на Гавайских островах. Размещение сети NEXRAD приведено на рис. 7.4.1а и 7.4.1б [47].

Передача информации потребителю с каждой станции NEXRAD производится в едином формате данных с использованием всех возможных видов и средств связи, которые в данным пункте экономически целесообразны.

Сеть NEXRAD работает круглосуточно с периодом обновления информации от 5 до 15 мин в зависимости от атмосферных условий. Стратегия обзора пространства антенной в зависимости от типа погоды не оптимизирована [47].

В чистом воздухе применяется медленный круговой обзор на пяти углах места, который занимает 10 мин. При наличии осадков круговой обзор происходит под углами места от 0,5 до 19,5° в двух режимах: в первом режиме требуется 6 мин на девяти углах места, во втором – 5 минут на 14 углах места (рис. 7.4.2) [26].

Зимой при небольших высотах радиоэха осадков (3–4 км) синоптики предпочитают информацию круговых обзоров, проведенных до меньших углов места с шагом меньше ширины ДНА (1°), а при возникновении интенсивных конвективных процессов нередко настаивают на проведении более частых обзоров на малых углах места.

Передача базовых данных и продуктов наблюдений WSR-88D всем заинтересованным потребителям обеспечивает составление дважды в час стыкованной карты по территории США в национальных центрах метеослужбы в Вашингтоне, Канзас-Сити и Майами и Национальном метеоцентре министерства обороны в Вашингтоне.

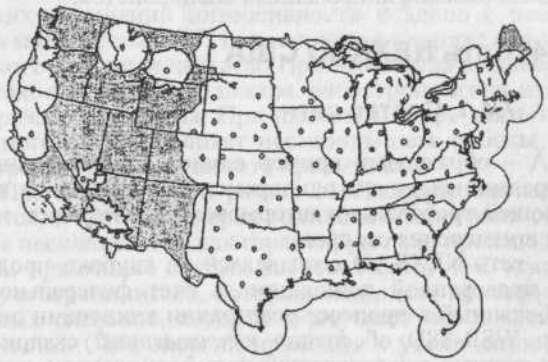

Рис. 7.4.1а. Общее радиолокационное покрытие на высоте 10 000 футов от места установки радиолокаторов в смежных штатах, существовавшее до ввода NEXRAD, и расположение радиолокаторов типа WSR-57 и WSR-74 [47].

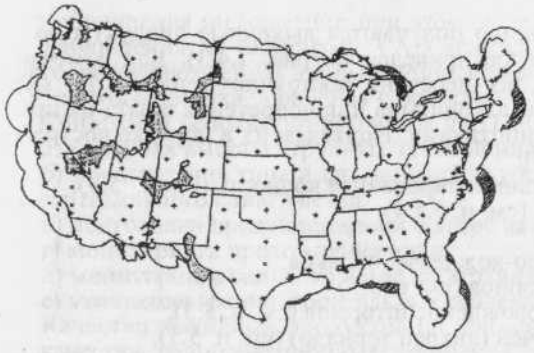

Рис. 7.4.1б. Общее радиолокационное покрытие радиолокаторами NEXRAD на высоте 10 000 футов от места установки радиолокаторов в смежных штатах и расположение станций Национальной метеослужбы и министерства обороны США. Заштрихованы районы, где будет сужено покрытие сетью NEXRAD на высоте 10 000 футов по сравнению с покрытием, существовавшим до внедрения сети NEXRAD [47].

В результате оперативной работы одним из важных достоинств информации сети NEXRAD признана возможность ее применения в экспертных системах текущего прогнозирования синоптика и гидролога, а также для инициации национальных, региональных и облачных прогностических моделей с высоким разрешением для составления численного метеопрогноза заблаговременностью до 24 ч (подробней см. главу 8).

7.4.2. Алгоритмы

Базовые данные WSR-88D – отражаемость, средняя радиальная скорость и ширина спектра радиальной скорости – после обработки выводятся на дисплей радиолокатора и одновременно анализируются с помощью алгоритмов, изложенных в главе 5.

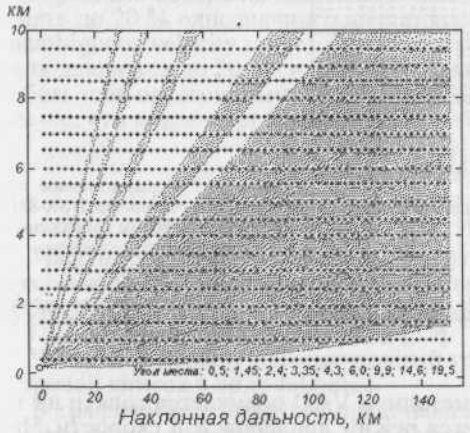

Рис. 7.4.2. Вертикальный разрез типичного объемного обзора WSR-88D, сделанного над островом Камано, в 150 км к востоку от радиолокатора [26].

Районы с данными заштрихованы. Местоположение каждой точки сетки декартовых координат отмечено крестиком. Местоположение антенны радиолокатора отмечено кружком.

На WSR-88D [47] постоянно получаются выходные продукты по 19 алгоритмам (один из примеров приведен на рис. 7.4.3). Как отмечают американские специалисты, их перечень постоянно меняется по мере смены и усовершенствования алгоритмов и приобретения опыта их практического использования синоптиками. Приведем их в порядке востребованности потребителями [47]:

1) VIL – вертикально проинтегрированная водность (см. п. 5.3),
2) VAD – профили ветра (см. п. 5.5.4),
3) осадки (см. п. 4.4),
4) высота радиоэха кучево-дождевых облаков,
5) обнаружение мезоциклонов (см. п. 5.5),
6) распознавание и сопровождение штормов (см. п. 5.3),
7) TVS – сигнатура смерчей (вихрей торнадо) (см. п. 5.5),
8) структура штормов (конвективных процессов с опасными явлениями),
9) ширина спектра (см. п. 5.5),
10) комплексная отражаемость слоя,
11) контуры высот радиоэха,
12) обнаружение града (см. п. 5.3 и 5.4),
13) потенциал опасной погоды (см. п. 5.3),
14) общий сдвиг (см. п. 5.5).

По-видимому, остальные пять алгоритмов используются эпизодически.

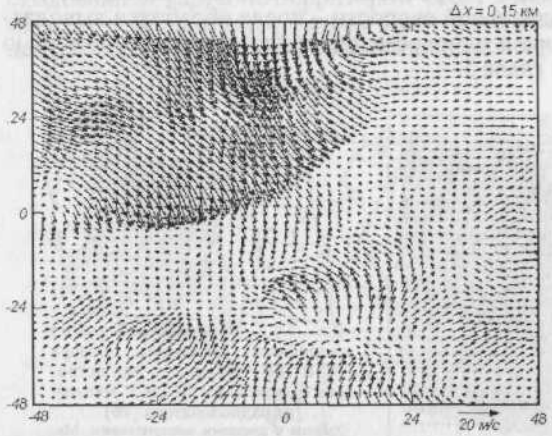

Рис. 7.4.3. Горизонтальное поле ветра, полученное на WSR-88D в Мемфисе методом сопряженного извлечения, предложенным Sun and Crook (1994, 1997).
Явление наблюдалось 24 июля 1996 г. и имело форму двух линий конвергенции [47]. Шаг сетки по дальности $\Delta x = 0{,}15$ км.

Профиль ветра с помощью методики VAD получается только на тех WSR-88D, на которых используется режим доплеровской скорости. Частота обновления информации при этом составляет 5–10 мин. Как правило, наблюдения по алгоритму VAD ведутся в районах, где отмечается много рассеивателей. В теплый сезон ветер измеряется в пограничном слое чистого воздуха, в районах с осадками и часто в облаках Ci и As.

Синоптики используют продукты VAD для следующих целей:

а) контроля высоты струйных течений нижнего уровня,
б) предсказания типа и интенсивности грозовых процессов по профилю вертикального сдвига ветра,
в) подготовки предупреждений о ветре на верхних уровнях,
г) мониторинга прохождения волн,
д) мониторинга сильного ветра на верхних уровнях,
е) уточнения границ фронтальных разделов на высотах.

Качество выходных продуктов по применяемым алгоритмам зависит от качества радиолокационных данных. Серьезными источниками их ухудшения являются отражения от местных предметов в нормальных и аномальных условиях распространения радиоволн и возникающие неопределенности в измерении доплеровских скоростей.

Последние наиболее часто отмечаются при высокой частоте посылок (1000 Гц) при низких углах места антенны. В этом случае район неопределенностей окрашивается в пурпурный цвет, что для оператора WSR-88D означает отсутствие полезной информации.

Для уменьшения отражений от местных предметов операторы WSR-88D имеют возможность выбрать один из трех режекторных фильтров нулевой скорости. Эти фильтры подавляют отражения от местных предметов примерно при нулевой радиальной скорости на 30, 40 или 50 дБ, что соответствует доплеровской скорости, равной примерно 2,3; 3,0 и 4,5 м/с в доплеровском режиме и 1,7; 2,4 и 3,4 м/с в режиме обзора.

В режиме обзора на малых углах места (0,5 и 1,5°) фильтр может занимать до 20 % однозначного диапазона измерения дальности и скорости (unambiguous velocity range). Поэтому со статистической точки зрения будет подавляться до 20 % сигналов, отраженных от метеообразований. При слабом или ортогональном к ДНА WSR-88D ветре это значение будет больше, что и приведет к занижению интенсивностей ливневых осадков.

7.4.3. Распространение продуктов NEXRAD

Массив оперативных данных с каждой станции NEXRAD состоит из двух частей: данных об осадках и радиолокационного закодированного сообщения (radar coded message). Последнее состоит из трех частей (A, B и C) и формируется автоматически [31].

Часть A содержит промежуточный графический продукт и буквенно-цифровой список в виде таблицы.

В графическом продукте представлены данные по отражаемости для ограниченной модели на мелкой сетке 1/16 × 1/16 (limited fine-mesh model, LFMM) для всей зоны обзора WSR-88D – 460 км. Этот продукт

передается синоптику Национальной метеослужбы для редактирования путем удаления или изменения данных.

Буквенно-цифровой список кодирует в каждом пикселе (квадрате) значения отражаемости и высоты, положение максимальной высоты радиоэха (где оно есть), координаты (местоположение) всех центроидов радиоэха конвективной облачности со значениями отражаемости, превышающими минимальный порог, и прогнозируемое перемещение каждого центроида.

Часть В содержит один профиль горизонтального ветра, полученный после обработки информации алгоритмом VAD.

Часть С содержит буквенно-цифровую информацию, которая указывает положение каждого обнаруженного мезоциклона и некоррелированный район горизонтального сдвига, каждый обнаруженный признак вихря торнадо, индекс града и данные о верхней границе шторма для каждого центроида.

Радиолокационное закодированное сообщение передается автоматически после ручного редактирования (если оно требуется) по сети связи AFOS System Z в Национальный метеоцентр, где составляется национальная радиолокационная сводная карта. Национальные сводные карты с разрешением 8×8 км, включая детальную карту осадков, составляются дважды в час.

Данные об осадках получаются в графическом и цифровом виде [12]. В п. 4.4 перечислены графические продукты системы NEXRAD по осадкам, которые отображаются 16 цветами на сетке 2×2 км в радиусе 230 км. Они предназначены в основном для вывода на цветные графические дисплеи главного процессора пользователя (ПУП) NEXRAD. (Каждый WSR-88D одновременно может обслуживать до 16 ПУП.) Дисплеи ПУП имеют разрешение не менее 640×512 элементов и 16 цветов. Функции отображения графических продуктов об осадках следующие:

вывод фоновой карты,
смещение центра,
масштабирование,
периодические снимки.

Данные об осадках в цифровом виде предназначены для передачи на компьютеры центров речных прогнозов (ЦРП) и бюро прогнозов метеослужбы (БПМС) для использования в автоматизированных моделях речного стока и прогностических расчетах.

1. Часовой цифровой продукт – текущие часовые или почасовые суммы осадков по квадратам 4×4 км. Их динамический диапазон составляет от –18 до 32 дБ*I*, а точность 0,5 дБ*I*. Период обновления – каждые 5 мин и автоматическая передача два раза в час в ЦРП и по запросу до четырех раз в час во все БПМС.

2. Избранные дополнительные данные, представляющие собой осредненные по площади 40×40 км значения интенсивности осадков за один или больше круговых обзоров за последний час. Обновляются каждые 5 мин и автоматически передаются каждые 30 мин в ЦРП и по запросу в

БПМС. Предусмотрена при необходимости передача и других дополнительных данных (см. п. 4.4).

До передачи потребителю данные переводятся на «универсальную» сетку, применяемую в Национальной метеослужбе и основанную на полярной стереографической проекции. Это позволяет выполнить быстрое совмещение данных, поступающих из разных пунктов. После процедур уплотнения с целью снижения нагрузки на средства связи данные передаются в БПМС и ЦРП для их обработки на региональном и национальном уровнях.

7.4.4. Служба распространения данных NEXRAD (NIDS)

В процессе создания сети NEXRAD была организована служба распространения информации NIDS (NEXRAD information dissemination service) [31, 47]. Для заграничных потребителей, метеорологов частного сектора, телевизионных служб и некоторых членов правительства NIDS готовит в закодированном виде восемь основных продуктов NEXRAD:

1) базовые отражаемости,
2) базовые доплеровские скорости,
3) VIL,
4) общее количество осадков (накопление) в шторме,
5) картина VAD,
6) профили ветра,
7) относительная скорость шторма,
8) таблица атрибутов шторма.

NIDS передает их через посредников в сфере телекоммуникаций (телевидение, радио, частные средства связи) или через метеорологические сервисные компании. С этой целью на каждом WSR-88D для потребителей выделено четыре порта. На конкурсной основе отбираются четыре компании, первичные дистрибьютеры, которые имеют право продавать основные продукты и создавать новые продукты повышенного качества, например местные, региональные и национальные мозаики данных сети NEXRAD.

Как отмечается в [47], «ни при каких условиях никакой компании не будет дано исключительное право получения данных и продуктов NEXRAD». Распространение информации сети NEXRAD через частный сектор рассматривается в США как выполнение обязательств Федеральной национальной метеослужбы по доведению до населения страны результатов своей прогностической деятельности через средства массовой информации.

7.4.5. Продукты NEXRAD и AWIPS

Наибольшую пользу информация отдельного WSR-88D и сети

NEXRAD приносит, если она своевременно окажется в руках квалифицированного синоптика. При угрозе появления опасных явлений ни один источник данных не изучается синоптиком более внимательно и не требует более частых консультаций, чем радиолокационные. Однако для составления успешного краткосрочного прогноза сведений только из одного источника даже самому опытному синоптику недостаточно.

Разработанная в США в рамках программы создания метеорологических рабочих станций *усовершенствованная интерактивная система обработки метеоданных* (*AWIPS*) (advanced weather interactive processing system) способна отображать все данные, необходимые для проведения текущего (nowcasting) и краткосрочного прогноза [31, 46, 47].

Основная задача AWIPS – объединение текущей информации от разных источников на одном дисплее без затраты синоптиком времени на преодоление технических трудностей при вводе на дисплей разнородной информации и ее объединении.

На дисплее текущей погоды AWIPS могут отображаться: карты отражаемости, осадков и радиальной скорости с WSR-88D, спутниковые изображения с большим разрешением, данные о молниях, результаты мезомасштабных наземных наблюдений, информация о ландшафте, гидрологические данные, административные карты и другие сведения, необходимые синоптику для работы.

Объединение информации на AWIPS выполняется с использованием цвета и анимации, алгоритмов экстраполяции положения радиоэха облаков и осадков и других метеорологических явлений. Изучая комбинации радиолокационных и других данных, синоптики осмысленно судят о потенциале опасного явления погоды и дают прямо с AWIPS в полуавтоматическом режиме штормовые предупреждения только для тех населенных пунктов и районов, которым опасное явление действительно угрожает.

Десятилетний практический опыт работы синоптиков США позволил рекомендовать AWIPS в качестве первой системы-резидента в офисах метеопрогнозов. Частью AWIPS является спутниковая связь между всеми офисами и Вашингтоном. Спутниковая связь позволяет получать в реальном времени спутниковые данные, а также набор результатов прогнозов из национальных центров прогнозирования. Впервые с помощью AWIPS синоптики на своих рабочих местах в любом прогностическом офисе США получают возможность детально рассмотреть погодные условия в национальном и глобальном масштабе, имея в то же время детальные поля осадков и опасных явлений с WSR-88D.

Важными компонентами внедряемых AWIPS являются вычислительное устройство, новые алгоритмы прогноза погоды, модели и алгоритмы гидрометеорологического прогноза для своевременного предупреждения о наводнениях, возможности оперативного подбора соотношений *Z–I*, редактирования данных, видоизменения правил прогноза и переделки прогнозов.

AWIPS поможет преобразовать каждый центр метеопрогнозов не только в совершенный метеоцентр, но и в место изучения метеопрогноза.

Планируется установить AWIPS в университетских городках для их использования в научной работе.

Дальнейшее развитие за счет совместного использования данных всех видов наблюдений позволит AWIPS максимально достоверно описывать погоду независимо от способа получения исходной информации. Последнее обеспечит в конечном счете максимально возможное практическое использование базовой информации и продуктов WSR-88D.

7.4.6. Техническое обеспечение работы сети NEXRAD

Технический контроль за работой WSR-88D на сети NEXRAD осуществляет OSF NEXRAD – подразделение оперативной поддержки Национальной метеослужбы США. Оно было создано в 1988 г. в Нормане (Оклахома) для централизованной координации управления, разработки приложений и технической поддержки сети NEXRAD. Это подразделение осуществляет сопровождение оперативных систем (техническое управление, обслуживание программного обеспечения и контроль за конфигурацией компонентов системы), а также координацию с аналогичной службой Федерального авиационного управления. В OSF NEXRAD работает 200 человек [34, 47].

В OSF разработаны процедуры проверки параметров основных рабочих характеристик передатчика, приемника, антенны и системы обработки сигнала. На WSR-88D автоматически контролируется мощность передатчика и настройки приемного устройства, определены обязательные настройки в процессе профилактических работ. Для проверки точности юстировки и ориентирования антенны каждые 28 дней производится проверка WSR-88D по солнцу. Настройка и проверка ошибок отражаемости проводятся с интервалом 84 дня. Постоянно проверяется минимально обнаружимый сигнал WSR-88D.

На все технические вопросы, возникающие в процессе эксплуатации WSR-88D, круглосуточно можно получить ответ из центра обслуживания сети OSF NEXRAD. В OSF ведется постоянный контроль за состоянием всех МРЛ сети NEXRAD с обязательным предупреждением каждого МРЛ о возникающих проблемах, которые нельзя решить на месте.

OSF определил и контролирует параметр SYSCAL. Когда этот параметр находится в установленных пределах, считается, что оценка отражаемости не выходит за требуемые границы ±1 дБ.

7.5. Сеть доплеровских МРЛ Испании

7.5.1. Общие задачи

Сеть МРЛ Испании с 1989 г. состоит из 12 доплеровских радиолока-

торов фирмы Ericsson, установленных на Пиренейском полуострове, и одного – на Канарах (рис. 7.5.1) [38] (восемь из них в диапазоне *S*, четыре в диапазоне *C*). При организации сети в северо-западных и центральных районах Испании были установлены следующие приоритеты [38].

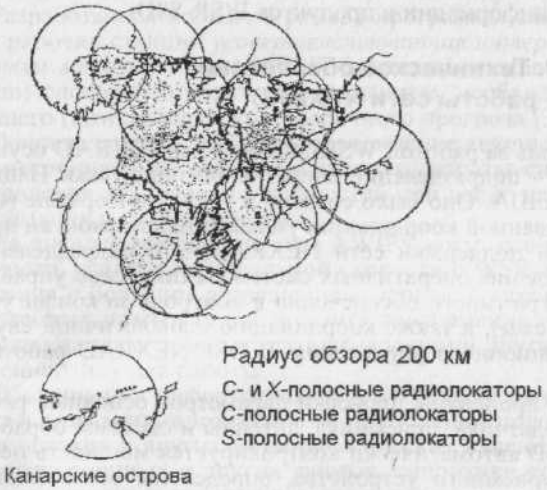

Рис. 7.5.1. Сеть доплеровских МРЛ в Испании [38].

1. Обеспечение радиолокационной информацией прогностических служб для подготовки текущих и краткосрочных прогнозов заблаговременностью 0–2 ч (текущий прогноз опасных явлений для авиации), 0–6 ч (прогноз осадков и опасных явлений для населения), 0–12 ч (прогноз при интерактивном совмещении радиолокационной и спутниковой информации с дальнейшей перспективой ввода совмещенных данных в мезомасштабные численные модели).

2. Гидрология – климатология осадков для прогноза наводнений, оценки влагозапасов почвы, исследований по физике облаков и оценки возможности проведения активных воздействий.

Радиолокационные данные должны накапливаться и систематизироваться для трех регионов Испании: прибрежного средиземноморского, равнин центральной части Испании с выделением зон осадков умеренной интенсивности или снега зимой и северо-западного прибрежного региона для оценки вероятности выпадения и интенсивности слабых и умеренных осадков на больших площадях в любое время года.

7.5.2. Структура сети и выходные продукты

1. Первый уровень: доплеровские радиолокаторы, обслуживающие потребителей в радиусе обзора.

2. Второй уровень: региональные контрольные центры, где объединяются данные двух-трех радиолокаторов (например, Малага–Севилья, Сарагосса–Барселона, Сан-Себастьян–Сантандер–Ла-Корунья).

3. Третий уровень: объединение информации всех радиолокаторов в Национальном прогностическом центре в Мадриде на центральном компьютере (SIRAM).

В Национальном центре производится и совмещение радиолокационной и спутниковой информации. Последняя получается с помощью SAIDAS.

Все позиции размещения МРЛ связаны с региональными и национальными центрами телефонными или оптоволоконными линиями с минимальной скоростью передачи 4800 байт/с.

Зона эффективного радиуса установлена для каждого МРЛ равной 200 км; наблюдения проводятся в радиусе 240 км со скоростью вращения антенны 6 об/мин. К базовым данным относятся отражаемость, доплеровская скорость и спектр доплеровских скоростей. Обновление информации производится каждые 10 мин.

За 10 мин в режиме «отражаемость» производится круговой обзор на 20 углах места, что дает 12 изображений CAPPI и одно ИКО (пиксел 2×2 км), из которых получаются максимальная отражаемость в каждом столбе, высота максимальной отражаемости, высота радиоэха, вертикальный разрез по любому направлению.

В доплеровском режиме под одним углом места с разрешением 1×1 км получаются три изображения ИКО. Доплеровские продукты получаются с помощью быстрого преобразования Фурье для 32 импульсов при частотах следования 900 и 1200 Гц. В последние годы в доплеровском режиме добавились круговые обзоры еще под восемью углами места.

Изображения на дисплей выводятся в 16 цветах, которые выбираются самим потребителем; в качестве фона могут использоваться административная карта Испании, водосборы рек, авиатрассы.

К специальным продуктам относятся: слой накопленных осадков; прогноз перемещения и начала осадков для 16 пунктов, выбранных из списка; карта вертикальных профилей ветра на высотах CAPPI, выбранных потребителем. Их получают с помощью программ радиолокационной метеорологической обсерватории Макгилльского университета (Канада) [14, 17].

Местники удаляются с помощью маски в режиме «отражаемость» и фильтра нулевой скорости в доплеровском режиме.

Слой осадков (дождя или снега) в миллиметрах в каждом пикселе 2×2 км получают за следующие периоды: 0–6, 6–12, 12–18, 18–24 ч, за сутки с 7

до 7 ч, за сутки с 0 до 24 ч и за любой период, выбранный потребителем. Расчет слоя осадков производится для 200 пикселов по выбору потребителя.

Региональные контрольные центры управляют радиолокаторами, входящими в регион, и отвечают за их ремонт. Кроме того, в них стыкуются изображения 240×240 км, из которых создается сводная карта на общей площади 960×960 км по квадратам 4×4 км. Сводная карта может передаваться в соседние регионы и Национальный центр.

7.5.3. Национальный центр

Основные функции Национального центра сети в Мадриде сводятся к следующему:

сбор спутниковых и синоптических данных с SAIDAS;

сбор информации с радиолокаторов (слой осадков, высота радиоэха, картины CAPPI, запрос дополнительных продуктов);

получение продуктов RAINSAT и составление прогнозов;

получение комбинированного изображения спутниковых и радиолокационных данных;

автоматическое представление полученных продуктов;

запись продуктов по файлам;

передача продуктов RAINSAT и комбинаций на радиолокаторы;

архивация.

Спутниковые данные представляются в формате спутниковой проекции по элементам 2,5 км при визуальных данных и 5 км в полосах ИК и водяного пара.

Комбинированное изображение с МРЛ состоит из элементов размером 4×4 км и занимает площадь 512×512 элементов в проекции Ламберта. Комбинированное изображение осадков на CAPPI содержит интенсивность дождя (мм/ч), комбинированное изображение максимальных высот радиоэха содержит максимальную высоту радиоэха (км) и накопление осадков (мм) за определенный период.

Изображение осадков на ИКО ПВ содержит интенсивность дождя (мм/ч), максимальную высоту радиоэха (км), накопление осадков (мм) при разрешении элемента 4 км в формате 120×120 элементов.

Синоптические данные содержат сведения о температуре (°С), давлении (гПа), скорости ветра (км/ч), направлении ветра (градусы по часовой стрелке от севера) и точке росы (°С) на нескольких высотах. Эти ряды данных представляются на соответствующей широте и долготе в установленном формате.

Главной задачей процесса обработки является получение следующих продуктов:

преобразование спутникового изображения (визуального, ИКО и водяного пара) в коническую проекцию Ламберта (каждые 30 мин). В визуальное изображение вводится поправка на угол солнца (для каждой широты и долготы элемента, даты и времени суток поправки различны);

вероятность дождя (каждые 30 мин), получаемая по климатологическому алгоритму осадков. Эта карта сопоставляется с районами осадков на комбинированной радиолокационной карте с повторением при необходимости (когда площади дождя со спутника больше или меньше площадей дождя на радиолокаторе);

интенсивность дождя (каждые 30 мин);

вероятность дождя по прогнозу (каждые 30 мин);

интенсивность дождя по прогнозу (каждые 30 мин);

комбинация радиолокационных и спутниковых данных о дожде в пикселах без радиолокационной информации (каждые 10 мин);

комбинированная карта максимальных высот радиоэха и спутниковой информации (каждые 10 мин). Для этого ИК данные переводятся в карту высот с привлечением данных репрезентативного зондирования, введенных оператором;

сводная карта слоя осадков для всей страны, состоящая из часовых накоплений на каждом МРЛ (каждый час). Для прогнозирования по этим изображениям используется алгоритм взаимной корреляции 16 территорий. Система дает также прогноз для 16 пунктов по выбору потребителя.

Эти продукты охватывают всю карту Испании в конической проекции Ламберта, используются на местах и снова передаются в региональные управления.

Изображения за последние 48 ч хранятся на диске и могут просматриваться на площади 2048×2048 км с разрешением 4 км.

Система может выдавать на дисплей эти изображения с наложением четырех сеток: географических границ, широты и долготы, радиуса радиолокационных наблюдений и поля ветра в реальном времени по данным RAINSAT.

7.5.4. Модуль RAINSAT

Модуль RAINSAT является основой системы и отвечает за создание перечисленных выше продуктов по входным данным в приемлемой для отображения форме [14, 17].

RAINSAT объединяет информацию об осадках и верхней границе радиоэха с нескольких МРЛ с изображением геостационарного спутника (GOES, GMS или Meteosat) для создания композитных изображений синоптического масштаба (2000×2000 км) с целью мониторинга в реальном времени и наукастинга. Программа RAINSAT картирует визуальные и ICAO изображения в конической проекции Ламберта или в полярной стереографической проекции, вводит необходимые поправки в визуальные данные на угловые вариации солнца, а затем объединяет визуальные и ИК данные, создавая карты с выделением зон дождя и гроз на основе физико-статистической классификации. Последняя разработана по большому количеству сопоставлений данных МРЛ и ИСЗ (см. п. 5.2).

Радиолокационные данные об осадках накладываются на карту осадков RAINSAT. К полученной таким образом карте осадков с помощью

алгоритмов расчета скорости на основе кросскорреляции и линейной экстраполяции (см. главу 8) готовятся материалы для краткосрочного прогноза заблаговременностью от 1 до 6 ч. При создании прогностических карт можно также использовать синоптические скорости на уровне поворота ветра вместе со скоростями, рассчитанными методом кросскорреляции во время подготовки прогностических карт.

Можно получить карту высоты радиоэха, в которой объединены информация о высоте радиоэха с сети МРЛ и ИК изображение.

Пакет программ для отображения в интерактивном режиме дает синоптику возможность полностью использовать потенциал спутниковых и радиолокационных данных.

Модуль RAINSAT установлен в Национальном центре по версии RAINSAT–MASTER. Он бездействует до тех пор, пока от SIRAM–SAIDAS–COM не поступит сообщение о приеме нового ряда спутниковых данных, после чего он начинает перевод этих данных в проекцию Ламберта площадью 512×512 пикселов (4×4 км) для вывода на дисплей. После этого преобразования модуль нормализует визуальное изображение по яркости относительно солнца (дня года или времени суток) и калибрует ИК изображение путем перевода уровня сигнала на спутнике в шкалу радиояркостных температур. Полученные изображения заносятся в главный файл выходных продуктов для потребителей.

После этого модуль RAINSAT определяет вероятность дождя и интенсивность осадков по визуальным и ИК данным, если заранее в него были заложены схемы классификации. Затем RAINSAT выдает любое изображение согласно схемам физико-статистической классификации, выбранным потребителем.

Выполняя эти задачи, модуль RAINSAT распределяет спутниковую информацию по комбинированным радиолокационным изображениям по пикселам, где нет радиолокационных данных.

Получив продукты по наукастингу, модуль RAINSAT начинает подбирать необходимые продукты для прогноза. Для установления корреляции между двумя соседними изображениями, сдвинутыми по времени на 30 мин, он разбивает все изображение на матрицу элементов (5×5). Каждый участок (из 25) оценивается отдельно. В процессе вычисления получается поле ветра на площади 2084×2084 км. Первоначальное поле ветра можно определять по синоптическим продуктам, полученным SAIDAS, и по оценке ветра на радиолокаторах (модуль FORECAST). По вычисленному полю ветра модуль RAINSAT вставляет каждый элемент входного изображения с вычисленной суммой осадков на свое место в выходном изображении прогноза. Система выдает одно прогностическое изображение для вероятности дождя и одно для интенсивности осадков.

Каждое выходное изображение (с наукастингом и прогнозом) записывается для потребителя в файл основных продуктов и сообщает о наличии продуктов.

7.5.5. Ограничения

Опыт практической работы сети позволил установить ограничения [20], возникающие при использовании оперативной информации.

1. Большие города вокруг радиолокатора (в радиусе до 60 км) создают «мертвые» зоны. Для точного мониторинга осадков в этой ситуации требуется привлекать доплеровскую информацию и наземные данные об осадках.

2. Доплеровский радиальный ветер не очень пригоден для быстрой диагностики, но весьма полезен для опытного синоптика.

3. Зимние осадки на 10-сантиметровом МРЛ отображаются неточно, а во время гроз с градом отмечается заметное ослабление на 5-сантиметровом МРЛ.

4. Возникают затруднения при адекватном выборе порогов отображения, определении максимальной высоты радиоэха и масок местников, особенно для ДМРЛ с полосой *S*.

5. На большом удалении от радиолокатора заметна потеря точности, ее приходится компенсировать, используя данные соседних ДМРЛ.

7.6. Сеть автоматизированных МРЛ Японии

Сеть МРЛ в Японии предназначена для измерения характеристик осадков с целью прогноза наводнений и регулирования режима рек при эксплуатации плотин на горных реках [52].

Контроль за режимом рек осуществляется в Японии речными управлениями министерства строительства (Ministry of Construction), которое имеет для этого сеть из 22 автоматизированных МРЛ (рис. 7.6.1 [52]) для передачи информации местным строительным управлениям.

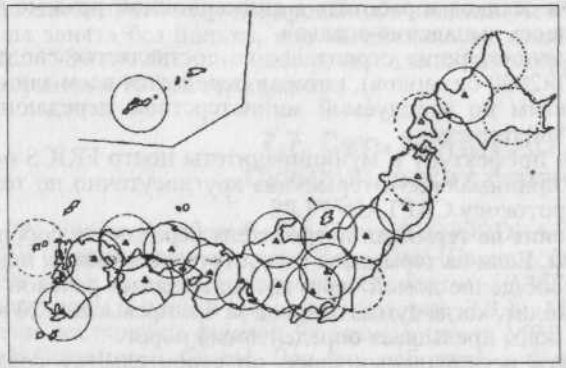

Рис. 7.6.1. Расположение радиолокаторов-дождемеров в Японии [52].

Доведением информации об осадках отдельных МРЛ и их сети до префектур и муниципалитетов занимается Управление интегрированных коммуникаций между реками и бассейнами FRICS (Foundation of river and basin integrated communications).

Радиус действия радиолокационной системы OWASAN, на базе которой создана сеть, составляет 200 км, количественные измерения проводятся в радиусе 120 км. Система OWASAN имеет следующие технические характеристики: несущая частота 5270 МГц (5 см), ширина ДНА 1,2°, импульсная мощность 250 кВт, скорость вращения антенны 5 об/мин, частота посылок 260 Гц, длительность зондирующего импульса 2 мкс. В полярной системе размер пиксела для измерения (2,81°×3 км) или (1,41°×3 км). Устранение местников производится с помощью индикатора движущихся объектов или карты местников. Для получения данных на одинаковых высотах радиолокатор ведет наблюдения на трех углах места для получения изображения ИКО ПВ. Радиолокатор в месте установки не обслуживаемый, поэтому его работа контролируется автоматически (предусмотрено тестирование всех систем и выявление неисправностей).

Сеть МРЛ работает круглосуточно с интервалом 5 мин с компьютерной обработкой данных об осадках, отображением и передачей этой информации потребителям.

Автоматизированный радиолокатор-дождемер после первичной обработки преобразует информацию об осадках в форму, удобную для применения в речных и дорожных управлениях, и передает ее на терминальные станции местных управлений министерства строительства. На них поступает базовая информация: средняя за 5 мин интенсивность осадков в полярных координатах и картина пространственного распределения осадков в радиусе обзора МРЛ.

Цветная (качественная) и цифровая (количественная) карты распределения интенсивности осадков позволяют определить скорость и направление перемещения зон осадков и работать в анимационном режиме для изучения истории процесса выпадения осадков.

В едином центре министерства строительства составляется сводная карта по Японии (4800×2000 символов), которая передается всем заинтересованным потребителям по арендуемой министерством передающей линии со скоростью 4800 бит в сек.

Передачу данных в префектуру и муниципалитеты центр FRICS осуществляет по запросу принимающего терминала круглосуточно по телефонной сети NTT по протоколу CAPTAIN PLPS.

При угрозе наводнения на терминал потребителя передаются сообщение и звуковые сигналы. Если на терминале отсутствует дежурный, центр FRICS передает ему сообщение домой через автоматический речевой генератор. Это же происходит, когда сумма осадков за час превышает 20 мм, 80 мм и когда уровень воды превышает определенный порог.

В каждом из десяти региональных бюро по строительству создан центр сбора данных по региону, который собирает информацию об осадках; к нему возможен доступ из другого региона.

Образец передаваемых изображений приведен на рис. 7.6.2.

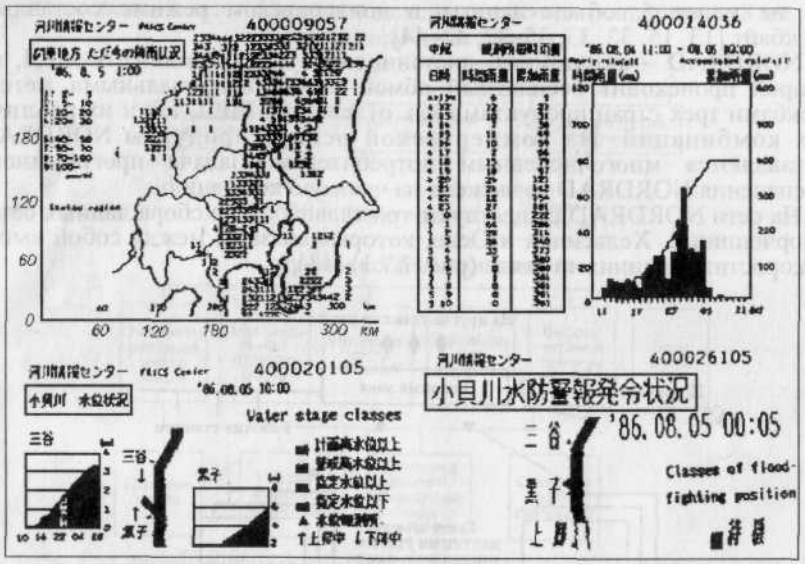

Рис. 7.6.2. Образец гидрометеоинформации и меры против наводнения [52].

Изображения передаются раздельно (для приема одного), пакетами (по четыре группы) и всех радиолокационных изображений за 6 ч с записью для дальнейшего копирования и анализа. Чтобы телефонная линия не была занята без пользы, она автоматически отключается от центров. На март 1989 г. в Японии было установлено 2290 терминалов, конечная цель – установка 10 000 терминалов.

7.7. Сеть NORDRAD Скандинавских стран

A Nordic Weather Radar Network (NORDRAD) – сеть доплеровских МРЛ Скандинавских стран (Норвегия, Швеция, Финляндия) – работает с 1991 г. и к настоящему времени состоит из 19 МРЛ (11 в Швеции, семь в Финляндии и один в Норвегии) (см. рис. 7.8.1). МРЛ для Швеции и Норвегии поставлены фирмой Ericsson, а шесть МРЛ для Финляндии – фирмой Gematronic, GmbH. Все они работают в *C* диапазоне. Пакеты программ для МРЛ подготовлены фирмами EWIS (Ericsson Weather Information System) и IRIS (Interactive Weather Information System (от Sigmet Inc.,

USA)). Они обеспечивают получение информации каждые 5–10 мин на площади 240×240 км по пикселам 2×2 км по 12 слоям ИКО ПВ. Этот объем данных оценивается в 170 кбайт при среднем коэффициенте уплотнения не менее 5; объем данных в доплеровском режиме составляет 340 кбайт [13, 15, 32, 33, 35–37, 42–44].

NORDRAD – автономная, дистанционно управляемая сеть МРЛ, на которой происходит бесплатный обмен между национальными метеослужбами трех стран продуктами как отдельного МРЛ, так и их различных комбинаций. На коммерческой основе продукты NORDRAD поставляются многочисленным потребителям. Задача программного обеспечения NORDRAD возложена на частную компанию.

На сети NORDRAD существуют три главных узла сбора данных сети: в Норчепинге, Хельсинки и Осло, которые связаны между собой высокоскоростными линиями связи (рис. 7.7.1) [43].

Рис. 7.7.1. Главный узел и региональные рабочие станции сети NORDRAD [43].

Главные узлы сети NORDRAD служат центрами национальной сети, имеющей форму звезды. Все потребители и МРЛ соединены с главным узлом страны либо напрямую, либо через местный узел. Местный узел может объединять узлы получения данных и иметь потребителей, подключенных к узлу распределения данных.

Сеть NORDRAD выполняет функции от коммуникационных до потребительских. Логическая структура сети NORDRAD представлена в табл. 7.7.1 [43], а функциональная схема – на рис. 7.7.2 [43].

Некоторые из функций (см. рис. 7.7.2) выполняются компьютером МРЛ, и результат этой обработки всегда есть в компьютере узла; другие функции выполняются только по запросу потребителя сети.

Общими продуктами сети NORDRAD являются композитные изображения данных более чем с одного МРЛ. Стандартные композитные изображения составляются:

для района с максимальным размером 1500×1500 км с максимальным

разрешением 2×2 км;

для всех Скандинавских стран с максимальным разрешением 2×2 км;

для северной части Европы с максимальным разрешением 8×8 км.

Рис. 7.7.2. Функциональная схема обработки и передачи данных сети NORDRAD [43].

Таблица 7.7.1

Логическая структура сети NORDRAD [43]

Источники данных	Способ хранения	Виды обработки	Отображение информации у потребителей
Доплеровские радиолокаторы	Архив	Стыковка информации МРЛ	Дисплеи Интерфейс
Выходные продукты и изображения		Извлечение и ввод необходимых синоптику данных	
Прочие		Перевод из формата в формат	
Представление информации сети МРЛ: заказ, административное управление и контроль, кодирование и сжатие *Сеанс*: стандартизация диалога *Передача информации*: защита передаваемых данных, протокол *Сеть*: выбор маршрута доставки передаваемых данных до места назначения *Связь*: защита передаваемых байтов *Физическая связь*: линии PTN			

Изображения даются в полярной стереографической проекции с возможностью подключать для анализа информацию от других источников (дождемеров, спутников, наземной сети и т.д.).

Определен минимальный набор результатов наблюдений МРЛ, которые всегда есть на МРЛ и на сетевом узле (см. рис. 7.7.3):

карта отражаемости,
карта доплеровских скоростей,
карты по результатам измерений на МРЛ с двойной поляризацией,
данные других источников.

Потребитель сети NORDRAD может переводить эти изображения или данные с других узлов на свой собственный компьютер. На нем он может обрабатывать их по своему усмотрению: составлять свои композиции или заказать дополнительные расчеты.

О вводе данных в систему PROMIS 600 и их практическом использовании см. п. 8.2.2.

В Финляндии частным потребителям предлагается лицензионная компьютерная программа. Радиолокационные данные (комплексные ИКО ПВ и по субъективной цветовой шкале данные об интенсивности осадков в трех градациях: слабые, умеренные и сильные) загружаются с Bulletin board system для микрокомпьютера и передаются по телефону [39].

7.8. Международная сеть МРЛ в Западной Европе

7.8.1. Результаты COST-73 [5, 22]

Различные климатические условия в странах Европы (см. табл. 7.8.1 [50] и рис. 7.8.5 [50]) диктуют и разные требования к радиолокационной метеорологической информации. В одних странах главная угроза – наводнения, в других ущерб причиняют грозо-градовые процессы. Во время выполнения проектов COST-72 и COST-73 сети автоматизированных МРЛ сформировались почти в каждой стране. Объединение их информации [30] стало актуальным для большинства стран.

На рис. 7.8.1–7.8.3 [22] показано, какую важную для практических целей информацию можно получить из объединенных радиолокационных данных, пользуясь результатами наблюдений сетей МРЛ разных стран (рис. 7.8.4).

Несмотря на то, что требования к радиолокационным метеоданным в странах Европы отличаются из-за различия не только климатических условий, но и социально-экономических структур, между странами достигнуто широкое соглашение по требованиям, возможностям, соотношению затрат и выгод, а также каналам распространения информации. Указанные соглашения вылились в примерные спецификации для стандартных радиолокационных систем Европы. Основные рекомендации COST-73 сформулированы К.Г. Кольером в [5].

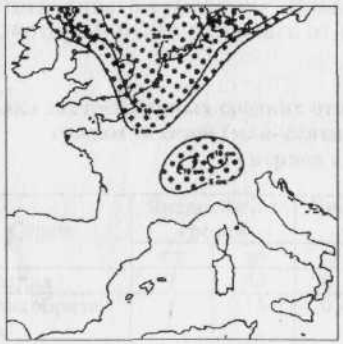

Рис. 7.8.1. Схематичное представление накопления снега за 12 ч по радиолокационным и спутниковым данным для Европы [22].

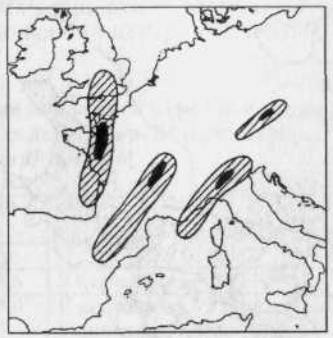

Рис. 7.8.2. Схематичное представление сводки опасной погоды за предшествующий час по изображениям COST с помощью различных алгоритмов и независимых данных [22].

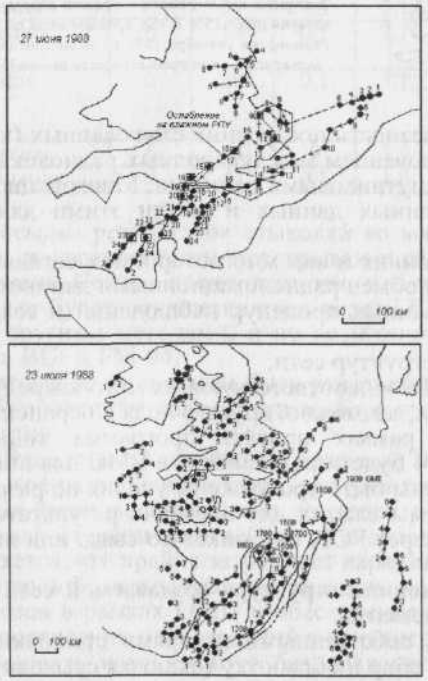

Рис. 7.8.3. Два примера траекторий радиоэха над северо-западом Европы, полученные по радиолокационным данным из Великобритании, Нидерландов, Франции и Швейцарии для изучения взаимодействия конвективных ячеек и эффектов топографии.
Направление движения указано стрелками, а положения с интервалами 1 ч пронумерованы. На нижнем рисунке показан генезис линии шквалов (тонкая линия) над Францией [22].

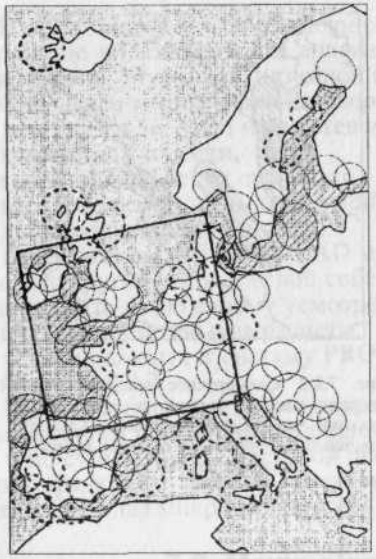

Рис. 7.8.4. COST-73 – проект создания сети метеорологических радиолокаторов.

Заштрихованные участки – области обзора локаторов ниже 1500 м над уровнем моря по состоянию на сентябрь 1991 г.; незаштрихованные круги – планируемые области обзора [5].

1. Признана ценность и полезность построения стыкованных (композитных) изображений с использованием международных радиолокационных данных, совмещенных со спутниковыми данными. Многонациональное совмещение радиолокационных данных и обмен этими данными должны основываться:

на использовании двухсторонних и/или многосторонних соглашений, регулирующих международный обмен радиолокационными данными;

на разработке стандартизованных процедур наблюдений и создании банков данных;

на разработке подходящих структур сети;

на использовании BUFR FM-94 и соответствующих методов редукции данных в ближайшем будущем и, возможно, другого кода в перспективе.

2. Уже разработанная в рамках проекта программа кодирования/декодирования BUFR FM-94 будет представлена в ВМО для широкого внедрения. Кроме того, должны быть продолжены усилия по разработке еще более эффективной схемы сжатия для передачи результатов радиолокационных наблюдений через ГСТ, спутниковую связь или любым другим подходящим способом.

3. По техническим соображениям структура создаваемой сети МРЛ должна включать следующие элементы.

Региональные субрайоны с собственными центрами стыковки данных, которые будут отвечать за сбор и обработку (включая стыковку) метеорологических радиолокационных данных, поступающих от стран со-

ответствующего субрайона. Планируется расширение региона сбора данных, который будет включать от пяти до восьми центров стыковки.

Таблица 7.8.1

Сводка экстремальных средних отношений числа дней с грозой и числа дней с градом за сезон (май–сентябрь) для десяти европейских стран за период с 1961 по 1990 г. [50]

Страна	Число дней с грозой		Число дней с градом		Районы опасной погоды
	от	до	от	до	
Австрия	7	43	0,1	3,6	Юго-западная дуга Альп
Великобритания	1	13	0,4	5,0	К востоку от Уэльса по линии Манчестер–Бирмингем–Ноттингем
Германия	16	33	0	3,8	Шварцвальд, Швабские Альпы
Испания	1	25	0,1	2,9	Кастилья и Леон, Ла Манча, к югу от Пиренеев
Италия	9	39	0,2	1,8	Вдоль северных границ страны
Словакия	11	34	0,3	2,1	Татры
Словения	6	54	0,1	2,7	Север страны по линии Грац–Марибор–Вазардин
Франция	5	29	0,1	3,1	Районы вокруг центрального массива к югу от Тулузы по линии Лимож–Гренобль
Хорватия	6	34	0	2,4	Север страны
Швейцария	9	42	0,1	1,8	Северная и южная часть страны

Рассылка результатов стыковки во все региональные центры в виде набора по возможности перекрывающихся субрайонов с подходящими размерами. Сейчас предполагается, что таких субрайонов будет шесть. Рассылка будет осуществляться через ГСТ, спутниковую связь или любыми другими методами, и по возможности будет использоваться программа BUFR FM-94.

Прежде всего должны быть утверждены основные идеи по географическим проекциям, шагу сетки, выбору уровней и определению конечных продуктов.

4. Вследствие того, что: а) основные модели циркуляции (ОМЦ) имеют плохое разрешение и характеризуют количество осадков только в виде средних суточных и месячных значений; б) связь между дождем и стоком в высшей степени нелинейна; в) скорость инфильтрации очень сильно изменяется, что крайне затрудняет параметризацию, для разработки более эффективной схемы параметризации поверхностных гидрологических процессов в рамках ОМЦ и обеспечения адекватности базы данных для гидрологических исследований в континентальном масштабе необходимо использовать комплексную базу радиолокационных данных. Создание системы «наблюдения за реками» в международном масштабе (макрогид-

рология), в особенности для целей оповещения об опасности наводнений, а также в интересах повседневной эксплуатации международной речной сети, было бы полезным для потребителей, расположенных как у истоков рек, так и в их нижнем течении.

7.8.2. Состав сети COST-75

В 1998 г. в Европе функционировало более 110 МРЛ (рис. 7.8.6) [39], из которых более 60 доплеровские, причем число последних постоянно увеличивается. Большинство МРЛ *C*-полосные. Национальные сети МРЛ есть в Великобритании, Испании и Франции (табл. 7.8.2).

Таблица 7.8.2

Оперативные метеорологические радиолокаторы в Европе на декабрь 1997 г. [39]

Страна	Число радиолокаторов	Полоса частот	Число углов места антенны	Частота обновления данных, мин	Число оборотов антенны в минуту	Частота следования импульсов, Гц	Метод устранения местников*
Австрия	4	*C*	21	10; 5	4,5	600	*M, D, S, R, I*
Великобритания	12	*C*	4	5	1–3	300–1200	–
Венгрия	3	*X, S*	4	5	3	250 *	–
Германия	10	*C*	19	15	3	600–1200	*M, D, I*
Греция	4	*C, S*	4	10	3	250	–
Дания	2	*C*	10	10	2–6	250–1200	*M, S*
Ирландия	2	*C*	10	15	2–6	250–1200	–
Испания	12	*C, S*	20	10	2–6	250–1200	*M, D*
Италия	14	*X, C*	10	15	2–6	300–1200	*M, D, P, I*
Нидерланды	2	*C*	4	10	3	250	*S*
Норвегия	1	*C*	12	10	6	250–1200	*M, D*
Польша	2	*C, X*	14	10	6	250	*M, D*
Португалия	1	*C*	13	15	3	250	*M, S, I*
Румыния	3	*X, S*	10	25	1–6	250	*M*
Словакия	2	*X, S*	15	15; 30	6	250	*M*
Словения	2	*C*	16	7,5	3	250–1200	*M*
Финляндия	6	*X, C*	11	15	2–6	250–1200	*M, D*
Франция	13	*C, S*	3	3	0,84	250–330	*S, I*
Хорватия	1	*S*	14	10	2–3	600	*M*
Чехия	2	*X, S, C*	13; 20	10; 10	3	250; 556	*M, D, I*
Швейцария	3	*C*	20	5	3–6	600–1200	*M, D, S, R, I*
Швеция	11	*C*	10–15	15; 5	2–6	250–1200	*M, D*

**M* – карта местников, *D* – доплеровские измерения, *S* – статистика сигналов, *P* – поляризация, *R* – разрешение, *I* – интерполяция.

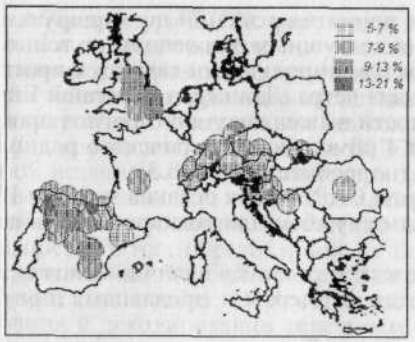

Рис. 7.8.5. Распределение параметра «град/гроза» в Европе [50].

Рис. 7.8.6. Распределение метеорологических радиолокаторов на оперативной сети в Европе [39].
1 – автоматизированные некогерентные МРЛ, *2* – доплеровские МРЛ и поляриметрические доплеровские МРЛ.

7.8.3. Приоритеты COST-75 [39]

В 1998 г. одной из наиболее приоритетных задач применения МРЛ в Европе стал общий региональный и локальный метеопрогноз, и особенно заблаговременностью до 3 ч.

Национальные метеослужбы европейских стран, конкурируя с частными компаниями, предложили широкое многообразие ориентированных на потребителя продуктов МРЛ, которые быстро распространяются через средства массовой информации.

Среди продуктов МРЛ и сети МРЛ (NORDRAD, German Composite, CERAD): изображения ИКО и ИКО ПВ (CAPPI) на разных высотах и удалениях, различные дBZ-шкалы и пороги с разной степенью осреднения, высота верхней границы радиоэха, VIL, вертикальные профили отражаемости и ветра, горизонтальные поля ветра и разрезы (вертикальные и горизонтальные).

Синоптикам региональных учреждений для выбора уровней передается изображение отражаемости с ИКО и ИКО ПВ с отдельных МРЛ или национальных сетей. Стандарта в передачах изображения не существует, а частота обновления информации может достигать 4 ч.

Надежность поступления потребителю информации об осадках для краткосрочного прогноза, по мнению европейских специалистов, должна составлять при заданной вероятности 95 % времени. Наиболее строгие требования предъявляются к предупреждению о жидких ливневых осадках интенсивностью свыше 10–30 мм/ч и о сильном снегопаде интенсивностью свыше 6 мм/ч для густонаселенных районов.

Для управления воздушным движением от МРЛ в европейских стра-

нах требуется метеоинформация для принятия решений по маршрутам, а в районах аэропортов для управления воздушным движением не только в воздухе, но и на земле. Наиболее важными продуктами являются прогноз опасной погоды, профили ветра и сдвиг ветра. Для стран Северной Европы на одно из первых мест по важности вышел текущий прогноз промежутков в снегопаде и распознавание с помощью доплеровского радиолокатора зон возможного обледенения (подробнее см. в п. 8.3).

Изображения CAPPI, сводные карты CAPPI, слои осадков за 3, 6 и 12 ч требуются дорожным и транспортным службам для технического обслуживания и очистки дорог от снега.

Прогнозы начала и окончания дождя, ожидаемая величина слоя осадков, повторяемость осадков требуются фермерам и продавцам, торгующим на улице.

Таким образом, в европейских странах большое и все возрастающее внимание уделяется доведению информации МРЛ до потребителя.

На юге Европы на первое место в применении данных МРЛ в летнее время выходит наукастинг опасных явлений погоды при прохождении мезомасштабных конвективных систем – града, шквалов и интенсивной грозовой деятельности (см. табл. 7.8.1 и рис. 7.8.5) [50].

Радиолокационные наблюдения позволяют распознавать и подробно прослеживать все конвективные процессы с опасными явлениями. Их мезомасштабная организация в рамках системы определяется по отражаемости; конвергенция на нижнем уровне, завихренность на среднем уровне и дивергенция на верхнем уровне (см. рис. 1.1.1–1.1.4) – по данным доплеровского МРЛ; микрофизическое и динамическое состояние – по данным доплеровского поляриметрического МРЛ.

Требования европейских гидрологов (городская гидрология и прогноз наводнений) по чрезвычайно высокому разрешению во времени и пространстве граничат с предельными возможностями радиолокационной технологии измерения осадков. По-видимому, они еще не пришли к выводу, как их американские коллеги, что с помощью радиолокационной информации все проблемы измерения осадков не решить (см. п. 4.6).

7.8.4. Код FM 94-BUFR

Кодированные сводки используются для международного обмена метеорологической информацией, включающей данные наблюдений, получаемые посредством Глобальной системы наблюдений Всемирной службы погоды (ВСП), и обработанные данные, поставляемые Глобальной системой обработки данных ВСП [16].

Код FM 94-BUFR («Binary Universal Form for Data Representation – FM 94 BUFR – Collected papers and specification» European Centre for Medium – Range Weather Forecasts, February 1988) [16] является международным кодом ВМО для метеорологических данных и других геофизических данных, имеющих отношение к метеорологии. Код имеет статус Технического регламента и используется для обмена данными и их хранения.

Аббревиатура BUFR переводится как «бинарная универсальная форма». Такое название код получил из-за своей универсальности, так как позволяет кодировать, практически любые типы данных. Термин «бинарный» означает, что данные представлены в двоичной форме и не годятся для визуального опознавания без компьютерной интерпретации.

Одним из достоинств кода BUFR является то, что он представляет собой независимую от компьютера двоичную форму и описывается двоичными значениями, составленными по определенным в этом коде правилам. Закодированное сообщение состоит из непрерывной последовательности битов, образованной из последовательности байтов. Порядок следования битов и байтов строго определен и не зависит от типа используемого компьютера. Эту особенность кода следует учитывать при кодировании и декодировании телеграмм. Так, в файлах, создаваемых на PCx и других компьютерах с процессором Intel, первым следует младший байт, а в системах с процессором Motorolla (например, компьютер Apple Macintosh) сначала идет старший байт. Рабочие станции UNIX от Sun, IBM и HP обычно хранят первым старший байт; рабочие станции от Intel и DEC хранят сначала младший байт. Данные, записанные в файлы на этих системах, практически всегда отражают порядок, свойственный машине, т.е. порядок в котором данные загружаются в память с младшего адреса до старшего.

К другим достоинствам кода BUFR следует отнести высокую степень сжатия кодируемой информации. Благодаря наличию большого набора кодовых таблиц и таблиц флагов, текстовая информация заменяется соответствующим кодовым значением, хотя возможно и прямое включение текста. Кроме специального синтаксиса, при описании типа данных используются и другие приемы, позволяющие сжимать кодируемую информацию. Так, если кодируется некоторое поле элемента или несколько однотипных поднаборов данных, то можно сжимать данные, записав сначала минимальное значение, а потом кодировать только превышение над минимальным значением, широко используя повторители.

Закодированная в коде BUFR телеграмма состоит из шести разделов:

Раздел указателя содержит призначную группу «BUFR», информацию о длине всего сообщения и номере издания BUFR.

Раздел идентификации содержит информацию о поставщике продукции, номере используемых эталонных таблиц, категории данных и времени отправления телеграммы.

Необязательный раздел зарезервирован для локального использования центрами АОД и может отсутствовать.

Раздел описания данных содержит дескрипторы, описывающие тип данных. Сами дескрипторы определены в соответствующих эталонных таблицах и описывают тип передаваемой информации и порядок ее следования. Развитая система дескрипторов позволяет описывать как простые сообщения, так и большие поля элементов.

Раздел данных содержит передаваемые данные в закодированном виде в соответствии с их описанием, данным в разделе описания данных.

Конечный раздел содержит призначную группу «7777», означающую конец телеграммы.

Синтаксис описания данных для BUFR

Описание данных должно состоять из одного или более дескрипторов. Каждый дескриптор содержит три части: *F* (2 бита), *X* (6 бит) и *Y* (8 бит) и занимает 2 байта (16 бит).

Форматом определено четыре следующих типа дескрипторов.

Если *F* = 0, то дескриптор будет называться *дескриптором элемента*. Дескриптор элемента должен определять единственный элемент посредством ссылки на соответствующую таблицу. В таблице определен способ кодирования элемента: единицы измерения, масштаб, начало отсчета, число битов, отводимое под значение. Поиск в таблице производится по значениям дескрипторов *X* и *Y*. *X* определяет класс таблицы, *Y* – элемент в рамках класса.

Например, дескриптору 0 12 003 в таблице соответствует следующее описание:

F X Y	Название элемента	Единицы измерения	Масштаб	Начало отсчета	Длина данных, биты
0 12 003	Температура точки росы	К	1	0	12

Следует отметить, что все измеряемые величины кодируются в единицах измерения СИ. Из таблицы следует, что кодируемое значение температуры точки росы, измеренное в кельвинах, следует умножить на 10, добавить 0, выделить целую часть и записать ее в 12 бит. Такое преобразование данных делается для того, чтобы кодировать положительные целые числа. При декодировании, произведя обратные действия, мы получим температуру точки росы с точностью до десятых долей кельвина. Если нам не подходит какое-либо поле данной кодировочной таблицы, то оно может быть изменено дескриптором оператора (см. ниже).

Некоторые элементы таблицы не имеют единиц измерения, и тогда в графе «Единицы измерения» стоит значение «Числ.», например:

F X Y	Название элемента	Единицы измерения	Масштаб	Начало отсчета	Длина данных, биты
0 04 053	Число дней с осадками	Числ.	0	0	6

Если кодируется текстовое значение, то в графе «Единицы измерения» стоит значение «МККТТ-МА5», т. е. идет кодирование в символах телеграфного кода МККТТ-МА5, например:

F X Y	Название элемента	Единицы измерения	Масштаб	Начало отсчета	Длина данных, биты
0 01 064	Указатель взлетно-посадочной полосы	МККТТ-МА5	0	0	32

Наконец, если возможные значения элемента представляют собой набор текстовых характеристик, то его значение кодируется кодом, определенным в специальной кодовой таблице или таблице флагов, а в графе «Единицы измерения» пишется «Кодовая таблица» или «Таблица флагов», например:

F X Y	Название элемента	Единицы измерения	Масштаб	Начало отсчета	Длина данных, биты
0 02 048	Указатель спутникового датчика	Кодовая таблица	0	0	4

Если открыть кодовую таблицу для дескриптора 0 02 048, то она имеет следующий вид:

Кодовая цифра	Спутниковый датчик
0	HIRS
1	MSU
2	SSU
3	AMSU-A
4	AMSU-D
5	AVHRR
6	SSMI
7 – 14	Зарезервированы
15	Отсутствующее значение

Из кодовой таблицы выбирается кодовая цифра и заносится в 4 бита.

Если *F* = 1, то дескриптор будет называться «*дескриптором повторения*». В этом случае *X* должен указывать число повторяемых дескрипторов, а *Y* – общее число повторений повторяемой последовательности. Если *Y* = 0, то это так называемое повторение с задержкой, и оно означает, что число повторений будет определено в разделе данных, так как определяется конкретным набором данных.

Если *F* = 2, то дескриптор будет называться «*дескриптором оператора*». Дескриптор оператора определяет операцию над дескрипторами посредством ссылки на соответствующую таблицу.

Если *F* = 3, то дескриптор будет называться «*дескриптором последо-*

вательности». Дескриптор последовательности определяет список дескрипторов элементов, дескрипторов повторений, дескрипторов операторов и дескрипторов последовательностей посредством ссылки на соответствующую таблицу. *X* обозначает категорию таблицы, *Y* – позицию в рамках категории. При декодировании вместо дескриптора последовательности ставится соответствующий ему список дескрипторов. Таким образом, один дескриптор может определить целый список элементов.

Исчерпывающее описание кода FM 94-BUFR дано в Наставлении по кодам ВМО [16].

Учитывая, что ВМО рекомендует в будущем всю метеорологическую информацию хранить в формате FM 94-BUFR, в Институте радарной метеорологии были созданы программы кодирования и декодирования данных АМРК «Метеоячейка» в формате FM 94-BUFR. Для этой цели все эталонные таблицы были представлены в виде набора файлов и вместе с программами поиска нужного дескриптора и соответствующих ему полей скомпонованы в DLL-библиотеке.

При кодировании (декодировании) телеграммы специальная программа выбирает дескрипторы из раздела описания данных, определяет его поля и в соответствии с заданными полями кодирует (декодирует) данные из раздела данных.

В настоящее время кодируется информация, получаемая с МРЛ-5, работающих в автоматическом режиме с АМРК «Метеоячейка». Приведем примерный набор дескрипторов, используемый при составлении телеграммы о высоте верхней границы облаков в радиусе 200 км от МРЛ (табл. 7.8.3).

Таблица 7.8.3

Дескриптор	Название элемента	Значение дескриптора
3 01 011	Дата	Год, месяц, день
3 01 012	Время	Часы, минуты (UTC)
0 01 002	Номер станции ВМО	26063 (Внуково)
3 01 024	Местоположение станции	Широта, долгота, высота
0 02 003	Тип приборного оборудования	Радиолокатор
0 02 101	Тип антенны	Параболическая с центральным возбуждением
0 02 103	Обтекатель антенны	Антенна с обтекателем
0 02 104	Поляризация антенны	Вертикальная поляризация
0 02 131	Временной контроль чувствительности (STS)	STS нет
0 25 004	Обработка отраженного сигнала	Некогерентная
0 25 005	Интегрирование отраженного сигнала	Логарифм 2,5 дБ
0 21 076	Представление интенсивностей	Логарифмическое
3 21 007	Коррекции (метод калибровки и пр.)	

Продолжение табл. 7.8.3

0 20 003	Тенденция развития радиоэха облачности	
0 20 003	Наиболее опасное явление	
0 11 003	Компонент *U* смещения радиоэха	
0 11 004	Компонент *V* смещения радиоэха	
0 29 001	Тип проекции	Проекция Меркатора
0 29 002	Тип сетки координат	Декартова
0 30 031	Тип изображения	Карта
0 30 021	Количество элементов изображения в строке	100
0 30 022	Количество элементов изображения в колонке	100
0 05 033	Размер элемента изображения по горизонтали-1	4000 м
0 06 033	Размер элемента изображения по горизонтали-2	4000 м
1 03 000 0 31 002	Повторитель с задержкой	Число элементов изображения
0 05 031	Номер строки	
0 06 031	Номер колонки	
0 21 021	Верхняя граница радиолокационного отражения	

Подобным образом можно закодировать и любую другую метеорологическую информацию для последующего хранения и обмена.

7.9. Выводы

1. МАРС создается, когда экономические условия в стране требуют оперативного применения в производственной деятельности потребителей радиолокационной метеорологической информации об опасных явлениях и осадках. МАРС должна полностью удовлетворять требованиям государственных и частных потребителей.

2. МАРС целесообразно создавать на базе метеорологического радиолокатора с доплеровским режимом работы в полосах частот *C* и *S*, не обслуживаемого в месте установки и имеющего полностью дистанционно контролируемые технические параметры (за счет встроенных в системы МРЛ сенсорных датчиков).

3. При планировании национальных МАРС в проекте COST-73 рекомендуется для размещения МРЛ по территории страны рассматривать 300-километровую треугольную сетку (или более плотную).

4. При создании МАРС и центра сбора ее данных определяются:

ее физическая и логическая структура,
гарантированный потребителям каталог продуктов сети,
перечень общесетевых функций.

При административном управлении МАРС в национальном (региональном) центре сбора необходимо предусмотреть программы конфигурации, контроля, статистики, управления радиолокаторами, ведения каталогов продуктов.

5. Для сбора и распространения информации МАРС должна использовать высокоскоростные каналы связи, единые форматы сообщений и протоколы передачи с учетом рекомендаций ВМО.

6. Географическая сетка для стыковки информации МАРС для большинства потребителей должна быть основана на полярной стереографической проекции.

7. Для разработки методов мониторинга в реальном масштабе времени, составления текущего прогноза и совмещения в едином центре данных разнородных методов наблюдений за погодой разработаны и проверены в оперативном режиме работы специальные программы для ЭВМ (Nimrod, RAINSAT, AWIPS и др.). Они позволяют синоптику в интерактивном режиме полностью использовать для прогноза потенциал всех видов наблюдений (спутниковых, радиолокационных, наземных, специальных), и в первую очередь радиолокационных.

В процессе создания МАРС обязательно совмещение радиолокационной и спутниковой информации об облачности и осадках для заполнения спутниковой информацией районов, где еще нет радиолокационной информации.

8. Число частных потребителей информации МАРС во всем мире стремительно возрастает, несмотря на ее регулярное доведение до населения через средства массовой информации США и Европы.

9. Насколько важны экономические вопросы при создании МАРС, можно судить по следующей цитате [6]: «При невысокой плотности воздушного движения и благоприятной топографии нет нужды использовать сложные автоматизированные системы; в таких случаях корректировка маршрута или ожидание посадки будут более экономически выгодными, чем использование системы доплеровских радиолокаторов. Там, где позволяют человеческие ресурсы и представляется затруднительным использовать высокотехнологические системы, приемлемым решением является сочетание низких и средних технологий с трудом высококвалифицированных синоптиков».

ГЛАВА 8

ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ИНФОРМАЦИИ СЕТИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ МРЛ

8.1. Прогноз в радиусе обзора МРЛ

Перемещение конвективных ячеек в 70–80 % случаев совпадает с направлением ветра на изобарической поверхности 700 гПа. Перемещение мезомасштабных и синоптических систем облачности и осадков по направлению движения лучше согласуется с ветром на высоте 5,5 км. Наилучшие совпадения достигаются при скорости перемещения 30–40 км/ч. Наиболее сложные и трудно прогнозируемые траектории перемещения отмечаются при скорости ветра менее 18 км/ч и аномальном ослаблении ветра с высотой в нижнем слое атмосферы. В этих ситуациях необходимо учитывать взаимодействие двух факторов: собственной динамики развития Cb и вертикальной изменчивости ветра в атмосфере [6].

На автоматизированных МРЛ скорость и направление перемещения радиоэха облачности и зон осадков рассчитывают по двум алгоритмам: кросскорреляции для наблюдаемого поля радиоэха за два последовательных срока и слежения за смещением центроида радиоэха. Использование последнего алгоритма приемлемо для расчета скорости и направления перемещения только при развитии в радиусе обзора МРЛ внутримассовых конвективных процессов и приводит к большим ошибкам при фронтальных ситуациях.

Процедура расчета приведена на рис. 8.1.1 [10]. Это простой алгоритм, выполняющий одну итерацию расчета среднего движения. Метод очень чувствителен к таким дефектам радиолокационных данных, как блокирование луча, эффекты дальности и аномальное распространение, когда одновременно с местниками наблюдается радиоэхо осадков.

Суть расчета скорости и направления перемещения радиоэха по алгоритму кросскорреляции заключается в расчете вектора смещения в направлении максимального коэффициента корреляции двух последовательных изображений поля радиоэха за интервал времени Δt [7]. На основании опыта практического применения алгоритма повсеместно были получены модификации метода кросскорреляции. Изложим одну из них [5].

Определение скорости и направления смещения радиоэха облачности производится следующим образом.

1. Вычисляется интервал времени, за который произошло смещение поля радиоэха Δt.

Рис. 8.1.1. Процедура слежения за центроидом радиоэха [10].

2. Производится смещение поля радиоэха таким образом, чтобы достичь максимального совмещения площадей радиоэха за два последовательных обзора. При этом для каждого смещения поля радиоэха за предыдущий обзор относительно поля за текущий обзор вычисляется коэффициент совмещения площадей (число совмещенных квадратов 4×4 км, занятых радиоэхом). Одновременно определяется максимальный коэффициент совмещения площадей.

3. При максимальном значении коэффициента совмещения площадей в прямоугольной системе координат определяются смещения по осям x и y. Если максимальный коэффициент совмещения не один, то значения смещения Δx и Δy при нескольких максимальных коэффициентах осредняются.

4. На основе средних значений смещения поля $\Delta x_{ср}$ и $\Delta y_{ср}$ вычисляется скорость поля радиоэха за интервал Δt:

$$V = \left(\Delta x_{ср}^2 + \Delta y_{ср}^2\right)^{1/2} / \Delta t .$$

Направление смещения определяют исходя из того, что

$$d = \operatorname{arctg} \frac{\Delta x_{ср}}{\Delta y_{ср}} .$$

Сверхкраткосрочный прогноз опасных явлений и осадков по радиолокационным данным для конкретных пунктов в радиусе обзора основан на линейной экстраполяции поля радиоэха облачности в соответствии с рассчитанными направлением и скоростью его движения V и d. Таким образом, самым важным в прогнозе оказывается точное определение V и d.

Для оценки возможностей кросскореляционного метода в табл. 8.1.1 приведены результаты расчета оправдываемости прогноза с использованием распределения ошибок определения V и d для Δt = 15 мин в слое. Из таблицы видно, что удовлетворительную оправдываемость прогноза следует ожидать для заблаговременности не более 1,5 ч. Под заблаговременностью прогнозов здесь понимается интервал времени от момента составления прогноза до начала опасных явлений и осадков в конкретных пунктах. Под оправдываемостью прогнозов понимается отношение $(n/N)\cdot 100$ %, где N – общее число составленных прогнозов, по которым ожидалось появление опасных явлений и осадков в пунктах, n – число оправдавшихся прогнозов.

Таблица 8.1.1

Расчетная оправдываемость прогноза для различных интервалов заблаговременности [5]

Заблаговременность, мин.	15–29	30–59	60–89	90–120
Оправдываемость, %.	93	76	59	15

Средняя ошибка определения времени начала осадков и опасных явлений погоды в конкретных пунктах района для прогнозов, составляемых с заблаговременностью до 60 мин, равняется ±13,5 мин.

Ошибка определения V и d поля радиоэха имеет место, как правило, в следующих случаях:

1) в период одновременного возникновения и развития конвективной облачности над различными участками района (внутримассовая ситуация), когда V и d могут резко меняться. С прекращением возникновения новых ячеек и с их слиянием, когда конфигурация радиоэха облачности и его площадь мало изменяются, рассчитываемые V и d стабилизируются;

2) при наличии радиоэха слоистообразной облачности в форме размытого пятна с центром над МРЛ;

3) в периоды, когда фронтальные полосы радиоэха входят в радиус обзора МРЛ или выходят за его пределы;

4) в периоды сильного ослабления отраженных сигналов в ливневых осадках, выпадающих в пункте размещения МРЛ.

Прогноз развития Cb и гроз на 2–3 ч совместно с фактическими данными МРЛ позволяет с достаточной заблаговременностью разработать штормовое предупреждение о начале опасных явлений по району, а в сочетании с наземными данными уточнить прогноз для конкретных пунктов [4, 6].

Ограничением заблаговременности прогноза по радиолокационным данным является время существования явления. Если при фронтальных процессах по данным МРЛ можно дать прогноз перемещения участка фронтальной зоны облачности (но не явления, которое существовало на этом участке в срок составления прогноза) с заблаговременностью 2–3 ч (что заметно меньше времени существования всей системы), то для внутримассовых процессов заблаговременность радиолокационного прогноза не превышает 30 мин. Дискретность обновления радиолокационных данных (15 мин) позволяет практически непрерывно обеспечивать потребителей прогнозами указанной заблаговременности. Прогноз стратификации атмосферы с использованием данных других видов наблюдений, включая радиолокационные, позволяет увеличить заблаговременность до 1–6 ч.

С учетом особенностей развития кучево-дождевой облачности в районе наблюдений с заблаговременностью 2–3 ч можно прогнозировать развитие не отдельного Cb, а только поля Cb. МРЛ при этом наблюдает поле радиоэха конвективной облачности. Для оценки тенденции развития этого поля прогнозируется изменение максимальной высоты верхней границы радиоэха конвективной облачности H_{max} в радиусе обзора 150 км. Такой прогноз можно составлять разными методами.

Для расчета характеристик прогностического облака в [1–3] подробно исследована возможность определения H_{max} с помощью одномерной осесимметричной стационарной модели конвективного облака. Указанная модель является развитием метода частицы и дополнительно учитывает вовлечение окружающего воздуха в облако и торможение потока весом сконденсировавшейся влаги.

Одновременно с прогнозом H_{max} рассчитывается прогноз ливней и гроз по району с той же заблаговременностью [4]. При этом используются следующие предикторы: радиус облака, H_{max}, превышение H_{max} над изотермой –22 °С, максимальная скорость восходящих потоков, максимальная водность в облаке. Прогноз выполняется с использованием линейной дискриминантной функции. Все расчеты проводятся автоматически с контролем исходных данных по желанию синоптика в интерактивном режиме работы комплекса.

Таким образом, радиолокационная информация может служить как для оценки оправдываемости прогнозов, так и для их уточнения в процессе подготовки штормпредупреждений по району и конкретным пунктам.

Применение информации доплеровских радиолокаторов позволяет синоптику в самых сложных ситуациях, определяя V и d, корректировать прогнозы, пользуясь данными последних наблюдений.

8.2. Радиолокационные метеорологические данные и прогнозы

8.2.1. Великобритания. Автоматизированный текущий прогноз (наукастинг) осадков на основе комбинации спутникового и радиолокационного изображения и продуктов численной модели

Для текущего прогноза в Великобритании применяются два основных метода: линейная экстраполяция текущей погоды с помощью специально созданной интерактивной рабочей станции под названием FRONTIERS и интегрирование уравнений гидротермодинамики атмосферы с использованием мезомасштабной численной модели прогноза погоды (NWP). FRONTIERS и мезомасштабная модель обладают разным потенциалом и дополняют друг друга. В течение нескольких первых часов любого детального прогноза доминируют текущая обстановка и последние тренды, тогда как при более продолжительных прогнозах они менее важны, чем нелинейное развитие. Мезомасштабная модель предсказывает эффекты нелинейного развития, в отличие от экстраполяционных прогнозов FRONTIERS, поэтому при большей заблаговременности численная модель дает лучшее направление. Однако модель не способна правильно отразить особенности масштабом меньше трех или четырех длин сетки, поэтому текущую обстановку и ее внезапное развитие лучше отражают результаты FRONTIERS. Заблаговременность, при которой их достоинства становятся сравнимыми, меняется от случая к случаю, но обычно лежит в диапазоне 2–6 ч.

Структуру прогнозирования осадков с учетом приобретенного многолетнего опыта можно изобразить схематично (рис. 8.2.1). Представленная на рисунке схема постоянно совершенствуется. Остановимся на ее основных составляющих во временном разрезе [11, 14, 20, 23, 26].

FRONTIERS (***с 1998 г. усовершенствованная система Nimrod***) – это специализированная интерактивная система отображения, позволяющая опытному синоптику изучать, изменять и комбинировать радиолокационные и спутниковые изображения для составления серии экстраполяционных прогнозов осадков на период 0–6 ч. Система работает получасовыми циклами. В каждом цикле выполняются три главные задачи.

- Производится анализ с контролем качества осадков, наблюдаемых на сети радиолокаторов. Оператор FRONTIERS должен произвести оценку интенсивности осадков и пространственной протяженности зоны осадков с разрешением 5 км в зоне обзора радиолокаторов. Он делает это, используя данные других источников (обычных наблюдений, изображений облачности со спутника Meteosat и т.д.) и свое представление о метеоролo-

гической обстановке для выявления и корректировки ошибок в радиолокационных данных.

• Производится анализ осадков на большей площади с использованием данных спутника Meteosat для расширения охвата сети радиолокаторов. Оператор определяет распределение (но не интенсивность) осадков на остальной площади FRONTIERS , находящейся вне зоны действия радиолокаторов, по изображению облачности со спутника Meteosat. Осадки, полученные по данным спутника Meteosat, наносятся на количественную радиолокационную карту осадков, полученную на этапе радиолокационного анализа, для получения наиболее полной картины существующих осадков в районе FRONTIERS.

Рис. 8.2.1. Предполагаемая структура системы прогнозирования осадков с искусственным интеллектом [20].

• Составляются сверхкраткосрочные прогнозы осадков посредством линейной экстраполяции последнего перемещения на последующие 6 ч. Оператор делит поле осадков, полученное на втором этапе, на несколько кластеров и приписывает им свои скорости. Кластерам дается определение, а скорости оцениваются с использованием последовательности радиолокационных и спутниковых изображений для выявления районов дифференциального перемещения. Затем FRONTIERS рассчитывает прогноз, перемещая кластеры с выбранными скоростями. Оператор может также назначить каждому кластеру линейный коэффициент развития/распада.

Период приемлемой экстраполяции в случае некоторых фронтальных систем может составлять 6 ч и более, но при отдельных грозах может быть ограничен часом и менее. Причинами простой экстраполяции, прерываемой после столь короткого времени, являются развитие и распад осадков и облачности и изменения их скорости. Усовершенствование FRONTIERS привело в 1998 г. к созданию системы Nimrod.

Система Nimrod непрерывно выдает прогнозы конвективных и слоистообразных осадков, анализируя данные радиолокационных, спутниковых и наземных измерений, а также поля мезомасштабной модели и используя алгоритмы адвекции прогноза на основе прогнозов ветра по мезомасштабной модели и методы слежения, основанные на использовании алгоритмов кросскорреляции и центроидов радиоэха. Несмотря на то что с большинством ситуаций Nimrod справляется хорошо, слабым местом системы является экстраполяция в конвективных условиях.

Модель. В мезомасштабной модели метеослужбы Великобритании использованы простейшие уравнения гидротермодинамики в приближении негидростатичности и сжимаемости с конечной полунеявной разностной схемой, допускающей интервал прогноза, равный 1 мин. Для Британских островов использована сетка С Аракавы размерностью 63×79 и разрешением 15 км, которая хорошо отображает орографию. Вертикальная координата – высота над рельефом. Модель имеет 16 уровней по вертикали, из которых нижний располагается на высоте 10 м, а самый верхний – на высоте 12 010 м, причем интервал между уровнями возрастает линейно от 100 до 1500 м [20].

Модель намного точнее отображает поле скоростей, чем FRONTIERS, при физически совместимых векторах скорости в каждой точке сетки своего района. Модель может также предсказывать нелинейное движение (вращение), развитие и распад, указывает возможные районы новых образований.

Модель детально описывает пограничный слой с турбулентной кинетической энергией в качестве переменной. Водность и влажность прогнозируются отдельно для хорошего представления облачности, и процессы моделируются по шкале сетки и по конвективным осадкам. Особо детализируется по облачности радиационная схема.

Запускается непрерывный 3-часовой цикл усвоения. В качестве первого приближения используется анализ наблюдений в комбинации с 3-часовым мезомасштабным модельным прогнозом и полями, интерполированными от самого последнего прогноза, сделанного по региональной модели. Такое «гибридное» первое приближение учитывает компонент полей верхней атмосферы в синоптическом масштабе, полученный по региональной модели, и коротковолновый компонент, найденный по мезомасштабному модельному прогнозу. Из мезомасштабного модельного прогноза берутся также облачные и приземные поля. Анализы используются для модификации других модельных переменных для получения подходящего ряда модельных полей.

Каждый день составляются 18-часовые прогнозы с полуночи и с полудня. Часовые прогнозы даются для давления, ветра, осадков подсеточного масштаба и конвективных осадков, облачного покрова и высоты его нижней границы, видимости, температуры и влажности.

Граничные условия на 3 ч определяются по региональной модели, использующей сигма-систему координат с 15 уровнями и имеющей разрешение примерно 75 км в заданном районе. Отношение смеси облачной влаги в региональной модели является переменной, поэтому оно определяется по относительной влажности, что в совокупности с интерполяцией может создавать нежелательные эффекты у границ. Поскольку границы

области моделирования находятся вблизи прогнозируемого района, прогноз в основном определяется пограничными условиями на последних стадиях, хотя он может хорошо описывать мезомасштабные структуры, создаваемые топографией. Однако в первые 6–9 ч, а иногда и больше, существенную роль играют начальные условия.

Интерактивная мезомасштабная инициализация (IMI). Интерактивная мезомасштабная инициализация – это управляемая из меню система, с которой работает аналитик на интерактивной графической рабочей станции [26]. Она позволяет аналитику контролировать использование наземных наблюдений, а также спутникового и радиолокационного изображения для подготовки ряда ключевых анализов наземных переменных и распределения облачности. Аналитик может модифицировать данные, используемые в анализе, и сами анализы, вкладывая, таким образом, свои знания обстановки в конечный результат. Чтобы сделать оставшиеся модельные поля совместимыми с этими анализами, используются концептуальные модели.

Аналитик по своему выбору в качестве первого приближения может использовать гибрид или ряд полей, интерполированных от самого последнего прогноза по региональной модели, причем последняя обычно используется только тогда, когда в прогнозе по мезомасштабной модели появляется серьезная временна́я ошибка. Первое приближение применяется в качестве фона для анализа давления на среднем уровне моря, ветра на высоте 10 м, интенсивности осадков, облачного покрова, высоты верхней и нижней границ облаков, видимости, толщины снежного покрова, температуры на уровне метеорологической будки и температуры точки росы. Аналитик имеет возможность использовать радиолокационное изображение для дополнения или замены проанализированных осадков в пределах зоны обзора радиолокатора. Поля облаков и высоту верхней границы облаков в первом приближении можно вычислить по инфракрасному изображению со спутника Meteosat, используя для калибровки модельные температуры. Облачный покров определяется путем сравнения приземной температуры в первом приближении с соответствующими девятью пикселами изображения Meteosat (разрешение около 5 км). Затем спутниковое изображение перед вычислением высоты верхней границы облаков подстраивается под радиационные эффекты у поверхности Земли при окончательном анализе облачного покрова.

Относительная влажность на нижних уровнях, отношение смеси облачной воды и концентрация ядер конденсации в облаках пограничного слоя инициализируются с использованием проанализированных температуры, точки росы и видимости. Концентрация ядер конденсации в облаках используется для проверки видимости по прогнозам, но она не взаимодействует с другими переменными.

Три анализа облачности используются совместно с распределением облаков в первом приближении и дополнительной информацией об облачности по данным наземных наблюдений для проведения трехмерного анализа облачности. Структуры облачности и температуры можно более

детально изучить путем отбора до 20 точек на модельной площади, по которым отображаются профили облачного покрова и потенциальной температуры. Эти профили можно корректировать по значениям температурных поправок и облачного покрова, выбранным на экране. Окончательный анализ облачности используется для определения относительной влажности в верхних слоях и улучшения описания распределения отношения смеси облачной воды в первом приближении.

Анализ температуры на уровне метеорологической будки используется для модификации температуры почвы, поверхности и первого уровня высоты в предположении логарифмического или линейного профиля температуры. Чтобы сделать устойчивым профиль температуры верхних слоев атмосферы, используют модифицированную температуру на нижнем уровне, принимая линейную комбинацию сухоадиабатического и влажноадиабатического градиентов в зависимости от балла облачности. Профиль температуры над верхней границей облаков делается устойчивым для слоя воздуха, следующего за насыщенной адиабатой из облачного слоя. Корректировка профиля температуры заключается в попытке ограничить избыточную конвекцию на первых этапах прогноза. После инициализации приземной температуры аналитик может модифицировать поле либо вручную, либо копированием температурного поля у морской поверхности, полученного по инфракрасным изображениям спутника Meteosat за недельный срок.

Профиль дивергенции подбирается таким образом, чтобы получить нулевую вертикальную скорость на верхней границе. Там, где образуются осадки, вертикальная скорость берется такой, чтобы насыщенный воздух поднимался и происходило возмещение осадков, выпадающих из этого слоя. Облачная вершина поддерживается небольшой отрицательной вертикальной скоростью. Чтобы устранить внезапные изменения и неоправданно высокие значения, применяются усиленное сглаживание и ограничение параметров.

Аналитик может вносить свои поправки по-разному. Площади, линии и точки, подлежащие изменению, можно выбирать на экране или по значениям любой переменной полей. В пределах выбранной площади можно устанавливать значение, вводить поправку, умножать на коэффициент, копировать значения из другого поля или сглаживать имеющиеся значения по радиусу сглаживания. И наконец, если аналитику не понравится результат, он включит опцию переделки анализа.

Радиолокационное изображение сейчас является единственным источником данных для получения мезомасштабных деталей во фронтальных полосах дождя.

Хотя применение спутниковых и радиолокационных данных в рамках интерактивной мезомасштабной инициализации не позволило полностью устранить прогностические ошибки, оно улучшило объективный прогноз, особенно на ранних стадиях, и явилось хорошим подспорьем прогнозисту при прогнозировании областей дождя.

Результаты проверки и рекомендации. На рис. 8.2.2 представлена оценка улучшения прогнозов по мезомасштабной модели Великобритании на лето 1997 г. с заблаговременностью 18 ч после включения радиолокационных данных [14]. При заблаговременности 6 ч наблюдается 4 %–ное улучшение характеристики в абсолютных терминах данного исследования и 16 %–ное улучшение за счет качества моделей. Если такое улучшение распространить на все явления, то был бы внесен существенный вклад в работу модели.

Рис. 8.2.2. Эффект ввода радиолокационных данных об осадках в рабочую мезомасштабную модель Великобритании [14].
Использованы 25 прогнозов обложного дождя (лето 1997 г.). Радиолокационные данные накапливались за 3 ч. *1* – наблюдения, *2* – нет радиолокационных данных.

В оперативной схеме усвоения данных Великобритании не используются напрямую данные об отражаемости. Вместо них берутся данные об осадках и используются в анализе облачности для определения полей влажности. Это часть системы наблюдений за влажностью с предварительной обработкой (MOPS). Здесь радиолокационные оценки дождя дают информацию о соответствующих слоях для модели и о том, каковы пикселы – «мокрые» или «сухие», что влияет на поля относительной влажности модели.

Усвоение полей ветра на доплеровском локаторе представляет собой более перспективную проблему, чем данных об осадках. В оперативной практике редко появляется возможность перекрытия у доплеровских локаторов, поэтому нелегко получить трехмерное поле ветра с какой-то степенью достоверности по существующим методикам. У метода VAD тоже отмечаются неточности с определением ветра, так как требуются

допущения линейности течения в районе радиолокатора и осадки должны занимать в радиусе обзора МРЛ площадь, равную 60 %.

Одним из наиболее перспективных путей применения радиолокационных наблюдений является их использование для инициализации моделей в режиме реального времени с высоким разрешением. Несмотря на отсутствие прямого метода получения трехмерных термодинамических данных, доплеровский радиолокатор (и лидар) дает принципиальную возможность получать необходимые поля ветра, температуры и давления по измерениям ветра (используя уравнения количества движения) для запуска таких моделей.

Система Gandolf. В оперативном прогнозировании особую трудность представляет проблема высокого пространственного и временного разрешения прогнозов конвекции и связанных с ней опасных явлений. Сущность проблемы заключается в нелинейности и размерах конвективных систем.

Для решения этой проблемы метеослужба Великобритании совместно с Агентством по окружающей среде разработала систему GANDOLF [23]. GANDOLF была создана специально для прогнозирования осадков, связанных с нефронтальной внутримассовой конвекцией. В GANDOLF и Nimrod используются методы наукастинга, базирующиеся на адвекции, поэтому они должны хорошо работать в условиях, когда адвекция является основной причиной наблюдаемых изменений в полях осадков.

Основная задача проекта GANDOLF – составление с высоким разрешением прогнозов ливней для прогнозирования городских наводнений. Для этого используются подходы, основанные на простых алгоритмах и законах, учитывающих эффекты вовлечения и нелинейности процесса.

Важно было понять, что реальные формы развития гроз могут значительно варьировать в зависимости от преобладающих условий окружающей среды. Например, при сильном вертикальном сдвиге ветра циркуляция в отдельных конвективных ячейках может сохраняться дольше. В условиях более слабого сдвига отдельные ячейки Cb могут расти и распадаться быстрее, создавая менее предсказуемые формы образования Cb.

Самым простым методом прогноза является инерционный, который основан на допущении стационарности. Ценность этого метода заключается в том, что он позволяет проводить сравнения с другими методами прогноза, создавая базис для сравнительной оценки качества прогнозов. Если какой-либо метод прогноза дает худшие результаты, чем инерционный, то он считается некачественным и не представляет ценности. При краткосрочном прогнозировании конвективных осадков инерционность представляет собой критерий, который трудно оспорить. Как известно, инерционность бывает двух видов – эйлеровской и лагранжевой.

Эйлеровская инерционность считается стационарной по отношению к Земле, поэтому точность прогноза зависит от движения и развития метеосистемы. Инерционность Лагранжа рассчитывается относительно системы координат, движущейся со средним движением системы. Следовательно, измерение менее требовательно к компоненту ошибки, связанно-

му с адвекцией, и любая ошибка будет связана только с дифференциальным развитием или движением системы.

В системе GANDOLF используется подход к модельному поведению конвективных ячеек с ориентацией на объект. Он допускает возможность образования дочерних ячеек в процессе развития конвекции. Отдельные ячейки Cb выявляются по данным о радиолокационной отражаемости, интерполированными на сетке со стороной квадрата 2 км. Для классификации ячеек Cb по продолжительности жизни и потенциалу развития используется модель жизненного цикла Cb. Установлено пять стадий жизненного цикла: образование, начальная зрелость, зрелость, начальная диссипация и диссипация. При вводе в систему для учета адвекции ячеек используются данные мезомасштабной модели Великобритании. Классификация стадий развития ячеек облегчается наличием спутниковых данных о температуре на высоте верхней границы облаков.

8.2.2. Швеция. Применение радиолокационных метеорологических данных в системах мезомасштабного анализа MESAN и PROMIS 600

Потребителей метеоданных часто интересует непрерывная в пространстве метеоинформация, а не представление данных точечных измерений. Можно получать дополнительный выигрыш, если данные независимых источников объединять и производить объективные интегрированные анализы. Это, например, избавляет синоптика от субъективного решения той же задачи. Кроме того, при этом информация доступна гидрологам и другим потенциальным потребителям [17, 18].

PROMIS 600. После внедрения в 1991 г. в оперативную работу первых двух доплеровских радиолокаторов в Швеции была создана прогностическая система PROMIS 600. Основу для PROMIS 600 формирует система наблюдений [18]. На рис. 8.2.3 показаны ее основные компоненты, а также рабочая станция и система распространения.

Источниками данных являются:

сеть автоматических станций,

доплеровские метеорологические радиолокаторы,

подсистема спутниковых данных PROSAT,

сеть регистраторов молний LPATS.

Метеорологические данные этих источников и обычная метеорологическая информация хранятся в центральном компьютере. Обработанные данные прогнозист получает на рабочей станции.

Данные наземных метеорологических наблюдений отображаются в обычном, «синоптическом» виде либо как временной ряд каждого параметра, либо как комбинация параметров.

Доплеровские радиолокаторы обеспечивают для PROMIS 600 отображения следующих основных параметров:

отражаемость на нескольких уровнях ИКО ПВ и ее максимальные значения;

интенсивность осадков и их накопление;

радиальная скорость, ИКО и уровни ИКО ПВ;

турбулентность;

высота верхней границы облаков.

Система PROSAT обрабатывает как данные метеоспутников с высоким разрешением NOAA, так и данные Meteosat. Продуктом PROSAT является изображение различного масштаба – от 1000×1000 км (разрешение 1 км) до 4000×4000 км (разрешение 8 км) – в полярной стереографической проекции. К стандартным продуктам относятся цветные композитные изображения (с Meteosat: визуальные – красные и зеленые, инфракрасные – синие) и для NOAA (канал 1 – красный, канал 2 – зеленый, канал 4 – синий), классификация облаков и осадков, температура на высоте верхней границы облаков и у поверхности Земли.

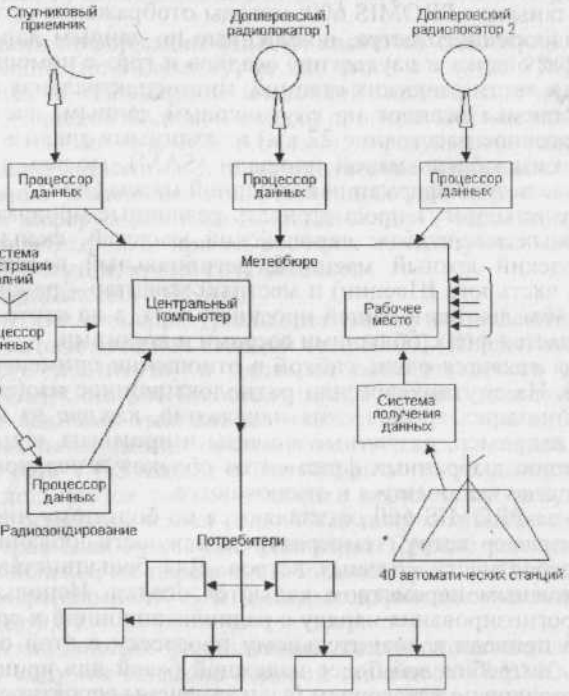

Рис. 8.2.3. Общий вид системы PROMIS 600 [18].

Сеть регистрации молний LPATS (система регистрации и мониторинга местоположения молний) охватывает всю Швецию. В системе используется метод регистрации времени появления молниевых разрядов (TOA). Информация с шести оптимально размещенных станций обнаружения принимается в реальном времени и накапливается в центре анализа в Норрчёпинге.

Для прогнозиста на рабочей станции отображаются обнаруженные молнии облако–Земля (ОЗ) (средняя ошибка локализации молнии ОЗ в районе PROMIS составляет меньше 5 км), их полярность и время.

Методы анализа и прогноза (метеорологические модели). Были разработаны простые методы интерпретации новой экспериментальной информации и для анализа мелкомасштабных структур, а также ряд моделей специализированного прогноза, которые могут воспроизводить наиболее существенные атмосферные процессы. Метод прогноза включает также субъективное мнение метеорологов.

Ниже представлен перечень методов анализа и прогноза, которые были разработаны для PROMIS 600: методы отображения скорости–азимута (VAD) и однородного ветра, полученные по данным доплеровского радиолокатора; оценка и наукастинг осадков и гроз с помощью радиолокаторов и сети автоматических станций; многоспектральная классификация облаков и оценка осадков по спутниковым данным; система мезобета-анализа (сеточное расстояние 22 км) и мезогамма-анализа (сеточное расстояние 5 км); модель малой площади (SAM); модель адвекции вихря (VAM); модель трансформации воздушной массы (AMT).

Прогнозисты могут просматривать различные продукты в пяти пространственных масштабах: европейский масштаб, скандинавский масштаб, шведский южный масштаб, региональный восточный масштаб (восточная часть юга Швеции) и местный масштаб – район PROMIS 600. Все масштабы даются в общей проекции карт, а на карте самого малого масштаба дается фон с большими озерами и дорогами.

Система является очень гибкой в отношении применения различных наложений. На спутниковое или радиолокационное изображение можно сделать до четырех графических наложений, каждое из которых может включать, например, различные анализы и прогнозы, измерения ветра и экстраполяцию выбранных фрагментов облаков и осадков. Эти наложения очень легко включаются и отключаются.

Прогнозы PROMIS 600 составляются по большому числу метеопараметров, например ветру, температуре, влажности, облачности, осадкам, грозам и вероятности сильных ветров. Для большинства потребителей наиболее важным параметром являются осадки. Использование новых моделей прогнозирования наряду с радиолокационной и спутниковой информацией привели к значительному прогрессу в этой области. Чтобы обеспечить потребителей более надежной базой для принятия решений, прогнозы осадков по категориям были заменены вероятностными прогнозами. Для обеспечения непрерывности и высокого качества прогнозов в заданные сроки готовятся специальные прогностические карты для основных параметров. Кроме того, используется метод с применением прогностических матриц. Прогностическая матрица нужна для небольшого района и включает в себя различные параметры на заданные прогностические сроки. Она обновляется как результатами компьютерных моделей, так и данными субъективного прогноза, введенными в компьютер дежурным метеорологом.

Прогнозы PROMIS 600 составляются для следующих потребителей: энергетические и строительные компании, местные радиостанции, местные метеоцентры, шведское управление железных дорог и шведское национальное дорожное управление. В летнее время составляются специальные прогнозы для фермеров и компаний, деятельность которых зависит от гроз.

MESAN. Система мезомасштабного анализа MESAN создана для получения объективных, непрерывных в пространстве полей из девяти параметров, относящихся к метеорологии и гидрологии, при времени интегрирования, как правило, 1 или 3 ч и пространственном разрешении 0,1×0,1° [17].

Потребителями информации MESAN являются синоптики и коммерческие организации (по-видимому, те же, что и в случае PROMIS 600), она используется в одномерной численной модели прогноза погоды (NWP), гидрологической модели и модели прогноза лесных пожаров.

Входными данными для MESAN служат результаты наземных наблюдений, радиолокационные метеорологические изображения, спутниковое изображение, модельные поля численного прогноза погоды и климатологическая информация. Накопленные осадки – один из девяти указанных выше параметров, и при их расчетах используются данные всех источников информации, кроме спутниковых.

Источники данных для MESAN.

Автоматические станции. Данные наземных наблюдений представлены данными автоматических станций сети SMHI (Шведского гидрометеорологического института) и данными сети шведского дорожного управления (VViS). Сеть SMHI состоит из 114 весовых дождемеров. Корреляция между данными этих автоматических систем и данными традиционных ручных наблюдений на климатологических станциях SMHI оставляет 0,87. В сеть VViS входит около 400 оптических дождемеров. Эти дождемеры используются только в зимнее время и поэтому доступны прогнозистам в остальное время года. VViS получает данные о снегопадах в миллиметрах слоя снега, а не слоя воды. Прежде чем использовать эти данные в анализах, их переводят в миллиметры слоя воды. Корреляция между измерениями VViS и данными климатологических станций SMHI составляет 0,84.

Синоптические данные. Накопленные осадки оцениваются по метеорологическому коду *ww* согласно кодовой таблице 4677 ВМО. Применяется и более точный метод. Каждые 3 ч получается синоптическая информация; это означает, что полученные четыре значения оставляют предиктор на 12-часовой период. Если появляется класс, то для каждого

3-часового отрезка 12-часового периода предиктор данного класса увеличивается на единицу. Чтобы получить коэффициенты для каждого класса, используется линейная регрессия. Предиктандом являются накопленные на станции осадки. При решении регрессии коэффициентом для данного класса является эквивалент средних осадков в этом классе.

В результате проверки этого метода за 3 года сбора синоптических данных была получена средняя ошибка, равная примерно 1 %. Однако в отдельных случаях среднеквадратичные ошибки составляют 60 % оценки осадков.

Радиолокационные данные получаются на шведской сети из 11 *С*-полосных доплеровских метеорологических радиолокаторов Ericsson. Пространственное разрешение составляет 2×2 км в недоплеровском режиме и 1×1 км в доплеровском. Дальность действия каждого локатора 240 км в недоплеровском режиме и 120 км в доплеровском. Разрешение по времени 15 мин. Комбинированное изображение составляется по 500 изображениям псевдоCAPPI, получаемым на каждом МРЛ и передаваемым в SMHI в Норрчёпинге.

Преимуществом применения радиолокационных метеоданных является высокое пространственное и временное разрешение. К главным недостаткам относятся, во-первых, ошибочная информация, обусловленная нерепрезентативностью характеристик радиоэха (оно часто связано с яркой полосой или аномальным распространением) и, во-вторых, проскакивание ДНА МРЛ через осадки на большом расстоянии (на еще большем расстоянии измеряемые осадки становятся менее репрезентативными из-за кривизны Земли).

Выход модели и климат. Используются модельные данные NWP, получаемые по модели с высоким разрешением для ограниченной площади (HIRLAM). Сравнение наблюдаемых средних значений у поверхности Земли с данными HIRLAM не выявило систематических ошибок. Данные HIRLAM применяются в анализе осадков как поле первого приближения.

Если известна непрерывная в пространстве климатология накопленных осадков, тогда можно проанализировать процент осадков по отношению к климатическим нормам. Для этого слой накопленных осадков нормализуется по климатологической средней и после анализа переводится в миллиметры. При таком подходе наблюдения в районах с малым количеством осадков в соответствии с климатическими нормами не снижают величину накопленных осадков в районах с обильным выпадением.

Контроль качества. В PROMIS 600 каждый источник информации перед проведением оптимальной интерполяции по другим источникам проверяется на качество. Небольшие случайные ошибки точечных наблюдений можно корректировать по данным других наблюдений. Большие или систематические ошибки идентифицируются и устраняются путем индивидуального сравнения каждого наблюдения с первым приближением и удаления их в случае отклонения, превышающего заданный порог. После этого проводится анализ каждого наблюдения на основе информации соседних пунктов наблюдений и поля первых приближений.

Зная нормальную ошибку наблюдений, ошибку первого приближения и ошибку конкретного наблюдения, можно определить доверительный интервал отклонения между этим наблюдением и анализом. Наблюдение исключается, если отклонение превышает доверительный интервал. Эта процедура итерационная, и она занимает много времени, так как наблюдения, контролируемые по другим наблюдениям, которые были в последующем исключены, должны быть проконтролированы повторно.

Последний метод контроля качества не следует применять для наблюдений, в которых ошибки коррелируют. Если некоррелируемые данные сначала контролируются, а потом используются для контроля коррелируемых данных, то коррелируемые ошибки в последних имеют шанс на исключение. Такая стратегия применима к радиолокационным, спутниковым, модельным и другим данным, непрерывным в пространстве. Недостаток этого метода заключается в том, что уникальные и точные коррелируемые данные, например данные радиолокационных наблюдений в открытом море, где другие наблюдения не проводятся, вполне могут быть исключены, если не подтверждаются другими наблюдениями.

Суточные (24 ч) наблюдения осадков на шведских климатологических станциях в 1994 г. и частота ветров с осадками использовались для определения взаимосвязи между ветром, топографией, береговой конвергенцией и накопленными осадками.

По полям топографии и направления ветра HIRLAM рассчитывались вертикальные скорости ветра, которые затем нормировались. Влияние поверхности на конвергенцию ветра моделировалось функцией разности шероховатости поверхности в точке наблюдения и в точке слева по направлению ветра; этот предиктор тоже нормировался. Широта также использовалась как предиктор. Предикатанд состоял из наблюдавшихся стандартных отклонений суточных (24 ч) осадков в направлении станции. Около 50 % дисперсии предикатанда можно описать с помощью этих предикторов.

Проверка. Поскольку в MESAN используются данные нескольких источников, очень ценно изучение вклада каждого источника, которое производилось методом перекрестной проверки. Анализировались данные за 18 дней за период с середины октября 1995 г. до конца марта 1996 г. В качестве испытательного района была выбрана южная Скандинавия. Использовались радиолокационные данные, не содержащие эффекта аномального распространения. Следовательно, можно считать, что результаты представляют зимние условия, когда аномального распространения почти не бывает и когда имеются данные VViS. Во всех случаях в качестве первого предположения использовались данные HIRLAM. Были определены два периода интегрирования: 3 и 12 ч. Эти два срока не совсем совместимы, поскольку шведские автоматические станции были единственным наземным источником для трехчасового периода интегрирования. Для 12-часового периода использовались синоптические данные, которыми обмениваются все страны. Эти условия могли повлиять на положительный эффект от применения радиолокаторов и отрицательный – при

применении VViS в 3-часовые периоды, так как радиолокатор охватывает районы за пределами Швеции, а VViS – нет.

Данные автоматических станций SMHI и синоптические данные сравнивались с проанализированными полями. Для каждой станции рассчитывалось анализируемое значение по выходному полю путем бикубической интерполяции. Данные автоматических станций и синоптические данные были разделены на 20 групп. Затем было проведено 20 анализов, в которых за раз исключалась из анализа одна группа, которая использовалась для проверки. Таким путем в каждый анализ было включено 95 % данных всех наземных наблюдений, и все данные наблюдений могли использоваться как независимые проверочные данные.

По перекрестным проверкам вычислялись средняя ошибка, среднеквадратичная ошибка и величина $K^2_{кор}$. Последняя величина представляет корреляцию в квадрате, эквивалентную объяснимой дисперсии.

В табл. 8.2.2 и 8.2.3 представлены результаты за 3- и 12-часовые периоды интегрирования соответственно. Основываясь на этих результатах можно утверждать, что радиолокационные наблюдения не вносят существенного вклада в анализы в тех районах, где есть очень густая сеть наземных наблюдений, однако вклад их велик в районах с малым количеством или полным отсутствием данных.

Таблица 8.2.2

Результаты перекрестной проверки по анализам 3-часового интегрирования, n = 6552

Источник данных	Средняя ошибка	Среднеквадратичная ошибка	$K^2_{кор}$
HIRLAM	0,112	0,94	33,2
HIRLAM + радиолокатор	0,098	0,76	42,3
HIRLAM + авто	0,073	0,79	41,2
HIRLAM + авто + радиолокатор	0,077	0,77	42,2
HIRLAM + авто + VViS	0,050	0,69	51,4
HIRLAM + авто + VViS + радиолокатор	0,050	0,68	52,0

Таблица 8.2.3

Результаты перекрестной проверки по анализам 12-часового интегрирования, n = 10 208

Источник данных	Средняя ошибка	Среднеквадратичная ошибка	$K^2_{кор}$
HIRLAM	0,445	2,35	37,4
HIRLAM + радиолокатор	0,494	2,12	43,8
HIRLAM + авто	0,140	1,79	50,7
HIRLAM + авто + радиолокатор	0,243	1,82	51,3
HIRLAM + авто + VViS	0,175	1,78	52,1
HIRLAM +а вто + VViS + радиолокатор	0,163	1,78	52,9

Применение радиолокационных данных в MESAN в настоящее время включает в себя в качестве основы для всего контроля качества использование прямоугольных изображений псевдоCAPPI. Шведская сеть МРЛ спланирована таким образом, чтобы каждый радиолокационный узел вырабатывал двумерные продукты по полярным объемным данным; эти двумерные продукты передаются на центральный узел для дальнейшей подготовки продуктов. Спустя какое-то время полярные объемные данные на узлах стираются. Методы MESAN являются консервативными в том смысле, что они не принимают радиолокационную информацию, которая может быть искажена при аномальном распространении. Существует явная необходимость в разработке новых, усовершенствованных методов контроля качества радиолокационных данных и количественного использования всего их потенциала.

MESAN представляет собой мощный инструмент для интегрирования модельных и экспериментальных данных из разных источников в пространственно непрерывные общие поля «лучшей оценки».

8.2.3. США. Объединение данных в AWIPS

Для синоптика весьма ценным является совмещение радиолокационных данных с дополнительной информацией, полученной со спутников, с помощью систем регистрации молний, из карт дренажных систем, речных бассейнов и геополитических карт. Отметим три метода объединения данных: простое наложение графической информации на радиолокационное изображение, переход с одного изображения на другое и постепенное устранение одного изображения с постепенным появлением другого [21].

Естественная для источников данных система координат. Первым шагом на пути объединения данных является осмысление системы координат, естественной для каждого источника данных. В обзорных радиолокаторах применяется система сферических координат (дальность, азимут, угол места), центром которой является радиолокатор. Преобразование радиолокационных координат в широтно-долготные координаты требует применения сферической тригонометрии. На спутниках применяется линейно-элементная система, в которой линия отмечает сканирование радиометра. Геосинхронные спутники сканируют по линиям восток–запад. Спутники с полярными орбитами сканируют в направлении, примерно перпендикулярном орбитальному курсу. «Элементом» является местоположение пятна сканирования на линии. Перевод линейно-элементных координат в широтно-долготные сложен и связан со сферической тригонометрией, орбитальной геометрией и положением (наведением) спутника. Данные наземных и аэрологических измерений, профили ветра, самолетные и геополитические данные связаны с широтно-долготными координатами.

Выбор системы координат для дисплея. Вторым шагом является выбор проекции объектов на дисплее. Для решения этого вопроса необходимо определить следующие факторы:

необходимый характер проекции,
объем выводимых данных и частоту обновления,
местонахождение вычислительных ресурсов,
компромиссы относительно точности положения,
предпочтения потребителей.

Есть три взаимоисключающие величины в проекциях карты. Равноудаленные проекции сохраняют соотношения расстояний между определенными точками. (Невозможно построить плоскую карту, сохраняющую взаимосвязи расстояний между всеми точками Земли.) Согласованные проекции сохраняют формы, благодаря чему масштаб в данной точке остается одним во всех направлениях. Эквивалентные проекции сохраняют площади. Каждая из трех этих величин достигается за счет других. Метеорологи почти во всех случаях пользуются согласованными проекциями.

Объем картируемых данных и частота картирования диктуют выбор системы координат, картирование спутниковых изображений в полярной стереографической проекции.

Логическое обоснование выбора систем координат для AWIPS делается по району обзора и по типам данных, чаще всего выводимых на дисплей в этом районе (см. табл. 8.2.4).

Субмасштаб WFO* предназначен в основном для радиолокационных данных с высоким разрешением. В таких небольших районах кривизна Земли значения не имеет, поэтому вариация масштаба может быть очень маленькой. Для этой цели идеальна местная стереографическая проекция с точкой касания у радиолокатора. Более того, радиолокационные данные в соответствующем масштабе могут накладываться без картирования. В субмасштабе WFO спутниковые данные придется картировать повторно, но поскольку второе картирование никогда не меняется, его очень быстро можно сделать по простой таблице просмотра.

Все виды фона, описываемые здесь, даются в масштабе WFO и меньших масштабах. С помощью векторной графики создаются четыре вида фона: границы графств и государств, названия графств и обозначения станций, дренажная карта с реками и ручьями и карта бассейновых границ. При подготовке предупреждений об опасных явлениях погоды прогнозисты используют два первых вида фона. Два последних вида фона используются при оценке потенциала паводка.

На комбинированном спутниковом и радиолокационном изображении трудно определить несоответствие между местоположением радиоэха отражаемости и соответствующим облаком. Несоответствие, достигающее

* Центр предупреждений и прогнозов. Круг диаметром 460 км заключает район, для которого обычный WFO будет составлять предупреждения об опасных явлениях погоды. Номинально такой район освещается радиолокатором NEXRAD.

иногда десятков километров, возникает по двум причинам: из-за неточности информации об орбите и местоположении, передаваемой со спутниковыми изображениями, и из-за параллакса. Параллакс – это ошибка определения местоположения облачной вершины по отношению к Земле, возникающая из-за невертикальности угла зрения спутника. Ошибка всегда проявляется в направлении от спутника. Параллакс становится значительным только при наблюдении за мощными облаками сбоку. Заметим, что ни одна из этих проблем не связана с процедурами картирования или выбора проекции карты.

Таблица 8.2.4

Район обзора	Наиболее часто получаемые данные	Проекция карт
Северное полушарие	Комбинированные инфракрасные изображения и изображения водяного пара (с двух или больше спутников); результат глобальной модели	Полярная стереографическая
Государства (включая большую часть Северной Америки)	Изображения визуальные, инфракрасные и водяного пара; графические аэрологические данные; результат модели	Полярная стереографическая
Регион (со стороной 1500 км)	Изображения визуальные, инфракрасные и водяного пара; графические наземные и аэрологические данные; результат модели	Согласованная Ламберта
Местный (со стороной 750 км)	Изображения визуальные, инфракрасные и водяного пара; графические наземные данные; мозаика радиолокаторов	Согласованная Ламберта
Масштаб WFO (со стороной 460 км)	Изображения визуальные и инфракрасные, графические наземные данные, радиолокационная отражаемость и радиальная скорость с разрешением 1 км, продукты NEXRAD , результат местных алгоритмов	Согласованная Ламберта
Субмасштаб WFO (со стороной 230 км)	Визуальные изображения, радиолокационная отражаемость и радиальная скорость с разрешением 1/2 км, графические мезомасштабные наземные данные, продукты NEXRAD, результат местных алгоритмов	Местная стереографическая

В США и Канаде современные суперЭВМ позволяют реализовывать расчеты по мезомасштабным моделям с 10-километровой сеткой для всей Северной Америки [22]. Работа такой суперЭВМ в метеослужбе Канады показала, что сжатую 10-километровую модель можно рассчитать за 40 мин и получить 24-часовой прогноз для всей Северной Америки. Ввод результатов измерений осадков у земли приводит в соответствие начальные условия влажности, дивергенции и скорости нагрева с наблюдаемыми осадками либо возбуждает поля скрытого нагревания и влаги. Для этого используются карты осадков с сети NEXRAD.

Информация сети NEXRAD начала применяться в автоматизированных системах текущего прогноза гроз. Эти системы должны давать точные краткосрочные прогнозы возникновения, перемещения и распада гроз на основе оперативных данных WSR-88D, спутников, наземных и аэрологических наблюдений. Такая постановка задачи стала возможной, поскольку ИСЗ и WSR-88D способны обнаруживать и прослеживать линии конвергенции в пограничном слое. Эти линии (фронты порывистости, морские бризы, линии орографического сдвига ветра) часто дают начало новым конвективным процессам и модулируют существующие.

Все имеющиеся результаты наблюдений вводятся в экспертную систему под названием «автонаукастер» гроз для составления прогнозов на 1-километровой сетке. Алгоритмы прогноза основаны на физических принципах, выведенных за годы экспериментальных и модельных исследований последнего десятилетия.

Ввиду большой потребности в прогнозах наводнений и количественных прогнозах осадков численное моделирование и экспертные системы будут использоваться в прогнозе сумм осадков. Американские специалисты предполагают, что эти два метода можно объединить таким образом, чтобы результатом точных численных прогнозов конвективных процессов облако- и осадкообразования стало одно из полей, используемых в экспертной системе.

8.3. Метеорологическое радиолокационное обеспечение авиации

Общие требования к радиолокационной метеорологической информации при метеообеспечении взлета и посадки воздушных судов, а также их проводки по маршрутам полета сформулированы сравнительно давно и не подвергаются заметным изменениям [8]. Необходимо отметить, что повторяемость метеорологических явлений различна в разных регионах Земли. Повторяемость явления, самого опасного для авиации в одном регионе земного шара, в другом регионе может быть ничтожной. В качестве примера можно привести грозы в субтропических районах и за полярным кругом соответственно.

По этой причине требования к метеообеспечению авиации согласуются в каждом регионе, стране и аэропорту между поставщиками и потребителями метеорологической информации. Согласованию подлежит объем, вид, способ обработки, трансляции и отображения метеоинформации для потребителя. Метеорологическая информация не должна быть избыточной, чтобы диспетчерский состав напрасно не отвлекался от выполнения своих основных функций. Последнее правило – общее для всех стран.

В табл. 8.3.1 перечислены требования к информации автоматизированных комплексов для автоматизированных систем управления воздушным движением (АС УВД) [8].

Таблица 8.3.1

Требования к радиолокационной метеоинформации для АСУВД [8]

Информация	Требования
Форма облаков	Кучевые и некучевые
Тип опасных явлений	Зоны возможного поражения молнией в кучево-дождевых и слоистообразных облаках Гроза, град Зоны сильных ливневых осадков, ухудшающих видимость Зоны обледенения и болтанки в облаках Зоны шквалов, связанных с Cb
Достоверность определения опасного явления (по каждому из явлений)	Не менее 92–95 %
Прогностические характеристики	Скорость перемещения ±5 км/ч Направление перемещения ±10° Тенденция развития (качественная оценка по трем градациям: развитие, распад, без изменений)
Форма представления	Картина распределения зон радиоэха или зон опасных явлений в горизонтальной и вертикальной плоскостях
Способ передачи	По телефонным и телеграфным каналам связи, по согласованному протоколу По локальной вычислительной сети
Инициатива формирования изображения	Объем отображаемой информации должен регулироваться диспетчером
Темп обновления информации	Отображение информации должно быть оперативным Минимальный темп – 1 раз в 15 мин, оптимальный – 1 раз в 10 мин, максимальный – 1 раз в 5 мин
Дополнительные источники информации	Грозопеленгатор или сеть грозопеленгаторов Метеостанции штормового кольца Бортовая погода Аэрологическое зондирование

Появление в оперативной практике метеообеспечения авиации доплеровских радиолокаторов позволило более глубоко анализировать элементы опасной погоды – сдвиг ветра, затопленную конвекцию, наличие крупных переохлажденных капель. Перечисленная информация поможет надежно выявлять зоны возможного обледенения.

В США разработана система для руководства аэропортов и авиакомпаний, которая передает последние данные о накопленном слое снега на территории аэропорта и прогноз с заблаговременностью от 0 до 30 мин накопленного слоя снега на основании данных WSR-88D [22]. Прогноз базируется на экстраполяции поля радиолокационной отражаемости на основе последнего измерения вектора скорости. Отражаемость перево-

дится в интенсивность снегопада по соотношению $Z–I$, основанному на сопоставлении Z и осадкомерных измерений за последние 2 ч. До получения 2-часовых данных по умолчанию используются соотношения $Z–I$, основанные на температурной зависимости.

Разработанная система измерения снега уже приносит значительную экономию аэропортам (уборка снега на взлетно-посадочных полосах) и должна поступить в открытую продажу.

В США очень высокая по сравнению с другими странами климатологическая повторяемость сдвига ветра на малых высотах при возникновении и перемещении Cb в районах аэропортов. По приводимой американскими специалистами статистике сдвиг ветра является основной из всех причин гибели самолетов и авиапассажиров, связанных с метеоусловиями [22].

Самолет, летящий через микровзрыв (см. рис. 1.1.4) на малой высоте (находясь на глиссаде), сначала испытывает действие сильного встречного ветра, затем нисходящего потока и, наконец, попутного ветра. Последний резко снижает скорость воздуха и вызывает внезапную потерю подъемной силы. Сдвиг ветра может быть также связан с фронтами порывистости (сильным оттоком холодного воздуха из грозового Cb), а также с теплыми и холодными фронтами и сильным ветром непосредственно у земли. Для уменьшения риска в период развития этих явлений в районе аэропорта необходимо на основании радиолокационных наблюдений дать пилоту объективную количественную оценку опасности. С этой целью был разработан и внедрен в аэропорты США доплеровский радиолокатор TDWR (terminal Doppler weather radar) (основные параметры см. в табл. 6.1.2). Его основное назначение – метеообеспечение взлета и посадки воздушных судов. Радиус действия TDWR составляет 50–60 км от аэропорта в так называемой терминальной зоне.

TDWR работает в *C*-диапазоне и делает для ускорения обзора пространства минимально необходимое число круговых обзоров под малыми углами места. TDWR снабжен алгоритмами для автоматического распознавания и количественной оценки сдвигов ветра любого типа и передачи этой информации на борт. Вероятность обнаружения микрошквала радиолокатором TDWR составляет более 90 %, а вероятность ложных тревог – менее 10 % [22].

Выбор *C*-диапазона обусловлен возможностью формирования более узкой ДНА (0,5°) и, следовательно, облегчением решения задач борьбы с местниками, которых в основном режиме работы TDWR под малыми углами места наблюдается много.

В США было принято решение установить 47 TDWR в главных аэропортах страны. К середине 1997 г. в эксплуатации было 26 TDWR. Работоспособность TDWR составила 90 % [22]. В отличие от WSR-88D Национальной метеослужбы, на сети TDWR не такая надежная связь с потребителями (пилотами на борту самолетов). Отмечаются перебои с электропитанием, что, по мнению американских специалистов, компрометирует саму идею TDWR [22]. Чтобы TDWR использовал весь свой потенциал и создавал важную дополнительную базу данных для метеопрогноза, его информация должна, по мнению авторов [22], поступать прогнозистам Национальной метеослужбы, работающим на центры управления полетами и станции обслуживания полетов.

8.4. Метеорологический радиолокатор и наземный транспорт

Автоматизированный МРЛ в настоящее время является самым эффективным (и пока незаменимым) средством для наблюдения за снегопадом и измерения его характеристик.

Зима является самым трудным временем года для тех организаций, которые обслуживают дорожные и железнодорожные транспортные системы. Метеорологический радиолокатор, применяемый совместно с другими средствами метеослужбы, играет большую роль при принятии решений по зимнему обслуживанию, в которое входят посыпка дорог солью и снегоуборка бульдозерами, а на железных дорогах – вызов снегоуборочной техники, оперативного персонала, включение местных подогревателей и добавление антиобледенителя в карусельные вагоны.

Раннее предупреждение о приближении зоны осадков с пространственной детализацией, существенной для разворачивания ресурсов на земле, обеспечивает МРЛ. Оно бесценно для дорожных служб и не только повышает эффективность использования труда, техники и материалов, но и уменьшает число дорожных происшествий из-за непогоды [25].

Из табл. 8.4.1 видно, как информация метеорологического радиолокатора способствует принятию решений при обслуживании дорог в зимних условиях. Хотя большинство примеров связаны с зимними работами, радиолокатор полезен и в летние месяцы при ремонте дорог. Заблаговременное предупреждение об осадках на основе информации МРЛ позволяет не посылать людей на дорожные работы в районы, где в ближайшее время начнутся осадки.

В зимний период (октябрь–март) метеоинформация для принятия решений базируется почти целиком на предупреждении об опасности на дорогах, на специальном прогнозе или на сведениях из консультационной службы.

В Великобритании все эти услуги по контракту предоставляются метеослужбой. Некоторые управления магистралями используют только предупреждение об опасности на дороге («основная» услуга, в которую входят подробности о возможном образовании гололеда на дорожной поверхности в ближайшую ночь), другие заключают контракт на две или все три услуги (по нашей терминологии, на специальное метеообеспечение). Дополнительная услуга, предоставляемая метеорологическим радиолокатором как средством штормового предупреждения, регистрируется в Великобритании организацией, уполномоченной заключать договоры на «полное предоставление услуг» по предупреждению об опасности на

дороге, составлению специальных прогнозов, консультированию и предоставлению радиолокационной информации. Для полного обслуживания дорог решения при таком метеообеспечении можно принимать с большей достоверностью и более эффективно распределять ресурсы. Результатом, особенно в зимнее время, является снижение числа дорожных происшествий за счет предотвращения опасных условий, развивающихся на дорогах.

Таблица 8.4.1

Применение метеорологического радиолокатора и консультационное обслуживание метеослужбой потребителей во время специальных дорожных работ [25]

Виды работ	Виды услуг метеослужбы		Ожидаемый эффект
	Метеорологический радиолокатор	Консультации	
		Зима	
Предупредительная посыпка солью	Предупреждение о приближении осадков Объект аварийного вызова Проблемные районы	Тип осадков Скорость и направление перемещения Возможное развитие обстановки Определение районов выпадения дождя или снега	Посыпка дорог солью для предотвращения гололеда Уменьшение числа происшествий Экономичное использование ресурсов
Профилактическая посыпка солью	Предупреждение о приближении осадков Объект аварийного вызова Проблемные районы	Тип осадков Скорость перемещения ячейки Возможное развитие Определение районов выпадения дождя или снега	Разрушение образовавшегося льда Предотвращение гололеда Уменьшение числа происшествий Экономичное использование ресурсов
Вызов и подготовка снегоуборочной техники	Предупреждение о приближении осадков Проблемные районы	Тип осадков Скорость и направление перемещения Возможное развитие обстановки Определение районов выпадения снега	Оповещение снегоуборочных бригад в районах выпадения снега, где требуется снегоуборочная техника Экономичное использование ресурсов
		Лето	
Ремонт дорог	Предупреждение о приближении зоны осадков Проблемные районы	Скорость и направление перемещения Возможное развитие обстановки Последствия для температуры дорожной поверхности в районе выпадения осадков	Эффективный ремонт дорог при минимальной задержке Экономичное использование ресурсов

В табл. 8.4.2 детально изложена информация для автодорожных служб, когда они должны принимать решение о том, посыпать ли дороги солью и задерживать ли людей после работы на очистку дорог. В первом случае радиолокатор позволяет предсказать возможное изменение состояния дорожного покрытия (например, с сухого на мокрое), а во втором случае – предупредить о приближающемся снегопаде, хотя подтверждающую информацию всегда рекомендуется получать в местном метеобюро.

Таблица 8.4.2

Примеры принятия решений при зимнем обслуживании автомагистралей с учетом информации метеорологического радиолокатора (++) [25]

А) Солить или не солить Прогноз метеослужбы о возможных метеоусловиях (предупреждение об опасности на дороге, специальный прогноз или консультация). Информация о состоянии дорожного покрытия (например, сухое, мокрое, соленое). ++Возможное изменение состояния дорожного покрытия (например, вместо сухого влажное). Состояние неба ночью или его изменение (например, ясное без облаков). Знание местных дорожных условий (например, темных пятен). Независимые наземные наблюдения (например, ранняя утренняя проверка). Информация других источников (например, из полиции). Предупреждение, выдаваемое дорожной сенсорной системой измерения температуры (если она имеется). Наличие персонала в нерабочее время (только для дорог графства и региона).
Б) Вызов снегоуборщиков Прогноз или уведомление метеослужбы о вероятности снегопада. ++Возможное изменение состояния дорожного покрытия, требующее применения снегоуборочной техники (например, снегопад или вероятность снегопада с толщиной слоя 10 см). Независимые наземные наблюдения (например, ранняя утренняя проверка). Информация других источников с началом снегопада (например, из полиции). Сигналы сенсоров в районах, удаленных от пунктов дорожного обслуживания (если имеются). Знание об условиях, которые могут вызвать заносы на дорогах. Наличие персонала в нерабочее время (только для дорог графства и региона).

Услуги для железных дорог в зимнее время. Вызов частных снегоуборщиков, сбор персонала, включение местных подогревателей и заправка карусельных вагонов антиобледенителем – вот те операции, для которых нужны радиолокационные данные. Летом производится опреде-

ление районов, где в конце дня ожидаются осадки, благодаря чему туда не надо вывозить обслуживающий персонал.

Радиолокатор полезен также для выявления районов, где возможны осадки в жаркий летний день, когда есть опасность выгибания сварных рельсов. Эти проблемы могут быть как географическими, так и метеорологическими, поскольку одни районы больше подвергаются разрушениям, чем другие. В таких районах метеорологический радиолокатор особенно полезен.

В настоящее время уже во многих европейских странах дорожные и транспортные службы получают радиолокационные данные для организации технического обслуживания дорог и их очистки, а в Финляндии и Швеции они сами участвуют в работе сетей автоматизированных МРЛ [16]. В густонаселенных районах Швеции особо высокие требования предъявляются к предупреждению о сильном снегопаде интенсивностью свыше 6 мм/ч. Для решения этих задач используют такие продукты автоматизированной сети МРЛ, как картинки CAPPI (ИКО ПВ), сводные CAPPI, накопленные слои осадков за 3, 6 и 12 ч. Однако для того чтобы информация МРЛ использовалась в процессе метеообеспечения наземного транспорта повсеместно и постоянно, необходимо, чтобы надежность работы МРЛ и поступления информации потребителю достигала 95 % [16].

8.5. Применение метеорологической радиолокационной информации в полевых экспериментах

МРЛ используется во многих полевых экспериментах, проводимых странами Европы и Америки. Проиллюстрируем это на примере полевого регионального эксперимента LINOX [15].

В июле и августе 1996 г. на юге Германии проводился региональный эксперимент LINOX (образующиеся в результате молниевого разряда оксиды азота NO_x). Главная цель заключалась в расширении знаний об источниках NO_x ($NO_x = NO + NO_2$) в верхней тропосфере, которые связаны с активностью молний при грозах. Эти проблемы важны для исследований глобального климата, так как, по мнению авторов [15], интенсивность образования озона сильно зависит от местных концентраций NO_x. Основными источниками NO_x в средней и верхней тропосфере являются вертикальный перенос из пограничного слоя атмосферы, молниевые разряды во время гроз, перенос из стратосферы и местный выброс NO_x с самолетов.

Основная цель полевого эксперимента LINOX заключалась в создании базы для более глубокого понимания процессов малого масштаба, с тем чтобы получить более полное представление об эффектах большего масштаба (с привлечением климатологии). Ключевыми вопросами исследования были следующие:

распределение молний в грозе и связь молний с другими параметрами облаков,

поле концентрации NO_x в наковальнях Cb и окрестности отдельных гроз.

Одним из основных инструментов эксперимента был поляризованный доплеровский радиолокатор POLDIRAD DLR. Эволюция облачности наблюдалась с большим временным разрешением. Сеть LPATS (lightning position and tracking system – система грозопеленгации и мониторинга) регистрировала разного вида вспышки в двух измерениях: положительные и отрицательные разряды облако–Земля и внутриоблачные разряды. Реактивный самолет DLR Falcon делал заходы в грозовые комплексы, выполняя в них химические (NO, NO_2, O_3) и метеорологические измерения. Завершали базу данных результаты спутниковых крупномасштабных наблюдений за облачностью (Meteosat, NOAA) и молниями (OTD).

Картина грозовых комплексов, полученная разными системами наблюдения, дает возможность изучить физико-статистические зависимости между разными типами объектов.

На рис. 8.5.1 показано, что наибольшая плотность молний наблюдается при самой низкой температуре на высоте верхней границы облачности. Даже если в данных имеется существенный разброс, большинство точек сконцентрированы в районе, где температура ниже –45 °С. Этот вывод полностью подтверждает все ранее проведенные исследования, в которых сделан вывод, что высота Cb является определяющей характеристикой грозовых процессов.

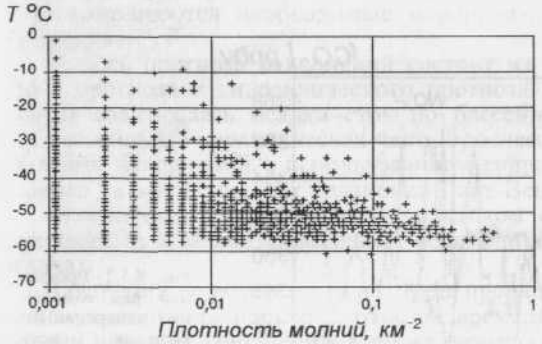

Рис. 8.5.1. Плотность молний на площади 30×30 км² в зависимости от температуры на высоте верхней границы (°С) облаков 23 июля 1996 г. Использованы данные по всему району грозовой деятельности [15].

Радиолокационную отражаемость сопоставляли с повторяемостью молний. Для этого использовалось пространственное распределение отражаемости при угле места антенны POLDIRAD 1°, с тем чтобы вычислить площади, окруженные разными порогами отражаемости. В стадии развития Cb частота вспышек и размер облаков быстро увеличиваются, достигая «состояния насыщения» при 40 дБZ. Контуры, соответствующие

более высокой отражаемости, продолжают какое-то время увеличиваться, указывая на продолжение роста и выпадение осадков. Большие значения отражаемости у земной поверхности указывают на распад ячеек Cb. Когда кривые максимальной отражаемости достигают максимума, частота вспышек молний начинает уменьшаться. Большинство вспышек наблюдается в диапазоне отражаемости от 30 до 45 дБZ. Маленькие и большие значения отражаемости связаны с молнией не так тесно. Таким образом, временные ряды радиолокационных размеров облачности сдвигаются по фазе относительно частоты вспышек молний. Основная активность молний предшествует максимальной наблюдаемой площади выпадения осадков на землю.

Во время проходов самолета в грозовом комплексе было обнаружено общее увеличение значений NO_x (см. рис. 8.5.2) даже при относительно большой флуктуации. В наиболее сильных восходящих потоках были получены пиковые значения отношения смеси NO_x, равные 3,5 ppbv. В главное ядро отражаемости самолет не заходил. С уменьшением отражаемости и вертикальной скорости концентрации NO и NO_x уменьшались.

В процессе проведения эксперимента LINOX было показано, что частота вспышек возрастает с увеличением размера конвективных облаков по ИК данным со спутника.

Узкие пиковые значения NO_x на рис. 8.5.2 указывают на образование NO_x за счет вспышек. Некоторые из этих вспышек были обнаружены сетью LPATS и в пространстве и во времени оказались вблизи траектории самолета.

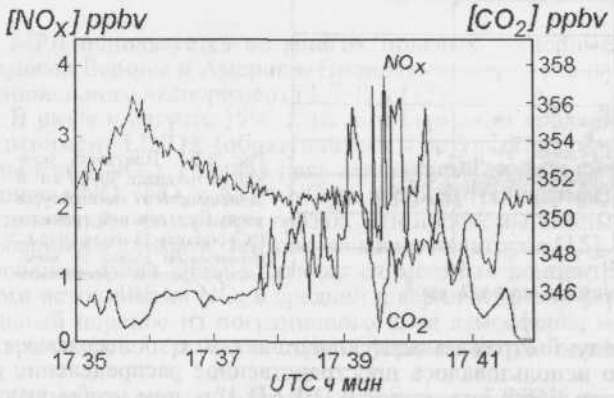

Рис. 8.5.2. Временной ряд самолетных измерений отношения смеси NO_x и CO_2 на траектории полета через грозовое облако [15].

Эти вопросы будут изучаться более подробно в процессе реализации проекта EULINOX (European lightning nitrogen oxides project – Европейский проект изучения оксидов азота в молниях).

МРЛ используется в ряде полевых программ Европы [16]. В качестве примера приведем следующие.

1. *Балтийский эксперимент BALTEX.* Его цель – изучение энергетического и водного баланса в водосборе Балтийского моря и его зависимости от внешнего воздействия глобальной циркуляции атмосферы, создание совместимых всеобъемлющих моделей, включающих атмосферу, земную поверхность с вертикальными и горизонтальными гидрологическими процессами, Балтийское море и лед в его водосборе. Для эксперимента привлекается сеть NORDRAD.

2. *Мезомасштабная альпийская программа* (*MAP*) для базового изучения с прямым практическим применением в области численного прогнозирования погоды. Конкретная цель MAP – определение трехмерного типа циркуляции в районе больших горных цепей. По результатам MAP планируются еще два европейских проекта – HERA (heavy precipitation – сильные осадки) и RAPHAEL (runoff and atmospheric processes with flood hazard for forecasting and control – программа прогноза и контроля стока в условиях наводнения).

8.6. Метеорологический радиолокатор в гидрологических задачах

Наводнение – одно из самых разрушительных стихийных явлений. Годовой ущерб, причиняемый наводнениями во всем мире, составляет миллиарды долларов. Прогноз наводнений позволяет уменьшить ущерб, если выполняются необходимые мероприятия по защите населения и имущества.

Модель прогноза наводнений состоит из двух частей: гидрологического прогноза и гидравлического прогноза. В гидрологическую часть входит взаимосвязь осадки–сток по бассейну реки, включая притоки (суббассейны). Гидравлическая часть прослеживает вклад этих притоков во время наводнений с использованием гидравлической трансформации паводка на основе полных уравнений Сант-Венанта [13].

Взаимосвязь между осадками и стоком описывается передаточной функцией, и в качестве исходной переменной используются данные об осадках.

В решении подходящей модели для прогноза потока учитывают необходимую точность прогноза, отрезок времени между подготовкой прогноза и началом наводнения, а также разрешающую способность данных об осадках, которые служат как исходные данные для модели [9, 11–13, 19, 24].

Существуют разные подходы к использованию радиолокационной информации об осадках:

1) определение осредненных по пространству осадков в масштабе бассейна или суббассейна для ввода в сосредоточенную или полураспределенную модель прогноза осадков–стока,

2) использование пространственных данных об осадках для прямого ввода в полностью распределенную модель прогноза на сетке.

В сосредоточенной модели в качестве исходного используется одно из значений количества осадков, репрезентативное для водосбора.

Основу структуры полураспределенной модели представляет собой группа из нескольких сосредоточенных моделей. Каждая сосредоточенная модель осадки–сток с передаточной функцией применяется сначала к суббассейну для определения прогнозируемого выхода в нижнем течении каждого суббассейна. Затем используется модель течение–течение с передаточной функцией, которая характеризует течение до выхода из главного бассейна.

Для использования пространственной информации автоматизированного МРЛ и детального описания гидрологических процессов применяют полностью распределенную модель осадки–сток на сетке. Водосбор представляется сеткой, соответствующей радиолокационной (рис. 8.6.1).

Пространственное распределение осадков вместе с поверхностными и субповерхностными характеристиками водосбора образует вход в каждый квадрат сетки. На рис. 8.6.2 показана форма входных данных.

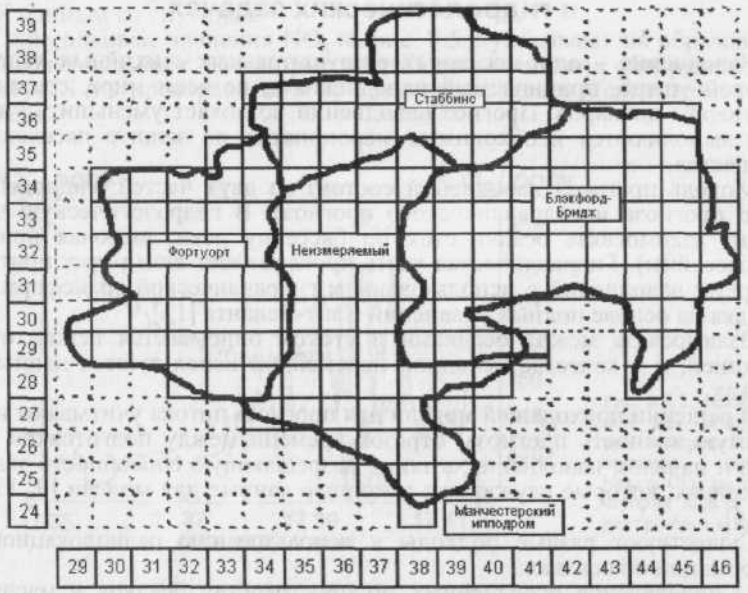

Рис. 8.6.1. Сетка для бассейна реки Ирвелл [11].

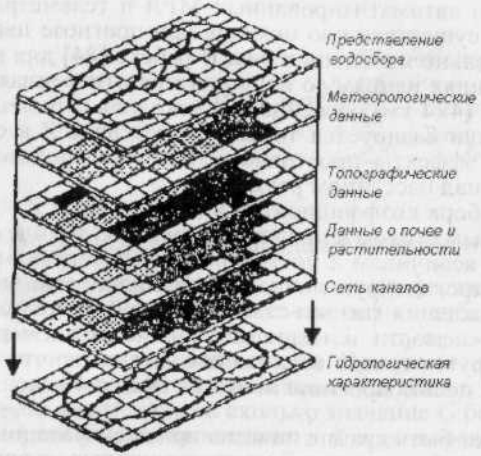

Рис. 8.6.2. Многослойная имитация распределенной модели на сетке [11].

Гидрологические процессы инфильтрационных потерь и трансформации осадки–сток рассчитываются в каждом квадрате сетки, сток – при каждом входе в речной канал и переносе речного потока.

Учет пространственного распределения осадков в масштабе суббассейна повышает точность прогнозов наводнения по сравнению с сосредоточенной структурой модели: средняя среднеквадратическая ошибка на возрастающем лимбе уменьшается на 30 % [11].

Гидрограмма 6-часового прогноза наводнений по моделям с использованием радиолокационной информации представлена на рис. 8.6.3. Аналогичные результаты получены в [11] и по другим бассейнам Восточной Англии.

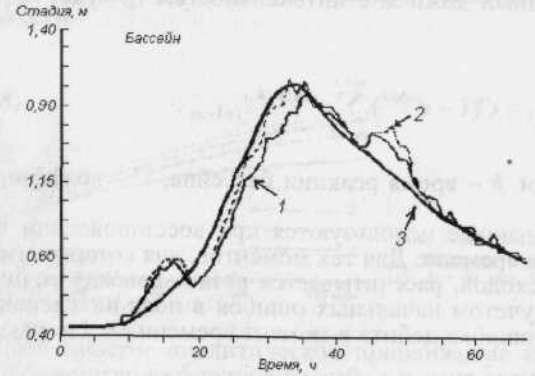

Рис. 8.6.3. Образец гидрограмм прогноза наводнений для модели бассейна реки Уиллоу-Брук [11].
1 и *2* – 8- и 3-битовый прогноз – прогноз по радиолокационным данным, полученным с разной точностью, *3* – гидрограмма на стадии наблюдения.

Совмещение информации автоматизированных МРЛ и телеметрических дождемеров оказывает существенную помощь при прогнозе наводнений в водосборах сравнительно небольших рек. В работе [24] для прогноза оповещения о наводнениях напрямую используется измеренная отражаемость в квадрате сетки (4×4 км) бассейна как исходная переменная для модели. Структура модели базируется только на переводе Z в слой осадков и включает в себя эффекты пространственного распределения осадков и движения осадков над бассейном реки.

Исключив проблемы подбора коэффициентов в соотношении $Z = AI^b$, с гидрологическим переменным стоком в предлагаемом в [24] методе связывают Z и по накопленным величинам Z по 5-минутным интервалам наблюдений в реальное время прогнозируют наводнение. Калибровка модели производится путем нахождения физико-статистической зависимости между гистограммами отражаемости и гидрограммой на дождемерной станции. Для корреляции берутся только восходящая ветвь гидрограммы и ее пик, поскольку главной целью прогноза является предупреждение о наводнении.

Эта же информация может быть крайне полезна при эксплуатации городских канализационных сетей, состоящих из водоотводных сооружений, в которые входят ливневые колодцы, коллекторы и водосборные бассейны. Канализационные сети служат для предотвращения наводнений в городах во время выпадения сильных ливневых осадков, сокращения выбросов из коллекторов в реки загрязненной дождевой воды, уменьшения повторяемости и интенсивности наводнений.

Французские специалисты исследовали вопросы городской гидрологии с применением МРЛ в рамках проекта автоматизации управления канализационными сетями в департаменте Сен-Дени [9, 19]. Они предположили, что водосборный бассейн описывается линейной моделью поверхностного стока [9]. С ее помощью рассчитывается коэффициент стекания, широко применяемый в городской гидрологии. В момент времени $i + 1$ дебит Q_{i+1}, вызванный дождем с интенсивностью I_i, будет определяться по формуле

$$Q_{i+1} = C(1 - e^{-\Delta t/k}) \sum_{m=0}^{m=i} e^{-m\Delta t/k} I_{i+1-m}, \qquad (8.6.1)$$

где Δt – шаг по времени, k – время реакции бассейна, C – коэффициент стекания.

Радиолокационные данные используются при восстановлении дебитов в заданные моменты времени. Для тех моментов, для которых имеются точные значения расходов, рассчитывается разница между точным и расчетным дебитом. С учетом начальных ошибок в поле интенсивности осадков относительная ошибка дебита в момент времени $i + 1$ характеризуется дисперсией

$$\sigma^2_{qi+1} = \sigma^2_p \frac{\sum_{m=0}^{m=i} e^{-2m\Delta t/k} I^2_{i+1-m}}{\left(\sum_{m=0}^{m=i} e^{-m\Delta t/k} I^2_{i+1-m}\right)^2}, \qquad (8.6.2)$$

где σ^2_p – дисперсия распределения относительной ошибки измерения I с помощью радиолокатора и плювиографа, зависящая от характера осадков.

Способность модели сглаживать ошибки в исходных данных можно описать некоторой величиной $G_i = \sigma_p/\sigma_{qi+1}$. Эта величина называется коэффициентом усиления скачка. При уменьшении крайних членов пропорции (за счет дебитов) начальные ошибки в поле интенсивности увеличиваются на столько, на сколько значение G больше единицы. В случае равномерного продолжительного дождя выражение для коэффициента усиления скачка упростится и будет иметь вид

$$G = \sqrt{(1 + e^{-\Delta t/k})/(1 - e^{-\Delta t/k})}. \qquad (8.6.3)$$

Из этой формулы при заданном Δt становится очевидной роль времени реакции бассейна.

Во время выпадения дождя коэффициент усиления скачка постоянно меняется. Из обработанной гистограммы был взят максимальный дебит, и для него произведен расчет коэффициента. На рис. 8.6.4 показан его временной ход (Δt = 10 мин) в зависимости от времени реакции бассейна k. Необходимо отметить, что относительная ошибка максимальных дебитов в 2 раза меньше, чем относительная ошибка начальных значений интенсивности.

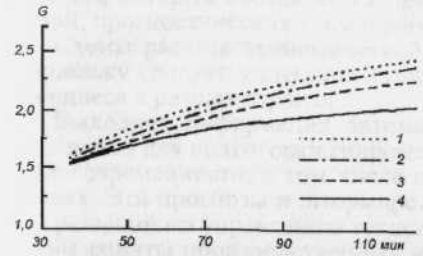

Рис. 8.6.4. Зависимость коэффициента усиления скачка от длительности дождя [9]. 1) k = 60 мин, 2) k = 50 мин, 3) k = 40 мин, 4) k = 30 мин.

Это простое аналитическое приближение позволяет уточнить роль фильтрации водосборного бассейна и дает возможность прогнозировать

порядок величины имитирующих дебитов в зависимости от характера осадков.

В каждом регионе Земли решение проблем радиолокационного измерения осадков с требуемой точностью при регулярной круглосуточной работе сети автоматизированных МРЛ позволяет использовать радиолокационную информацию для прогноза наводнений, выбора оптимальных моделей гидрологических прогнозов и решения аналогичных задач в городской гидрологии при сильных ливневых осадках, особенно в мегаполисах.

ГЛАВА 9

ОБ ОЦЕНКАХ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ МРЛ

9.1. Введение

Эффект от использования гидрометеоинформации проявляется в процессе принятия на ее основе управленческих решений. Прогноз опасных явлений, поступающий потребителю или в административный орган, на основании которого принимается решение о выполнении упреждающих действий, должен иметь практически 100 %-ную оправдываемость и достаточную заблаговременность. Всем очевидно, что неправильный прогноз и ложное штормовое предупреждение, если на их основании предприняты необходимые и обязательные мероприятия по защите, могут приводить к экономическим затратам, сравнимым с потерями от неспрогнозированного стихийного явления.

Оценка экономической эффективности всегда является неоднозначно решаемой задачей. Главная трудность заключается в необходимости вычленить вклад одного из средств наблюдений и прогноза в окончательный прогноз, который составляется при использовании многих видов наблюдений, прогностических схем и работы средств телекоммуникации.

Схемы расчета экономической эффективности трудно сопоставлять, поскольку следует учитывать стоимости и расценки, значительно различающиеся в разных странах.

Выходная информация автоматизированных МРЛ повсеместно используется для подготовки гидрометеорологических прогнозов различной заблаговременности, в том числе штормпредупреждений об опасных явлениях. Эти прогнозы и штормпредупреждения используются для принятия решений по управлению технологическими процессами и для организации защиты производственных и жилых объектов от неблагоприятных гидрометеоусловий, а также для принятия оперативных решений по складывающимся гидрометеоусловиям.

9.2. Экономический эффект

Особо опасные явления наблюдаются редко, но именно они причиняют наибольший ущерб потребителям. Оценка экономического эффекта прогнозов опасных явлений основана на учете предотвращенных потерь в результате предпринятых с использованием предупреждений об опасных явлениях мероприятий.

Экономический эффект одного прогноза (предупреждения) предусмотренного опасного явления определяется по формуле [7]

$$\Delta Э_{оя} = У_б - У_{пр} - З_{защ} - З_{пр}, \qquad (9.1)$$

где $У_б$ – ущерб, причиненный потребителям опасными явлениями при непринятии защитных мер; $У_{пр}$ – ущерб, причиняемый потребителям опасными явлениями, предусмотренными прогнозом (предупреждением) при принятии защитных мероприятий; $З_{защ}$ – затраты на защитные мероприятия; $З_{пр}$ – затраты на получение прогностической гидрометеоинформации (с учетом затрат на наблюдения).

Для определения величины экономического эффекта $\Delta Э_{оя}$ в рублях по этой универсальной формуле необходимо знать ответ на вопрос, кто получит экономический эффект: государство, если ущерб причинен федеральной собственности; страховые компании, если объекты были застрахованы; местные административные органы; организации, предприятия и любые другие потребители, которые воспользовались прогнозом; уполномоченные органы, занимающиеся специализированным метеообеспечением, за счет увеличения числа возможных потребителей.

В первом приближении потребителей можно распределить по отраслям народного хозяйства [7]. Отрасли располагаются в порядке зависимости их функционирования от метеоусловий: сельское хозяйство, энергетика, связь, общественный, авиа-, железнодорожный и автомобильный транспорт, коммунальное хозяйство, лесное хозяйство, строительство и топливный комплекс.

9.3. Экспертная оценка вклада информации МРЛ в экономический эффект

Информация автоматизированного МРЛ активно используется при составлении краткосрочных прогнозов и штормпредупреждений по следующим опасным и стихийным гидрометеорологическим явлениям: грозо-градовые, ветер, шквал, смерч, дождь, ливень, сель, снегопад, наводнения [2, 6, 8]. Ущерб, причиненный каждым из этих явлений, фиксируется и оценивается страховыми компаниями.

По общепринятым в мировой практике оценкам, за счет своевременного штормового предупреждения предотвратимый ущерб может составлять от 10 до 40 %.

Как уже говорилось в предыдущих главах, краткосрочный прогноз опасных и стихийных явлений составляется и при необходимости корректируется с применением информации автоматизированных МРЛ. Вклад этой информации зависит от плотности наземной наблюдательной сети и возможности привлечения других видов информации (ИСЗ, сеть грозопеленгаторов). Он может быть определяющим, если метеостанций мало и отсутствует быстрая и надежная связь, и, наоборот. При обнаружении смерча, шквала, сильных снегопадов, при атмосферной стратификации, когда трудно предсказать траектории градоопасных Cb, вклад информации МРЛ в штормовое предупреждение также может быть заметным. По этим причинам вклад информации МРЛ в краткосрочный прогноз опасных явлений можно оценить от 5 до 40 % при среднем значении 10 %.

Если своевременное штормовое предупреждение или краткосрочный прогноз с использованием информации МРЛ позволили предотвратить 20 % общего ущерба, а вклад информации МРЛ в этот прогноз составил 10 %, то это позволяет оценить вклад информации МРЛ в 2 % общего предотвращенного ущерба. Два процента вклада информации МРЛ в предотвратимый ущерб можно принять за среднее значение, максимальное может достигать 16 %, а минимальное – 0,5 %.

В зависимости от повторяемости опасных явлений в разных регионах эти цифры могут меняться в широких пределах. В одних регионах на первое место выходят дожди, вызывающие наводнения, в других – град, уничтожающий урожай, в третьих – снегопад, парализующий на длительный срок транспортные артерии региона. В каждом отдельном случае необходим конкретный расчет и ущерба, и вклада информации МРЛ в его предотвращение.

Наиболее просто оценивается экономический эффект при метеообеспечении авиации. В среднем автоматизированный МРЛ, размещенный на аэродроме, обеспечивает получение информации на площади 400×400 км, т.е. на участке авиатрассы длиной 400 км.

На основе сведений об авиационных происшествиях в странах – членах ИКАО за 20-летний период (1962–1982 гг.) [1, 3, 4, 9] были рассчитаны показатели характеристик уровня безопасности полетов в метеорологическом отношении. По этим данным число авиационных происшествий на 100 млн. км полета составляет в среднем 0,05.

Если через воздушную зону за год производится 100 000 пролетов самолетов, то ожидаемое число авиационных происшествий в год составит 400 км × 100 000 × 0,05/100 000 000 = 0,02.

По статистике [9] среднее число авиационных происшествий на 100 тыс. посадок составляет 0,1. Согласно данным [1, 3, 4], при взлете и посадке происходит 32 % авиационных происшествий, однако стоимость потерь при посадке составляет 52 % общей стоимости потерь от всех типов авиационных происшествий. Сдвиг ветра и турбулентность являются

причиной 78 % всех авиационных происшествий, связанных с метеоусловиями во время взлета, захода на посадку и посадки [3].

Удельный вес влияния метеоусловий на безопасность полетов составляет 23 %. Это означает, что каждое пятое авиационное происшествие, регистрируемое в странах – членах ИКАО, обусловлено метеорологическими условиями.

Экономический эффект одного правильного прогноза (предупреждения) опасного явления определяется по формуле

$$\Delta Э = У_б - З_{пр},$$

где $З_{пр}$ – затраты на получение прогностической метеоинформации на авиаметеостанции с учетом затрат на наблюдения и поставку МРЛ; $У_б$ – ремонт самолета при непринятии защитных мер для исключения авиационного происшествия, т.е. невыполнении пилотом команды диспетчера в сложных метеорологических условиях.

По статистике в 38 % авиационных происшествий происходит повреждение самолетов. Стоимость ремонта обычно превышает 10 % стоимости самолета, но при этом ниже 50 % стоимости. При серьезном повреждении стоимость ремонта составляет от 50 до 90 % стоимости самолета. Необходимо добавить, что, кроме стоимости ремонта самолета, в стоимость ущерба входит оплата спасательных работ и страховки в случае гибели и ранения пассажиров и экипажа.

При обосновании необходимости разработки терминального доплеровского погодного радиолокатора TDWR в США приводились следующие сведения [16]. Согласно исследованию, проведенному Национальным исследовательским советом (НИС) в 1983 г., с 1964 по 1982 г. сдвиг ветра на малой высоте явился причиной 27 авиационных аварий и происшествий. В семи из этих аварий погибло 488 человек, 112 из них в крушении «Истерн флайт 66» в Нью-Йорке в 1975 г. и 153 человека в крушении «Пан американ флайт 759» в Нью-Орлеане в 1982 г. После завершения исследования НИС было проведено по крайней мере еще три исследования происшествий, связанных со сдвигом ветра. Одно из них, а именно крушение «Дельта флайт 191» в Форт-Уорте (Даллас) 2 августа 1985 г., унесло еще 137 жизней.

После внедрения TDWR пилоты стали серьезнее относиться к предупреждению о микровзрывах, поэтому резко снизилось число случаев попадания самолетов в сильные микровзрывы и сдвиги ветра [15]. К 1998 г. работоспособность TDWR составила примерно 90 % при вероятности обнаружения микровзрывов 95 %. Как большое достижение отмечается обнаружение с помощью TDWR в течение лета 1996 г. в Вашингтонском аэропорту 85 микровзрывов. Система TDWR в США вносит большой вклад в обеспечение безопасности авиапассажиров в летнее время года.

Учитывая приведенные сведения о потерях и сопоставляя стоимость самолета и МРЛ, можно сделать вывод о том, что предотвращение хотя бы одного авиационного происшествия с использованием информации

автоматизированного МРЛ в аэропорту полностью окупит стоимость его поставки, установки и эксплуатации.

В 1988 г. Конгресс США санкционировал модернизацию и реструктуризацию Национальной метеослужбы США [11, 15]. В числе основных принципов модернизации было использование метеорологического радиолокатора NEXRAD, который базировался на достижениях многих исследований 1960–1970 гг. (модернизация предполагала использование сети WSR-88D, автоматических метеостанций ASOS, интерактивной системы AWIPS, суперкомпьютера в Центре прогнозов). Авторы работ [11, 15] считают, что это привело к уменьшению ущерба, связанного с неблагоприятными и опасными условиями погоды на территории США в 3,5 раза и практически в течение года окупило всю модернизацию и структуризацию Национальной метеослужбы.

По независимым оценкам, один прогноз снегопада в аэропортах США с использованием информации WSR-88D экономит более 1 млн. долларов за зимний сезон.

Следует обратить внимание, что система доведения информации сети NEXRAD до потребителя тоже дает значительный экономический эффект. Однако фактических данных найти не удалось. Будем считать, что эти цифры вошли в общий экономический эффект. Система NEXRAD будет работать 20 лет, и, как считают американские специалисты, за счет высокой климатологической повторяемости опасных явлений в США она окупится как минимум 20 раз.

Финляндия отличается суровым климатом с частыми снегопадами: в среднем число дней со снежным покровом колеблется от 100 на архипелаге до 220 в Лапландии. Поэтому зима является трудным периодом для дорожного движения: как правило, годовые затраты на очистку и посыпку дорог солью составляют 100 млн. экю* [12]. Очистка дорог после одного шторма со снегом на южном побережье Финляндии стоит примерно 150 000 экю. Финское дорожное управление поддержало создание сети доплеровских радиолокаторов при Финском метеорологическом институте (FMI). В оперативной работе используются комбинированные карты псевдоCAPPI для высоты 500 м (дБZ), детальные изображения CAPPI с высоким разрешением (дБZ), получаемые на отдельных радиолокаторах, и данные о накоплении осадков (мм) за 3, 6 и 12 ч. Наличие радиолокационных изображений сыграло важную роль, когда дорожное управление сосредоточило всю суточную оперативную работу в нескольких так называемых центрах дорожного движения. Продукты одномоментного и продолжительного измерения важны, когда дорожный центр должен принять решение о том, посылать ли дорожные бригады на очистку дорог или посыпку их солью во время шторма со снегом. По словам руководителя дорожного центра на юго-востоке Финляндии Jukka Annala,

* Экю – единица европейской валюты Европейского фонда финансового сотрудничества. В 1998 г. экю в первом приближении равнялось или чуть превышало доллар США.

«…радиолокатор – это инструмент номер один для получения информации о том, где идет снегопад. Утром метеоролог сообщает нам об общей обстановке, мы руководствуемся радиолокационными изображениями, чтобы знать о времени событий... Сеть авиаметеослужбы редкая, и мы не можем надеяться только на нее... Авиаметеослужба дает сведения о начале и конце снегопада, но данные об интенсивности и накоплении осадков доверия не заслуживают... Радиолокатор не совершенен, но он намного лучше дождемеров авиаметеослужбы».

Дорожное управление при Центре дорожного движения хельсинкского региона считает, что метеослужба FMI экономит им каждую зиму только по этому региону примерно 200 000 экю. Проводимые в Центре дорожного движения работы сильно зависят от количества осадков и от водной фазы падающих гидрометеоров. Применение зимних автопокрышек в Финляндии обязательно с декабря по март. Однако слой свежего снега толщиной 5–10 мм уже может потребовать действий от Центра дорожного движения.

В Швеции уборка снега обходится почти в 800 млн. крон в год [13]. Эта сумма делится между округами по сложным правилам. Например, округ Остерготланд, куда входит Норчепинг, получает примерно 1/20 этой суммы, т.е. 40 млн. крон. Метеослужба (SHMI) тесно сотрудничает с дорожными управлениями и готовит 6-часовой прогноз типа и количества осадков. Он делится на 2-часовые интервалы, и для этого нужен радиолокатор. Стоимость вызова персонала и техники для очистки дорог составляет 400 000 крон. Ложный вызов обходится дорого. Если радиолокатор наблюдает снегопад, то снегоуборочную технику можно выводить на дороги до того, как возникнут трудности для движения транспорта. Возможность направлять снегоуборочную технику в нужное место и в нужное время является критерием повышения эффективности метеообеспечения. Любая система, повышающая точность прогнозов снегопада, окупается.

По оценкам, выигрыш от предупреждений о наводнениях в Великобритании с использованием только радиолокационных данных составил 1,8 млн. долларов, а выигрыш при совместном использовании радиолокационных и спутниковых данных при участии синоптика составил 4,5 млн. долларов [10].

Отметим, что тропический циклон может причинить ущерб в несколько миллионов долларов. Заблаговременное предупреждение на основе информации сети МРЛ позволит сэкономить от 1 до 5 %, но эта экономия будет сравнима со стоимостью части сети МРЛ, однако остается еще неоценимый фактор – человеческие жизни. Очевидно, что выигрыш можно рассчитывать только для каждой страны или региона в отдельности, поскольку стоимость недвижимости, расценки на услуги и т.п. в разных странах существенно различаются.

Однако даже из приведенных сведений можно вывести следующие закономерности:

ценность радиолокационной метеорологической информации при

опасных явлениях резко возрастает при редкой сети наземных метеонаблюдений;

надежность штормового предупреждения и краткосрочного прогноза при опасных явлениях резко повышается, когда используются все виды метеоинформации и прогноз составляет опытный специалист;

размер ущерба может быть минимизирован при нормальном функционировании всей цепочки служб, задействованных при чрезвычайных ситуациях (метеослужба, телекоммуникации, региональные органы МЧС, администрация региона – потребители в самом широком смысле этого слова).

9.4. Оценка затрат на приобретение и установку МРЛ

Естественно, для максимального экономического выигрыша требуется разумная минимизация затрат на установку и эксплуатацию наблюдательных метеосистем, в которые входит и метеорологический радиолокатор.

Оценим затраты на приобретение, установку и эксплуатацию автоматизированного МРЛ, которые входят в затраты на получение прогностической гидрометеоинформации. Для этого привлечем данные, опубликованные в разных странах в течение последних двух десятков лет (табл. 9.4.1).

На установку одного автоматизированного МРЛ с сетью из 20 оптических дождемеров, объединенных с центром сбора данных, фирма SENCON (Австралия) запланировала в 1991 г. 2 533 400 австралийских долларов. В 2000 г. сеть автоматизированных МРЛ Австралии (по побережью) состояла из 49 установок.

Таблица 9.4.1

Расходы на приобретение и установку автоматизированного МРЛ на позиции [14]

№ п/п	Статья расхода	Стоимость, %
1	Автоматизированный МРЛ с автономным электропитанием и запасным имуществом и приборами	30
2	Планирование выбора места для установки	4
3	Доставка, дорожные расходы и предварительная сборка на месте установки	6
4	Обучение персонала	0,2
5	Дождемерная сеть для каждого МРЛ (20 оптических дождемеров с радиомодемом и центр сбора на ЭВМ)	10,3
6	Расходы на монтажные и пусконаладочные работы	49,5
	Итого	100

Правительство США выделило на разработку WSR-88D и создание сети NEXRAD из 165 WSR-88D 1 млрд. долларов [11]. Таким образом, к началу функционирования стоимость приобретения и установки одного радиолокатора WSR-88D составляла в среднем 6 млн. долларов. Из них, если учесть соотношения табл. 9.4.1, стоимость WSR-88D на заводе-изготовителе составляет примерно 2 млн. долларов. Стоимость основных подсистем WSR-88D в процентном отношении от общей стоимости распределилась следующим образом: подсистема получения радиолокационных данных (RDA на рис. 6.3.2) 60 %, подсистема получения и передачи радиолокационных результатов (генератор радиолокационных продуктов, RPG) 20 %, процессор основного потребителя (PUP) 20 % [11].

9.5. Эксплуатационные расходы

Оценка эксплуатационных расходов автоматизированного МРЛ произведена для режима обновления радиолокационной информации каждые 10 мин при наработке на радиолокатор не менее 4500 ч в год при условии, что осадки, количество которых составляет 1 мм/сут, наблюдаются в регионе 140 дней в году. Результаты приведены в табл. 9.5.1.

Таблица 9.5.1

№ п/п	Статья эксплуатационных расходов автоматизированного МРЛ	Стоимость (%) от общих затрат на эксплуатационные расходы	
		от	до
1	Расходы на содержание обслуживающего персонала с накладными расходами	26	40
2	Аренда выделенных линий связи, включая междугородные, для доведения информации МРЛ до потребителей и центра сбора данных сети МРЛ	16	20
3	Оплата электроэнергии	3,5	4
4	Текущий ремонт МРЛ и профилактические работы с заменой комплектующих с учетом расходов на приобретение СВЧ комплектующих с ограниченным ресурсом (магнетроны, тиратроны, СВЧ усилители)	40	50

Ежегодные эксплуатационные расходы на один автоматизированный МРЛ в составе сети составляют от 6 до 16 % его стоимости на заводе-изготовителе. По исследованиям экономистов ГГО [5], при оценке себестоимости гидрометеорологической продукции (услуг) Госкомгидромета СССР себестоимость информации одного автоматизированного МРЛ Северо-Кавказского УГМС была оценена в 99 110 руб. в год (1990 г.). МРЛ-5 был автоматизирован с помощью аппаратуры АОМ «Циклон» и работал на АСУВД в режиме один раз в 15 мин. Если принять, что советский

рубль был равен доллару, то получим стоимость эксплуатационных расходов для автоматизированного МРЛ, равную почти 100 тыс. долларов в год. При всей условности такой оценки ее можно принять за верхний предел, а нижним пределом считать 30 тыс. долларов в год.

В [10] отмечается, что стоимость обслуживания и эксплуатации автоматизированного МРЛ зависит от принятой политики и методов, но, как правило, составляет в европейских странах в год от 30 до 50 % заводской стоимости МРЛ. С учетом ценовых реалий в нашей стране легко прийти к значению 6–16 %.

Основная экономия при эксплуатационных расходах автоматизированных МРЛ заключается в выборе СВЧ комплектующих с большими сроками наработки и в оптимальном выборе линий связи. Такая экономия особенно заметна на автоматизированных МРЛ, не входящих в сеть. В этом случае МРЛ работает в основном на обеспечение авиаполетов в районе аэропорта, а для общих прогностических задач обычно выдает информацию лишь к моменту составления и корректировки прогнозов.

При обосновании затрат на приобретение СВЧ комплектующих надо анализировать отношение стоимости СВЧ изделия ко времени его гарантированной наработки. Если СВЧ изделие стоит 30 000 у.е. и имеет гарантированный срок наработки 50 000 ч, то на 1000 ч работы будет затрачено 600 у.е. Если аналогичное СВЧ изделие стоит 5000 у.е. и срок гарантированной наработки 5000 ч, то на 1000 ч работы будет затрачено 1000 у.е. При наработке автоматизированного МРЛ 4500 ч в год первое СВЧ изделие отработает без замены 11 лет, второе – чуть больше года.

9.6. Затраты на телекоммуникационные услуги

К началу века телекоммуникационные услуги во всех без исключения странах подорожали. В зависимости от схем, принятых при создании сетей автоматизированных МРЛ, скорость передачи информации может колебаться в широких пределах – от 4800 бит/с до сотен кбит/с, хотя еще 10 лет назад во многих странах удовлетворялись скоростью 1200 бит/с. Эти расходы могут компенсироваться платой потребителей информации как отдельному МРЛ, так и сети в целом.

Как видно из изложенного выше, схемы подключения потребителей и объем оказываемых им услуг в каждой стране различны: от продажи программ подключения через телефонную сеть и интерпретации на своей ПЭВМ в Финляндии и абонентских пунктов в Японии до NIDS и AWIPS в США. Здесь все решают технические возможности и традиции каждой страны. В Европе аренда цифровых линий 64 кб/с у общественных агентств связи обосновывается тем, что линии 64 кб/с – основной стандарт агентств связи [10]. По этой причине они обладают достаточной

пропускной способностью, исключающей наличие очередей в критических ситуациях.

Скорость прохождения данных для подачи информации в автоматизированные системы особого назначения обычно строго задана и должна выдерживаться в самых критических ситуациях. Это основное требование неизменно соблюдается при работе сетей МРЛ в Европе и США.

9.7. Выводы

Несмотря на весьма значительные затраты на приобретение, установку и ввод в эксплуатацию автоматизированного МРЛ, их объединение в сеть, разработку и усовершенствование методов краткосрочного прогнозирования, применение радиолокационной метеорологической информации считается экономически выгодным во всех странах мира. И если достижения английских и шведских ученых не потрясли воображение их соотечественников из-за постепенного характера создания оперативных сетей МРЛ в этих странах, то Национальная метеослужба США, переоснастившая сеть МРЛ за пять лет с одновременным внедрением новых прогностических схем и методов доведения информации до потребителя, вправе считать, что «внедрение NEXRAD является самым важным из новых технических достижений Метеослужбы за последние полвека» [15].

ГЛАВА 10

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ОПЕРАТИВНЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МРЛ

10.1. Разработка методов борьбы с отражениями от местных предметов

10.1.1. Доплеровская и статистическая фильтрация

Для борьбы с мешающими отражениями от местных предметов используется доплеровская и статистическая фильтрация с учетом характеристик осадков (средней скорости и ширины спектра), а также местников [1].

Центр доплеровского спектра радиоэха осадков находится на среднем значении скорости, зависящем от горизонтальной скорости ветра. Спектр состоит из центральной частоты, соответствующей радиальной скорости осадков, и вариации частоты вокруг этой центральной частоты, которую можно считать гауссовой (если скорость ветра мала, спектр осадков близок к спектру местников).

Спектр местников в большинстве случаев состоит из когерентного компонента, медленно рассеивающего компонента и быстро рассеивающего компонента, относительная величина которого в общем пренебрежимо мала [1].

При доплеровской фильтрации применяются фильтры верхних частот, уменьшающие отражения от земли и ограниченные низкими доплеровскими частотами. При этом радиоэхо осадков не ослабляется, если средняя скорость его перемещения достаточно высока.

Если скорость перемещения осадков мала, то радиоэхо местников можно фильтровать с помощью статистического фильтра, который учитывает спектр осадков по отношению к спектру местников.

Рассмотрим эффективность обоих способов фильтрации.

Распределение флуктуаций амплитуд в радиоэхе дождя подчиняется закону Рэлея [1]:

$$f(x) = \frac{x}{\sigma_1^2}\exp\left(-\frac{x}{2\sigma_1^2}\right). \qquad (10.1.5)$$

Первые два момента распределения имеют вид

$$\bar{f} = \sqrt{\frac{\pi}{2}}\sigma_1, \qquad (10.1.6)$$

$$\overline{f^2} = 2\sigma_1^2. \qquad (10.1.7)$$

Для незатухающей энергии m_r и дисперсии σ_r^2 запишем следующие выражения:

$$m_r = \overline{f^2} = \frac{\pi}{2}\sigma_1^2, \qquad (10.1.8)$$

$$\sigma_r^2 = \overline{f^2} - \bar{f}^2 = \left(2 - \frac{\pi}{2}\right)\sigma_1^2, \qquad (10.1.9)$$

$$q_r = \sigma_r^2 / m_r = 0{,}27\ (\approx -5{,}6\ \text{дБ}). \qquad (10.1.10)$$

Стандартное отклонение σ_1 связано со спектром скорости осадков σ_v выражением

$$\sigma_1 = 0{,}171\ \lambda/\sigma_v, \qquad (10.1.11)$$

где λ – длина волны радиолокатора в метрах, σ_v – в м/с, σ_1 – в секундах.

Корреляционная функция находится с помощью аппроксимации спектра распределением Гаусса:

$$R(\tau) = m_r + \sigma_r^2 \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma_1^2}\right). \qquad (10.1.12)$$

При доплеровской фильтрации используют режекторный фильтр. Передаточную функцию режекторного фильтра $\Phi(F)$ записывают следующим образом [1]:

$$\Phi(F) = \left(\frac{F}{F_c}\right)^m \text{ при } F \le F_c,$$

$$\Phi(F) = 1 \text{ при } F \ge F_c,$$

где F_c – урезанная второстепенная частота. Ниже F_c в режекторном фильтре существует постоянный наклон (дБ/октава), выше F_c – постоянная унитарная характеристика. Наклон фильтра ниже F_c составляет 6 мдБ/октава.

Мощность радиоэха местников P_1 определяется формулой

$$P_1 = \int_0^\infty e^{-F/F^2}\,\phi^2(F)dF.$$

Без фильтрации

$$P_2 = \int_0^\infty e^{-F/F_2}dF = F_2.$$

Коэффициент исключения β описывается выражением

$$\beta = \frac{P_1}{P_2} = \frac{P_1}{F_0/b},$$

где F_0 – несущая частота МРЛ; b – коэффициент, зависящий от типа радиоэха и скорости ветра (при скорости ветра 30 км/ч лесистый холм дает $b = 0{,}6\cdot 10^9$).

Не зависит от длины волны λ отношение

$$\frac{F_0}{F_c} = \frac{F_0}{2v_д} = \frac{c}{2v_д},$$

где $v_д$ – доплеровская скорость, c – скорость электромагнитных колебаний.

После преобразований и разложения в ряд получаем

$$\beta = e^{-bF_c/F_0}\left[1 + \frac{bF_c/F_0}{2m+1} + \frac{(bF_c/F_0)^2}{(2m+1)(2m+2)} + \ldots\right]. \qquad (10.1.13)$$

Таким образом, спектр и коэффициент исключения β не зависят от λ, но зависят от типа радиоэха и скорости ветра. Согласно расчетам [1], при режекторном фильтре с характеристиками $m = 6$ (36 дБ/октава), $F_0 = 5{,}6 \cdot 10^9$ Гц, $F_c = 70$ Гц ($v = 1{,}9$ м/с) и $F_c = 35$ Гц ($v = 0{,}95$ м/с) и местниках (лесистый холм, скорость ветра 30 км/ч) $b = 0{,}6 \cdot 10^9$ имеем

при $F_c = 70$ Гц $\quad 10 \lg \beta = -30$ дБ,
при $F_c = 35$ Гц $\quad 10 \lg \beta = -15$ дБ.

Статистическая фильтрация основана на выборке принимаемой мощности с определенной частотой (период τ_1) и в вычитании последовательных выборок в каждом бине дальности. Результатом статистической фильтрации является флуктуирующая часть сигнала, которая увеличивается со скоростью флуктуаций в одном и том же бине дальности между последовательными выборками. Затем рассчитывается среднее за время τ_r. Точность оценки амплитуды флуктуаций сигнала зависит от величины τ_r. Выбор τ_r является компромиссом между желаемой точностью и скоростью вращения антенны.

Для использования статистической фильтрации устройство подавления местников конструируется на основе учета трех главных различий между постоянным радиоэхом от местников и радиоэхом осадков:

радиоэхо местников флуктуирует *меньше*, чем радиоэхо осадков;

радиоэхо местников флуктуирует *медленнее*, чем радиоэхо осадков;

отношение между дисперсией радиоэха дождя и его средним значением постоянно, что согласуется с распределением Рэлея.

Эти положения позволяют создать систему фильтрации на базе оценки дисперсии. Режекция фиксированного радиоэха n_t, производимая таким фильтром, включает в себя два члена:

режекцию среднего значения n_a амплитудной флуктуации фиксированного радиоэха относительно аналогичного значения осадков;

режекцию n_v оценки дисперсии фиксированного радиоэха, для которой τ не подбирается. Для режекции местников оценим n_a и n_v.

Фильтр блока оценки подавляет незатухающий компонент сигнала. Затем мощность фиксированного радиоэха ослабляется в соотношении 500 (27 дБ), а мощность радиоэха дождя ослабляется в 3,7 раза ($\approx$ 6 дБ) согласно закону Рэлея. Тогда

$$10 \lg n_a = 21 \text{ дБ}.$$

Для оценки n_v используют следующие закономерности. Энергия сигнала $s(t)$, среднее значение которой равно нулю, равняется оцениваемой дисперсии $X(t)$:

$$\overline{\sigma}^2 = \int [X(t) - X(t-\tau)]^2 \, dt, \qquad (10.1.14)$$

откуда получаем

$$\overline{\sigma}^2 = 2[R(0) - R(\tau)], \qquad (10.1.15)$$

где $R(\tau)$ – автокорреляционная функция $X(t)$ (см. п. 3.3).

Выражение для n_v можно записать следующим образом:

$$n_v = \frac{\overline{\sigma}_r^2 / \overline{\sigma}_f^2}{\sigma_r^2 / \sigma_f^2}. \qquad (10.1.16)$$

Тогда

$$n_v = \left(1 - e^{-\tau^2/2\sigma_r^2}\right) \frac{1 + \tau^2/2\sigma_2^2}{\tau^2/2\sigma_2^2} \qquad (10.1.17)$$

при $\sigma_r^2 / \sigma_r^2 = 1 - e^{-\tau^2/2\sigma_r^2}$ для осадков (гауссова модель).

При частоте следования радиолокационных импульсов 3 мс модель радиоэха σ_r рассчитывается: при $\lambda = 5{,}4 \cdot 10^{-2}$ и $\sigma_v = 1$ м/с, что дает $\sigma_1 = 3$ мс; модель местников (лесистый холм, скорость ветра $\approx$30 км/ч) находим $10 \lg n_v = 10$ дБ и $10 \lg n_t = 31$ дБ для всей режекции.

Отметим, что фактически режекция ограничивается скоростью вращения антенны. Типичное значение равняется примерно 30 дБ.

Ошибка оценки E описывается уравнением

$$E = \frac{\sigma_r^2}{\overline{\sigma}_r^2} = \frac{1}{1 - e^{-\tau^2/2\sigma_r^2}}. \qquad (10.1.18)$$

Потеря чувствительности на фильтре S^* будет определяться выражением

$$S^* = \frac{\sigma_r^2}{\overline{\sigma}_r^2} = E. \qquad (10.1.19)$$

Если пренебречь шумом приемника, из-за которого автокорреляционная функция очень узка по сравнению с автокорреляционной функцией сигнала осадков при допущении линейного обнаружения, то при частоте следования 3 мс потеря чувствительности равняется –4 дБ.

В работе [1] сделаны следующие выводы.

- Если средняя скорость радиоэха осадков достаточно велика (≥2 м/с) при умеренном ветре (≈30 км/ч), то эффективность доплеровской фильтрации достаточно высокая.
- Если средняя скорость радиоэха осадков нулевая, то оценочная функция дисперсии лучше и обеспечивает хорошее подавление местников (≈30 дБ). Однако эффективность этого метода снижается, когда скорость осадков не нулевая и спектр дождя узкий.
- Можно использовать оба метода фильтрации – доплеровский (с разной отсечкой частоты) и статистический (с учетом параметров дождя и местников). Такой подход применяется в Шведском метеорологическом институте.

10.1.2. Обработка местников на радиолокаторах Gematronic Meteor 360 AC

В метеослужбе ФРГ (DWD) на сети радиолокаторов вводятся в оперативную практику новые методы обработки местников. Эти методы основаны на фильтрации сигналов, позволяющей не только распознать и удалить местники, но и ввести поправку на местники в ячейках, где одновременно отмечаются сигналы, отраженные от дождя и от местников [10].

Девять радиолокаторов метеослужбы ФРГ являются высококогерентными доплеровскими радиолокаторами (Gematronic Meteor 360 AC) со стабилизацией мощности магнетрона и регулировкой DQ. Они снабжены пульспарными и частично FFT процессорами, генератором испытательных сигналов, программным имитатором сигналов и утилитами, с помощью которых регулярно вырабатываются и архивируются одновременно скорректированные и нескорректированные (или с log-коррекцией плюс доплеровской коррекцией) первичные данные и продукты.

Почти в произвольной комбинации постоянно используются следующие методы:

амплитудный (log) фильтр, временной (доплеровский) фильтр или FFT (доплеровский) фильтр для оценки относительной мощности местников CCOR;

разделительные фильтры: пороги для log-интенсивности (абсолютной и динамической), IQ-интенсивности (относительной), качества сигнала (доплеровского) SQI, мощности метеосигнала WSP, CCOR, микроподавления местников CMS (на базе CCOR), средство уничтожения спеклов;

количественная коррекция местников;

статичная и динамичная карты местников;

динамическая обработка изображений.

Статичная и динамичная карты местников. Широко применяется статичная карта местников, которая является самым приближенным допущением постоянства радиоэха местников, несмотря на известную изменчивость условий распространения.

В условиях аномального распространения можно пользоваться динамичной картой местников, которая может базироваться просто на синхронном продукте для ветра. На дисплей выводятся только те пикселы, в которых имеется одновременно измеряемая скорость $|v| > 1$ м/с.

Адаптивное отображение. Определенного улучшения можно достичь, когда отраженные от осадков сигналы смешаны с местниками, на изображениях самого нижнего уровня (1 км CAPPI) с помощью алгоритма поиска, а не прямого отображения. В этом случае картируется не строго самый нижний уровень куба данных, а отыскивается столб над каждым пикселом (например, до 6 км) до первого элемента пространства без местников (lowest non-clutter voxel – самый нижний воксел (элемент объемного изображения) без местников). Решение базируется на трехмерном, но все равно статическом файле местников. Из-за «произвольной» сортировки по высоте относительно вертикального профиля отражаемости этот метод не используется для получения количественных продуктов.

При существующем в DWD алгоритме отображения ближайшая полярная ячейка измерения (бин дальности) размещается в каждой прямоугольной ячейке (вокселе) с помощью заранее подготовленной справочной таблицы. В ней не учитывается наличие в бине местников или отсутствие данных. При «адаптивном отображении» выбирается бин с осадками и без местников, которым заполняется воксел.

Корреляционный фильтр изображения. Комбинированный продукт на сети МРЛ Германии, передаваемый некоторым партнерам по COST-75, проходит постобработку следующим образом. Над обследуемой квадратной подзоной (например, 5×5 пикселов) рассчитывается корреляция между двумя изображениями с определенным временным интервалом между ними (например, 1 ч). Центральный пиксел сильно коррелирующих подзон обнуляется. Неизменившиеся местники удаляются, и, к сожалению, при обложном дожде образуются пропуски данных.

«Aneichung». В DWD была разработана процедура, отвечающая требованиям гидрологов и устраняющая местники следующим образом. Чтобы пикселы, превышающие какой-то процент случаев, назвать местниками, используется динамичная карта местников. Выбранные пикселы интерполируются, и сглаживается весь ряд данных; качество проверяется по площадным средним. Эта процедура применяется к выбранным случаям интерактивно. Смысл состоит не в том, чтобы значительно исправить после обработки плохие данные, а в том, чтобы как можно лучше произвести измерение при низких поправочных коэффициентах и по отдельности исключить источники ошибок.

Коррекция отражаемости. По логарифмическому отношению энергетических средних фильтруемого и нефильтруемого рядов рассчитывается отрицательная поправка на местники CCOR = 10 lg (сигнал/(сигнал + местники)) = –10 lg(CSR + 1) для уравнения радиолокации в логарифмическом виде:

скорректированная Z (дБZ) = нескорректированная Z (дБZ) + CCOR (дБ),

где первому члену дадим сокращение *CZ*, а второму – *UZ*. Расчет относительной интенсивности местников по некалиброванному линейному каналу (LIN) обусловливает сохранение отношения местники/сигнал CSR на обоих каналах. Чтобы канал LIN не насыщался, его рабочая точка контролируется как функция интенсивности радиоэха (AGC). Вторым критическим моментом является когерентность системы. Фазовый шум магнетрона «протаскивает» часть когерентной энергии местников в шум, что перекрывает слабые метеосигналы. В системах DWD фазовая стабильность приближается к единице.

Следует отметить, что несмотря на ограничения аппаратуры и полосы фильтра, которые позволяют эффективно ограничивать максимальное удаление местников CCOR примерно до 40 дБ, перерассчитанная разница между нескорректированной и скорректированной отражаемостью |UZ–CZ| может оказаться намного больше всякий раз, когда один из порогов (включая средство уничтожения спеклов) вступит в действие, экранируя, например, 60 дБZ местников до 0 (что соответствует –32 дБZ или «отсутствию данных»).

log-*фильтры.* Логарифмические log-фильтры созданы для некогерентных радиолокаторов, которые не обрабатывают фазовую информацию. Они являются рекурсивными фильтрами верхних частот третьего порядка Чебышева мощностью 30 или 40 дБ, работающими непосредственно с аналого-цифровыми выборками на линеаризованном логарифмическом канале, или серией амплитуд X_m и вырабатывают отфильтрованную серию X'_m, которая необходима для калибровки.

Фильтрация в некогерентном режиме базируется на статистических свойствах случайных межимпульсных колебаний амплитуды, которые соответствуют спектру флуктуаций. Предполагается высокая корреляция выборок местников и некоррелируемого метеорологического радиоэха. Это предполагает низкую частоту следования импульсов МРЛ, а также корреляцию и ослабление метеовыборок. Поправка на местники рассчитывается по отношению фильтрованной энергии к нефильтрованной с учетом теоретического влияния фильтра на амплитудную статистику λ (см. п. 10.1.1).

Доплеровские фильтры. Доплеровские фильтры – это фильтры верхних частот четвертого порядка, которые в каждом бине дальности когерентного канала работают с комплексным временным рядом центрированных аналого-цифровых выборок $A_m = I_m + jQ_m$ и создают фильтрованный ряд A'_m. Моменты и CCOR рассчитываются традиционно путем обработки парных импульсов:

$$A'_m = \sum_{i=0}^{4} B_i A_{m-i} - C_i A'_{m-i},$$

$$CCOR_{R_{0,1}} = 10x\lg(R'_0 / R_0). \qquad (10.1.20)$$

Для доплеровской обработки нужна когерентность выборок метеоотражений, которая возрастает с частотой следования импульсов. Время задержки не должно превышать время корреляции. Переключение ЧСИ или AGC создает переходы в характеристике фильтра, причем у более узких фильтров более широкие переходы. Вот почему в фильтрах с временным рядом какое-то число импульсов оставляется для установки фильтров.

Доплеровские фильтры обладают глубиной 40–50 дБ и шириной 5–23 % интервала Найквиста, поэтому абсолютная ширина определяется частотой следования импульсов.

FFT-фильтры. С точки зрения сохранения более перспективной информации об осадках, чем фильтр с временным рядом и фиксированной глубиной, является эвристическая коррекция спектра с помощью интерполяции по базовой линии местников. Для фильтрации в частотном домене в процессоре сигналов должен иметься полный спектр, чего нет в процессоре парных импульсов. Однако в процессоре FFT такие фильтры реализуются просто. Последние версии процессоров DWD имеют опцию FFT и семь фильтров Фурье, которые удаляют от 1 до 13 точек спектра вокруг нулевой скорости и интерполируют промежуток. Это оптимально адаптирует фильтры, но нелинейно к спектру метеосигналов, оставляя неопределенной их спектральную характеристику.

Если преобразование Фурье имеет вид $S_i = |\mathrm{FFT}(A_i)|^2$, тогда фильтр # *k* описывается формулой

$$S'_{i=-k,\ldots,k} = S_{-k-1} + (S_{k+1} + S_{-k-1})\frac{k+1+i}{2(k+1)}, \qquad (10.1.21)$$

CCOR: модели нет.

Ширина фильтра определяется числом импульсов в интервале Найквиста и шириной последнего, глубина фильтра зависит от самого сигнала, а также от динамического диапазона линейного канала и окна FFT. При достаточном динамическом диапазоне окно Блэкмана получает до 60 дБ CCOR.

Порог поправки на местники. Очень интенсивное радиоэхо местников полностью скорректировать не удается из-за недостаточной глубины фильтра IIR, конечной ширины фильтра и ограничений аппаратуры. Остатки местников будут присутствовать, или увеличится неопределенность отражаемости осадков. Такие значения должны ограничиваться даже при расчете поправки. С этой целью величина поправки на местники CCOR проверяется по порогу $CCOR_{thresh}$, который исключает все 1-километровые ячейки, скорректированные выше порога. С одной стороны, порог, близкий к нулю, будет удалять все бины, дающие ненулевую поправку, и снижать поправку вплоть до удаления. Большая разница получается при

малом пороге, который допускает поправку на местники в определенном интервале интенсивности местников в целях извлечения метеоинформации, которая в противном случае была бы потеряна. Оказалось, что порог $CCOR_{thresh}$ надо делать более жестким чем 25 дБ по умолчанию, так как CCOR приближается к верхнему пределу (глубина фильтра) лишь в редких случаях, обычно 20–27 дБ. Можно эффективно использовать карту с непостоянным $CCOR_{thresh}$ (аналогичную загружаемой карте фильтров), но, возможно, с разными значениями соответствующих параметров.

Микроподавление местников (CMS) и фильтр спеклов. Установка порогов в процессоре сигналов выполняется *после* осреднения по дальности восьми первичных бинов для получения 1-километровых данных. Теперь, после осреднения, очень интенсивный местник в одном из 125 первичных бинов будет «смазываться» в осредненную ячейку, что может в последующем испортить тест CCOR. Микроподавление местников производит дополнительную проверку первичного бина и исключает его *до* осреднения, охраняя тем самым бесприемные ячейки. Эффект CMS (т.е. разница в отражаемости или интенсивности дождя) количественно оценить нелегко, так как CMS нельзя одновременно включить для *CZ* и отключить для *UZ*. В той же мере это относится к уничтожителю спеклов, базирующемуся на знании того, что метеоцели обладают известной протяженностью, и отфильтровывающему «одиночные» 1-километровые бины, не имеющие радиального соседа.

За счет оптимизации посредством фильтров, порогов и параметров даже при слабом фильтре остается ничтожно мало местников. На когерентных фильтрах пропуски данных редки и потери осадков малы. Чтобы свести к минимуму потери информации об осадках, рекомендуется применять низкочастотные (узкие) фильтры.

Существующая поправка на местники в большой мере зависит от скорости вращения антенны. Местники будут эффективно удаляться даже при быстром вращении антенны.

10.1.3. Автоматическое распознавание и подавление местников при аномальном распространении радиоволн

Радиоэхо от земли, как при нормальном распространении (НР), так и при аномальном (АР), ухудшает рабочие характеристики алгоритмов «автоматизации», т.е. метеорологических алгоритмов, в которых используются базовые данные по отражаемости и ширине спектра, для создания специальных радиолокационных продуктов. Автоматическое ослабление местных помех при АР приведет к улучшению оперативных оценок осадков и обзора обстановки для потребителей, не связанных с гидрологией [5].

Для отбора входных характеристик распознавателя с лент архива выбирались базовые данные, которые отмечались как содержащие радиоэхо

местных помех с АР. Затем они группировались по репрезентативным оценочным рядам и по последовательностям случаев. Полученные таким образом ряды использовались для оценки распознавателя и для визуализации автоматизированного распознавания.

«Характеристиками» являются статистические величины, рассчитанные по базовым данным о радиолокационном спектральном моменте. Были построены гистограммы средних, стандартного отклонения и «текстуры» (мера пространственной зернистости) для районов с местными помехами при АР и для районов с осадками (метеоявлением). Эти параметры рассчитывались по «характерной ячейке» данных. Для расчетов привлекались следующие характеристики: текстура отношения сигнал/шум (TSNR), или, что то же самое, коэффициент радиолокационной отражаемости; среднее для оценок момента скорости в ячейке (MVE); среднее для оценок спектральной ширины в ячейке (MVS) и стандартное отклонение оценок скорости в ячейке (SDVE).

В классификаторе «нечеткой логики» (FZ) используется взвешенное среднее функций принадлежности (или размытых множеств), оцениваемых по входным характеристикам. Каждая функция принадлежности имеет линейно-ломаную характеристику и в качестве входа – стробимпульс данных для каждой из четырех входных характеристик. Каждая функция принадлежности «настраивается» на характерную статистику класса объектов и производит непрерывный выход в диапазоне [0,1] в зависимости от того, на что указывает значение характеристики: на принадлежность к осадкам (погоде), на местные помехи с АР или какой-то другой заданный класс объектов. Если выходное значение превышает 0,5, то это означает, что распознаватель FZ приписывает точную принадлежность этому заданному классу объектов.

Размытый логический алгоритм, используемый для идентификации АР (и осадков), простой и надежный (вероятность обнаружения 0,82, вероятность ложной тревоги 0,03). При работе с алгоритмом придерживаются определенной последовательности операций: 1) распознать местные помехи с АР и осадки, 2) подавить местные помехи с АР фильтрами помех, 3) компенсировать отражаемость осадков из-за фильтра помех ввиду смещения с остаточными эффектами, 4) проверить районы с АР на наличие остатков местных помех.

Для практического применения размытого распознавателя необходимо вычислить характеристики (сигнатуры объектов) по потоку базовых данных. Чтобы выровнять поле, в алгоритме применяют медианный фильтр (или стадию постороннего цензурирования). Следует по возможности использовать несколько входных характеристик (TSNR, MVE, MSW, SDVE, GDZ) и только тогда, когда нет доплеровских моментов – TSNR и GDZ.

Для подавления АР фильтром местных помех необходимо автоматизировать первоначальный подход к подавлению местных помех на WSR-88D путем селективного применения фильтров помех и задать цензурирование помех. Автоматизированная схема отвечает за прослеживание

эволюции районов радиоэха и в то же время подбирает подавление помех для каждой зоны обслуживания объема (VCP). Затем выход распознавателя используется для селективного включения или отключения подавления помех внутри и вблизи районов с АР.

В случае с помехами от АР и осадками помехи должны фильтроваться с особым вниманием к компенсации отражаемости.

Компенсация отражаемости базируется на простой модели коррекции Гаусса, которая интерполирует два параметра (V и W) предполагаемого погодного спектра Гаусса, отыскивая непрерывность в соседних районах. Затем по ранее созданной таблице соответствия производится коррекция отражаемости. Таблицу соответствия можно создать офлайново по известным функциям фильтра, свернутым вместе с параметризованной моделью погоды Гаусса. Моделирование показывает, что удовлетворительного уровня компенсационной ошибки можно достичь тогда, когда потеря отражаемости в слоистообразных осадках при ширине спектра 1 м/с составляет не более 9 дБ, что соответствует одному из средних фильтров подавления WSR-88D. MVE используется для определения местоположения «смещенной зоны» отражаемости, которая нуждается в компенсации.

10.2. Ожидаемый эффект при учете частичного экранирования диаграммы направленности антенны МРЛ

В [3] представлен алгоритм, по которому рассчитывается та часть ДНА МРЛ, которая экранируется орографическими препятствиями типа гор или вследствие кривизны Земли. С помощью этого алгоритма затем обрабатываются данные МРЛ об осадках при их сравнении с результатами дождемерных измерений на большом расстоянии от МРЛ.

Экранируемую часть ДНА МРЛ авторы [3] рассчитывают по уравнению радиолокации при наличии орографических данных с высоким разрешением.

Уравнение радиолокации атмосферных образований можно записать в виде

$$Z_m(r) = \frac{\int\limits_{4\pi} Z(r,\Omega) f^2(\eta) d\Omega}{\int\limits_{4\pi} f^2(\eta) d\Omega}, \qquad (10.2.1)$$

где Z и Z_m – реальная и измеренная отражаемость соответственно, r – расстояние от радиолокатора, η – угол между рассматриваемой точкой и осью луча. Распределение интенсивности излучения дается функцией

$f(\eta)$, где квадрат f получается из-за двустороннего излучения. Допустив гауссово распределение интенсивности излучения

$$f(\eta) = f_0 \exp[-(\eta/\eta_0)^2]$$

и разделив η на азимутальную и зенитную составляющие θ и ϕ, уравнение (10.2.1) можно аппроксимировать следующим образом:

$$Z_m(r) = \frac{2}{\pi\eta_0^2} \int\limits_{-\infty}^{\infty}\int\limits_{-\infty}^{\infty} Z(r,\theta,\phi) \exp\left(-2\frac{\theta^2+\phi^2}{\eta_0^2}\right) d\theta d\phi = \frac{1}{\pi\phi_0^2} \int\limits_{-\infty}^{\infty}\int\limits_{-\infty}^{\infty} Z(r,\theta,\phi) \exp\left(-\frac{\theta^2+\phi^2}{\phi_0^2}\right) d\theta d\phi, \qquad (10.2.2)$$

где величина η_0 связана с шириной луча в точке –3 дБ η_{-3} следующим соотношением:

$$10^{-0,3} = \exp\left[-\left(\frac{\eta_{-3}/2}{\eta_0}\right)^2\right],$$

откуда после разложения на η_0, а затем на $\phi_0 = \eta_0/\sqrt{2}$ получаем

$$\phi_0 = \frac{1}{\sqrt{2}}\eta_0 = \frac{1}{2\sqrt{2}}(0,3\ln 10)^{-0,5}\eta_{-3} = 0,43\eta_{-3}. \qquad (10.2.3)$$

Ошибки, появляющиеся за счет расширения до ± бесконечности в интеграле уравнения (10.2.2), намного меньше ошибок, появляющихся при исключении боковых лепестков по гауссову распределению интенсивности, которыми обычно пренебрегают.

Для последующих рассмотрений допустим, что в пределах ДНА отражаемость по горизонтали однородна, а по вертикали изменяется. Это позволяет заменить расчет двойного интеграла уравнения (10.2.2) расчетом интеграла вдоль ϕ. Кроме того, в уравнениях для объема ДНА на каком-то расстоянии зависимость от расстояния r опускается.

При наличии орографических препятствий типа гор или вследствие кривизны Земли на равнинах радиолокационный луч экранируется до угла ϕ_S (по отношению к оси луча). Тогда из уравнения (10.2.2) получаем

$$Z_m = \frac{1}{\sqrt{\pi}\phi_0} \int_{\phi_S}^{\infty} Z(\phi) \exp\left(-\frac{\phi^2}{\phi_0^2}\right) d\phi . \qquad (10.2.4)$$

Если допустить, что отражаемость в объеме ДНА по вертикали постоянна, то уравнение (10.2.4) упростится и будет иметь следующий вид:

$$Z_m = Z \frac{1}{\sqrt{\pi}\phi_0} \int_{\phi_S}^{\infty} \exp\left(-\frac{\phi^2}{\phi_0^2}\right) d\phi = Z\left[1 - \frac{1}{\sqrt{\pi}\phi_0} \int_{-\infty}^{\phi_S} \exp\left(-\frac{\phi^2}{\phi_0^2}\right) d\phi\right] = \qquad (10.2.5)$$

$$= Z[1 - \mathrm{erf}(\phi_S / \phi_0)],$$

где

$$\mathrm{erf}(x) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{x} \exp(-t^2) dt$$

есть функция ошибки.

Если выразить отражаемость в дБZ, то по измеренной величине дБZ_m получим реальное значение:

$$\text{дБ}Z = \text{дБ}Z_m + \Delta\,\text{дБ}Z\,; \quad \Delta\,\text{дБ}Z = -10\,\lg_{10}[1 - \mathrm{erf}(\phi_S/\phi_0)]. \qquad (10.2.6)$$

Для того чтобы получить представление о величине члена поправки, можно использовать приведенную на рис. 10.2.1 зависимость Δ дБZ от угла экранирования ϕ_S, вычисленную по данным радиолокатора IMK с шириной луча в точке –3 дБ, равной 0,98°. Видно, что при $\phi_S = 0$ ΔдБZ равняется 3 дБ. Этого следовало ожидать, так как при $\phi_S = 0$ экранируется только половина луча.

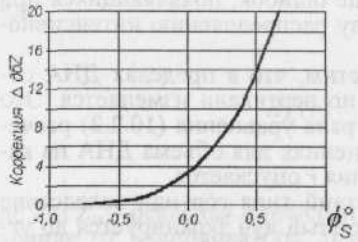

Рис. 10.2.1. Член поправки Δ дБZ как функция угла экранирования ϕ_S (относительно оси ДНА).

При малых углах места ДНА ε (меньше 5°) и на расстоянии меньше 200 км высоту z можно связать с зенитным углом ϕ (по отношению к оси луча) и высотой z_0 оси луча на расстоянии r:

$$z = \frac{r^2}{2R_{Eff}} + r(\sin\varepsilon + \phi) = z_0 + r\phi\,, \qquad (10.2.7)$$

где R_{Eff} – эффективный радиус Земли с учетом атмосферной рефракции радиолуча.

Если отражаемость (логарифмическое значение) изменяется линейно с высотой z, т.е.

$$\text{дБ}Z\,(z) = \text{дБ}Z_0 + (z - z_0),$$

то из уравнения (10.2.7) получаем

$$\text{дБ}Z\,(\phi) = \text{дБ}Z_0 + r\,\Gamma_Z\phi, \qquad (10.2.7а)$$

где дБZ_0 – отражаемость на высоте оси ДНА z_0; Γ_Z – вертикальный градиент отражаемости.

С помощью уравнения (10.2.4) оценим отражаемость Z_m при угле экранирования ϕ_S по отношению к оси ДНА:

$$\begin{aligned} Z_m &= \frac{1}{\sqrt{\pi}\phi_0} \int_{\phi_S}^{\infty} Z(\phi) \exp\left(-\frac{\phi^2}{\phi_0^2}\right) d\phi = \\ &= \frac{1}{\sqrt{\pi}\phi_0} \int_{\phi_S}^{\infty} 10^{(dBZ_0 + \Gamma_Z r\phi)/10} \exp\left(-\frac{\phi^2}{\phi_0^2}\right) d\phi = \\ &= 10^{dBZ_0/10} \frac{1}{\sqrt{\pi}\phi_0} \int_{\phi_S}^{\infty} 10^{(\Gamma_Z r\phi)/10} \exp\left(-\frac{\phi^2}{\phi_0^2}\right) d\phi = \\ &= Z_0 \frac{1}{\sqrt{\pi}\phi_0} \int_{\phi_S}^{\infty} \exp\left(c\Gamma_Z r\phi - \frac{\phi^2}{\phi_0^2}\right) d\phi \end{aligned} \qquad (10.2.8)$$

при $c = 0{,}1 \ln 10$.

Кроме того, при $\phi_1 = \frac{1}{2}\, c\, \Gamma_Z\, r\, \phi_0^2$

$$c\Gamma_Z r\phi - \frac{\phi^2}{\phi_0^2} = \frac{2\phi\phi_1 - \phi^2}{\phi_0^2} = -\frac{(\phi-\phi_1)^2}{\phi_0^2} + \frac{\phi_1^2}{\phi_0^2} = -\frac{(\phi-\phi_1)^2}{\phi_0^2} + \left(\frac{1}{2}c\Gamma_Z r\phi_0\right)^2.$$

Тогда

$$Z_m = Z_0 \exp\left[\left(\frac{1}{2}c\Gamma_Z r\phi_0\right)^2\right]\frac{1}{\sqrt{\pi}\phi_0}\int_{\phi_S}^{\infty}\exp\left[-\frac{(\phi-\phi_1)^2}{\phi_0^2}\right]d\phi =$$

$$= Z_0 \exp\left[\left(\frac{1}{2}c\Gamma_Z r\phi_0\right)^2\right]\frac{1}{\sqrt{\pi}\phi_0}\int_{\phi_S-\phi_1}^{\infty}\exp\left(-\frac{\phi^2}{\phi_0^2}\right)d\phi =$$

$$= Z_0 \exp\left[\left(\frac{1}{2}c\Gamma_Z r\phi_0\right)^2\right]\{1 - \mathrm{erf}[(\phi_S-\phi_1)/\phi_0]\}.$$

Следовательно, реальная отражаемость дБZ (логарифмическое значение) рассчитывается по измеренной дБZ_m:

$$\text{дБ}Z = \text{дБ}Z_m + \Delta\,\text{дБ}Z_G + \Delta\,\text{дБ}Z_S, \qquad (10.2.9)$$

$$\Delta\,\text{дБ}Z_G = -10\lg_{10}[\exp(1/2c\,\Gamma_Z r\,\phi_0)^2] =$$
$$= -10(1/2\,c\,\Gamma_Z\,\phi_0)^2\lg_{10} e = -c(1/2\Gamma_Z\, r\,\phi_0)^2,$$

$$\Delta\,\text{дБ}Z_S = -10\lg_{10}\{1 - \mathrm{erf}\,[(\phi_S - \phi_1)/\phi_0]\},$$

$$\phi_1 = 1/2\,c\,\Gamma_Z\, r\,\phi^2{}_0,$$

$$c = 0{,}1\ln 10 = 1/(10\lg_{10} e). \qquad (10.2.10)$$

Член поправки Δ дБZ_S такой же, как в случае постоянной по вертикали отражаемости, только для функции ошибки вместо ϕ_S надо взять меньшее значение $\phi_S - \phi_1$. Тем не менее значение ΔдБZ_S всегда положительное, поэтому этот член поправки все равно увеличивает отражаемость. Следует отметить, что в пределе $\Gamma_Z \to 0$ ϕ_1 принимает нулевое значение и получается формула поправки для постоянной по вертикали отражаемости.

Член поправки Δ дБZ_G, вызванный существованием вертикального градиента отражаемости, всегда отрицательный. Для предела $\phi_S \to -\infty$, т.е. для неэкранируемого луча, член поправки принимает нулевое значение, но Δ дБZ_G сохраняется. Это означает, что реальная отражаемость на оси луча всегда меньше измеренной в случае, когда присутствует постоянный вертикальный градиент отражаемости. Значение Δ дБZ_G не зависит от знака градиента, т.е. не важно, увеличивается отражаемость с высотой или уменьшается.

Надо сказать об ограничениях применения алгоритма, чтобы исключить ошибочные результаты в ситуациях, когда применение алгоритма поправки нежелательно.

Во-первых, горизонт, вызывающий частичное экранирование луча, считается ровным в азимутальном направлении. Следовательно, если по азимуту имеются большие склоны гор, то надо рассчитывать эффективный угол экранирования.

Во-вторых, если в объеме луча имеются местники, увеличение отражаемости за счет применения алгоритма поправки на экранирование приведет к неконтролируемым ошибкам. Следовательно, алгоритм нельзя применять, если имеются местники. Для этого, кроме угла экранирования, рассчитывается угол по отношению к земле, «видимый» с радиолокатора, если нет каких-либо препятствий, называемый в дальнейшем углом к земле. В местах, где земля «видна» с МРЛ напрямую, эти углы одинаковы. В районах позади препятствий угол к земле меньше угла экранирования. В случае нормального распространения луча в этих районах местники не появляются. Следовательно, алгоритм используется, только если угол экранирования больше угла к земле на определенную величину, например 0,1°.

В случае аномального распространения луча могут появиться местники в районах, где угол к земле меньше угла экранирования, т.е. в районах, где луч или боковые лепестки в нормальных условиях не достают земли. Поэтому если в радиолокационных данных есть признаки аномального распространения луча, алгоритм применять не следует.

Как видно из рис. 10.2.1, член поправки Δ дБZ сильно зависит от угла экранирования, если он положителен, т.е. если больше половины луча экранируется препятствиями. Неопределенность угла экранирования 0,5°, равная 0,1°, ведет к неопределенности, равной 3 дБ, члена поправки Δ дБZ или примерно 50 % интенсивности осадков. Это говорит о том, что угол экранирования надо рассчитывать очень точно. Угол экранирования рассчитывался по орографическим данным с разрешением 1 м по вертикали и примерно 100 м по горизонтали. Кроме того, алгоритм поправки применялся [3], только если угол экранирования был меньше –0,3°. При углах экранирования больше 0,1° соответствующее значение отражаемости заменялось ее значением со следующего, более высокого угла места путем экстраполяции с учетом определенного профиля отражаемости, а при углах экранирования от –0,3 до 0,1° брались средневзвешенные скорректированные и замененные значения.

Кроме использования орографических данных с высоким разрешением, надо проверить, идентичны ли номинальный угол места и реальный.

Разница всего в несколько десятых градуса может вызвать большие ошибки.

10.3. Многопараметрический метеорологический радиолокатор

Для реализации многопараметрических радиолокационных измерений дождя необходимо синхронное измерение отражаемости Z_H, дифференциальной отражаемости Z_{DR} (формула (2.19)) и удельной дифференциальной фазы K_{DP} град/км (формула (2.7.2)). Напомним, что Z_{DR} и K_{DP} применяются, когда в осадках наблюдаются сплющенные формы дождевых капель диаметром больше 1 мм.

Скорость изменения K_{DP} с расстоянием оказалась особенно эффективной при оценке осадков с большой интенсивностью (>50 мм/ч) [2, 5, 9]. Для полосы частот S она связана с интенсивностью осадков I (мм/ч) соотношением

$$I = 40{,}6\, K_{DP}^{0{,}866}, \qquad (10.3.1)$$

а для полосы частот C – соотношением

$$I = 19{,}8\, K_{DP}. \qquad (10.3.2)$$

Фазовые измерения являются абсолютными. Они не зависят ни от калибровки приемника, ни от ослабления в дожде или на радиопрозрачном укрытии антенны, ни от блокировки ДНА.

Переход на цифровые системы обработки отраженных сигналов в приемных устройствах МРЛ позволил измерять K_{DP} с необходимой точностью. В [2] указано, что стандартное отклонение для K_{DP} составляет 0,01°/км при диапазоне оценки наклона 5 км и интервале между стробимпульсами 450 м.

Проведение поляризационных измерений накладывает повышенные требования к характеристикам антенно-волноводного тракта. Основными факторами, снижающими точность поляризационных измерений, являются наличие паразитного перекрестного (кроссполяризованного) компонента в измеряемой радиоволне, неидентичность диаграмм направленности антенны на ортогональных поляризациях, различный уровень ослабления радиоволн ортогональных поляризаций в волноводном тракте и в радиопрозрачном укрытии (обтекателе), неидеальность развязки поляризационного переключателя и др.

Обычно паразитную кроссполяризацию антенны характеризуют величиной интегрального кроссполяризационного соотношения ICPR (integrated cross polarization ratio), которое равно отношению излученной мощности паразитного перекрестного компонента поля к мощности согласного компонента поля в линейном поляризационном базисе. При

ICPR = –30 дБ поляризационные измерения можно проводить с требуемой точностью.

Реализация поляризационных методов достигается на многопараметрических радиолокаторах. Один из самых перспективных многопараметрических радиолокаторов разработан в США [5]. В Европе такими являются NCAR CP-2 и POLDIRAD [2, 9].

Радиолокатор S-Pol (США) был создан как новый вариант эффективного современного поляриметрического метеорологического радиолокатора для внедрения в любом пункте Земли [5]. Метод контейнерной транспортировки S-Pol позволяет практически сразу развернуть его в любом месте земного шара, включая удаленные и труднодоступные географические районы. Весь радиолокатор с генератором и пультом управления упаковывается в шесть 20-футовых морских контейнеров. Стоимость работ по подготовке места и развертывания радиолокатора сведена к минимуму, поскольку антенный пьедестал конструируется из транспортировочных контейнеров. В радиолокаторе S-Pol установлен современный передатчик с высокими характеристиками, параболическая антенна с низким уровнем первого бокового лепестка и надежным разделением горизонтального и вертикального каналов и современный двухканальный приемник. Разработанная в NCAR система получения данных VIRAQ позволяет рассчитывать все параметры распространения волн и матрицу поляризационного рассеяния.

Ниже приведены основные характеристики S-полосного поляриметрического исследовательского радиолокатора NCAR S-Pol, которые очень сходны с характеристиками WSR-88D. Передающий блок изготовлен на основе ASP-9 и по конструкции аналогичен WSR-88D, где применяется охлаждаемый воздухом клистрон; он вырабатывает импульс мощностью 1 МВт и длительностью 1 мкс. Частота следования импульсов регулируется от 325 до 1200 с$^{-1}$. Импульс передатчика сужается и фильтруется с минимальной интерференцией радиочастоты. Отражатель антенны – алюминиевая конструкция, создающая первые боковые лепестки от –30 дБ и до –35 дБ.

Передатчик (один) – клистрон

Частота	2,7–2,9 ГГц
Ширина импульса коническая	0,5–1 мкс
Частота следования импульсов	325–1200 Гц
Пиковая мощность	1 МВт
Качающийся импульс	есть
Импульс с фазовым сдвигом	есть
Интерференция	по ВЧ Mgmt 5.2.3C

Приемники (два) – одновременно для горизонтальной и вертикальной поляризации

Мощность шума	115 дБмВт
Коэффициент шума	3,2 дБ

Динамический диапазон	90 дБ
Ширина полосы	1 МГц
Цифровая промежуточная частота	линейная плавающая точка
Минимальная дБZ 50 км/1 км	–10 дБZ/–44 дБZ
Переключение поляризации	механическое или ферритовое
Изоляция механического переключателя	49 дБ
Изоляция ферритового переключателя	28 дБ

Антенна – параболическая с центральным облучателем

Усиление	44,5 дБ
Диаметр	8,5 м
Ширина ДНА	0,91°
Первый боковой лепесток	–30 дБ
Изоляция (ICPR)	–35 дБ
Скорость сканирования	до 15 град/с по каждой оси
Ветровая нагрузка при работе	25 м/с (без колпака)

Система получения данных NCAR VIRAQ

Число отрезков дальности (бинов)	1500
Интервал между отрезками	37,5–500 м
Число выборок	32–512
Фильтр местных помех	только на одной поляризации
Временные отрезки I/Q	есть
Дисплей исследователя	NCAR Zebra
Регистрируемые переменные	P_{HH}, P_{VV}, V, W, $\lvert R(1)_{HV}\rvert$, $\lvert R(1)_{VH}\rvert$, $\lvert R(2)\rvert$, NCP, ρ_{HV}, Z_H, Z_{DR}, LDR, ϕ_{DP}, K_{DP}

Вид регистрации

Exabyte, DORADE format

Транспортировка

Судами в шести 20-футовых контейнерах

Подготовка места – планирование места установки и подъездных дорог

Электропитание – дизель-генератор

Связь – сотовый телефон

10.4. Требования к метеорологическому радиолокатору с фазированной решеткой

В рамках рабочей группы COST-75 были подробно исследованы перспективы создания МРЛ быстрого сканирования [6, 7], или иначе МРЛ с фазированной решеткой (ФАР).

Метеорологические радиолокаторы быстрого (электронного) сканирования (Е-сканирования) должны обеспечивать высокую скорость и гибкость измерений, что сокращает время обзора тропосферного объема, ускорит распознавание погодных явлений и обеспечит более хорошую адаптацию к характеристикам сигналов от осадков и местных помех. Фактически метеорологический радиолокатор быстрого сканирования – это не просто обычный радиолокатор, снабженный новой, более сложной и дорогой антенной, он требует значительной модификации цепи передатчик–приемник, а также алгоритмов обработки и интерпретации сигналов и программного обеспечения.

Например, сокращение времени быстрого сканирования при полной нагрузке радиолокатора невозможно без разработки особых способов сокращения времени задержки, что в свою очередь создает проблемы с доплеровской совместимостью (необходимой для схем сжатия и модуляции, совместимых с доплером). Кроме того, способность радиолокатора быстрого сканирования автоматически выбирать направление облучения и приема открывает новые возможности для обнаружения и коррекции местных помех, которых можно достичь за счет псевдорасширенных сроков задержки в местах с подозрением на местные помехи (повторное обследование этих мест после декорреляции осадков).

Главным преимуществом применения Е-сканирования является сокращение времени обзора. Существующие радиолокаторы с механическим сканированием делают полный обзор объема за 5 мин (или половину за 2,5 мин), а радиолокаторы с Е-сканированием за счет резервирования луча в направлениях без осадков и расширения луча на больших углах места, а также благодаря частоте следования импульсов и адаптации времени задержки к типу и распределению в диапазоне характеристик целей производят обзор всего объема примерно за 1 мин.

Наиболее вероятным типом антенны для применения на оперативных метеорологических радиолокаторах с быстрым сканированием рабочей группой признана антенна с медленным (но адаптируемым) механическим вращением по азимуту и электронным сканированием по углу места. Более сложные конфигурации (от однослойной активной решетки с двухмерным Е-сканированием и механическим вращением по азимуту до статичных четырехслойных активных решеток) были отвергнуты из-за уровня их разработки, доступности и цены, которые в настоящее время приемлемы только для военных.

Были определены основные концепции сканирования, включая самоадаптируемое сканирование (концентрация времени наблюдения на интересных объемах и пропуск областей чистого неба или районов с редким заполнением; изменение частоты следования импульсов и времени задержки в зависимости от распределения эхосигналов по дальности, флуктуации и спектральных характеристик), для немодулированных импульсов несущей частоты и схем сжатия и модуляции импульсов в целях быстрого определения интенсивности.

Особое внимание рабочая группа COST-75 рекомендует уделить автоматической адаптации частоты следования импульсов, времени задержки и алгоритмам обработки сигнала к характеристикам эхосигналов. С учетом возможности решения вопросов сжатия и модуляции импульсов примерный сценарий будет следующим:

выдается пакет импульсов с высокой частотой следования в одном направлении;

осуществляется переход к следующему наведению антенны, если селекторный импульс дальности не приносит радиоэха, превышающего заданный порог;

если имеется существенное радиоэхо, определяется расстояние до самого дальнего объекта в этом направлении, и эта информация используется в дальнейшем при выборе оптимальной частоты следования импульсов для этого направления (как можно более высокая, но без неопределенности по дальности);

осуществляется попытка получения (в каждом значительном селекторном импульсе дальности) доплеровских и флуктуационных характеристик;

если доплеровская частота высокая, то первый пакет может дать существенную информацию об интенсивности и скорости объектов; в противном случае (например, при очень низких флуктуациях в первом пакете импульсов, т. е. это направление (а также соответствующие селекторные импульсы дальности) помечается для повторного просмотра (с задержкой согласно доплеровским характеристикам в пакете импульсов).

Е-сканирование при выборе азимута приводит к усложнению и фальсификации обработки, а все это должно происходить в реальном времени на сыром материале со скоростью передачи данных мегабайты в секунду. Если считать, что аппаратура для такой обработки уже есть, то разработка и испытание стабильных алгоритмов и их применение в программном обеспечении будут самыми затратными по времени и по деньгам и поглотят больше 50 % бюджета, предназначенного на разработку макета метеорологического радиолокатора с Е-сканированием.

Рабочей группой COST-75 подготовлены рекомендации (табл. 10.4.1) для метеорологических радиолокационных систем быстрого сканирования с учетом как запросов потребителей (диктуемых физикой осадков), так и промышленных и технологических возможностей (где тоже должны учитываться запросы потребителей в отношении сохранения стоимости новых систем на приемлемо низком уровне).

Таблица 10.4.1

Ориентировочные спецификации для европейского радиолокатора быстрого сканирования [6]

Наименование	Обязательное условие	Желательное условие	Желательно исследовать
Частота радиолокатора	Полоса *C*	Полоса *C*	Полосы частот *S*, *C* или *X*, двухполосный
		Зона действия	
1. Минимальная дальность	1 км	300 м	<1 км
2. Максимальная дальность	*Z* 250 км Допл. 125 км	*Z* 250 км Допл. 150 км	*Z* 250 км Допл. 150км
3. Угол азимута	0–360°	0–360°	0–360°
4. Угол места	–5…55°	–5…70°	–5…90°
5. Высота над уровнем моря	15 км	15 км	18 км
		Пространственное разрешение	
1. Минимальная ширина ДНА	≤1°	≤1°	≤1°
2. Длина ячейки дальности	*Z* 150 м Допл. 75 м	*Z* 150 м Допл. 75 м	*Z* 150 м Допл. < 75 м
		Точность по отражаемости	
1. Абсолютная расчетная погрешность	≤ ±0,5 дБ	≤ ±0,5 дБ	≤ ±0,5 дБ
2. Случайная погрешность	Примечание 1	Примечание 1	Примечание 1
		Многопараметрические опции	
1. Радиоэхо с поперечной поляризацией	Монополярный передатчик (можно добавить приемник с поперечной поляризацией)	Двойная линейная (горизонтально–вертикальная или наклонная) или круговая TX & RX	Любая поляризация на TX & RX
2. Быстрая смена частоты	Нет	Нет	Есть
		Доплеровские характеристики	
1. Рабочая зона	±0 м/с	±50 м/с	±0 м/с
2. Разрешение	1 м/с	1 м/с	<1 м/с
3. Точность	<1 м/с	<1 м/с	<0,5 м/с
4. Параметр турбулентности	3 уровня	1 м/с	Отображать весь спектр
Временнóе разрешение	$1' < t < 2{,}5'$	$1' < t < 2{,}5'$	$1' < t < 2{,}5'$
Динамический диапазон отражаемости	120 дБ Примечание 2	120 дБ Примечание 2	120 дБ Примечание 2

Продолжение табл. 10.4.1

Чувствительность	0 дБZ @ Дальность 50 км	0 дБZ @ Дальность 50 км	0 дБZ @ Дальность 50 км
Окружающая среда	Примечание 3	Примечание 3	Примечание 3
Характеристики контроля и мониторинга	Местный и дистанционный автоматический	Местный и дистанционный автоматический	Местный и дистанционный вручную
MTBF/MTTR	Примечание 4	Примечание 4	Примечание 4
Юридические требования	Регулировка частоты ITU и ERO/CEPT	Регулировка частоты ITU и ERO/CEPT	Регулировка частоты ITU и ERO/CEPT
	Спецификации электронной антенны (см. также примечание 5)		
Интегрированный уровень бокового лепестка в вертикальной плоскости	< –30 дБ	< –35 дБ	< –40 дБ
Интегрированный уровень бокового лепестка под другим углом	< –25 дБ	< –28 дБ	< –28 дБ
Разделение поперечной поляризации	>30 дБ	>36 дБ	>40 дБ
Ступенчатость сканирования по углу места	0,05°	0,05°	0,05°

Примечания:

1. Зависит от времени достижения объекта, которое может меняться от погодных условий (переменная времени интегрирования).
2. Включая временную автоматическую регулировку усиления, АРУ и/или MGC.
3. Радиолокаторы быстрого сканирования еще больше, чем существующие погодные радиолокаторы, нуждаются в антенных укрытиях для защиты сложной конструкции антенны от воздействий окружающей среды. Гомогенные пластиковые вспененные антенны предпочтительнее сетчатых. Следует уделить внимание ослаблению и/или отклонению луча водяной пленкой или снежным покровом на антенном укрытии.
4. Средняя наработка на отказ (MTBF) и средняя наработка до ремонта (MTTR) будут зависеть главным образом от прочности и защиты антенны электронного сканирования, а также от типа передатчика (ламповый или твердотельный усилитель) и субсистем глубокой обработки и интерпретации сигналов (аппаратное и программное обеспечение).
5. По ценовым соображениям, наиболее приемлемым типом антенны электронного сканирования в оперативных системах будет пассивная антенна (только однолучевая) с медленным механическим вращением по азимуту, электронным управлением по углу места и с электронным управлением лучом по азимуту (для компенсации смещений при механическом вращении, когда надо возвратиться в предыдущие наведения антенны).

Вполне очевидно, что МРЛ с ФАР будут востребованы и приняты многими потребителями для использования в целях обнаружения опасных погодных явлений, для решения проблем как городской гидрологии, так и, главным образом, для авиационной метеорологии. Однако ожидается, что применение новых радиолокаторов улучшит точность измерения параметров осадков.

Предпочтительными оказываются следующие характеристики: дальность наблюдений 200 км, пространственное разрешение 1×1×0,5 км, продолжительность сканирования объема 2 мин и 256 уровней интенсивности.

Требования к характеристикам: доплеровские скорости ±40 м/с (144 км/ч) и разрешение по скорости 0,5 м/с (1,8 км/ч). Измерения турбулентности (спектральная ширина) нужны всем потребителям. Поляризационные измерения оказались менее привлекательными или необходимыми.

Большинство потенциальных потребителей высказывается за коллективное использование многофункциональных радиолокаторов (терминальные обзорные системы) с уменьшенной максимальной дальностью (примерно 100 км) и продолжительностью цикла 1–2 мин при том условии, что требования метеорологов к ним останутся в разумных пределах.

Очевидна также общая готовность потенциальных покупателей заплатить больше (иногда намного) за систему быстрого сканирования, чем за обычный ДМРЛ В среднем приемлемая цена составляет 150 % стоимости ДМРЛ, однако иногда достигает 200 %.

Установка и внедрение новых систем планируется на 2005–2010 гг. в основном в процессе замены ДМРЛ, выработавших ресурс.

По мнению рабочей группы, европейская промышленность будет готова производить и поставлять на рынок метеорологические радиолокаторы быстрого сканирования самое позднее в 2005 г.

10.5. Метеорологическая радиолокация в системе глобального наблюдения за климатом

В главе 3 приведен пример применения оперативной радиолокационной информации в региональных климатических исследованиях. Полная автоматизация радиолокационных наблюдений и создание сетей МРЛ на больших территориях позволяют решать эту задачу на качественно новом уровне [8].

Глобальная система наблюдений за климатом (ГСНК) является частью глобальной сети наблюдений. Она спонсируется четырьмя международными организациями: Всемирной метеорологической организацией (ВМО), Межправительственной океанографической комиссией (МОК) при ЮНЕСКО, Программой окружающей среды при ООН и Международным советом научных союзов (МСНС). ГСНК осуществляет сотрудничество с международными организациями и исследовательскими программами (Всемирная программа исследований климата, ВПИК; Меж-

дународная программа геосфера–биосфера, МПГБ; Межправительственная группа экспертов по изменению климата, МГЭИК).

В задачу Глобальной системы наблюдений за климатом (ГСНК) входит обеспечение получения данных, согласующихся со следующими данными:

мониторинга климатической системы, выявления изменений климата и мониторинга реакции, в частности, земных экосистем;

применения информации о климате для национального экономического развития;

исследований в целях более глубокого понимания климатической системы, совершенствования ее моделирования и прогнозирования.

К наиболее важным критическим переменным, описывающим изменение климата, относятся температура, влажность и скорость ветра. В табл. 10.5.1 дано общее представление о точности измерения и о горизонтальном и вертикальном разрешении. Для глобального мониторинга и выявления изменения климата рекомендуется применять месячные средние по затребованным данным.

В настоящее время климатические данные в глобальном масштабе получаются со спутников или в результате точечных измерений в репрезентативных пунктах. Поскольку постоянные точечные измерения производятся главным образом на суше, спутниковые данные о температуре и влажности получаются оперативно только над океаном. Радиолокационная поддержка систем наземных, аэрологических и надводных измерений позволит дополнить пространственный и временной охват суши и акватории и даст дополнительные сведения о метеорологических параметрах атмосферы и океана.

В сети можно объединить не только метеорологические радиолокаторы, но и профайлеры ветра. Всего в мире используется примерно сотня профайлеров ветра, работающих в оперативном режиме и в исследовательских целях. Большинство (70 %) находится в Северной Америке и в Европе, остальные – в Австралии, Южной Америке и Азии.

В табл. 10.5.3 представлен обзор данных профайлеров, а также общие и частные продукты. Продукты профайлеров ветра, как и продукты метеорологических радиолокаторов, можно отнести к климатическим данным. Следует отметить, что профайлер и радиоакустические системы зондирования позволяют контролировать характеристики атмосферы без использования радиозондов с меньшей средней погрешностью оценок ветра, чем при радиозондировании. Препятствием на пути их распространения являются высокая стоимость и дискуссия о распределении частот для исключения помех.

По мнению авторов [8], сбор радиолокационных данных и продуктов для климатических исследований должен базироваться на следующих принципах и нормативах мониторинга окружающей среды, принятых ВМО.

• Ответственные за проведение наблюдений обеспечивают долгосрочные записи ключевых переменных. Процедуры настройки должны выполняться таким образом, чтобы наблюдения увязывались с объективными внешними стандартами. Все усилия должны быть направлены на задействование существующих механизмов, планов и систем.

Таблица 10.5.1

Требования к климатическим данным (Hadley Centre, 1994) [8]

	Точность	Горизонтальное разрешение	Вертикальное разрешение
Приземная температура воздуха	≤0,1 К долгосрочная стабильность	500 км	–
Температура верхних слоев атмосферы	≤0,1 К (тропосфера) ≤0,2 К, долгосрочная стабильность; ≤ 0,2–0,5 К (стратосфера)	100–250 км	1 км; 3 км
Осадки над сушей над океаном над океанами тропиков	 5 % за месяц; 10 % за сутки; 2 %, долгосрочная стабильность 20 % ≤ 5 %, долгосрочная стабильность	 Переменное 500 км	
Влажность	≈5 %; нужна долгосрочная стабильность	500 км	2 км
Ветер в тропосфере	≤ 1 м/с; ≤1 м/с, долгосрочная стабильность	500 км	1 км
Облачный покров	≤ 10 %; <2–3 %, долгосрочная стабильность	250 км	
Водность облаков	10 % содержания столба; <5 % , долгосрочная стабильность	250 км	
Высота верхней и нижней границ облаков, вертикальное распределение высот	Разрешение по вертикали 1 км	250 км	
Размер облачных частиц и фазовое распределение	±1 мкм	500 км	

В табл. 10.5.2 представлены наиболее распространенные радиолокационные продукты. Большинство продуктов определяются как критические климатические данные (ср. с табл. 10.5.1).

Таблица 10.5.2

Радиолокационные продукты [8]

Данные радиолокационных наблюдений	Продукт	
Отражаемость	Облака	Тип (слоистые, кучевые, облачные улицы)
	Границы	
	Осадки	Интенсивность дождя Интенсивность снегопада Площадь зоны осадков Накопление осадков
	Водность	
	Шторм	Высота, тенденция Возможность наводнения Переполнение речного бассейна
Скорость*	Ветер	Обнаружение мезоциклонов Сдвиг
	VAD** – профиль ветра (радиальный и вертикальный)	Профиль скорости и направления ветра Струйные течения верхнего и нижнего уровней Термическая адвекция

*Для доплеровского радиолокатора

**Отображение скорости в азимуте (метод анализа данных доплеровского радиолокатора, позволяющий определять скорость и направление ветра как функцию вертикальной и горизонтальной дальности) (см. главу 5).

Таблица 10.5.3

Продукты профайлера ветра

Данные профайлера	Продукт	
Отражаемость (спектральная)	Составляющие скорости ветра (u, v, w)	Временные разрезы Поперечные разрезы Изменчивость
	Облака	Слои, покрытие
	Осадки	Интенсивность дождя Водность
Радиоакустические системы зондирования		
	Температура	Термическая адвекция Влажная адвекция Тепловой поток

- Информация должна собираться и анализироваться таким образом, чтобы была очевидна достоверность записей. Периодически должна собираться информация по мониторингу качества данных, включая оценку случайных ошибок и долгосрочные систематические отклонения.
- Следует распределять информацию таким образом, чтобы можно было проверять взаимосогласованность долгосрочных записей. Должно быть обеспечено широкое распространение всей информации и анализов, выполняемых для оценки долгосрочной записи (периодическая информация о настройке и проверке, метаданные и процедуры, использованные для обработки данных).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

К главе 1

1. Алибегова Ж.Д. Структура полей жидких осадков за короткие интервалы времени. – Л.: Гидрометеоиздат, 1975. – 134 с.
2. Алибегова Ж.Д., Брылёв Г.Б., Иванова Н.Ф. Соотношения между статистическими характеристиками дождей различной продолжительности по данным Валдайского ливнемерного куста. – Труды ГГО, 1978, вып. 416, с. 71–77.
3. Алибегова Ж.Д., Брылёв Г.Б., Иванова Н.Ф. О связи между максимальными и средними значениями интенсивностей дождей по данным радиолокационных и плювиографических наблюдений. – Труды ГГО, 1976, вып. 383, с. 63–66.
4. Боровиков А.М., Костарев В.В., Мазин И.П., Смирнов В.И., Черников А.А. Радиолокационные измерения осадков. – Л.: Гидрометеоиздат, 1967, с. 140.
5. Брылёв Г.Б., Гашина С.Б., Низдойминога Г.Л. Радиолокационные характеристики облаков и осадков. – Л.: Гидрометеоиздат, 1986. – 230 с.
6. Голубев В.С., Зашимов Н.В., Зыков Н.А. Некоторые результаты исследований жидких осадков в районе Валдайской возвышенности. – Труды ГГИ, 1965, вып. 123, с. 5–14.
7. Облака и облачная атмосфера. Справочник / Под ред. И.П. Мазина и А.Х. Хргиана. – Л.: Гидрометеоиздат, 1989. – 641 с.
8. Роджерс Р.Р. Краткий курс физики облаков. – Л.: Гидрометеоиздат, 1979. – 231 с.
9. Рыжков А.В. Метеорологические объекты и их радиолокационные характеристики. – Зарубежная электроника, 1993, № 4, с. 6–17.
10. Шакина Н.П. Динамика атмосферных фронтов и циклонов. – Л.: Гидрометеоиздат, 1985, с. 264.
11. Шметер С.М. Физика конвективных облаков. – Л.: Гидрометеоиздат, 1972. – 288 с.
12. Huff F.A. Sampling errors in measurement of mean precipitation. – J. Appl. Met., 1970, v. 9, p. 35–44.
13. Nishitsuji A., Matsumoto A. Calculation of radiowave attenuation due to snowfall. – Rts. Inst. of Appl. Electricity, Hokkaido Univ., 1971, v. 19, p. 63.

14. Wilson J.W., Roberts R.D., Kessinger C., McCarthy. Microburst wind structure and evaluation of Doppler radar for airport wind shear detection. – J. Clim. Appl. Met., 1984, v. 23, № 6, p. 898–915.

К главе 2

1. Атлас Д. Успехи радарной метеорологии. – Л.: Гидрометеоиздат, 1967. – 195 с.
2. Берюлев Г.П., Колосков Б.П., Мельничук Ю.В. Некоторые результаты измерений ослабления радиоволн в радиопрозрачном укрытии антенны, покрытом водяной пленкой. Радиометеорология. Труды VI Всесоюзного совещания. – Л.: Гидрометеоиздат, 1984, с. 49–52.
3. Брылёв Г.Б., Гашина С.Б., Низдойминога Г.Л. Радиолокационные характеристики облаков и осадков. – Л.: Гидрометеоиздат, 1986. – 231 с.
4. Брылёв Г.Б., Рыжков А.В. Ошибки определения границ облаков радиолокационным методом. – Труды ГГО, 1979, вып. 430, с. 8–11.
5. Довиак Р., Зрнич Д. Доплеровские радиолокаторы и метеорологические наблюдения. – Л.: Гидрометеоиздат, 1988. – 512 с.
6. Контроль и нормализация электромагнитной обстановки, создаваемой метеорологическими радиолокаторами. Методические указания Госкомгидромета и Минздрава СССР. – Л.: Гидрометеоиздат, 1990. – 64 с.
7. Мельников В.М. Обработка информации в доплеровских МРЛ. – Зарубежная радиоэлектроника, 1993, № 4, с. 35–42.
8. Руководство по производству наблюдений и применению информации с радиолокаторов МРЛ-1 и МРЛ-2 / Под ред. Г.Б. Брылёва и Е.М. Сальмана. – Л.: Гидрометеоиздат, 1974. – 344 с.
9. Руководство по производству наблюдений и применению информации с неавтоматизированных радиолокаторов МРЛ-1, МРЛ-2, МРЛ-5. РД 52.04.320-91. – Л.: Гидрометеоиздат, 1993, с. 358.
10. Рыжков А.В. Поляризационные методы в метеорологической радиолокации. – Зарубежная радиоэлектроника, 1993, № 4, с. 18–28.
11. Степаненко В.Д. Радиолокация в метеорологии. 2-е изд. – Л.: Гидрометеоиздат, 1973. – 343 с.
12. Bean B.R., Dutton E.J. Radio meteorology. Dover, New York, 1968. – 435 p.
13. Clift G.A. Use of radar in meteorology. WMO Technical Notes, № 181, 1985. – Geneva. – 90 p.
14. Manz A., Monk T., Sangiolo J. Radome effects on weather radar systems, COST-75. Advanced weather radar systems/ International Seminar, Locarno, Switzerland, 1999, p. 467–478.
15. Rinehart R.E. On the use of ground return targets for radar reflectivity factor calibration checks. – J. Appl. Met., 1978, v. 17, № 9, p. 1342–1350.

16. Smith P.L. Equivalent radar reflectivity factors for snow and ice particles. – J. Clim. Appl. Meteorology, 1984, v. 23, № 86 p. 1258–1260.
17. U.S. Weather Radar Manual, 1967.

К главе 3

1. Балбуцкий И.М., Брылёв Г.Б., Куликова Г.И. Зависимость высот верхних границ радиоэха конвективных и слоистообразных облаков от высоты уровня нулевой изотермы. Радиолокационная метеорология. – Л.: Гидрометеоиздат, 1988, с. 42–46.
2. Брылёв Г.Б., Куликова Г.И., Завдовьев А.В., Линев А.Г. Статистические зависимости между высотами верхних границ конвективных облаков и интенсивностью выпадающих из них осадков. – В сб.: Радиолокационная метеорология. – Л.: Гидрометеоиздат, 1987, с. 38–45.
3. Брылёв Г.Б., Гашина С.Б., Низдойминога Г.Л. Радиолокационные характеристики облаков и осадков. – Л.: Гидрометеоиздат, 1986, с. 230.
4. Брылёв Г.Б., Куликова Г.И. Характеристики гроз над территорией СССР по данным сети МРЛ. Радиолокационная метеорология. – Л.: Гидрометеоиздат, 1988, с. 18–24.
5. Брылёв Г.Б., Линев А.Г. Радиолокационные характеристики облачности и осадков, полученные по ячейкам пространства 5×5 км. – В сб.: Радиолокационная метеорология. – Л.: Гидрометеоиздат, 1984, с. 145–153.
6. Брылёв Г.Б., Грачев С.С., Куликова Г.И., Степаненко В.Д. Годовые изменения средней высоты радиоэха над территорией СССР по данным выборочной сети МРЛ. – В сб.: Радиолокационная метеорология. – Л.: Гидрометеоиздат, 1982, с. 63–75.
7. Облака и облачная атмосфера. Справочник / Под ред. И.П. Мазина и А.Х. Хргиана. – Л.: Гидрометеоиздат, 1989. – 641 с.
8. Роджерс Р.Р. Краткий курс физики облаков. – Л.: Гидрометеоиздат, 1979, с. 231.
9. Gagin A., Rosenfeld D., Lopez R.E. The relationship between height and precipitation characteristics of summer time convective cells in South Florida. – J. Atm. Sci., 1985, v. 42, № 1, p. 84–94.
10. Katz I.A. A rain cell model. Preprints Proc. 18th Radar Met. Conf., 1978, Atlanta, AMS, p. 442–447.
11. Konrad T.G. Statistical models of summer rainshowers derived from fine-scale radar observation. – J. Appl. Met., 1978, v. 17, p. 171–188.
12. Rogers R.R., Yan M.K. Areal extent and vertical structure of weather radar echoes at Montreal. – Pure and Appl. Geophys., 1982, v. 120, p. 273–285.

13. Waldvogel A. Detecting and measuring hail by radar. – La houille blanche, 1983, No. 5/6, p. 411–420.

К главе 4

1. Берюлев Г.П., Голубев В.С., Колосков Б.П., Коридоров В.А., Ливанова Н.А. Экспериментальные радиолокационные измерения количества твердых осадков. Труды V Всесоюзного совещания по радиометеорологии. – М.: Гидрометеоиздат, 1981, с. 9–13.
2. Берюлев Г.П., Евпряков В.А., Костарев В.В., Мельничук Ю.В., Черников А.А. Измерение осадков на площади с использованием модернизированной радиолокационной станции МРЛ-2. – Труды ЦАО, 1977, вып. 126, с. 3–13.
3. Билетов В.М., Брылёв Г.Б., Соломатин С.В. Использование метода линейной фильтрации Калмана в задаче измерения вертикального профиля радиолокационной отражаемости облачной системы. Труды VII Всесоюзного совещания. – Л.: Гидрометеоиздат, 1989, с. 137–139.
4. Боровиков А.М., Костарев В.В., Мазин И.П., Смирнов В.И., Черников А.А. Радиолокационные измерения осадков. – Л.: Гидрометеоиздат, 1967. – 140 с.
5. Брылёв Г.Б., Гашина С.Б., Низдойминога Г.Л. Радиолокационные характеристики облаков и осадков. – Л.: Гидрометеоиздат, 1986. – 231 с.
6. Брылёв Г.Б., Грачев С.С. Об оценке радиолокационной отражаемости и выборе начальных условий при моделировании конвективных облаков. – В сб.: Радиолокационная метеорология. – Л.: Гидрометеоиздат, 1981, с. 94–100.
7. Брылёв Г.Б., Куликова Г.И., Завдовьев А.В., Линев А.Г. Статистические зависимости между высотами верхних границ конвективных облаков и интенсивностью выпадающих из них осадков. – В сб.: Радиолокационная метеорология. – Л.: Гидрометеоиздат, 1987, с. 38–45.
8. Вельтищев Н.Ф., Корольков А.М. Мезомасштабный численный анализ осадков с использованием радиолокационных и станционных измерений. – Метеорология и гидрология, 1995, № 7, с. 15–23.
9. Голубев В.С., Зошимов Н.В., Зыков Н.А. Некоторые результаты исследований жидких осадков в районе Валдайской возвышенности. – Труды ГГИ, 1965, вып. 123, с. 5–14.
10. О составе, точности и пространственно-временном разрешении информации, необходимой для гидрометеорологического обеспечения народного хозяйства и службы гидрометеорологических прогнозов. – Л.: Гидрометеоиздат, 1975. – 219 с.
11. Руководство по производству наблюдений и применению информации с неавтоматизированных радиолокаторов МРЛ-1, МРЛ-2, МРЛ-5. РД 52.04.320–91. – Л.: Гидрометеоиздат, 1993. – 358 с.

12. Руководство по производству наблюдений и применению информации с радиолокаторов МРЛ-1 и МРЛ-2 / Под ред. Г.Б. Брылёва и Е.М. Сальмана. – Л.: Гидрометеоиздат, 1974. – 344 с.
13. Сальман Е.М. Влияние неоднородности распределения отражаемости на точность ее измерения. – Труды ГГО, 1973, вып. 281, с. 14–18.
14. Andrieu H., Gervais R., Bachoc A., Gacquet G. Radar meteorologique et determination des intensites pluvieses en hydrologie urbaine. – Bull. liaison Labo ponts et chausses, 1986, v. 143, p. 5–16.
15. Anhert P.R., Hudlow M.D., Johnson, Green D.R., Dias M.P.R. Proposed «on-site» precipitation processing system for NEXRAD. – Pr. 25th Conf. on Radar Meteorology, 1983, AMS, p. 378–385.
16. Bellon A., Austin G.L. The accuracy of short-term radar rainfall forecasts. – J. Hydrol., 1984, v. 70, No. 1/4, p. 35–45.
17. Brandes E.A. Optimizing rainfall estimates with the aid of radar. – J. Appl. Met., 1975, v. 14, No. 7, p. 1339–1345.
18. Cain D.E., Smith P.L. Operational adjustment of radar estimated rainfall with rain gauge data. A Statistical Evaluation. – Preprints 17th Conf. on Radar Meteorol., Boston, 1976, p. 533–538.
19. Clift G.A. Use of radar in meteorology. – WMO Technical Note, 1985, No. 181. – 90 p.
20. Collier C.G. Accuracy of rainfall estimates by radar. Part I: Calibration by telemetering raingauges. Part II: Comparison with raingauge network. – J. Hydrol., 1986, v. 83.
21. Collier C.G. Applications of weather radar systems. A Guide to Users of Radar Data in Meteorology and Hydrology. – N.-Y.: Ellis Horwood Ltd., 1989.
22. Collier C.G. COST-73: The development of a weather radar network in Western Europe. Seminar on «Weather Radar Networking», 1989, p. 3–16.
23. Collier C.G., Knowles J.M. Accuracy of rainfall estimates by radar. Part III: Application for short-term flood forecasting. – J. Hydrol., 1986, v. 83, p. 207–249.
24. Divjak M. Radar measurement of precipitation in non-optimal conditions. COST 75, 1999, p. 150–158.
25. Doviak R.J. A survey of radar rain measurement techniques. – J. Clim. Appl. Met., 1983, v. 22, p. 832–849.
26. Hershfield D.M. Extreme rainfall intensities. – Archives for Meteorology, Geophysics and Bioclimatology, 1984, ser. B 35, p. 67–80.
27. Joss J. Ways of using and correcting for errors in conventional radar reflectivity data. – Seminar COST 73 on «Weather radar networking», 1989, p. 175–184.
28. Joss J., Waldvogel A. Precipitation. Measurement and hydrology – a review 1988 (to appear in the Battan Memorial and 40th Anniversary Radar Meteorology Volume). Chapter 29a, p. 577–597.
29. Joss, Jand R. Lee. The application of radar gage profile corrections. – J. Appl. Met., 1995, v. 34, p. 2612–2630.

30. Koistinen J., Puhakka T. An improved special gauge-radar adjustment technique. 20th Conf. on Radar Meteorology. Boston, Mass., Amer. Met. Soc., 1981.
31. Koistinen J., Puhakka T. Can we calibrate radar with raingauges. – Geophysica, 1986, v. 22, No. 1–2, p. 119–129.
32. Koistinen J., Saltikoff E. Experience of customer products of accumulated snow, sleet and rain. – COST 75, 1999, p. 397–406.
33. Meischner P. The potential of advanced weather radars in Europe. – COST 75, 1999, p. 24–34.
34. Newsome D.H., Clift G.A. Real-time measurement of precipitation using weather radar. – Endeavour, New Series, v. 7, No. 3, 1983, p. 123–132.
35. Palmer S.G., Nicholass C.C., Lee M.J., Bader M.J. The use of rainfall data from radar for hydrometeorological services. – Met. Mag., 1983, No. 1336, p. 333–346.
36. Richards W.G., Crozier C.L. Precipitation measurements with a C-band weather radar in Southern Ontario. – Atmospheric–Ocean, 1983, v. 21, p. 125–137.
37. Serafin R.J., Wilson J.W. Operational weather radar in the US: progress and opportunity. – COST 75, 1999, p. 35–60.
38. Smith A.H., Kitchen M. A review of the quality Control and quality evaluation of radar rainfall. Measurements carried out by the UK Met. Office. – COST 75, 1999, p. 68–81.
39. Smith C.J. The reduction of errors caused by bright bands in quantitative rainfall measurement made using radar. – J. Atm. Ocean Techn., 1986, v. 83, p. 129–141.
40. Smith P.L. Equivalent radar reflectivity factors for snow and ice particles. – J. Clim. Appl. Met., 1984, v. 23, p. 1258–1260.
41. US Weather Radar Manual, 1967.
42. Wilson J.W., Brandes E.A. Radar measurement of rainfall – a summary. – BAMS, 1979, v. 60, No. 9, p. 1048–1058.
43. Woodley W.L., Olsen A.R., Herndon A., Wiggert V. Comparison of gage and radar methods of convective rain measurement. – J. Appl. Met., 1975, v. 14, No. 5, p. 909–928.

К главе 5

1. Балбуцкий И.М., Брылёв Г.Б., Куликова Г.И. Зависимость высот верхних границ радиоэха конвективных и слоистообразных облаков от высоты уровня нулевой изотермы. – В сб. Радиолокационная метеорология. – Л.: Гидрометеоиздат, 1989, с. 42–46.
2. Билетов М.В., Брылёв Г.Б., Соломатин С.В. Радиолокационное распознавание кучево-дождевых облаков, адаптивное к условиям их образования. – В сб.: Радиолокационная метеорология. – Л.: Гидрометеоиздат, 1989, с. 68–81.

3. Брылёв Г.Б. Радиолокационные характеристики облаков. В кн.: Облака и облачная атмосфера. – Л.: Гидрометеоиздат, 1989, с. 648.
4. Брылёв Г.Б., Гашина С.Б., Низдойминога Г.Л. Радиолокационные характеристики облаков и осадков. – Л.: Гидрометеоиздат, 1986.
5. Брылёв Г.Б., Шведов В.В. Радиолокационные критерии грозоопасности в оперативной практике. – В кн.: Радиолокационная метеорология. – Л.: Гидрометеоиздат, 1982, с. 144–154.
6. Гашина С.Б., Сальман Е.М. Особенности радиолокационных характеристик грозовых облаков. – Труды ГГО, 1965, вып. 173, с. 19–25.
7. Довиак Р.Дж., Зрнич Д. Доплеровские радиолокаторы и метеорологические наблюдения. – Л.: Гидрометеоиздат, 1988. – 512 с.
8. Иванова Т.В. и др. Исследование неоднородностей ветрового поля в облаках и осадках с помощью автоматизированного некогерентного метеорологического радиолокатора. – Труды ГГО, 1988, вып. 526, с. 16–22.
9. Мельников В.М. Обработка информации в доплеровских МРЛ. – Зарубежная электроника, 1993, № 4, с. 35–42.
10. Принципы построения автоматизированных систем метеорологического обеспечения авиации. – Л.: Гидрометеоиздат, 1991. – 375 с.
11. Руководство по производству наблюдений и применению информации с неавтоматизированных радиолокаторов МРЛ-1, МРЛ-2, МРЛ-5. РД 52.04.320-91. – Л.: Гидрометеоиздат, 1993. – 358 с.
12. Руководство по применению радиолокаторов МРЛ-4, МРЛ-5 и МРЛ-6 в системе градозащиты. – Л.: Гидрометеоиздат, 1980. – 230 с.
13. Рыжков А.В. Поляризационные методы метеорологической радиолокации. – Зарубежная радиоэлектроника, 1993, № 4, с. 18–28.
14. Солонин А.С. К вопросу применения теории распознавания образов для анализа радиолокационной метеорологической информации. – Труды ГГО, 1979, вып. 430, с. 73–79.
15. Солонин А.С. Синтез адаптивных алгоритмов анализа радиолокационной метеорологической информации. – В кн.: Радиолокационная метеорология – Л.: Гидрометеоиздат, 1982, с. 186–193.
16. Bosche Q. Radar detection of turbulence in precipitation environments. – J. Atm. Sci., 1982, v. 39, p. 1819–1837.
17. Brown R., Lemon L., Burgess D. Tornado detection by pulsed Doppler radar. – Mon. Wea. Rev., 1978, v. 106, p. 29–38.
18. Browning K.A. The role of radar in weather forecasting. – Phys. Techn., v. 14, 1983, p. 140–143.
19. Caylor I., Illingworth A. Radar observations and modeling of warm rain initiation. – Quart. J. Roy. Met. Soc., 1987, v. 113, p. 1171–1191.
20. Clark D., Di Stefano J. Analysis of microburst observability with Doppler radar through comparison of radar and surface wind sensor data. – Proc. 24th Conf. Radar Meteor., 1989, p. 171–174.

21. Doviak R., Istok M. Analysis of the relation between Doppler spectral width and thunderstorm turbulence. – J. Atm. Sci., 1986, v. 43, p. 2199–2214.
22. Eilts M. Low altitude wind shear detection with Doppler radar. – J. Clim. Appl. Met., 1987, v. 26, No. 1, p. 96–106.
23. Elvander R.C. The relationship between digital weather radar data and reported severe weather occurrences. – Proc. 16th Radar Met. Conf., AMS, p. 330–336.
24. Fujita T.T., McCarthy J. The application of weather radar in aviation meteorology. – Radar in Meteorology, 1988, Ch. 31A, p. 657–681.
25. Golden J.H. The prospects and promise of NEXRAD: 1990's and beyond. Seminar on Weather Radar Networking, Sept. 5th, 1989, Brussels (Belgium), p. 17–30.
26. Green D.R., Clark R.A. VIL as indicator of explosive development in severe storms. – Proc. 7th Conf. on Severe Local Storms. AMS, 1971, p. 97–104.
27. Illingworth A., Goddard J., Cherry S. Polarization radar studies of precipitation development in convective storms. – Quart. J. Roy. Met. Soc., 1987, v. 113, p. 469–489.
28. Klingle-Wilson et al. Gust front detection algorithm for the terminal Doppler weather radar. P. 2: Performance assessment. – 3d Int. Conf. on Aviation Weather Systems, 1989, p. 398–402.
29. Lee J.T. Use of Doppler radar to detect weather hazards such as turbulence, wind shear and gust fronts. – IGARSS'83, p. 21–27.
30. Leitao M., Watson P. Application of dual linearly polarized radar data to prediction of microwave path attenuation at 10–30 GHz. – Radio Science, 1984, v. 19, p. 209–221.
31. Marshall J.S., Radhakant S. J. Appl. Met., 1978, v. 17, p. 206–212.
32. Merrit M. Microburst divergence detection for terminal Doppler weather radar. – Proc. 24th Conf. Radar Meteor., 1989, p. 220–223.
33. Muench H.S. Use of digital radar data in severe weather forecasting. – BAMS, 1976, v. 57, No. 3, p. 298–303.
34. Reap R.M., McGorman D.R. Cloud-to-ground lightning: climatological characteristics and relationships to model fields radar observations and severe local storms. – Mon. Wea. Rev., v. 117, 1989, p. 518–535.
35. Ryzhkov A., Melnik Yu., Zhuravlyov V. Cloud and precipitation studies by means of polarization diversity X-band radar. – Annales Geophys., Proc. 16th Gen. Assembly, Suppl. to v. 9, 1991, p. C140–C141.
36. Saffle R.E., Elvander R.C. Refinement of the National Weather Service severe weather probability algorithm. – 23th Conf. Radar Meteor., 1986, v. 3, p. YP70–YP72.
37. Serafin R.J., Wilson J.W. Operational weather radar in the US: progress and opportunity. – COST 75, 1999, p. 35–60.
38. Smith S. et al. Gust front detection algorithm for the terminal Doppler weather radar. P. 1: Current Status. – 3d Int. Conf. on Aviation Weather

Systems, 1989, p. 31–34.
39. Tuttle J., Bringi V., Orville H., Kopp F. Multiparameter radar study of microburst: comparison with model results. – J. Atm. Sci., 1989, v. 46, p. 601–620.
40. Uyeda H., Zrnic D. Automatic detection of gust fronts. – J. Atm. Ocean Technology, 1986, v. 3, No. 1, p. 36–50.
41. Waldvogel A. Detecting and measuring hail by radar. – La houille blanche, 1983, No. 5/6, s. 411–420.
42. Wilson J., Carbone R. Nowcasting with Doppler radar: the forecaster–computer relationship. – Nowcasting II Symp., Norrkoeping, Sweden, 1989, p. 177–186.
43. Zrnic D., Burgess D., Hennington L. Automatic detection of mesocyclonic shear with Doppler radar. – J. Atm. and Ocean Techn., 1985, v. 2, No. 4, p. 425–438.
44. Zrnic D.S., Doviak R.J., Lee J.T., Eilts M.D. Weather phenomena that affect aviation. 2nd Colloq. – «Security Airlines», 1988, p. 33–45.

К главе 6

1. Богатский К.М., Брылёв Г.Б., Завдовьев А.В., Линев А.Г., Маланичев С.А. и др. Автоматизированная система обработки данных МРЛ на базе микроЭВМ. – В сб.: Радиолокационная метеорология. – Л.: Гидрометеоиздат, 1989, с. 12–18.
2. Губарчук В.Н., Иванников А.П., Иванов А.А., Мельничук Ю.В. и др. Автоматизированный комплекс сбора, обработки и представления радиолокационной информации. – В сб.: Радиолокационная метеорология. – Л.: Гидрометеоиздат, 1989, с. 6–11.
3. Довиак Р., Зрнич Д. Доплеровские радиолокаторы и метеорологические наблюдения. – Л.: Гидрометеоиздат, 1988 – 512 с.
4. Мельников В.М. Обработка информации в доплеровских МРЛ. – Зарубежная радиоэлектроника, 1993, № 4, с. 35–42.
5. Принципы построения автоматизированных систем метеорологического обеспечения авиации. – Л.: Гидрометеоиздат, 1991. – 375 с.
6. Рыжков А.В. Характеристики метеорологических РЛС. Зарубежная радиоэлектроника, 1993, № 4, с. 29–34.
7. Beyer S., Fleuth U., Mähner K., Schleiermacher C. Aims and advantages: a new generation of distributed radar acquisition and control systems (DIRAC). – COST 75, 1999, p. 221–228.
8. Cavalli R. Operational experience with the new generation of Swiss radars. – COST 75, 1999, p. 159–164.
9. Clift G.A. Use of radar in meteorology. – WMO technical note, 1985, No. 625. 90 p.
10. Curtis J., Brodzik S., Edmon H., House R., Yuter S. Mountain Zebra: real time archival and 4D visualization of radar volumes over complex terrain. – COST 75, 1999, p. 297–306.
11. Edwards M.R.A., Lissaman V.A. Weather radar performance optimization carried out by the UK Met. Office. – COST 75, 1999, p. 165–178.
12. Enterprise Electronics Corporation, USA. Weather radar solutions for today and tomorrow. A tech.-sys. company. Prospects, 1999.
13. Enterprise Electronics Corporation, USA. DWSR-88 Doppler weather surveillance radar. Prospects, 1990–1994.
14. Gematronic GmbH, Germany, «21st century weather monitoring» «Meteor 500C Doppler weather radar», Prospects, 1999, p. 35.
15. Golden J.H. The prospects and promise of NEXRAD: 1990's and beyond. – COST 73, 1989, p. 17–36.
16. Joe P., Crozier C., Scott J., Falla M., Passarelli R.Jr., Siggia A. Signal processing and digital IF on the Canadian Doppler radar network. – COST 75, 1999, p. 544–556.
17. Puhakka T., Snarikivi P., Harju A., Koistinen J. The Doppler weather radar at the University of Helsinki. Helsinki, 1985.
18. Serafin R.J., Wilson J.W. Operational weather radar in the US: progress and opportunity. – COST 75, 1999, p. 35–61.
19. Terminal Doppler weather radar (TDWR). A briefing paper. Federal Aviation Administration USA, Boulder, 1988, p. 18.

К главе 7

1. Брылёв Г.Б., Гашина С.Б., Низдойминога Г.Л. Радиолокационные характеристики облаков и осадков. – Л.: Гидрометеоиздат, 1986. – 321 с.
2. Брылёв Г.Б., Завдовьев А.В. Методические аспекты обработки информации комплексов МРЛ–ААОМ с помощью ЭВМ. – В сб.: Радиолокационная метеорология. – Гидрометеоиздат, 1981, с. 15–23.
3. Брылёв Г.Б., Николаев П.Н., Фогель И.А. Применение метеорологических радиолокаторов (МРЛ) штормооповещения в СССР. – Л.: Гидрометеоиздат, 1979, с. 1–15.
4. Код для сообщения данных метеорологических наблюдений, проводимых с помощью наземных радиолокаторов (международная форма FM20-V RADOB). – Л.: Гидрометеоиздат, 1981. – 24 с.
5. Кольер К.Г. Создание сети метеорологических радиолокаторов в Европе – проект COST-73 Комиссии европейского сообщества. – Бюллетень ВМО, 1991, т. 40, № 4, с. 445–451.
6. Пампел Х. Обнаружение и сверхкраткосрочное прогнозирование конвективных явлений, опасных для авиации. – В сб.: Новые тенденции в гидрометеорологии, вып. 4. – Л.: Гидрометеоиздат, 1998, с. 79–83.
7. Принципы построения автоматизированных систем метеорологического обеспечения авиации. – Л.: Гидрометеоиздат, 1991. – 375 с.

8. Руководство по производству наблюдений и применению информации с неавтоматизированных радиолокаторов МРЛ-1, МРЛ-2, МРЛ-5 РД52.04.320.91. – Л.: Гидрометеоиздат, 1993, с. 360.
9. Руководство по производству наблюдений и применению информации с неавтоматизированных радиолокаторов МРЛ-1 и МРЛ-2. – Л.: Гидрометеоиздат, 1974. – 344 с.
10. Федоров Ю.К. Программная реализация алгоритмов стыковки данных МРЛ. – Труды ГГО, 1976, вып. 383, с. 39–44.
11. Федоров Ю.К. Способ автоматической стыковки данных метеорологических радиолокаторов. – Труды Гидрометцентра СССР, 1973, вып. 102, с. 62–74.
12. Ahnert P.R., Hudlow M.D., Johnson E.R., Greeve D.R., Dias M.P.R. Proposed «on-site» precipitation processing system for NEXRAD. – Preprints 21st Conf. Radar Meteorology, AMS, 1983, p. 378–385.
13. Anderson T., Lindström B., Ullerstig A. Operative experience of a development plans for SMHIs Doppler weather radar. – COST 72, 1985, p. 199–221.
14. Austin G.L., Kilambi A., Biron H.-P. The operational use of a high speed interactive radar data processing system (RDPS). Part I. A technical description. – COST 73, 1989, p. 229–236.
15. Berglund T., Åberg P. Flight weather forecasts based on modern radar presentation. – COST 72, 1985, p. 107–109.
16. Binary universal form for data representation – FM 94 BUFR. Collected papers and specification / European center for medium-range weather forecasts, February 1988; Издание 1995 г., доп. № 4 (III.2000), рск 6 (КОС–Bueor (98)), рск (КОС 99).
17. Biron H.-P., Austin G.L., Kilambi A. The operational use of a high speed interactive radar data processing system. Part II. – COST 73, 1989, p. 415–421.
18. Browning K.A. Weather radar and FRONTIERS. – Weather, 1986, v. 41, p. 9–16.
19. Brownscombe J.L., Hems B.D. Comparison of radar precipitation measurements with a dense network of daily rain gauges – Application to radar network. – COST 73, 1989, p. 433–442.
20. Camacho Ruiz J.L. Weather radar observations in Spain: operational limitations. – COST 75, 1999, p. 593–601.
21. Clift G.A. Use of radar in meteorology. – WMO technical note, 1985, No. 625, 90 p.
22. Collier C.G. The development of a weather radar network in Western Europe. – COST 73, 1989, p. 3–16.
23. Collier C.G. United Kingdom weather radar status report. Measurement of precipitation by radar. – COST Project 72 – Proceedings of a final seminar, 1985.
24. Collier C.G., Fair C.A., Newsome D.H. International weather radar networking in Western Europe. – BAMS, 1988, v. 69, p. 16–21.

25. Collier C.G., James P.K. On the development of an integrated weather radar processing system. Proc. 23d Conference on radar meteorology. – Boston, AMS, 1986, JP95–JP97.
26. Curtis J., Brodzik S., Edmon H., House R., Yuter S. Mountain Zebra: real-time archival and 4D visualization of radar volumes over complex terrain. – COST 75, 1998, p. 297–306.
27. Durand R.L. Weather radar systems: Radar compositing now makes the big picture even bigger. – COST 73, 1989, p. 153–162.
28. Edwards M.R.A., Lissaman V.A. Weather radar performance optimization carried out by the UK Met Office. – COST 75, 1999, p. 165–178.
29. Fair C.A., James P.K., Larke P.R. The United Kingdom weather radar network. – COST 73, 1989, p. 145–152.
30. Goddard D.M., Conway B.J. Near-real-time precipitation analysis over Europe. – COST 73, 1989, p. 331–340.
31. Golden J.H. The prospects and promise of NEXRAD: 1990's and beyond. – COST 73, 1989, p. 17–36.
32. Gustafsson S.G., Ekengreen B. Weather radar networking. –COST 72, 1985, p. 124–131.
33. Isaksson B. Design of radar signal processors for operational Doppler weather radar. – COST 73, 1989, p. 293–299.
34. Keeler R.J. Data quality enhancements for an open system NEXRAD. – COST 75, 1998, p. 124–135.
35. King R. Weather radar status report. – COST 72, 1985, p. 173–174.
36. King R. Operational experience with the Finnish weather radar network. – COST 73, 1989, p. 87–96.
37. Koistinen J., King R., Harju A. Monitoring and assessment of systematic measurements errors in the NORDRAD network. – COST 75, 1999, p. 62–67.
38. Martinez C. The Spanish weather radar network project. – COST 72, 1986, p. 191–199.
39. Meischner P. The potential of advanced weather radars in Europe. – COST 75, 1999, p. 24–34.
40. Nevado T. Composite radar and satellite data processing in the meteorological project in Spain (SIRAM Project). – COST 73, 1989, p. 133–145.
41. Newsome D.H. Practical applications of weather radar data in Europe. – COST 73, 1989, p. 445–458.
42. Nilsson S., Brunsberg J.O. Promis 600: an operational system for very short range weather forecasting in Sweden. – COST 73, 1989, p. 393–402.
43. Overgaard S. A Nordic weather radar network. – COST 73, 1989, p. 47–58.
44. Overgaard S., Wienberg E. Distribution of weather radar images to agricultural end users. – COST 73, 1989, p. 567–580.

45. Parrish R. Radar season – longer than you might expect. – Business and Commer-Aviation, 1978, v. 43, No. 3, p. 114–119.
46. Schlatter T.W. An integrated approach to the display of Doppler radar and other meteorological data. – COST 73, 1989, p. 317–330.
47. Serafin R.J., Wilson J.W. Operational weather radar in the U.S.: Progress and Opportunity. – COST 75, 1998, p. 35–61.
48. Smith A.H., Kitchen M. A review of the quality evaluation of radar rainfall measurements carried out by the UK Met Office. – COST 75, 1999, p. 68–81.
49. Sutton G., Convay B.J. Automating precipitation nowcasts based on satellite and radar imagery combined with numerical model products. – COST 73, 1989, p. 367–376.
50. Svabik O. Documentation of severe weather: thunderstorm and hail frequency in Europe. – COST 75, 1999, p. 357–363.
51. Working group on regional procedures for the transmission of digitized meteorological radar data on the GTS. – COST 72, Final Report, 1986, p. 26.
52. Yoshino F., Ichimya K., Kanbayashi Y., Yamaguchi T., Shirakawa N. Overview of radar networking by MOC. Japan and its data dissemination system (FRICS). – COST 73, 1989, p. 123–132.

К главе 8

1. Бочарников Н.В. Начальные условия для оперативной модели конвективного облака. – В сб.: Радиолокационная метеорология. – Л.: Гидрометеоиздат, 1984, с. 50–53.
2. Бочарников Н.В. Использование струйной модели конвективного облака в оперативной работе радиолокационного штормоповещения. – В сб.: Радиолокационная метеорология. – Л.: Гидрометеоиздат, 1982, с. 35–38.
3. Бочарников Н.В., Брылёв Г.Б., Ватиашвили М.Р. Диагноз шквалов по данным МРЛ. – В сб.: Радиолокационная метеорология. – Л.: Гидрометеоиздат, 1989, с. 64–67.
4. Бочарников Н.В., Брылёв Г.Б., Иванова Т.В., Солонин А.С. Метод прогноза роз с использованием модели конвективного облака и радиолокационной метеорологической информации. – В сб.: Радиолокационная метеорология. – Л.: Гидрометеоиздат, 1987, с. 32–37.
5. Брылёв Г.Б., Васильева Л.Г., Завдовьев А.В., Линев А.Г., Четверикова Е.С., Якимайнен Ю.А. Оценка оправдываемости сверхкраткосрочных прогнозов начала осадков и опасных явлений погоды в конкретных пунктах обзора автоматизированной МРЛС. – В сб.: Радиолокационная метеорология. – Л.: Гидрометеоиздат, 1989, с. 56–63.

6. Брылёв Г.Б., Гашина С.Б., Низдойминога Г.Л. Радиолокационные характеристики облаков и осадков. – Л.: Гидрометеоиздат, 1986. – 231 с.
7. Брылёв Г.Б., Завдовьев А.В., Низдойминога Г.Л. Определение параметров движения радиоэха облаков и осадков на основе корреляционного анализа. – Труды ГГО, 1979, вып. 430, с. 93–100.
8. Принципы построения автоматизированных систем метеорологического обеспечения авиации. – Л.: Гидрометеоиздат, 1991. – 372 с.
9. Andrieu H., Creutin J.D., Delrieu G., Denoeux T., Jaquet G. Feasibility studies on the use of the French «ARAMIS» radar network for hydrologic applications. – COST 73, 1989, p. 505–509.
10. Ciccione M., Pircher V. Preliminary assessment of very short term forecasting of rain from single radar data. Proc. Nowcasting II symposium. – Norrköping, Sweden, 1984, p. 241–244.
11. Cluckie J.D., Pao-shan Yu, Tilford K.A. Real time forecasting: model structure and data resolution. – COST 73, 1989, p. 459–471.
12. Borrows P.F., Haggett C.M. The impact of weather radar on aspects of operational management in the Thames region. – COST 73, 1989, p. 495–504.
13. De Troch F.P., Heynderickx J., Troch P.A., Van Erdeghem D. On the usefulness of weather radar data in real-time hydrological forecasting in Belgium. – COST 73, 1989, p. 473–481.
14. Hardaker P.J., Macpherson B., Brown P.R.A. Weather radar data and numerical weather prediction models. – COST 75, 1999, p. 451–459.
15. Höller H., Finke U., Hagen M., Huntrieser H. Thunderstorm observation during LINOX – combined radar, satellite, lightning and in situ measurements. – COST 75, 1999, p. 364–374.
16. Meischner P. The potential of advanced weather radars in Europe. – COST 75, 1999, p. 24–34.
17. Michelson D.B., Häggmark L., Golvik S. Use of weather radar data in the MESAN mesoscale analysis system. – COST 75, 1999, p. 427–440.
18. Nilsson S., Brunsberg J.O. PROMIS 600: an operational system for very short range weather forecasting in Sweden. – COST 73, 1989, p. 393–402.
19. Pointin Y., Husson D., Founet-Fayard J., Messaoud M. Urban hydrology and hail detection experiments made with a raingage-hailpad network with a dual polarization radar. – COST 73, 1989, p. 529–538.
20. Satton G., Convay B.J. Automating precipitation nowcasts based on satellite and radar imagery combined with numerical model products. – COST 73, 1989, p. 367–376.
21. Schlatter T.W. An integrated approach to the display of Doppler radar and other meteorological data. – COST 73, 1989, p. 317–330.
22. Serafin R.J., Wilson J.W. Operational weather radar in US: progress and opportunity. – COST 75, 1999, p. 35–61.

23. Soul K.M., Pierce C.E., Hagget C.M., Rippon J., Collier C.G. The GANDOLF system: results and new opportunities. – COST 75, 1999, p. 418–426.
24. Trovati L.R., Mattos A. A radar reflectivity-runoff model for use in flood warnings. – COST 73, 1989, p. 483–494.
25. Williams P.J., Perry A.H., Symons L.J. The application of weather radar to transport problems in the United Kingdom, 1986, p. 32–52.
26. Wright B.J., Golding B.W. The impact of radar and satellite imagery in a mesoscale NWP system. – COST 73, 1989, p. 379–391.

К главе 9

1. Аралов Г.Д., Макшанцев Б.Б. Достигнутый уровень и некоторые методы повышения безопасности полетов за рубежом. – Итоги науки и техники. Воздушный транспорт, 1984.
2. Брылёв Г.Б., Гашина С.Б., Евтеев Б.Ф., Камалдина И.И. Характеристики электрически активных зон в слоистообразных облаках. – Л.: Гидрометеоиздат, 1989. – с. 158.
3. Васин И.Ф. Влияние сдвига ветра на безопасность полетов. – Итоги науки и техники. Воздушный транспорт, 1980, т. 8.
4. Васин И.Ф. Методы расследования и определения причин авиационных происшествий за рубежом. – Итоги науки и техники. Воздушный транспорт, 1981, т. 9.
5. Вимберг Г.П., Гальперин В.М., Кондратюк В.И., Эфрос Н.Л., Емельянова Г.Ю. Методические рекомендации по определению договорных цен на гидрометеорологическую продукцию. – Изд. ГГО, 1990. – 38 с.
6. Николаев П.Н. Экономическая эффективность сети радиолокационного штормоповещения. Труды V Всесоюзного совещания по радиометеорологии. – М.: Гидрометеоиздат, 1981, с. 119–124.
7. Вимберг Г.П., Кондратюк В.И., Кривошеева Е.В., Куприенко В.Г. Рекомендации по определению экономического эффекта от использования гидрометеорологической информации в народном хозяйстве. – Л.: Изд. ГГО, 1987. – 63 с.
8. Руководство по производству наблюдений и применению информации с неавтоматизированных радиолокаторов МРЛ-1, МРЛ-2, МРЛ-5. РД 52.04.320.91. – Л.: Гидрометеоиздат, 1993, с. 360.
9. Шарапов А.Ю. Влияние метеорологических условий на безопасность полетов по данным ИКАО. – В сб.: Влияние внешней среды на безопасность полетов и вопросы воздействия факторов на ее состояние. – Труды ОЛАГА, 1985, с. 89–91.
10. Clift G.A. Use of radar in meteorology. – WMO, Technical note, 1985, No. 181. 90 p.
11. Golden J.H. The prospects and promise of NEXRAD: 1990's and beyond. – COST 73, 1989, p. 17–36.

12. Koistinen J., Saltikoff E. Experience of customer products of accumulated snow, sleet and rain. – COST 75, 1999, p. 397–406.
13. Newsome D.H. Practical application of weather radar data in Europe. – COST 73, 1989, p. 445–458.
14. Sencon Australia PTY LTD, 1991, Sydney, p. 32 (рекламные проспекты).
15. Serafin R.J., Wilson J.W. Operational weather radar in the U.S.: progress and opportunity. – COST 75, 1999, p. 35–61.
16. Terminal Doppler weather radar (TDWR). A briefing paper. – Federal Aviation Administration USA, Boulder, 1998, p. 18.

К главе 10

1. Beguin D., Plante J.L. Ground clutter suppression methods. – COST 75, 1999, p. 569–580.
2. Hagen M., Hacker S., Meischner P. Estimation of rainfall rate from measurements of polarimetric radar parameters by the C-band multiparameter radar POLDIRAD. – COST 75, 1999, p. 710–716.
3. Hannesen R., Löffler-Mang M. Improvement of quantitative rain measurements with a *C*-band Doppler radar through consideration of orographically induced partial beam screening. – COST 75, 1999, p. 511–519.
4. Joe P., Hudak D., Crozier C., Falla M., Passarelli R.Jr., Siggia A. Signal processing and digital IF on the Canadian Doppler radar network. – COST 75, 1999, p. 544–555.
5. Keeler R.J. Data quality enhancements for an open systems NEXRAD. – COST 75, 1999, p. 124–135.
6. Randeu W.L. Activity and results of COST 75 Working Group No. 4 «Fast scanning weather systems», 1999, p. 625–639.
7. Randeu W.L. Dwell time reduction for fast scanning weather radars. An overview on existing methods and recommendations for further work. – COST 75, 1999, p. 665–677.
8. Richter C. The global climate observing system (GCOS) and radar. – COST 75, 1999, p. 213–220.
9. Scarchilli G., Gorgucci E., Chandrasekar V. Applications of self-consistency principle to multiparameter radar measurements in rainfall. – COST 75, 1999, p. 786–795.
10. Seltmann J.I.I., Riedl J. Improved clutter treatment within the German radar network: first results. – COST 75, 1999, p. 267–279.