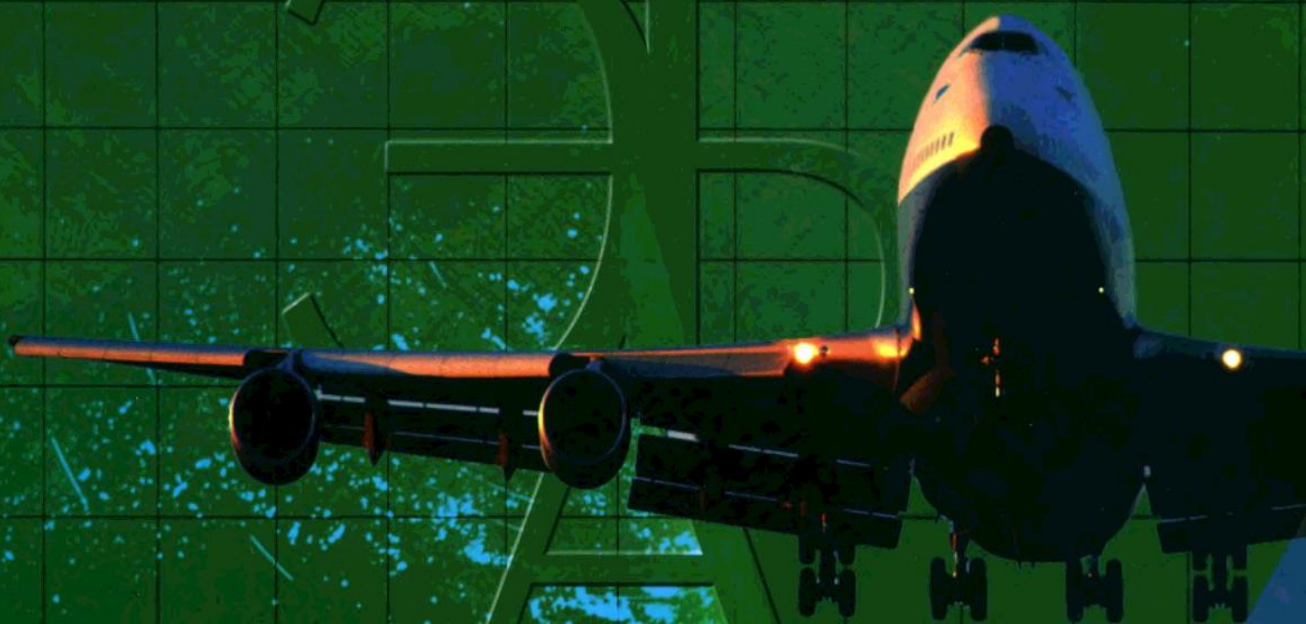


# ЭНЦИКЛОПЕДИЯ БЕЗОПАСНОСТИ АВИАЦИИ



7.6.2. Локация развивающихся дефектов структуры по сигналам акустической эмиссии ....	490
7.6.3. Обнаружение трещин по сигналам акустической эмиссии .....	499
7.6.4. Акустоэмиссионные системы локации дефектов структуры .....	511
<b>Глава 8. Обеспечение безопасности полетов при неблагоприятных воздействиях внешней среды ...</b>	<b>521</b>
8.1. Анализ зависимости безопасности полетов от опасных метеорологических явлений .....	521
8.2. Метеорологические факторы и их природа .....	527
8.2.1. Обледенение самолетов .....	527
8.2.2. Турбулентность атмосферы .....	529
8.2.3. Ветровые возмущения .....	531
8.2.4. Грозы и электрические разряды .....	533
8.2.5. Ливневые осадки .....	535
8.3. Столкновение воздушных судов с инородными предметами .....	536
8.4. Воздействие внешней среды на характеристики воздушных судов .....	538
8.4.1. Влияние обледенения на аэродинамические и летно-технические характеристики ...	538
8.4.2. Влияние турбулентности на летно-технические характеристики .....	540
8.4.3. Влияние сдвига ветра на полет .....	542
8.4.4. Влияние грозовой активности атмосферы на полет .....	543
8.5. Исследование влияния внешней среды на характеристики воздушных судов .....	547
8.5.1. Методы и процедуры исследования .....	547
8.5.2. Модель процесса обледенения .....	549
8.5.3. Модель процесса турбулентности .....	551
8.5.4. Модель критического профиля сдвига ветра .....	552
8.5.5. Моделирование процессов действия грозы и интенсивных ливневых осадков .....	556
8.5.6. Модель динамики полета воздушного судна .....	559
8.6. Организационные принципы метеорологического обеспечения авиации .....	563
8.6.1. Основные определения .....	563
8.6.2. Международные рекомендации .....	564
8.6.3. Организация метеорологического обеспечения полетов .....	565
8.7. Дистанционное зондирование атмосферы .....	568
8.7.1. Преимущества дистанционного зондирования .....	568
8.7.2. Объекты и применение дистанционного зондирования .....	569
8.7.3. Системы и методы дистанционного зондирования .....	570
8.7.4. Обратные задачи .....	572
8.7.5. Локализация зон опасных метеорологических явлений .....	573
8.8. Радиолокационные характеристики метеорологических образований .....	573
8.8.1. Радиолокационная отражаемость .....	573
8.8.2. Параметры доплеровского спектра ...	574
8.8.3. Поляризационные параметры .....	576
8.8.4. Доплеровско-поляриметрические характеристики .....	579
8.9. Методы обнаружения зон опасных метеорологических явлений .....	581
8.9.1. Ливни .....	581
8.9.2. Турбулентность .....	583
8.9.3. Сдвиг ветра .....	588
8.9.4. Молния .....	590
8.9.5. Град .....	592
8.9.6. Обледенение самолетов .....	592
8.10. Наземные средства обнаружения опасных метеорологических явлений .....	593
8.10.1. Виды метеорологических радиолокаторов .....	593
8.10.2. Некогерентные метеорологические радиолокаторы .....	593
8.10.3. Доплеровские метеорологические радиолокаторы .....	594
8.10.4. Поляризационные доплеровские метеорологические радиолокаторы .....	596
8.10.5. Лидары .....	596
8.10.6. Радиометры .....	596
8.10.7. Радиопеленгаторы гроз .....	597
8.10.8. Содары .....	597
8.10.9. Средства обнаружения сдвига ветра .....	597
8.10.10. Сети метеорологических радиолокационных линий .....	598
8.10.11. Автоматизированные метеорологические станции .....	598
8.11. Обнаружение опасных метеорологических явлений с борта воздушного судна .....	599
8.11.1. Функции метеонавигационных радиолокаторов .....	599
8.11.2. Принцип действия и особенности метеонавигационных радиолокационных станций .....	601
8.11.3. Параметры и конструктивные особенности бортовых локаторов .....	601
8.11.4. Штормоскопы .....	604
8.11.5. Оптические локаторы .....	605
8.11.6. Комплексная локализация опасных метеорологических явлений .....	605
8.12. Спутниковые наблюдения метеорологической обстановки .....	606
8.12.1. Геостационарные спутники .....	606
8.12.2. Полярные спутники .....	608
8.12.3. Система спутникового мониторинга атмосферы .....	608
8.12.4. Метеорологическая информация .....	611
8.12.5. Спутниковые исследования .....	611
8.12.6. Погода в аэропортах .....	611
8.12.7. Спутники в интегрированных системах .....	612

8.13. Интегрированные системы получения метеорологической информации и международные программы .....	612	потока обслуживаемых воздушных судов с учетом экономических показателей .....	670
8.13.1. Земля–спутник .....	612	9.7.8. Математическая модель многоальтернативного последовательного правила .....	671
8.13.2. Аэропорт .....	613	9.7.9. Последовательный многокритериальный анализ в диагностике особых ситуаций .....	674
8.13.3. Борт воздушного судна .....	615	9.8. Оценка влияния интегрированных навигационных средств на вероятность классификации ситуаций воздушной обстановки в интегрированной аэронавигационной системе .....	678
8.13.4. Борт воздушного судна–спутник–Земля .....	615	9.8.1. Принцип построения интегрированных систем предупреждения столкновений .....	678
8.13.5. Другие специализированные интегрированные системы .....	618	9.8.2. Моделирование вероятностных характеристик усовершенствованной интегрированной системы предупреждения столкновений .....	680
8.13.6. Глобальная система наблюдения .....	618	9.8.3. Анализ схем объединения координатной информации в интегрированных системах принятия решений .....	682
8.14. Эффективность метеорологического обеспечения авиации .....	619	9.8.4. Расчет вероятностных характеристик при объединении информации от разных систем определения местоположения воздушного судна .....	686
<b>Глава 9. Аэронавигационное обслуживание в системе безопасности полетов .....</b>	<b>623</b>	<b>Глава 10. Безопасность авиационных информационно-коммуникационных систем .....</b>	<b>689</b>
9.1. Структура системы аэронавигационного обслуживания .....	623	10.1. Общие проблемы безопасности авиационных информационно-коммуникационных систем .....	689
9.2. Современное состояние и перспективы развития аэронавигационных систем .....	631	10.1.1. Основные понятия и определения .....	689
9.3. Информационный контур решения динамических конфликтных ситуаций системы аэронавигационного обслуживания полетов .....	635	10.1.2. Стандарты информационной безопасности .....	694
9.4. Методологическое обоснование оценки риска столкновений .....	641	10.1.3. Современные методы и средства оценки состояния безопасности .....	697
9.5. Оценка риска столкновений воздушных судов на трассах полета .....	646	10.1.4. Особенности безопасности авиационных информационно-коммуникационных систем .....	700
9.5.1. Модель риска столкновений в результате нарушения бокового эшелонирования .....	646	10.2. Каналы утечки в информационно-коммуникационных системах .....	703
9.5.2. Модель риска столкновений в случае вертикального отклонения воздушных судов .....	647	10.3. Методы защиты информации в авиационных информационно-коммуникационных системах .....	713
9.5.3. Оценка параметров модели риска столкновений .....	648	10.3.1. Классификация средств технической защиты информации в каналах общего пользования .....	713
9.6. Оценка риска столкновений воздушных судов в районе аэродрома .....	652	10.3.2. Устройства защиты информации в телекоммуникационных системах .....	720
9.7. Повышение уровня безопасности полетов путем комплексного использования средств аэронавигации .....	657	10.3.3. Индикаторы поля .....	731
9.7.1. Комплексная обработка навигационной информации и информации системы управления воздушным движением .....	657	10.3.4. Сканирующие приемники .....	736
9.7.2. Логический анализ ситуаций для выработки стратегии совместной обработки аэронавигационной информации .....	657	10.3.5. Многофункциональные поисковые системы .....	738
9.7.3. Оптимизация потока воздушных судов .....	662	10.3.6. Обнаружители и подавители диктофонов и высокочастотных электронных устройств .....	750
9.7.4. Определение оптимального количества информационных систем для максимизации потока обслуживаемых воздушных судов без учета экономических показателей .....	665	10.3.7. Системы виброакустического шумозащиты .....	754
9.7.5. Влияние вероятности обнаружения воздушных судов на время наблюдения при заданных средних затратах .....	667	10.3.8. Нелинейные радиолокаторы .....	760
9.7.6. Процедура суммирования решений, полученных от нескольких информационных систем .....	668	10.4. Обеспечение безопасности авиационных информационно-коммуникационных систем .....	761
9.7.7. Определение оптимального количества информационных систем для максимизации			



## ПРЕДИСЛОВИЕ

В 2008 году была издана книга

### **Энциклопедия безопасности авиации,**

написанная **большой группой авторов.**

Книга издана под редакцией ректора НАУ проф. **Кулика Н.С.**

Издательство **Техника**, Киев, **2008**

Эта книга содержит огромный объем информации по разным отраслям науки и техники, влияющим на безопасность авиации.

Однако в качестве «Меток» по этой книге указано лишь:

#### **энциклопедия, авиация, авиационная техника**

Но книга посвящена далеко не только технике. Это сильно сужает возможности нахождения конкретной информации. Практически ни один поисковик не выйдет на эту книгу, например, при поиске информации по конкретным вопросам воздушного права и регулирования, психологии и человеческого фактора, метеорологического обеспечения, информационной безопасности, аэродинамики, летной годности, технической диагностики, информационно-коммуникационных систем и многим другим вопросам, которые детально рассмотрены в этой энциклопедии.

Поэтому я решил выложить небольшую часть текста этой энциклопедии, написанную мною.

Это разделы 8.6 – 8.14, которые размещены в указанной книге на страницах 563 – 622 плюс соответствующий список литературы. Это большая часть главы 8 «Обеспечение безопасности полетов при неблагоприятных воздействиях внешней среды».

Условное название предлагаемых материалов:

### **Метеорологическое обеспечение авиации**

Материал подан в редакции автора; потому он может незначительно отличаться от текста бумажной версии Энциклопедии. Существенные отличия касаются лишь форматирования. Нумерация страниц книги не сохранена, но номера подразделов полностью сохранены. Список литературы дается лишь в части ссылок, относящихся к разделам 8.6 – 8.14.

Ссылки на данный материал предлагаю делать следующим образом:

Ф. И. Яновский. Метеорологическое обеспечение авиации. Разделы 8.6-8.14 (С. 563 – 622) в книге: «Энциклопедия безопасности авиации», под ред. Н.С. Кулика, Киев: Техника, 2008, 1000 с.

## **Раздел 8.**

# **ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ПОЛЕТОВ ПРИ НЕБЛАГОПРИЯТНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ**

## **СОДЕРЖАНИЕ**

**8.1. Анализ влияния опасных метеорологических явлений на безопасность полетов**

**8.2. Метеорологические факторы и их природа**

**8.3. Столкновение воздушных судов с инородными телами**

**8.4. Действие внешней среды на характеристики воздушных судов**

**8.5. Исследования влияния внешней среды на характеристики воздушных судов**

*д.т.н., проф. Яновский Ф.И.*

**8.6. Организационные принципы метеорологического обеспечения авиации**

8.6.1. Основные определения

8.6.2. Международные рекомендации

8.6.3. Организация метеорологического обеспечения полетов

**8.7. Дистанционное зондирование атмосферы**

8.7.1. Основные определения дистанционного зондирования

8.7.2. Преимущества дистанционного зондирования

8.7.3. Объекты и применение дистанционного зондирования

8.7.4. Эффективность дистанционного зондирования

8.7.5. Системы и методы дистанционного зондирования

8.7.6. Обратные задачи

8.7.7. Носители средств ДЗ

8.7.8. Локализация зон опасных метеорологических явлений

**8.8. Радиолокационные характеристики метеорологических образований**

8.8.1. Радиолокационная отражаемость

8.8.2. Параметры доплеровского спектра

8.8.3. Поляризационные параметры

8.8.4. Доплеровско-поляриметрические характеристики

**8.9. Методы обнаружения зон опасных метеорологических явлений**

8.9.1. Ливни

8.9.2. Турбулентность

8.9.3. Сдвиг ветра

8.9.4. Молния

8.9.5. Град

8.9.6. Обледенение самолетов

## **8.10. Наземные средства обнаружения опасных метеорологических явлений**

- 8.10.1. Метеорологические радиолокаторы
- 8.10.2. Некогерентные МРЛ
- 8.10.3. Доплеровские МРЛ
- 8.10.4. Поляризационные доплеровские МРЛ
- 8.10.5. Лидары
- 8.10.6. Радиометры
- 8.10.7. Радиопеленгаторы гроз
- 8.10.8. Содары
- 8.10.9. Средства обнаружения сдвига ветра
- 8.10.10. Сети МРЛ
- 8.10.11. Автоматизированные метеорологические станции

## **8.11. Обнаружение опасных метеорологических явлений с борта воздушного судна**

- 8.11.1. Функции метеонавигационных радиолокаторов (МНРЛС)
- 8.11.2. Принцип действия и особенности МНРЛС
- 8.11.3. Параметры и конструктивные особенности бортовых локаторов
- 8.11.4. Штормоскопы
- 8.11.5. Оптические локаторы
- 8.11.6. Комплексная локализация ОМЯ

## **8.12. Спутниковые наблюдения метеорологической обстановки**

- 8.12.1. Геостационарные спутники
- 8.12.2. Полярные спутники
- 8.12.3. Система спутникового мониторинга атмосферы
- 8.12.4. Метеорологическая информация
- 8.12.5. Спутниковые исследования
- 8.12.6. Погода в аэропортах
- 8.12.7. Спутники в интегрированных системах

## **8.13. Интегрированные системы получения метеорологической информации и международные программы**

- 8.13.1. Земля – спутник
- 8.13.2. Аэропорт
- 8.13.3. Борт ВС
- 8.13.4. Борт ВС – спутник – Земля
- 8.13.5. Другие специализированные интегрированные системы
- 8.13.6. Глобальная система наблюдения

## **8.14. Эффективность метеорологического обеспечения авиации**

**Список литературы** к разделам 8.6-8.14 (нумерация соответствует ссылкам в тексте разделов)

## 8.6. ОРГАНИЗАЦИОННЫЕ ПРИНЦИПЫ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ АВИАЦИИ

### 8.6.1. Основные определения

Задача метеорологического обслуживания авиации заключается в содействии безопасному, эффективному и регулярному осуществлению аэронавигации. Это достигается путем предоставления необходимой информации о погоде эксплуатантам, членам летных экипажей, органам обслуживания воздушного движения, органам поисково-спасательной службы, администрации аэропортов и другим органам, имеющим отношение к авиации.

Согласно [3], метеорологическое обеспечение полетов в гражданской авиации (ГА) – это получение и своевременное доведение до руководящего, командно-летного, летного состава, работников службы движения и других должностных лиц метеорологической информации, необходимой для выполнения возложенных на них обязанностей. Метеорологическое обслуживание представляет собой комплекс мероприятий, направленных на обеспечение безопасности, регулярности и экономической эффективности полетов воздушных судов (ВС) ГА. Этот комплекс включает: метеорологическое, аэрологическое и радиолокационное наблюдение; авиационные прогнозы погоды; штормовые предупреждения по аэродромам, воздушным трассам (ВТ), маршрутам и районам полетов; действия по своевременному предоставлению метеоинформации для планирования, организации и выполнения полетов.

В действующих документах ИКАО принята следующая терминология. *Аэродромный метеорологический орган* – это расположенный на аэродроме орган, предназначенный для метеорологического обеспечения полетов воздушных судов. Метеорологическая информация является важной составляющей *полетно-информационного обслуживания*, целью которого является предоставление консультаций и информации для обеспечения безопасного и эффективного выполнения полетов. Часть воздушного пространства, в пределах которого обеспечивается полетно-информационное обслуживание и аварийное обслуживание, называется *районом полетной информации*. Обслуживание района полетной информации обеспечивается секторами *полетно-информационного обслуживания районного диспетчерского центра (РДЦ)*, *вспомогательного районного диспетчерского центра (ВРДЦ)*, и *диспетчерского органа подхода (ДОП)*, предназначенными для предоставления полетно-информационного обслуживания в классифицированном воздушном пространстве в пределах зоны полетной информации.

Важными элементами метеоинформации являются штормовые сообщения и предупреждения. Штормовое сообщение – это разовая метеоинформация о начале или усилении опасного для авиации явления. Для сообщений вокруг каждой авиационной метеостанции образуется штормовое кольцо. Штормовое предупреждение – это информация об ожидаемом появлении (усилении) опасного метеоявления. Конкретный порядок метеообеспечения разных видов полетов должен соответствовать международным и государственным нормам по метеорологическому обеспечению полетов ГА.

### **8.6.2. Международные рекомендации**

Для обеспечения безопасных и эффективных воздушных перевозок очень важными являются вопросы взаимодействия и согласованности метеорологического обеспечения на международном уровне. Они координируются такими организациями как ИКАО, Всемирная Метеорологическая Организация (ВМО) и EUROCONTROL. Основным нормативным документом, который определяет порядок метеорологического обеспечения аэронавигации, является Приложение 3 “Метеорологическое обеспечение международной аэронавигации” к Конвенция о международной гражданской авиации ИКАО [58] и Технический регламент ВМО № 49, том II, “Метеорологическое обслуживание международной аэронавигации”.

Нормы метеорологического обслуживания, определяемые Приложением 3, сводятся к следующему. Пилоты нуждаются в информации о метеоусловиях на маршрутах, по которым им предстоит выполнять полет, и на аэродромах назначения. Для выполнения задачи метеорологического обслуживания необходимо наладить тесную связь между теми, кто поставляет метеорологическую информацию, и теми, кто ею пользуется. На международных аэродромах метеорологическую информацию авиационные пользователи получают от аэродромного метеорологического органа. Государство обеспечивает соответствующие средства электросвязи, позволяющие метеорологическим органам предоставлять информацию органам обслуживания воздушного движения и органам поисково-спасательной службы. Средства электросвязи между метеорологическими органами и аэродромными диспетчерскими пунктами или диспетчерскими пунктами подхода должны обеспечивать возможность установления связи в течение 15 с. Сводки по аэродрому и прогнозы необходимы авиационным пользователям для выполнения своих функций. В сводки по аэродрому, согласно требованиям ИКАО, как минимум, включаются данные о приземном ветре, видимости, дальности видимости на ВПП, существующих условиях погоды и облачности, температуре воздуха и точки росы и атмосферном давлении. Эти сводки выпускаются каждый час или каждые полчаса. Дополнительно к этим сводкам



выпускаются специальные сводки, если какой-либо параметр изменяется и начинает превышать пределы, установленные с учетом его эксплуатационного значения.

Прогнозы по аэродрому включают данные о приземном ветре, видимости, условиях погоды, облачности и температуре и выпускаются каждые три или шесть часов со сроком действия от 9 до 24 ч. Прогнозы по аэродрому постоянно контролируются и по мере необходимости соответствующее метеорологическое бюро вносит в них изменения.

Прогнозы для посадки составляются на некоторых международных аэродромах в целях удовлетворения потребностей воздушных судов, выполняющих посадку. Они прилагаются к сводкам по аэродрому и срок их действия составляет 2 ч. В прогнозы для посадки включаются сведения об ожидаемых условиях в районе комплекса ВПП, содержащие данные о приземном ветре, видимости, условиях погоды и облачности.

Для оказания пилотам помощи при планировании полетов в большинстве государств организуется метеорологический инструктаж, при проведении которого все чаще используются автоматизированные системы.

Инструктаж включает предоставление сведений об условиях погоды по маршруту полета, ветре и температуре воздуха на высотах, часто отображаемых на метеорологических картах, а также предоставляются предупреждения, связанные с наличием опасных условий погоды по маршруту, сводки и прогнозы по аэродрому назначения и запасным аэродромам.

Для предоставления находящимся в полете воздушным судам информации о существенных изменениях условий погоды создаются органы метеорологического слежения. Они готовят предупреждения о таких опасных метеорологических явлениях, как грозы, тропические циклоны, мощные фронтальные шквалы, сильный град, сильная турбулентность, сильное обледенение, горные волны, песчаные и пыльные бури и облака вулканического пепла. Кроме того, эти органы выпускают предупреждения по аэродрому о метеорологических условиях, которые могут оказать неблагоприятное воздействие на воздушные суда или оборудование и средства на земле, например предупреждения об ожидаемых снежных бурях. Они также выпускают предупреждения о сдвиге ветра на траекториях начального набора высоты и захода на посадку. Дополнительно к этому с борта воздушных судов, находящихся в полете, должны передаваться сводки об особых явлениях погоды, встречаемых ими на маршруте.

Полученные донесения подразделения по обслуживанию воздушного движения направляют всем заинтересованным воздушным судам.

На большинстве международных маршрутов экипажи воздушных судов ведут наблюдения за ветром и температурой воздуха на высотах. Они передаются с борта находящихся в полете воздушных судов в целях предоставления данных наблюдений,

которые могут быть использованы при составлении прогнозов. Данные о наблюдаемых с борта воздушных судов ветре и температуре передаются в автоматизированном режиме путем использования линии передачи данных "воздух – земля".

Что касается прогнозов по маршруту полета, то все экипажи нуждаются в получении заблаговременной и точной метеорологической информации для прокладки такого курса, который позволит им воспользоваться благоприятным ветром и сэкономить топливо. В условиях, когда цены на топливо постоянно растут, это становится все более важным фактором. Поэтому ИКАО внедрила Всемирную систему зональных прогнозов (ВСЗП). Эта система предназначена для предоставления государствам и авиационным пользователям типовых и очень точных прогнозов о температуре, влажности и ветре на больших высотах, а также об особых явлениях погоды. ВСЗП состоит из двух всемирных центров зональных прогнозов, в которых используются самые современные компьютеры и средства спутниковой связи (ISCS и SADIS) для составления и направления глобальных прогнозов в цифровой форме непосредственно государствам и пользователям.

В последние годы имел место ряд инцидентов с воздушными судами при их пролете через облака вулканического пепла, образовавшиеся в результате вулканических извержений. В целях организации наблюдений и предоставления информации об облаках вулканического пепла, а также подготовки предупреждений для пилотов и авиакомпаний ИКАО с помощью других международных организаций создала службу слежения за вулканической деятельностью на международных авиатрассах (IAVW). Основой IAVW являются девять консультативных центров по вулканическому пеплу, которые предоставляют консультативную информацию о вулканическом пепле в глобальном масштабе как авиационным пользователям, так и соответствующим метеорологическим органам.

Все чаще используемые в настоящее время на аэродромах автоматизированные системы наблюдения за погодой считаются очень эффективными для удовлетворения авиационных потребностей в том, что касается наблюдений за приземным ветром, видимостью, дальностью видимости на ВПП, высотой нижней границы облаков, температурой воздуха и точки росы и атмосферным давлением. В связи с улучшением характеристик полностью автоматизированных сетей в настоящее время они могут функционировать без участия человека в те периоды, когда аэродром не эксплуатируется.

Важным является вопрос приведения нормативных документов национального уровня в соответствие с указанными и другими положениями стандартов ИКАО.

### 8.6.3. Организация метеорологического обеспечения полетов

Организационная структура метеорологического обеспечения может существенно отличаться в разных странах. В ряде государств национальная метеорологическая или гидрометеорологическая служба (НМС) является полномочным метеорологическим органом, аккредитованным в ИКАО, что дает ей возможность и вменяет в обязанность выполнять метеорологические наблюдения, составлять все виды прогнозов и предоставлять метеоуслуги на этапе предполетной метеорологической подготовки. В некоторых странах все или отдельные виды метеорологического обслуживания выполняют службы, созданные в структуре аэронавигационных служб или в структуре национальных администраций ГА. Иногда этим занимаются специализированные подразделения, которые административно находятся вне структур как НМС, так и ГА.

На совещании метеорологической группы (METG) ИКАО было отмечено [21], что в тех государствах, где метеорологическое обеспечение аэронавигации находится в структуре аэронавигационных служб или ГА, вопрос метеообеспечения и модернизации оборудования решаются быстрее и более качественно.

В Украине метеорологическое обеспечение ГА организует и проводит министерство Охраны внешней естественной среды Украины, к которому относится Государственная гидрометеорологическая служба (Госгидрометслужба). Метеообеспечение регламентируется Положением о метеорологическом обеспечении ГА, утвержденном Кабинетом Министров Украины, и НМО ГА. Конкретный порядок метеорологического обеспечения полетов в пределах зоны полетной информации утвержден совместным приказом Государственной службы Украины по надзору за обеспечением безопасности авиации и министерством Охраны внешней естественной среды Украины. При разработке этого Порядка в дополнение к указанным в п. 8.6.2 международным документам учтены следующие нормативно-правовые акты: Воздушный кодекс Украины; Наставление по метеорологическому обеспечению гражданской авиации (НМО ГА-90); Правила полетов воздушных судов и обслуживания воздушного движения в классифицированном воздушном пространстве Украины; Программа развития государственной системы использования воздушного пространства Украины на 2002-2006 годы.

Госгидрометслужба несет ответственность за полноту, качество и своевременность метеорологического обеспечения. Непосредственное метеорологическое обеспечение осуществляют оперативные подразделения Госгидрометслужбы, обычно расположенные непосредственно в аэропортах. Базовыми метеорологическими подразделениями можно считать, авиаметцентры (АМЦ), авиаметстанции (АМСГ), а также авиаметпосты (АМП).

Метеорологические подразделения регулярно проводят метеорологические и аэрологические наблюдения, собирают и распространяют метеоинформацию, подают штормовые предупреждения, составляют и доводят до потребителей штормовые предупреждения об опасных метеорологических явлениях, составляют и представляют командованию авиакомпаний, летному и диспетчерскому составу прогнозы и данные о фактической погоде на своем и запасных аэродромах, в пунктах посадки, по маршрутам и районам полетов.

Метеорологические наблюдения на аэродромах ведутся на основных, вспомогательных и дополнительных пунктах (регулярные и специальные наблюдения). Существуют контактные и дистанционные методы метеорологического и аэрологического наблюдения. Для обеспечения аэронавигации особенно большое значение имеют средства дистанционного зондирования (ДЗ). Наблюдения с помощью метеорологических радиолокаторов (МРЛ) дают большой объем информации об облачности, грозовых явлениях, зонах града и ливневых осадков. В оперативном отношении АМСГ и МРЛ подчиняются руководству авиапредприятий, а в методическом – гидрометслужбам, которые обеспечивают оперативное и техническое обслуживание МРЛ. Базы ЭРТОС или другие технические структуры аэропорта обычно не обслуживают МРЛ. Основные определения и методы ДЗ атмосферы в интересах авиации рассмотрены в разд. 8.7 – 8.9.

Метеорологические подразделения должны быть обеспечены квалифицированными специалистами и необходимыми метеорологическими и аэрологическими приборами, техническими средствами и оборудованием согласно нормам годности аэродромов и аэродромного оборудования. В рамках международного сотрудничества существует возможность предоставления консультативной помощи со стороны ИКАО в организации обучения специалистов в области авиационной метеорологии, а также в организации и проведении экспертизы при решении вопросов приобретения и модернизации оборудования. Такая помощь может также поступать со стороны ВМО. Например, в 2001 году был организован курс обучения по использованию данных Всемирного Центра Зональных Прогнозов (ВЦЗП), включая использование спутниковой (разд. 8.12) системы SADIS. Согласно Приложению 3 ИКАО, в мире функционируют два ВЦЗП, или World Area Forecast System (WAFS): в Лондоне и Вашингтоне. Кроме ВЦЗП существуют региональные центры – РЦЗП, один из которых – в Москве.

Требования ИКАО по связи между метеорологическими органами и потребителями информации обеспечиваются тем, что для сбора и распространения метеорологической информации используют систему прямых авиационных связей (СПАС), каналы связи ГА, а также арендуют радио и проводные средства Министерства связи. В последнее время

находит применение и метеоинформация, поступающая по сети Интернет. Актуальным является вопрос определения статуса такой информации [77].

Видное место в работе оперативных метеорологических подразделений занимает обеспечение метеоинформацией органов обслуживания воздушного движения (ОВД), в частности, полетно-информационного обслуживания РДЦ, ВРДЦ и ДОП. В традиционной структуре ОВД такими органами являются аэродромный диспетчерский пункт (АДП), диспетчерский пункт руления (ДПР), стартовый диспетчерский пункт (СДП), диспетчерский пункт посадки (ДПСП), диспетчерский пункт круга (ДПК), диспетчерский пункт подхода (ДПП), местный диспетчерский пункт (МДП), командно-диспетчерский пункт местных воздушных линий (КДП МВЛ). Каждый орган ОВД и органы единой системы управления воздушным движением ЕС УВД обеспечиваются всей метеоинформацией в соответствии с требованиями НМО ГА, государственными правилами и международными рекомендациями.

Поскольку метеорологическое обеспечение авиации базируется на сборе и распространении метеорологической информации, следует определить источники и технические средства, необходимые получения информации. Источники информации могут быть разными: от метеорологических спутников Земли до метеонаблюдателя АМП. Общее требование состоит в том, что метеорологическая информация должна быть своевременной, неискаженной и репрезентативной.

К основным источникам информации, поступающей в авиационные структуры метеообеспечения, относятся: наземные государственная и ведомственная сети метеорологических станций; сеть международного обмена; средства разведки погоды; метеорологическая космическая система. Отдельную группу источников оперативной метеорологической информации составляют автономные бортовые средства ДЗ (разд. 8.11), которые непосредственно предупреждают пилота о наличии опасных метеорологических явлений на трассе полета и в близлежащих районах.

Ни один из источников информации не является универсальным. Поэтому удовлетворить требования авиации можно только пользуясь всем объемом доступной информации. Например, наземная метеорологическая и аэрологическая сеть, включая сеть международного обмена, дает большой объем информации о метеорологических величинах и явлениях с довольно высокой точностью. Но эта информация характеризуется высокой степенью дискретности и вообще отсутствует в отдельных, иногда довольно больших, районах. В сеть автоматических станций входят станции, установленные в труднодоступных районах (горы, льды Арктики и т.п.). Такие станции обычно четыре раза в сутки передают сведения об измеренных метеорологических величинах, а также о местонахождении станции, если она дрейфующая. Станции автоматизированной сети передают информацию с

неосвещенной территории, и это очень важно, однако на таких станциях не выполняются аэрологические наблюдения. Для передачи информации с таких станций в метеорологические центры используется ретрансляция через искусственные спутники Земли.

Особое значение имеют автоматизированные станции, расположенные на аэродромах. Такой станцией является комплексная радиотехническая автоматическая метеорологическая станция (КРАМС) и более новая автоматическая метеорологическая информационно-измерительная система (АМИИС). На этих системах ведутся измерения, регистрация и кодирование метеорологических величин, а также выдача результатов измерений на цифровые индикаторы, установленные у работников ГА, отвечающих за безопасность полетов. Согласно требованиям ИКАО, выдача результатов измерений и обновление информации должно осуществляться с интервалом 1-2 минуты.

В последнее время в некоторых аэропортах США введены станции автоматизированного метеорологического наблюдения нового поколения – Automated meteorological Observing Stations (AOS). Это одобрено Комиссией по аэронавигационной метеорологии ВМО [76]. Использование AOS позволило США обеспечить непосредственные метеорологические наблюдения в таких аэропортах, где они вообще никогда не выполнялись, что повысило уровень безопасности в этих аэропортах.

Станции AOS также улучшили качество наблюдений в других аэропортах, в частности там, где в соответствии с требованиями Приложения 3 ИКАО [58] и Технической директивой ВМО (WMO Technical Regulation C.3.1) необходимы регулярные авиационные метеорологические сообщения о погоде в кодовой форме ВМО METAR (Aviation Route Weather Report). Исследовательская группа ИКАО по аэродромной системе метеорологического наблюдения, проанализировав современное состояние и возможности автоматизации метеорологических наблюдений, предложила соответствующие поправки [76] к Приложению №3 ИКАО. В будущем прогнозируется использование автоматизированных систем наблюдений во всех международных аэропортах, так как они соответствуют потребностям метеорологического обслуживания международных авиационных перевозок.

Кроме сообщений METAR используются и метеорологические сообщения других форматов. В частности, формат SIGMET используется для передачи информации о фактическом или ожидаемом возникновении определенных явлений погоды на маршруте, которые могут повлиять на безопасность полетов ВС, сообщения AIRMET представляют собой аналогичную информацию, но для полетов на малых высотах, а сообщения GAMET являются данными зонального прогноза, который составляется в виде открытого текста для полетов на малых высотах для района полетной информации.

К средствам разведки погоды следует отнести средства ДЗ атмосферы и воздушного



разведки. ДЗ, в частности, радиотехническая разведка, осуществляется с помощью различных локационных станций (разд. 8.10). Основными объектами радиолокационных наблюдений являются облака вертикального развития (мощные кучевые и кучево-дождевые), ливни и грозы. Специальные МРЛ, кроме того, дают возможность наблюдать за облаками всех других ярусов, различать зоны осадков разной интенсивности, определять вертикальный профиль облачности, обнаруживать зоны турбулентности, града и сдвига ветра, а иногда и турбулентности ясного неба (ТЯН).

Средствами воздушной разведки являются ВС без пассажиров на борту, которые в сложной и неустойчивой метеорологической обстановке могут выполнять специальные полеты для оценки метеорологических условий. Воздушная разведка ведется довольно редко. Намного чаще информацию о погоде, наличии опасных явлений и их влиянии на взлет, полет и посадку передают экипажи рейсовых ВС, которые взлетают, пролетают, или заходят на посадку. Такой вид метеонаблюдения получит дальнейшее развитие в рамках концепции автоматического зависимого наблюдения (раздел 8.13.4). Метеорологическая космическая система позволяет получить огромный объем информации, необходимой для обеспечения ГА (разд. 8.12). Наблюдения метеорологических спутников Земли (МСЗ) принимаются наземными автономными пунктами приема информации и передаются синоптикам для анализа.

Объединение метеорологической информации, получаемой из разных источников, помогает успешно решать задачи метеорологического обеспечения ГА. В последнее время особое развитие и значение приобретают интегрированные системы (разд. 8.13), которые комплексно обрабатывают информацию от источников разной физической природы, наземных и бортовых датчиков. С другой стороны, пилоту необходимо предоставлять надежную оперативную информацию об опасных метеорологических явлениях по трассе полета. При этом значительно увеличивается роль автономных бортовых средств получения метеоинформации. Это целиком соответствует концепции Free Flight. Общее действие обеих указанных тенденций может в будущем привести к полномасштабному участию бортовых датчиков в формировании единой картины интегрированной метеорологической обстановки с передачей на каждый борт лишь адресной метеорологической информации, необходимой для безопасного осуществления полета каждым ВС [38], [39]. Созданные экспериментальные система сбора и оповещения с трансляцией метеоинформации с рейсовых самолетов на спутники Aircraft to Satellite Data Relay (ASDAR) и система автоматического сбора данных и оповещения Automated Meteorological Data and Reporting (AMDAR), которые успешно развиваются [59], являются существенным шагом на пути реализации этой идеи.

Деятельность авиационных и метеорологических организаций и программ направлена

на усовершенствование системы метеорологического обеспечения аэронавигации. Актуальными являются вопросы, связанные с внедрением новой концепции CNS/ATM. В соответствии с постановлением, принятым Европейской группой аэронавигационного планирования (EANPG) в 1999 году, группа по метеорологии EANPG (METG) занимается контролем за деятельностью в области CNS/ATM в части разработки метеорологической составляющей для европейской концепции CNS/ATM. Разработкой этой концепции занимается проектная группа в области метеорологии (PT/METATM). Основной задачей этой группы является разработка проекта стратегии, направленной на удовлетворение требований к метеорологической информации в рамках европейской концепции CNS/ATM на следующие 15 лет. Эта стратегия, по сути, является планом действий с указанием основных этапов. В ходе разработки стратегии в области метеорологии для CNS/ATM необходимо налаживание регулярного взаимодействия с EUROCONTROL, причем эта организация подтвердила свою поддержку данной задачи и назначила координатора для решения вопросов, связанных с метеорологией [65]. В состав проектной группы входят эксперты из Австрии, Бельгии, Великобритании, Германии, Латвии, Нидерландов, Румынии, Украины, Финляндии, Франции, Швеции, EUROCONTROL и IATA, работающие под руководством ICAO.

## **8.7. ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ**

### **8.7.1. Основные определения дистанционного зондирования**

Дистанционным зондированием (ДЗ) часто называют получение информации об объектах без вхождения с ними в физический контакт [69]. Однако это определение является слишком широким. Поэтому необходимо ввести некоторые ограничения, которые позволят конкретнее очертить особенности понятия "Дистанционное зондирование", и в частности, важного для обеспечения безопасности авиации предмета ДЗ атмосферы. Во-первых, говоря о ДЗ, предполагается, что информацию получают с помощью технических средств. Во-вторых, речь идет об объектах, которые находятся на значительных расстояниях от местоположения технических средств, что принципиально отличает ДЗ от ряда других научно-технических направлений, таких как неразрушающий контроль материалов и изделий, медицинская диагностика, и т.п. Справедливо добавить, что ДЗ использует косвенные методы измерения, хотя такое уточнение не слишком ограничивает область рассмотрения, так как вообще любые измерения чаще всего являются косвенными. Еще одно уточнение касается объектов исследования. ДЗ обычно включает исследования атмосферы и земной поверхности, в последнее время развилось и подповерхностное ДЗ. В контексте тематики, посвященной безопасности авиации, в этом разделе речь идет о ДЗ атмосферы, в частности о методах и средствах дистанционного неконтактного получения информации о состоянии и параметрах тропосферы и их применению в интересах авиации.

### **8.7.2. Преимущества дистанционного зондирования**

Главные преимущества ДЗ – это высокая скорость получения данных о больших объемах атмосферы (или о больших площадях земной поверхности), а также возможность получения информации о таких объектах, которые практически недоступны для исследования другими способами. Эти преимущества являются очень важными для авиационных применений. Рядом с традиционными метеорологическими измерениями в верхней атмосфере, которые выполняются с применением шаров-зондов, широко и систематически применяются изоэренные методы ДЗ.

### 8.7.3. Объекты и применение дистанционного зондирования

Объекты ДЗ связаны с:

- погодой и климатом (осадки, облака, ветер, турбулентность, излучения);
- элементами окружающей среды (аэрозоли, газы, электричество атмосферы, перенос, т. е. перераспределение в атмосфере той или иной субстанции);
- океанами и морями (морское волнение, течения, количество воды, лед);
- земной поверхностью (растительность, геологические исследования, изучения ресурсов, высотометрия).

Информация, получаемая средствами ДЗ, необходима для многих отраслей науки, техники и экономики. Количество потенциальных потребителей этой информации постоянно растет. Не пытаясь пересчитать все, упомянем лишь, что средствами ДЗ удовлетворяются потребности нескольких областей, непосредственно связанных с безопасностью полетов:

- метеорологии, климатологии и физики атмосферы (оперативные данные для прогноза погоды, определения профиля температуры, давления и содержания водяного пара в атмосфере, измерения скорости ветра и т.п.);
- спутниковой навигации, связи, радиолокационного наблюдения и радионавигации – эти области требуют данных об условиях распространения радиоволн, которые оперативно получают средствами ДЗ;
- авиации, например, прогноз метеоусловий в аэропортах и на авиатрассах, оперативное обнаружение опасных метеорологических явлений, таких как град, гроза, турбулентность, сдвиг ветра, микровзрыв и обледенение.

Кроме того, важными являются такие применения [69], в которых летательные аппараты используются в качестве носителей средств ДЗ:

- гидрология, включая оценку и управление водными ресурсами, прогнозирование таяния снегов, предупреждения о паводках;
- аграрные области (прогноз и управление погодой, контроль типа, распространения и состояния растительного покрова, построение карт типов грунтов, определение влажности, предупреждение градобитий, прогноз урожая);
- экология (контроль загрязнения атмосферы и земной поверхности);
- океанография, например, измерение температуры морской поверхности, исследования океанских течений и спектров морского волнения;
- гляциология, например, отображение распространения и движения ледовых щитов и морского льда, определения возможности морского судоходства в ледовых условиях;

- геология, геоморфология и геодезия, например, идентификация типа горных пород, локализация геологических дефектов и аномалий, измерения фигуры Земли и наблюдения тектонического движения;
- топография и картография, в частности, получение точных данных о высоте и привязке их к данной системе координат, производство карт и внесения изменений в них;
- контроль стихийных бедствий, в том числе контроль объема паводков, предупреждения о песчаных и пылевых бурях, лавинах, оползнях, определение маршрутов лавин и т.п.;
- планирование в других технических приложениях, например, инвентаризация землепользования и контроль изменений, оценка земельных ресурсов, наблюдения за движением транспорта;
- военные применения, такие как контроль передвижения техники и воинских формирований, оценка местности.

#### **8.7.4. Эффективность дистанционного зондирования**

ДЗ стоит довольно дорого, в особенности, когда оно осуществляется из космоса. Несмотря на это, сравнительный анализ затрат и получаемых результатов доказывает высокую экономическую эффективность ДЗ. К этому справедливо добавить, что помимо чисто экономического эффекта, использование данных ДЗ, в частности, метеорологических спутников, наземных и бортовых радиолокационных средств, уже сохранило тысячи человеческих жизней за счет предупреждения стихийных бедствий и избежания опасных метеорологических явлений, в том числе в авиационных приложениях. Поэтому интенсивная научно-исследовательская, экспериментальная, конструкторская и оперативная деятельность в области ДЗ, которая проводится в ведущих странах мира все в больших масштабах, является полностью оправданной.

#### **8.7.5. Системы и методы дистанционного зондирования**

Классификация систем ДЗ основывается на привычных для специалистов по радиолокации отличиях между активными и пассивными системами. Активные системы облучают исследуемую среду электромагнитным излучением (ЭМИ), которое обеспечивает самая система ДЗ, то есть в этом случае средство ДЗ генерирует электромагнитную энергию и излучает ее в направлении на исследуемый объект. Пассивные системы воспринимают ЭМИ, которое исходит от исследуемого объекта естественным образом. Это может быть как

собственное ЭМИ, возникающее в самом объекте зондирования, например, тепловое излучение, так и рассеянное ЭМИ какого-либо естественного внешнего источника, например, солнечного излучения. Преимущества и недостатки каждого из двух указанных типов систем ДЗ (активные и пассивные) определяются рядом факторов. Например, пассивная система практически неприменима в тех случаях, когда отсутствует достаточно интенсивное собственное излучение исследуемых объектов в заданном диапазоне длин волн. С другой стороны, активная система становится технически невыполнимой, если излучаемая мощность, необходимая для получения достаточного отраженного сигнала, оказывается слишком большой.

В ряде случаев для получения необходимой информации желательно знать точные параметры излучаемого сигнала, чтобы обеспечить какие-то специальные возможности анализа, например, измерение доплеровского сдвига частоты отраженного сигнала для оценки движения цели относительно датчика (приемника) или изменения поляризации отраженного сигнала относительно зондирующего сигнала. Как и любые информационно-измерительной системы, которые используют ЭМИ, системы ДЗ различаются по диапазонам частот электромагнитных колебаний, например: ультрафиолетовые, видимого света, инфракрасные, миллиметровые, сантиметровые, дециметровые.

Основное внимание в этом разделе обращено на ДЗ атмосферы, в частности, тропосферы, то есть той части земной атмосферы, которая непосредственно прилегает к поверхности Земли. Тропосфера простирается до высот 10-15 км, а в тропических широтах – до 18 км. Говоря о ДЗ с целью метеорологического обеспечения безопасности полетов, мы больше интересуемся системами, которые рассматривают атмосферу как трехмерный, объемно распределенный объект, и позволяют получать профили атмосферы в разных направлениях зондирования. Поэтому рассмотрим особенности методов ДЗ с этой точки зрения.

Объектами зондирования, или целями могут быть флуктуации, которые естественно происходят в атмосфере, а также фиксированные объекты на определенном расстоянии от средства ДЗ. Прежде всего, важно понять суть разных видов взаимодействия между ЭМИ и атмосферой. Разные виды такого взаимодействия представляют удобный способ классификации методов ДЗ. Речь идет о методах, основанных на: 1) затухании, 2) рассеянии и 3) излучении электромагнитных колебаний объектами зондирования. На рис. 8.33 – 8.36 показаны схемы основных процессов взаимодействия электромагнитных колебаний с атмосферными неоднородностями применительно к задачам ДЗ.

В первом случае (рис. 8.33) излучение от заданного известного источника (передатчика) поступает на вход приемника после того, как оно прошло из-за исследуемый



объект. Оценивается величина ослабления излучения на трассе распространения от передатчика к приемнику, при этом предполагается, что величина потерь электромагнитной энергии при прохождении из-за объекта связана со свойствами этого объекта. Причиной этих потерь может быть поглощение или комбинация поглощения и рассеяния. Это лежит в основе получения информации об объекте. Много методов ДЗ по сути основаны на этом подходе.

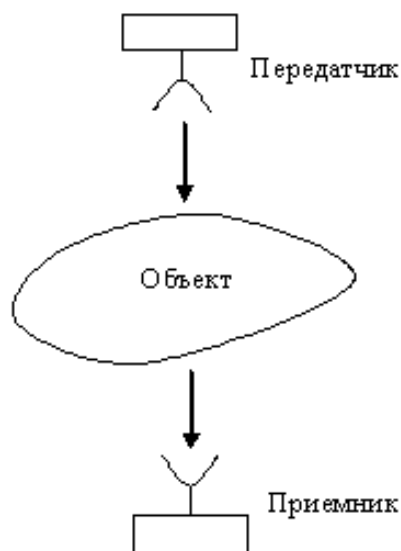


Рис. 8.33. Дистанционное зондирование на основе поглощения излучения объектом зондирования.

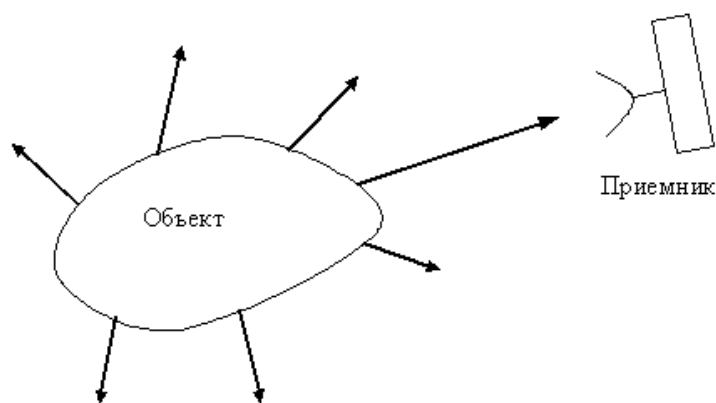


Рис. 8.34. Дистанционное зондирование основе собственного излучения объекта.

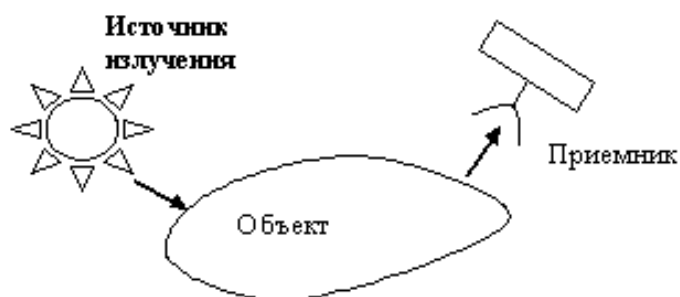


Рис. 8.35. Дистанционное зондирование на основе рассеяния (пассивная система).

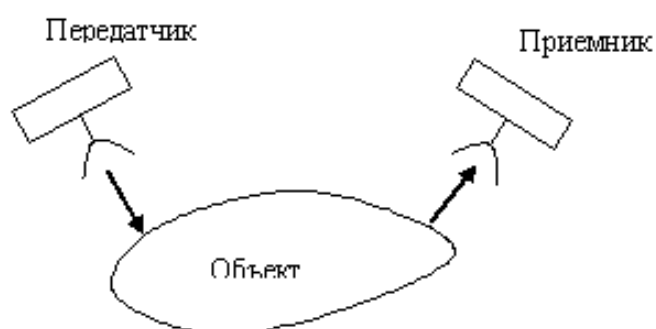


Рис. 8.36. Дистанционное зондирование на основе рассеяния (активная система).

Во втором случае, когда излучение испускается самим объектом (рис. 8.34), обычно возникает задача измерения инфракрасной или/и микроволновой эмиссии, что используется, для получения информации о тепловой структуре атмосферы и других ее свойствах. Кроме того, такой подход характерен для исследования молниевых разрядов на основе его собственного радиоизлучения и для обнаружения грозы на больших расстояниях.

Третий случай состоит в использовании рассеяния электромагнитных колебаний атмосферным образованием для получения информации о нем. На свойстве рассеяния основаны различные способы ДЗ. Один из них характеризуется тем, что исследуемая среда освещается каким-то источником некогерентного излучения, например, солнечным светом или инфракрасным излучением, которое исходит от поверхности Земли, а датчик средства ДЗ принимает рассеянное объектом излучение (рис. 8.35). Другой – тем, что объект облучается специальным искусственным (когерентным или некогерентным) источником, например, лазером или источником с длиной волны от дециметров до миллиметров (как в случае радиолокатора). Это излучение рассеивается объектом, обнаруживается приемником и используется для извлечения информации о рассеивающем объекте (рис. 8.36).

Заметим, что первый из рассмотренных случаев (рис. 8.33) соответствует активной системе зондирования, второй (рис. 8.34) – пассивной, а третий может быть реализован как в

пассивном (рис. 8.35), так и в активном (рис. 8.36) вариантах.

Активная система ДЗ может быть моностатической, когда передатчик и приемник средства ДЗ размещаются на одной позиции (рис. 8.37), бистатической, как показано на рис. 8.36, или даже мультистатической, когда система состоит из одного или нескольких передатчиков и нескольких приемников, расположенных в разных позициях.

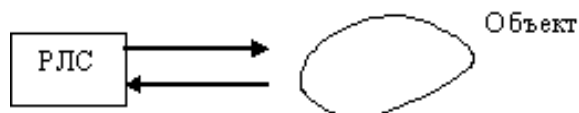


Рис. 8.37. Моностатическая активная система дистанционного зондирования.

Классификация не будет достаточно полной, если не указать основные технические средства ДЗ: радиолокаторы, радиометры, лидары и другие устройства или системы, используемые в качестве датчиков ДЗ.

#### 8.7.6. Обратные задачи

Задачи ДЗ относятся к категории обратных задач, т. е. таких, при решении которых мы вынуждены идти от результата к причине. К ним относятся все задачи обработки и интерпретации данных наблюдений. Теория обратных задач – самостоятельная математическая дисциплина [24], а ДЗ атмосферы – лишь одно из научно-технических направлений, для которых теория обратных задач является важной. В данном прикладном аспекте необходимо хорошо понимать, как ЭМИ взаимодействует с исследуемыми атмосферными объектами, формируя сигналы, которые используются для получения информации об атмосфере. В идеальном случае между измеренным параметром сигнала и оцениваемой характеристикой атмосферы существует взаимно однозначное соответствие. Но в реальных ситуациях всегда возникают характерные для обратных задач проблемы.

Рассмотрим простой пример, который относится к пассивному зондированию атмосферы. Предположим, что поглощающий газ в атмосфере характеризуется собственным излучением, которое зависит от температуры газа. Это излучение воспринимается датчиком, расположенным на спутнике. Предположим также, что существует связь между длиной волны излучения и температурой, а температура зависит от высоты слоя атмосферы. Тогда знание взаимосвязи между интенсивностью излучения, длиной волны излучения и температурой газа дает способ оценки температуры атмосферного газа как функции длины волны и, следовательно, высоты. На самом деле ситуация намного сложнее по сравнению с описанным идеальным случаем. Излучение на заданной длине волны на самом деле не исходит из одного слоя на соответствующей высоте, а распределено по толще атмосферы,

что приводит к отходу от взаимно однозначного соответствия между длиной волны и высотой, как это предполагалось для идеального случая, вызывая размытость этой связи. Этот пример является типичным для многих обратных задач ДЗ. В данном случае на совокупность измерений собственного излучения как функции длины волны влияют все значения неизвестного вертикального распределения температуры  $f(x)$  по всему диапазону слоев, которые вносят вклад в излучение. Пусть  $K_i(x)$  – весовая функция относительного вклада излучающего слоя при длине волны  $\lambda_i$ . Интервал между  $x$  и  $x + \Delta x$  вносит в измерение интенсивности излучения  $i$ -го канала радиометра взнос  $f(x)K_i(x)dx$ . Полное измеренное излучение в  $i$ -том канале равняется

$$g_i = \int_a^b K_i(x)f(x)dx \quad (8.23)$$

где границы интегрирования зависят от особенностей конкретной задачи. Это уравнение известно как интегральное уравнение Фредгольма первого рода. Оно характеризуется тем, что границы интеграла фиксированные, а  $f(x)$  появляется только в подынтегральном выражении. Функция  $K_i(x)$  называется ядром, или функцией ядра уравнения.

Разные задачи ДЗ сводятся к уравнению (8.23) или к подобным уравнениям. Для решения таких задач необходимо выполнить обратное преобразование, чтобы по результатам измерений  $g_i$  получить распределение  $f(x)$ . Такие обратные задачи называются некорректными, или некорректно поставленными задачами. Их решение ассоциировано с преодолением трех следующих трудностей. В принципе решение некорректной задачи может оказаться 1) математически несуществующим, 2) неоднозначным или 3) неустойчивым. Отсутствие решения обычно не является типичным для практических задач, так как речь идет о реальных измерениях  $g_i$ , и искомая функция  $f(x)$  должна существовать из физических соображений. Неоднозначность связана с влиянием размытости, о чем было сказано выше. Практическое следствие этого состоит в том, что математически существует несколько функций  $f(x)$ , которые приводят к той же самой функции  $g_i$ . Эта проблема может быть преодолена за счет ограничения класса допустимых решений путем введения априорной информации в процедуру поиска, и сведения решения к физически осуществимому. Наибольшие трудности при решении уравнения (8.23), по крайней мере, для практических задач, связаны с преодолением проблемы неустойчивости, которая возникает, например, из-за погрешности в наблюдениях  $g_i$ . С учетом погрешности  $\varepsilon_i$ , которая возникает при измерении  $g_i$ , уравнение (8.23) приобретает такой вид:

$$g_i + \varepsilon_i = \int_a^b K_i(x)f(x)dx, \quad (8.24)$$

где даже маленькая погрешность  $\varepsilon_i$  может привести к как угодно большому изменению в  $f(x)$ . Поэтому окончательный успех любого решения в значительной мере зависит от точности измерения  $g_i$  и от формы  $K(x)$ . Поскольку избавиться от погрешностей измерения параметров принятого ЭМИ в принципе невозможно, то необходимо разрабатывать такие процедуры решения обратных задач, которые обеспечивают получение возможных решений в реальных условиях получения исходных данных ДЗ.

#### **8.7.7. Носители средств ДЗ**

Изучение атмосферы с помощью ДЗ включает использования приборов, устанавливаемых на искусственных спутниках Земли и орбитальных станциях, самолетах, ракетах, воздушных шарах, а также средствами, размещенными на земле. Чаще всего носителями средств ДЗ являются спутники, самолеты и платформы наземного базирования.

#### **8.7.8. Локализация зон опасных метеорологических явлений**

С точки зрения ДЗ, опасные метеорологические явления (ОМЯ) можно рассматривать как объемно распределенные объекты, которые занимают определенные пространственные зоны в облачности или в безоблачной атмосфере (ясном небе). Физические признаки внешнего проявления ОМЯ, как правило, описываются параметрами, которые характеризуют интенсивность ОМЯ и которые в принципе можно измерять, например, параметры скорости ветра, напряженности электрического и магнитного полей, интенсивность осадков. Физические параметры ОМЯ рассмотрены в разделе 8.2.

Районы атмосферы, в которых параметры, которые характеризуют интенсивность ОМЯ, превышают некоторый заданный уровень, называются зонами ОМЯ. Процесс обнаружения ОМЯ и отнесения зон ОМЯ к определенным пространственным координатам в заданное время на основании результатов ДЗ называется локализацией зон ОМЯ.

Таким образом, в процессе локализации средствами микроволнового ДЗ атмосферы обнаруживают зоны ОМЯ и определяют их местоположение в заданной системе координат. В ряде случаев можно оценить также и степень интенсивности ОМЯ.

Когда говорят о локализации опасных для полетов зон бортовыми радиолокационными средствами, имеют в виду их оперативное обнаружение и определение местоположения с помощью метеонавигационных радиолокаторов (МНРЛС) и других бортовых устройств, которые могут быть сопряжены с МНРЛС.

## 8.8. РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ОБРАЗОВАНИЙ

### 8.8.1. Радиолокационная отражаемость

Радиолокационное зондирование облаков и осадков, как и других объектов радиолокационного наблюдения, с энергетической точки зрения описывают уравнением радиолокации [27]. Облака и осадки состоят из большого количества частиц – капель и кристаллов, которые выпадают или «висят» в воздухе. Такие частички называют гидрометеорами. Они являются рассеивателями электромагнитного излучения. Радиолокатор облучает одновременно большое количество рассеивателей, совокупность которых в позволяющем объеме  $V$  воспринимается как единая цель. Средняя мощность принятого сигнала пропорциональна радиолокационной отражаемости (РО), которая целиком определяется микроструктурой самого метеорологического образования.

Объединив все характеристики радиолокатора единым параметром  $C$ , который имеет смысл энергетического потенциала данного радиолокатора, уравнение радиолокации метеорологических объектов в сокращенном виде [40] записывается как

$$\bar{P}_{np} \approx \frac{C \cdot Z}{R^2} |K|^2, \quad (8.25)$$

где  $C = \text{const}$ ;  $R$  - расстояние от РЛС до объекта;  $K$  - комплексный показатель преломления вещества рассеивателей. Из выражения (8.25) вытекает, что измеряя  $P_{np}$ , можно оценивать РО метеорологического объекта. РО очень сильно зависит от диаметра капель (шестая степень). Ее принято измерять в  $[\text{мм}^6/\text{м}^3]$ . Диапазон значений РО, которые встречаются в облаках и осадках, очень большой. Поэтому РО удобно представлять в логарифмических единицах. Часто РО выражают в так называемых "дебесетах" (dBZ), причем  $1\text{dBZ} = 10 \lg Z$ , где  $Z$  выражен в  $[\text{мм}^6/\text{м}^3]$ .

Величина РО является важным информативным параметром (ИП), который интегрально характеризует опасность метеорологического объекта для авиации.

### 8.8.2. Параметры доплеровского спектра

Рассеиватели, формирующие отраженный сигнал, двигаются в позволяющем объеме. Скорость капли относительно радиолокатора в произвольный момент времени образуется под действием нескольких сил. По крайней мере, капля падает вертикально вниз под действием силы гравитационного притяжения, на нее действует ветер и, в особенности в



случае бортового радиолокатора, присутствует составляющая скорости, вызванная движением носителя радиолокатора – самолета или вертолета. Вследствие эффекта Доплера сигнал обратного рассеяния, характеризуется частотным сдвигом относительно зондирующего колебания. В случае зондирования реального метеорологического объекта принятый сигнал формируется от множества рассеивателей, находящихся в позволяемом объеме. Поскольку эти рассеиватели двигаются относительно радиолокатора с разными скоростями, и каждый из них создает свой доплеровский сдвиг, то принятый сигнал содержит целый спектр доплеровских частот.

С использованием эффекта Доплера связаны различные методы радиолокационного получения информации о динамических процессах, происходящих в облаках и осадках. В практике микроволнового ДЗ облаков и осадков при интерпретации данных широко пользуются понятием доплеровского спектра (ДС). Это название обязано тому, что спектр эхо-сигнала от гидрометеоров образуется совокупностью доплеровских частот, которые связаны с радиальными скоростями рассеивателей. Понятие ДС учитывает не только распределение радиальных скоростей рассеивателей, но и энергетическую сторону формирования рассеянного сигнала ансамблем хаотически движущихся частичек. Это выражается, прежде всего, в том, что мощность отраженного сигнала зависит от эффективной площади рассеяния (ЭПР) частички, в то время как доплеровский сдвиг частоты зависит от радиальной скорости этой частички. Поэтому скорости частичек с большой ЭПР, вносят больший вклад в ДС, чем скорости частичек, которые имеют меньшую ЭПР.

Как аргумент ДС часто используется не частота  $f$ , а доплеровская скорость, или радиальная скорость рассеивателей  $v$ . Ясно, что при постоянной частоте излучаемых колебаний доплеровская скорость и доплеровская частота однозначно связаны соотношением  $f=2v/\lambda$ . Однако величина  $v$  как аргумент спектральной функции носит более общий характер, поскольку она не зависит от несущей частоты сигнала радиолокатора.

Таким образом, ДС сигнала, отраженного от облаков и осадков, является взвешенным распределением радиальных скоростей рассеивателей. Весы доплеровских скоростей (или доплеровских частот) зависят от отражающей способности рассеивателей, которые двигаются с соответствующими скоростями. Отражаемость капель очень сильно зависит от их размеров. Поэтому если в позволяющем объеме имеются несколько больших капель, то их скорости в ДС могут играть большую роль, чем скорости мелких капель, хотя количество последних во много раз больше.

На самом деле веса скоростей (или частот) ДС зависят не только от отражающей способности соответствующих рассеивателей, но также от формы ДН антенны, формы

зондирующих импульсов и отклика приемника на эти импульсы. Это можно учесть с помощью весовой функции по дальности, которая в импульсной РЛС зависит от огибающей зондирующего импульса, и весовой функции по угловым координатам, которая, по сути, повторяет форму главного лепестка ДН антенны по мощности. При упрощенном определении ДС [40] учитывают только веса, связанные с отражающей способностью капель. Весовые функции подробно рассмотрены в [49], а оценка влияния реальной формы ДН на параметры спектра дана в [32].

Математическое выражение ДС учитывает ЭПР капли  $\sigma(D)$ , которое зависит от диаметра капель, и количество капель данного диаметра в единице объема, который задается распределением капель по размерам  $N(D)$ . Если известна плотность распределения радиальной скорости капли диаметра  $D$ , то ДС можно определить формулой

$$S_v(v) \sim \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} p(v/D) \sigma(D) N(D) dD \quad (8.26)$$

с интегрированием по всем размерам капель от наименьших  $D_{\min}$  до наибольших  $D_{\max}$ .

Ключевым компонентом ДС в форме (8.26) является условная плотность распределения радиальной скорости капли  $p(v/D)$ , которая связана с инерционностью капли [34]. На рис. 8.38, заимствованном из [40], представлены распределения  $p(v/\varepsilon, \theta)$  при слабой турбулентности  $\varepsilon = 1 \text{ см}^2/\text{с}^3$  (штриховая линия) и сильной турбулентности  $\varepsilon = 100 \text{ см}^2/\text{с}^3$  (сплошная линия) для двух моделей зондирования: вертикальное зондирование ( $\theta=90^\circ$ ) и зондирование при наклоне антенны на угол  $\theta=20^\circ$  относительно горизонта.

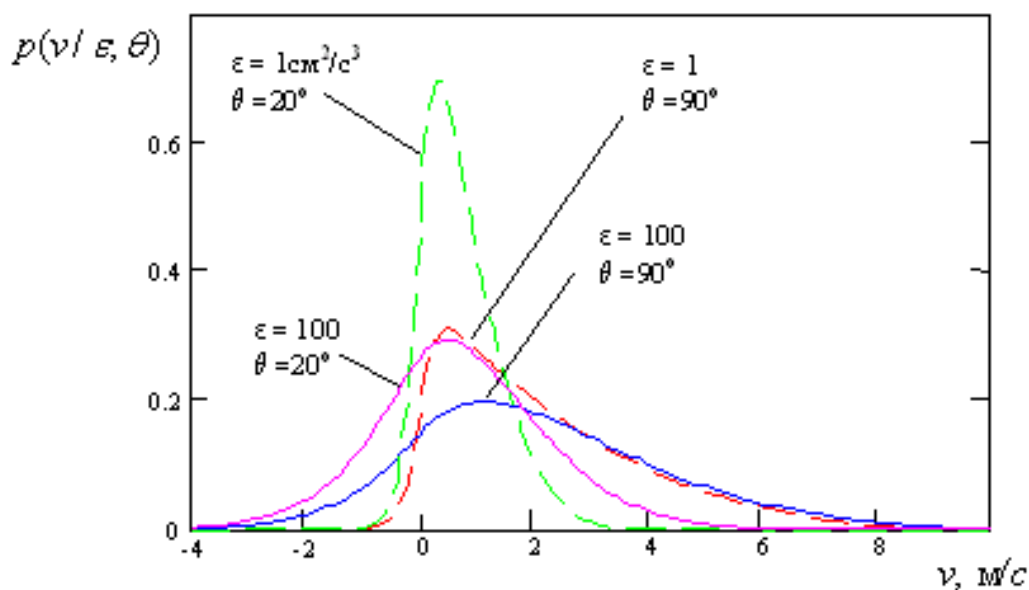


Рис. 8.38. Плотности вероятностей радиальной скорости капель дождя при разных интенсивностях турбулентности и углах наклона антенны.

Из графиков видно, что распределения при  $\theta=90^\circ$  располагаются правее распределений при  $\theta=20^\circ$ . Это вызвано тем, что проекция скорости падения капель на луч (радиальная скорость) максимальна, когда антенна направлена вертикально вверх. Распределения, которые соответствуют сильной турбулентности ( $\varepsilon = 100 \text{ см}^2/\text{с}^3$ ), значительно шире распределений, соответствующих слабой турбулентности ( $\varepsilon = 1 \text{ см}^2/\text{с}^3$ ). Расширения спектра из-за турбулентности больше при малых углах наклона антенны ( $\theta = 20^\circ$ ), чем при больших углах наклона ( $\theta=90^\circ$ ). Положительные скорости (в направления на радиолокатор) более вероятны при зондировании вертикально вверх. Вероятность отрицательных скоростей повышается при повышении интенсивности турбулентности.

При реальных измерениях мощность принятых сигналов и амплитуды спектральных составляющих, которые являются результатом преобразования Фурье принятых временных реализаций, зависят от энергетического потенциала и других параметров радиолокатора. Поэтому при расчетах удобно вынести все сомножители, которые не зависят от  $D$ , за знак интеграла и ввести такое нормирование, чтобы площадь под спектральными кривыми равнялась РО:  $\int S_v(v)dv = Z$ . Тогда

$$S_v(v, \varepsilon) = \zeta \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} p(v/D, \varepsilon) D^6 N(D) dD, \quad (8.27)$$

где  $\zeta$  - множитель, зависящий от  $\lambda$ ,  $|K|^2$ , параметров радиолокатора и нормирования.

Некоторые другие метеорологические явления и процессы ДЗ также могут влиять на ДС. К ним относятся сдвиг ветра, изменения ориентации и вибрации гидрометеоров, движение луча антенны, поступательное движение самолета. Поэтому процессы формирования реальных ДС более сложны, чем рассмотренные модели.

Влияние движения носителя РЛС (самолета) на спектр принятого сигнала состоит в том, что, во-первых, ДС будет смещен вправо в соответствии с проекцией скорости самолета на луч, а во-вторых, спектр получит дополнительное расширение. Движение луча антенны также приводит к расширению спектра. Эти эффекты рассмотрены в [40]. Они могут быть учтены или скомпенсированы при обработке сигналов.

Для расчета средней скорости и ширины ДС удобно пользоваться нормированным спектром:  $S_v(v) / \int_{-\infty}^{\infty} S_v(v) dv$ . Если удельная ЭПР однородна по объему или если ЭПР и скорость капли являются некоррелированными величинами, то нормированная спектральная плотность пропорциональна распределению вероятностей радиальных скоростей. Важно отметить, что при нормировании теряется информация, которая содержится в амплитудных характеристиках отраженного сигнала. Полную информацию из сигнала доплеровского

радиолокатора можно извлечь, работая со спектрами, которые сохраняют энергетические особенности отраженного сигнала. Поэтому основными параметрами ДС являются его моменты:

- нулевой момент, который является ничем другим как РО данного позволяющего объема метеорологического объекта:

$$\int_{-\infty}^{\infty} S_v(v)dv = Z ; \quad (8.28)$$

- первый начальный момент, который определяет среднюю доплеровскую скорость:

$$\frac{1}{Z} \int_{-\infty}^{\infty} vS_v(v)dv = \bar{v} ; \quad (8.29)$$

- второй центральный момент, который определяет дисперсию доплеровской скорости:

$$\frac{1}{Z} \int_{-\infty}^{\infty} (v - \bar{v})^2 S_v(v)dv = \sigma_v^2 . \quad (8.30)$$

По своей сути параметр  $\sigma_v$  является взвешенным среднеквадратичным отклонением радиальных скоростей рассеивателей от их взвешенной средней радиальной скорости. Из формулы (8.28) вытекает тесная связь между измерениями РО по временным реализациям путем их усреднения для оценки средней мощности принятого сигнала и измерениями ненормированных спектров. Фактически РО, будучи нулевым моментом спектра используется в формулах (8.29) и (8.30) в качестве нормирующего делителя. Параметры ДС содержат очень важную информацию, об опасности исследуемого отражающего объема и совокупности отражающих объемов при зондировании метеорологического объекта.

### 8.8.3. Поляризационные параметры

Поляризационные радиолокаторы отличаются переменной поляризацией зондирующего и/или принятого сигнала, а также обеспечивают прием двух ортогонально поляризованных радиоволн. Это дает возможность дистанционно определять такие характеристики гидрометеоров, как размеры, форму, пространственную ориентацию и термодинамическое состояние. Поляризационные характеристики отдельного гидрометеора имеют фундаментальное значение. Эти характеристики описываются с помощью матрицы обратного рассеяния [S], которая связывает электрическое поле обратного рассеяния в антенне с падающим электрическим полем [49].

Учитывая практическое значение линейной ортогональной поляризации, рассмотрим лишь линейный ортогональный поляризационный базис, указав, что результаты имеют силу

и для любого другого ортогонального поляризационного базиса. Связи между параметрами отражателей и измеряемых величин обычно являются нелинейными, а также завуалированными интегралами математических ожиданий. Поэтому специалисты используют специальные комбинации измеряемых величин, чтобы исключить какие-то характеристики свойств гидрометеоров и выделить другие. Некоторые поляриметрические измеряемые переменные, полученные из параметров ковариационной матрицы обратного рассеяния, указанные ниже.

Радиолокационная отражаемость (РО) при горизонтальной ( $h$ ) и вертикальной ( $v$ ) поляризациях

$$Z_h = \frac{4\lambda^4}{\pi^4 |K|^2} \langle |s_{hh}|^2 \rangle, \quad Z_v = \frac{4\lambda^4}{\pi^4 |K|^2} \langle |s_{vv}|^2 \rangle, \quad (8.31)$$

где  $s_{ij}$  – элементы матрицы  $[S]$ , а индексы означают поляризацию, причем первый индекс характеризует поляризацию принятой составляющей сигнала, а второй – зондирующего колебания.

Дифференциальная отражаемость (ДО)

$$Z_{DR} = 10 \log \frac{|s_{hh}|^2}{|s_{vv}|^2}. \quad (8.32)$$

Линейное деполаризационное отношение (ЛДО)

$$LDR_{hv} = 10 \log \frac{|s_{hv}|^2}{|s_{vv}|^2} \text{ або } LDR_{vh} = 10 \log \frac{|s_{vh}|^2}{|s_{vv}|^2}. \quad (8.33)$$

Взаимный корреляционный коэффициент при нулевом сдвиге

$$\rho_{hv}(0) = \frac{\langle s_{vv} s_{hh}^* \rangle}{\langle |s_{hh}|^2 \rangle^{\frac{1}{2}} \langle |s_{vv}|^2 \rangle^{\frac{1}{2}}}. \quad (8.34)$$

Кроме этих пяти измеряемых переменных могут быть использованные и другие, например, удельная дифференциальная фаза, которая представляет собой относительную разность фаз сигналов на ортогональных поляризациях.

После сделанных определений и введения измеряемых параметров, которые учитывают поляризационные особенности сигналов, рассмотрим физическую сторону поляриметрического зондирования метеорологических объектов. В пунктах 8.9.3.1 и 8.9.3.2 не оговаривалась форма рассеивателей. По сути, рассматривались частички сферической формы, так как поляризационные эффекты не принимались во внимание. Однако большинство типов осадков содержат несферические частички. Капли дождя сплюснутые, ледяные кристаллы – вытянутые или сплюснутые, снежинки имеют сложную форму. На рис.

8.39. приведенные фотографии реальных капель дождя разных размеров, из которых ясно видно, что чем крупнее капля, тем больше ее форма отличается от сферы.



Рис. 8.39. Типичные формы падающих капель дождя.

Обратное рассеяние на несферических частичках зависит от поляризации зондирующего сигнала. Поэтому путем изменения поляризационных характеристик антенн и специальной обработки сигналов можно получить информацию о форме гидрометеоров. При использовании поляризационных характеристик появляются дополнительные возможности улучшения качества идентификации типа гидрометеоров, а также повышается точность оценки интенсивности осадков.

Для того чтобы учесть несферичность гидрометеоров, их форма моделируется сплюснутыми или вытянутыми эллипсоидами. В частном случае при равенстве двух из трех осей эллипсоида он превращается в сфероид. В книге [40] с привлечением результатов [78] детально рассмотрены ЭПР сфероида в положении без наклона и с наклоном с учетом поляризационных эффектов. ЭПР сфероида можно записать в виде:

$$\sigma_{ri} = \frac{k_o^2}{4\pi} V^2 (\varepsilon_r - 1)^2 q_{ri} , \quad (8.35)$$

где индексы  $r$  и  $i$  при  $\sigma$  означают поляризацию отраженной и падающей волн соответственно,  $V$  – объем частицы,  $\varepsilon_r$  – относительная диэлектрическая проницаемость частицы, а  $q_{ri}$  – коэффициент, который зависит от формы и ориентации сфероида [40]. В случае обратного рассеяния на сфере из (8.35) можно получить оценку, которая совпадает с выражением для релеевского рассеяния на сферической частице [27].

Когда частичка наклонена, т. е. ее ось симметрии находится под углом  $\delta$  к вертикали, рассеянный сигнал содержит кросс-поляризационную (перекрестную) составляющую. Это лишь одно из проявлений связи поляризационных параметров с ориентацией частичек. Связь поляризационных параметров с характеристиками метеорологических образований базируется на том, что они очень чувствительны к форме и ориентации частиц. Не углубляясь в теорию, приведем результаты расчетов с помощью математических моделей, адекватность которых проверенная экспериментально [80]. Эти результаты иллюстрируют связи параметров поляризации радиолокационного сигнала с характеристиками гидрометеоров.



Угол  $\delta$  наклона частиц в облаках и осадках является случайной величиной и характеризуется распределением значений  $\delta$ . При условии гауссового распределения  $p(\delta)$  с нулевым средним и дисперсией  $\sigma_\delta$  зависимость ДО  $Z_{DR}$  от эквивалентного диаметра каплей  $D$ , т. е. диаметра сферы, объем которой равен объему несферической капли, приведены на рис. 8.40. для разных углов наклона антенны в вертикальной плоскости при  $\sigma_\delta = 10^\circ$ . Из графиков видно, что при зондировании в вертикальном направлении ( $\theta = 90^\circ$ ) зависимость от диаметра отсутствует и ДО близка к нулю.

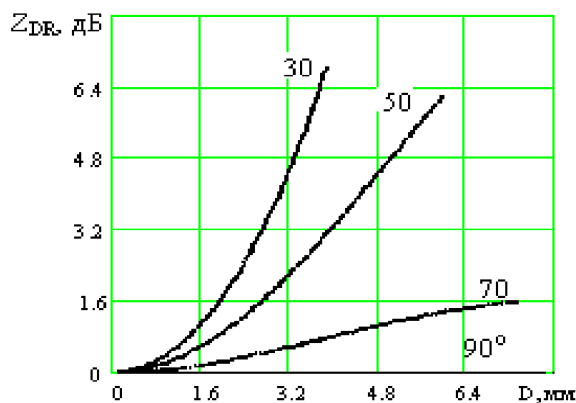


Рис. 8.40. Зависимость дифференциальной отражаемости от диаметра частиц при разных углах наклона антенны.

Это объясняется тем, что капли сплюснены в вертикальной плоскости и их проекциями являются круги. При наклоне антенны ДО  $Z_{DR}$  возрастает, так как проекция капли на плоскость, перпендикулярную лучу, отличается от круга, то есть сигналы с ортогональными поляризациями рассеиваются по-разному. Чем больше  $D$ , тем более отличается капля от сферы – тем больше  $Z_{DR}$ . Зависимость ДО от диаметра частиц при постоянном угле наклона антенны ( $60^\circ$ ), но при разных значениях дисперсии угла наклона частиц ( $\sigma_\delta = 1; 10; 30; 50$  град.) приведена на рис. 8.41.

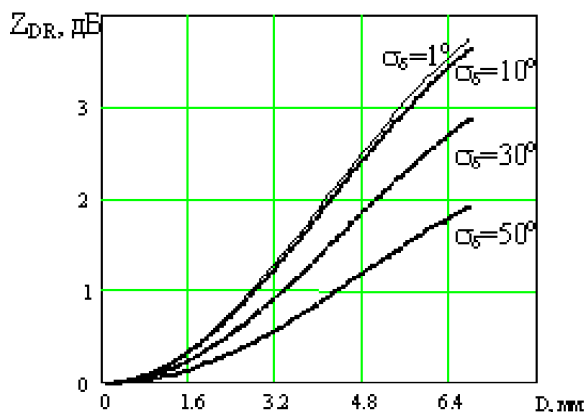


Рис. 8.41. Зависимость дифференциальной отражаемости от диаметра частиц при разных значениях угла наклона частиц.

Анализ этого графика показывает, что рост дисперсии углов наклона несферических частиц, а значит, повышение вероятности отклонения их от нормального положения падающей капли, нивелирует обычную зависимость  $Z_{DR}(D)$ . При увеличении дисперсии  $\sigma_\delta$  кривые становятся более пологими. В реальных условиях большой разброс углов  $\delta$  наклона частиц может быть вызван динамическими процессами такими, как турбулентность, сдвиг ветра, торнадо.

В случае несферических твердых частиц, таких как градины или снежинки, рассеяние на разных поляризациях будет разным вследствие их несимметричности. Кроме того, может появиться существенная кросс-поляризационная составляющая, то есть отражение на ортогональной поляризации относительно поляризации падающей волны.

Расчеты проводились для капель дождя при наклоне антенны  $30^\circ$  для разных значений дисперсии углов ориентации частичек  $\sigma_\delta$ . Наблюдается возрастание величины  $L_{DR}$  как функции эквивалентного диаметра капли  $D$ , причем более хаотичная ориентация частиц (большое значение  $\sigma_\delta$ ) ведет к возрастанию ЛДО. Таким образом, турбулентность, очевидно, влияет на параметры  $Z_{DR}$  и  $L_{DR}$  противоположным чином. Вероятно, что одновременное измерение  $Z_{DR}$  и  $L_{DR}$  может дать более определенную информацию о микрофизических характеристиках гидрометеоров в исследуемом объеме облака. Из приведенных формул и результатов расчетов вытекает, что ДО чутко реагирует на изменение размеров частиц при углах наклона антенны отличных от  $90^\circ$ . ЛДО возрастает при увеличении разброса углов наклона частиц несферической формы.

На самом деле ситуация еще более сложна, поскольку речь идет о рассеянии на ансамбле частиц с учетом их распределения по размерам и ЭПР. Не углубляясь далее в теоретические вопросы, перейдем к практической оценке поляризационных параметров.

Наиболее простыми являются такие три схемы измерений:

1. Передатчик и приемник настроены на горизонтальную поляризацию:  $\vec{e}_r = \vec{e}_i = \vec{e}_h$ .
2. Передатчик и приемник настроены на вертикальную поляризацию:  $\vec{e}_r = \vec{e}_i = \vec{e}_v$ .
3. Передатчик излучает горизонтально поляризованный сигнал, а приемник принимает только вертикально поляризованную компоненту отраженного сигнала:  $\vec{e}_r = \vec{e}_v \cap \vec{e}_i = \vec{e}_h$ .

Схемы 1 и 2 относятся к со-поляризационным измерениям. Схема 3 представляет кросс-поляризационные измерения. Для управления поляризацией радиолокационного сигнала используют антенны с управляемой поляризацией. Известны два основных типа поляриметрических РЛС – одноканальные и двухканальные. Двухканальные РЛС, в которых

каждый из ортогональных компонентов сигнала обрабатывается параллельно в своем канале, позволяет быстрее получить необходимую совокупность поляризационных параметров. Однако точная работа двухканальной РЛС связана с необходимостью поддержания строгой идентичности каналов. Иначе поляризационные отличия могут оказаться не следствием особенностей облаков и осадков, а быть вызваны расхождениями критических характеристик параллельных каналов ортогональных поляризаций. Одноканальные РЛС лишены этого недостатка (если не учитывать, что измерения на разных поляризациях проводятся с интервалом в период модуляции зондирующего сигнала), но требуют вдвое больше времени для излучения и приема необходимого набора сигналов для оценки измеряемых поляризационных параметров.

Технические аспекты построения устройств с необходимыми характеристиками касаются также проблемы идентичности ДН антенн при изменении поляризации и развязки основных и перекрестных составляющих поляризованных сигналов. Антенны с управляемой поляризацией, которые обеспечивают необходимые технические характеристики, вполне реализуемы в бортовых МНРЛС. Конкретные разработки таких антенн известны [37]. С их помощью можно делать поляризационные измерения с достаточной для практики точностью.

Чаще всего измеряют радиолокационную отражаемость (РО) при разных поляризациях  $Z_h$ ,  $Z_v$ ,  $Z_{hv}$ , ДО  $Z_{DR} = 10 \lg(Z_{hh}/Z_{vv})$ , реже ЛДО  $L_{DR} = 10 \lg(Z_{hv}/Z_{vv})$  или  $L_{DR} = 10 \lg(Z_{vh}/Z_{vv})$ . Заметим, что  $L_{DR}$  обычно является довольно малой величиной, и ее измерения с необходимой точностью вызывают определенные трудности.

#### **8.8.4. Доплеровско-поляриметрические характеристики**

Отдельного обсуждения заслуживает вопрос применения поляриметрических измерений в когерентных радиолокаторах. Когерентно-импульсные радиолокаторы, а также когерентные радиолокаторы непрерывного излучения с частотной модуляцией, которые имеют технические устройства для управления поляризацией на передачу и на прием и позволяют проведение как доплеровских, так и поляриметрических измерений, называются доплеровско-поляриметрическими радиолокаторами. Такие радиолокационные системы имеют значительно большие информационные возможности, однако и интерпретация данных таких систем существенно сложнее. В настоящее время известны лишь результаты исследовательских работ по измерению турбулентности, интенсивности осадков и других метеорологических характеристик доплеровско-поляриметрическими РЛС наземного базирования [49], [80].

На рис. 8.42 приведены примеры [40] расчетов ДС при горизонтальной  $S_{hh}(v)$  и вертикальной  $S_{vv}(v)$  поляризациях. Ясно, что для каждого спектра можно рассчитать или получить путем измерений оценки параметров ширины ДС  $\sigma_{hh}$ ,  $\sigma_{vv}$ ,  $\sigma_{hv}$ , РО при разных комбинациях поляризации на передачу и прием  $Z_{hh}$ ,  $Z_{vv}$ ,  $Z_{hv}$ , средних скоростей  $\bar{V}_{hh}$ ,  $\bar{V}_{vv}$ ,  $\bar{V}_{hv}$  и т.п. Справедливо предположить, что совокупности таких параметров содержат больше информации, чем каждый из них в отдельности, но наибольший интерес вызывают спектральные поляризационные параметры, которые формируются путем совместной обработки двух или больше доплеровско-поляриметрических спектров.

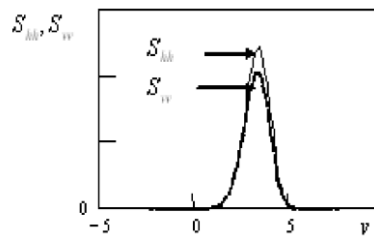


Рис. 8.42. Модели доплеровских спектров при двух поляризациях.

В работах [81], [75] введенные параметры, похожие на ДО  $Z_{DR}$ , и ЛДО  $L_{DR}$ , но в отличие от этих интегральных параметров, которые являются числами для данного позволяющего объема, новые параметры являются функциями. Эти функции вводятся как

$$Z_{DR}(v) = 10 \lg \frac{S_{hh}(v)}{S_{vv}(v)}; \quad L_{DR}(v) = 10 \lg \frac{S_{hv}(v)}{S_{vv}(v)} \quad (8.36)$$

и называются соответственно спектральная ДО (СДО) и спектральное ЛДО (СЛДО).

Интерпретация доплеровско-поляриметрических спектральных параметров – сложная задача, но эти параметры имеют большой информационный потенциал. Рассмотрим, например, один из простейших метеорологических объектов – дождь. Дождевые капли имеют два свойства, которые являются важными для интерпретации СДО и СЛДО. Во-первых, чем больше диаметр капли, тем ее форма больше отличается от сферы. Во-вторых, капли с большим эффективным диаметром  $D$  падают быстрее, так как постоянная скорость падения формируется как баланс силы притяжения земли и силы сопротивления воздуха (закон Стокса). Поэтому при зондировании зоны осадков под некоторым углом в вертикальной плоскости характеристики СДО и СЛДО как функции скорости  $v$  должны возрастать (большая скорость отвечает большому диаметру, то есть большей деформации капли по сравнению со сферой). Этот логический вывод иллюстрируется результатами расчетов, которые показанные на рис. 8.43.

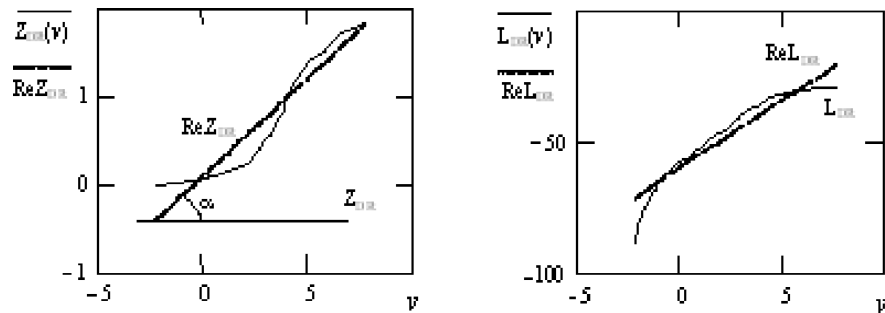


Рис. 8.43. Спектральные ДО и ЛДО как функции доплеровской скорости капель.

Пунктирные прямые – это линейные регрессии ( $ReZ_{DR}$  и  $ReL_{DR}$ ), построенные методом наименьших квадратов. Тангенс угла  $\alpha$  наклона прямой  $ReZ_{DR}$  к оси абсцисс обозначим  $SlpZ_{DR}=tg\alpha$ . Эта величина является одним из доплеровско-поляризационных ИП. Турбулентность атмосферы, действуя на капли, нарушает их установившуюся скорость и нормальную ориентацию. Это частично нивелирует характерную зависимость, показанную на рис. 8.43. Результаты расчетов СДО при разных значениях интенсивности турбулентности, которая задается параметром  $\varepsilon$ , показаны на рис. 8.44.

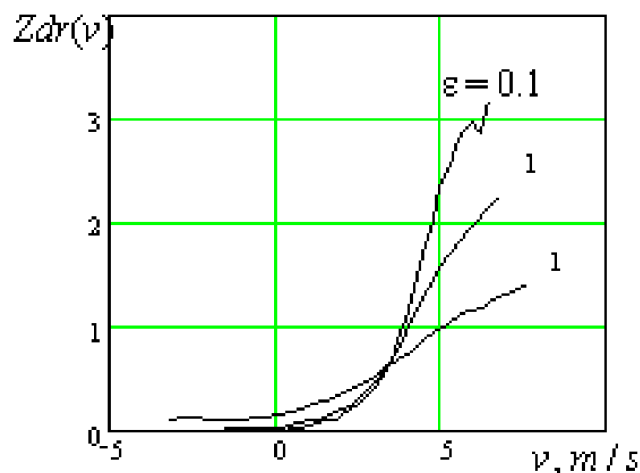


Рис. 8.44. Функции спектральной дифференциальной отражаемости (СДО) при трех значениях интенсивности турбулентности.

Кривая при  $\varepsilon = 0,1$  соответствует практически отсутствию турбулентности. Следующие две кривые представляют две градации слабой турбулентности. Эти результаты свидетельствуют о довольно высокой чувствительности параметра  $SlpZ_{DR}$  к интенсивности турбулентности. Таким образом, доплеровско-поляризационные ИП отличаются чувствительностью как к особенностям формы и ориентации частиц (подобно поляризационным параметрам), так и к динамике рассеивателей, которая определяется турбулентностью, сдвигом ветра и другими факторами. Доплеровско-поляризационные методы являются перспективными для оперативных метеорологических радиолокаторов следующих поколений.

## 8.9. МЕТОДЫ ОБНАРУЖЕНИЯ ЗОН ОПАСНЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ

### 8.9.1. Ливни

Кучево-дождевые облака, которые сопровождаются ливневыми осадками, иногда называют ливневыми облаками. Ливневые облака и дожди хорошо обнаруживаются средствами радиолокации сантиметрового диапазона. Метеорологические образования могут иметь разнообразную микроструктуру. Вследствие высокой чувствительности РО к размерам капель диапазон РО в облаках и осадках очень большой. Данные об отражаемости  $Z$  облаков разных типов приведенные в [22]. Среди недождевых облаков наибольшая отражаемость в среднем присуща мощно-кучевым облакам. Все дождевые облака характеризуются еще большими значениями РО. В грозовых и градовых облаках РО может достигать  $10^7$  мм<sup>6</sup>/м<sup>3</sup>.

Интенсивность осадков  $I$  измеряют в единицах толщины слоя воды, которая выпадает в единицу времени (миллиметр в час). Величина  $I$  зависит от распределения капель по размерам и скорости их падения относительно земли. Поскольку свойства метеорологических образований также связаны с распределением размеров капель  $N(D)$ , то их можно связать и с интенсивностью осадков. Отражаемость осадков  $Z$  как функцию их интенсивности  $I$  приблизительно можно выразить эмпирической зависимостью

$$Z=A I^b. \quad (8.37)$$

В умеренных широтах для дождя в среднем  $A=200$  и  $b=1,6$ , а для снега  $A=2000$  и  $b=2$ . Интенсивность снегопадов обычно находится в пределах 0,01...5 мм/ч. Дожди имеют более широкий диапазон значений интенсивности  $0,1 < I < 150$  мм/ч. Комбинируя (8.37) и (8.25), можно рассчитать дальность обнаружения дождя заданной интенсивности с помощью радиолокатора с известными параметрами.

Основной способ обнаружения опасных ливневых осадков состоит в измерении РО ( $Z$ ), которая связана с интенсивностью дождя. Обычно РО оценивается по сечению метеорологического образования в горизонтальной или в вертикальной плоскости. Если интенсивность осадков или РО превышает установленный пороговый уровень, то принимается решение об опасности данного метеорологического образования с точки зрения интенсивности осадков. Национальное бюро погоды США применяет классификацию интенсивности осадков и их РО [17], представленную в табл. 8.6.

В правом столбце указан цвет, которым обычно отображается соответствующая зона на экране метеорологического радиолокатора в режиме обнаружения интенсивных осадков.

Таблица 8.6

Классификация интенсивности осадков и соответствующие значения радиолокационной отражаемости

Характеристика осадков	Интенсивность осадков, мм/ч	Радиолокационная отражаемость, Z		Цвет отображения
		мм <sup>6</sup> /м <sup>3</sup>	дБZ	
Слабые	0,76 - 3,8	$(1,3 - 17) \cdot 10^2$	21 - 32	Зеленый
Умеренные	3,8 - 12,7	$(1,7 - 12) \cdot 10^3$	32 - 41	Желтый
Сильные	12,7 - 50,8	$(1,2 - 11) \cdot 10^4$	41 - 50	Красный
Интенсивные	50,8 - 204	$(1,1 - 10) \cdot 10^5$	50 - 60	Фуксин

Для надежной оценки опасности осадков необходимо довольно точно измерять РО. Погрешности измерения РО зависят от многих инструментальных, системных и случайных факторов. В частности, на эти погрешности влияют: неточность временной автоматической регулировки усиления (ВАРУ); неточность компенсации ослабления радиоволн; системные погрешности, связанные с приемом отражений от земной поверхности по основному и боковым лепесткам; длина волны (за счет возможного отклонения характера рассеяния от модели Релея и особенностей распространения радиоволн); неточность калибровки радиолокатора; флуктуации сигнала; изменчивость микроструктуры метеорологических объектов.

Оценка требований к точности измерения РО сделана в [40]. Там показано, что для обеспечения погрешности измерения интенсивности осадков не выше 10%, необходимо измерять РО с погрешностью, которая не превышает 16%. Методами повышения точности оценки РО являются осреднение сигнала, снижение уровня боковых лепестков, коррекция по дальности, компенсация ослабления радиоволн, калибровка радиолокационной системы.

**Осреднение принятого сигнала.** Вопрос состоит в том, сколько реализаций или какое время необходимо для оценивания средней мощности. При условии, что амплитуда подчиняется распределению Релея, а мощность – экспоненциальному распределению, в работе [2] оценено влияние осреднения сигнала на распределение его значений и на точность оценки РО. При осреднении по 25 независимым импульсам и доверительной вероятности 0,95 измеренное среднее будет находиться в интервале 40% от истинного среднего. Поскольку такие погрешности имеют тот же порядок, что и другие случайные погрешности, а также учитывая, что дальнейшее повышение точности оценки истинной средней мощности

требует значительно большего количества независимых выборок (пропорционально  $k^2$ ), то при экспериментальных измерениях мощности эхо-сигналов от осадков можно требовать приблизительно  $k=25$  независимых импульсов.

**Коррекция сигнала по дальности.** Из уравнения (8.25) вытекает, что мощность принятых сигналов, отраженных от метеообразований с одинаковой РО, обратно пропорциональна квадрату их дальности. Облака, которые имеют одинаковую РО  $Z$ , но находятся на разных расстояниях от радиолокатора, создадут на входе приемника разную мощность. Для количественного определения опасности метеообъектов по их РО  $Z$  необходима коррекция сигнала по дальности. Компенсация зависимости сигнала от дальности при измерении РО осуществляется методом ВАРУ приемника. Система ВАРУ изменяет усиление приемника в зависимости от расстояния  $R$  в соответствии с уравнением (8.25). Согласно [17], максимальная дальность действия ВАРУ бортового метеорологического радиолокатора должна быть не меньше 0,25 от максимальной дальности обнаружения метеообразований, обусловленной показателем потенциала или не меньше 130 км. График градуировки ВАРУ можно построить путем введения начальных отсчетов дальности  $R_0$  и мощности  $P_0$ , как показано в [31]. Схемы ВАРУ, которые работают по принципу снижения чувствительности приемника, в некоторых случаях могут привести к нежелательному подавлению сигналов, отраженных от слабых осадков. Для устранения этого недостатка разрабатывают более изощренные алгоритмы ВАРУ [18].

**Коррекция сигнала по ослаблению.** Необходимость учета ослабления радиоволн при оценке опасности облаков и осадков, расположенных за другими метеообъектами, очевидна. Однако корректная компенсация ослабления является сложной технической задачей. Национальный Комитет по безопасности перевозок США - National Transportation Safety Board (NTSB) опубликовал результаты расследования авиационных катастроф, связанных с некорректной работой бортовых радиолокаторов. Причиной одной из них явилось затухание радиолокационных сигналов 3 см диапазона в атмосферных осадках, что ограничило возможность определения с помощью МНРЛС фактической протяженности и интенсивности опасной зоны, из-за чего экипаж продолжал полет в зону сильного дождя. Это привело к тому, что оба двигателя заглохли из-за засасывания значительных масс воды. В 1975 году при подобных обстоятельствах, из-за потери мощности обоих двигателей потерпел крушение самолет DC-9. Погибло 63 человека. В данном случае NTSB установил, что потеря тяги была вызвана попаданием в компрессор двигателей значительной массы воды и града. Самолет DC-9 вошел в зону осадков интенсивностью более 50 мм/ч с верхней кромкой  $C_b$  выше 12000 м. В отчете NTSB отмечалось, что на данные радиолокатора, который работает в 3 см диапазоне, существенно влияет ослабление радиоволн в водяных



парах и атмосферных осадках. Если пилот не учитывает это ограничение, он может неправильно истолковать изображение на экране индикатора. Из этого был сделанный вывод, что самолетный метеорадиолокатор (без компенсации затухания) следует использовать только как средство избежания попадания в зону сложных метеоусловий, а не как устройство для прохождения из-за зоны гроз. Поэтому в современных МНРЛС обязательно предусматривают компенсацию ослабления радиоволн. Для сантиметрового диапазона ослаблением атмосферными газами можно практически пренебречь, но ослабление в облаках и осадках должно обязательно учитываться. Известны разные аппроксимации эмпирических зависимостей между интенсивностью осадков и ослаблением радиоволн в них. В [57] используется уравнения  $L_2 = 2,9 \cdot 10^{-4} \cdot Z^{0,72}$ , где  $L_2$  – одностороннее ослабление в дожде, дБ/км;  $Z$  – РО, мм<sup>6</sup>/м<sup>3</sup>.

Принцип коррекции по ослаблению состоит в изменении амплитуды по закону, который зависит от измеренных значений РО в элементах дальности. Таким образом, устройство компенсации ослабление по своей сути является адаптивным [40].

### 8.9.2. Турбулентность

Существует несколько подходов к обнаружению зон опасной турбулентности (ЗОТ) в облаках и осадках, а также в ясном небе (ТЯН). ЗОТ в облаках и осадках обнаруживаются с помощью микроволновых радиолокаторов. Чаще всего используют радиолокаторы сантиметрового диапазона. ТЯН можно обнаружить лазерными локаторами (лидарами), а также радиолокаторами дециметрового диапазона с высоким энергетическим потенциалом.

**Связь радиолокационной отражаемости (РО) с турбулентностью.** Механизм корреляционной связи между РО и турбулентностью в облаках и осадках состоит в том, что турбулентность и восходящие потоки способствуют образованию крупных капель. А размеры капель и количество больших капель определяют величину РО. Поэтому высокая РО является косвенным признаком ЗОТ. Можно вообразить себе следующую модель образования и роста капель. При определенных условиях (температура, влажность, давление) первые капельки образуются за счет конденсации воды, которая находится в парообразном состоянии, на мелких частичках – ядрах конденсации, которых всегда много в тропосфере. Только что образовавшиеся капельки – очень маленькие и имеют слабую РО. Однако процесс конденсации продолжается, и капли увеличиваются; возрастает и их РО. В то же время капля, которая образовалась, падает под действием сил гравитации, она может выйти из зоны эффективной конденсации и тогда, не успев вырасти, она испаряется. Этому препятствуют восходящие потоки. Восходящий поток воздуха, поддерживая капли на

высотах, содействует продолжению процесса конденсации и роста капель. На границах восходящего потока существуют высокие градиенты скорости воздуха и возникают турбулентные завихрения. Турбулентность, в свою очередь, может способствовать росту капель. Это связано с тем, что хаотичные вихри воздуха, увлекая капли за собою, сталкивают их, в результате таких столкновений капли сливаются. Из двух мелких капель получается одна большая. Увеличения диаметра капли в два раза приводит к росту отражаемости в 64 раза. Процесс роста капли за счет их слияния в результате столкновений называется коагуляцией. Таким образом, восходящие потоки воздуха и турбулентность оказывают содействие конденсации и коагуляции, а значит, росту размеров капли и увеличению РО.

При достижении критических размеров массы гидрометеоров начинают падать, вызывая усиление нисходящих потоков в облаке и увеличение турбулентности. Отсюда вытекает, что РО (а значит и принятая радиолокатором мощность отраженных радиоволн), которая находится в сильной зависимости от размеров капель, должна характеризовать степень опасности облака для самолетов с точки зрения наличия ЗОТ. Действительно, слоистые, слоисто-кучевые и высококучевые облака, в которых процессы турбулентного обмена развиты слабо, не имеют и больших РО ( $Z < 102 \text{ мм}^6/\text{м}^3$ ). В таких облаках отсутствует корреляция между величиной РО и параметрами турбулентности. Это является следствием того, что турбулентность здесь играет второстепенную роль в процессе увеличения рассеивателей по сравнению с другими факторами (например, электрическими силами). Для мощно-кучевых и кучево-дождевых облаков, в особенности в грозовой стадии, заметна четкая связь между параметрами РО и турбулентности (оба параметра в среднем одновременно возрастают по мере развития облака и перехода его в грозовую стадию). Таким образом, области высокой РО являются индикаторами тех районов тропосферы, в которых повышена вероятность ЗОТ.

Коэффициент корреляции между величинами  $\sigma_V$  и  $10 \lg Z$  составляет приблизительно 0,5, что характеризует не очень тесную, но заметную корреляцию между этими двумя случайными параметрами. Подобные зависимости были получены путем специальных летных экспериментов [60]. Сравнения одновременно измеренных значений скоростей турбулентных пульсаций, которые вызвали перегрузку самолета, и характеристик РО облаков, которые пересекал самолет, подтверждает, что характеристики РО и параметры турбулентности статистически связаны.

Необходимо иметь в виду, что расположение зон повышенной РО в целом не совпадает точно с расположением ЗОТ в облаке. То есть РО лишь интегрально характеризует повышенную вероятность опасности облака с точки зрения наличия ЗОТ в облаке или в районе облака. Поэтому инструкции по использованию данных бортовых некогерентных

радиолокаторов, которые не имеют режима доплеровского обнаружения ЗОТ, вообще запрещают входить у облака, которые дают сильные радиолокационные отражения.

**Связь параметров ДС с турбулентностью.** Возможность оценки турбулентности на основе эффекта Доплера основана на следующих предположениях и фактах. 1. Турбулентные порывы ветра вовлекают в свое движение частички облаков и осадков, которые являются рассеивателями энергии, излучаемой МНРЛС, следовательно, скорости рассеивателей связаны с турбулентностью. 2. При формировании сигнала, отраженного от ансамбля рассеивателей, колебания, рассеянные частицами взаимодействуют между собою, и доплеровские сдвиги частоты парциальных сигналов разных рассеивателей при наложении приводят к флуктуациям суммарного принятого сигнала. 3. Анализируя сигнал путем прямого преобразования Фурье, получаем оценку спектра, который зависит от исходных доплеровских сдвигов частоты, вызванных подвижными рассеивателями. 4. Оценки параметров радиальной скорости движения рассеивателей позволяют судить о характеристиках турбулентности, которая является одной из причин этого движения. Таким образом, информация о турбулентности и других динамических процессах в метеообъекте, который состоит из рассеивателей электромагнитной энергии, содержится в энергетическом спектре отраженного сигнала. Скорость диссипации кинетической энергии турбулентности (СДКЭТ), которая характеризует интенсивность турбулентности, входит в качестве параметра в выражение ДС (8.26)

$$S_v(v, \varepsilon) \sim \int_{D_{min}}^{D_{max}} p_p(v/D, \varepsilon) \sigma(D) N(D) dD . \quad (8.38)$$

На рис. 8.45. показаны результаты расчетов [40] нормированных ДС при трех значениях интенсивности турбулентности. В качестве оценки ширины ДС часто пользуются среднеквадратическим отклонением доплеровской частоты, которое является квадратным корнем второго центрального момента ДС, т.е. дисперсии спектра  $\sigma_v^2$ .

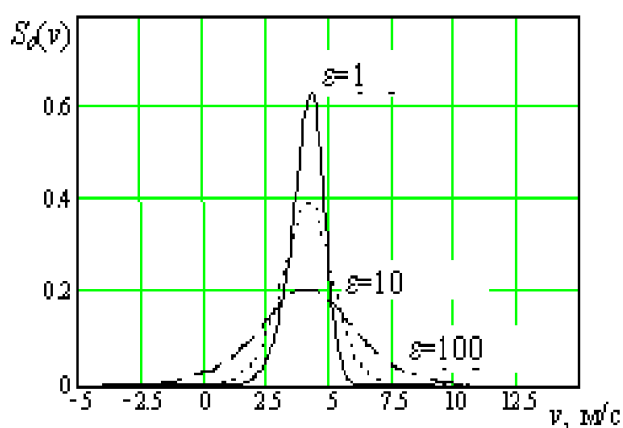


Рис. 8.45. Нормированные ДС при разной интенсивности турбулентности.

Величина  $\sigma_v$  зависит как от параметров РЛС и режима зондирования, так и от метеорологических параметров, которые определяют распределение плотности гидрометеоров и их скоростей в позволяющем объеме. Критическими параметрами радиолокатора являются ширина ДН антенны, частотный диапазон и длительность зондирующего импульса.

Относительное движение гидрометеоров в радиальном направлении приводит к расширению спектра. Турбулентность вызывает хаотичное относительное перемещение рассеивателей. Но является и другие причины взаимного движения гидрометеоров: СВ и разброс скоростей падения как следствие отличий размеров капель. Кроме того, спектр расширяется также из-за движения отражающего объема из-за сканирования антенны. Поскольку указанные механизмы расширения спектра действуют независимо друг от друга, дисперсия частоты может быть представлена как сумма вкладов каждого из эффектов [49]:

$$\sigma_v^2 = \sigma_s^2 + \sigma_\alpha^2 + \sigma_d^2 + \sigma_o^2 + \sigma_T^2, \quad (8.39)$$

где каждое из слагаемых представляет вклад в общую дисперсию за счет:  $\sigma_s^2$  - СВ;  $\sigma_\alpha^2$  - движения антенны;  $\sigma_d^2$  - разброса скоростей падения рассеивателей;  $\sigma_o^2$  - изменения ориентации и вибраций рассеивателей;  $\sigma_T^2$  - турбулентности.

Следует отметить, что при обнаружении турбулентности на основе измерения ширины ДС, дополнительное расширение спектра за счет СВ не является препятствием для принятия решения об опасности: во-первых, СВ – действительно опасное явление, во-вторых, ЗОТ встречаются намного чаще, и в-третьих, отличия между явлениями турбулентности и СВ в определенной мере являются условными и проходят по линии пространственных масштабов, которые принимаются во внимание. Иначе говоря, макромасштабная турбулентность может рассматриваться как совокупность СВ меньших масштабов. Поэтому измерение суммы  $\sigma_v^2 = \sigma_s^2 + \sigma_T^2$  вполне приемлемо.

Формула (8.39) не учитывает возможное расширение спектра в результате обработки сигнала (эффект спектрального окна и тому подобное). Заметим, что все приведенные расчеты сделаны в предположении конкретных значений многих метеорологических факторов, которые влияют на результат, а также параметров РЛС и режима зондирования. Из-за того, что эти факторы и параметры никогда не известны точно, их общее действие обуславливает случайный характер связи между характеристиками метеообъекта и измеренными параметрами отраженного радиолокационного сигнала, даже, если предположить, что сами параметры измерены довольно точно.

**Алгоритмы обнаружения турбулентности.** Существует ряд подходов к решению задачи обнаружения турбулентности в облаках и осадках на основе связей между турбулентностью и характеристиками отраженного радиолокационного сигнала. Разработаны и находят практическое применение разные алгоритмы обработки сигналов.

Следует отметить, что на ширину ДС, оцененную по сигналу, отраженному от одного позволяющего объема, влияют лишь турбулентные вихри, пространственный масштаб которых меньше размера позволяющего объема. Путем доплеровских измерений средней скорости рассеивателей в разных позволяющих объемах, сравнивая их между собою, можно, наоборот, оценить интенсивность турбулентности, масштабы которой превышают размеры позволяющего объема радиолокатора. Это можно сделать только с помощью когерентного доплеровского радиолокатора. В то же время, известно [2], что ширина спектра огибающей сигнала некогерентного радиолокатора однозначно связана с шириной ДС, если выполняются условия Котельникова-Найквиста. Следовательно, она также содержит информацию о турбулентности. Кроме того, ширина ДС обратно связана с коэффициентом межпериодной корреляции сигнала. Это дает возможность использовать корреляционные характеристики сигнала в наземных и бортовых метеорологических радиолокаторах [35]. Идея использования коэффициента межпериодной корреляции для обнаружения турбулентности нашло довольно широкое применение в наземных и бортовых метеорологических радиолокаторах.

В работе [26] предложен комплексный алгоритм совместного использования амплитудного и корреляционного параметров для повышения вероятности локализации опасных турбулентных зон. Алгоритм включает измерения параметров РО и ширины спектра, формирование и испытание на порог дискриминантной функции, которая зависит от комплекса параметров.

Алгоритм, известный как пульс-парный (pulse-pair) широко используется в метеорологических радиолокаторах [49]. Для оценки корреляции от импульса к импульсу используется корреляционный коэффициент (КК), оценка которого на практике может быть получена различными вычислительными процедурами. Алгоритм обнаружения турбулентной зоны реализуется с помощью сравнения оценки КК с порогом решения  $V_p$ .

Отраженный радиолокационный сигнал является коррелированным случайным процессом. КК между двумя последовательными импульсами, отраженными от одного единичного радиолокационного объема, рассматривается как функция интенсивности турбулентности  $r = r(\sigma_V)$ , где  $\sigma_V$  - среднеквадратичное значение доплеровской скорости, характеризующее интенсивность турбулентности. Чем выше интенсивность турбулентности, тем ниже КК. Этот алгоритм достаточно прозрачен при отсутствии шума. Но в реальной

ситуации, когда действует аддитивная смесь коррелированного сигнала и некоррелированного шума, достоверность обнаружения турбулентности снижается. В работе [62] показано, что существует определенное значение отношения сигнал-шум  $\gamma_0$ , начиная с которого КК уменьшается, когда увеличивается  $\sigma_V$ . Для импульсной РЛС оно зависит периода повторения импульсов  $T_S$ , длины волны  $\lambda$  и мощности шума приемника  $\sigma_n^2$ . Поэтому пульс-парный алгоритм, который на самом деле измеряет межпериодный КК, чувствителен к интенсивности турбулентности только если отношение сигнал-шум больше чем  $\gamma_0$ . Некоррелированный шум может привести к значительной декорреляции принятого сигнала. Это означает, что необходимо повысить порог обнаружения, что снижает эффективность пульс-парного алгоритма в случае небольшого отношения сигнал-шум. В результате уменьшается дальность обнаружения турбулентности. Пульс-парный алгоритм становится непригодным при малых значениях ширины спектра (несильной турбулентности) или при недостаточных отношениях сигнал-шум.

Указанные выше алгоритмы радиолокационного обнаружения зон турбулентности в облаках используют ясные физические принципы. Они построены с использованием измерительных алгоритмов конкретных ИП сигналов (мощности, ширины спектра, интервала корреляции, КК и т.д.). Одним из важных факторов, который часто ограничивает вероятность обнаружения турбулентности с помощью известных алгоритмов, является недостаточный объем выборки сигнала для получения обоснованных оценок ИП. Статистические характеристики выборочных оценок существенно зависят от объема выборки. Кроме того, на достоверность информации существенное влияние оказывают шумы и помехи, характеристики которых могут изменяться в процессе работы. Поэтому алгоритмы, которые построены на основе физических соображений, в реальных ситуациях не всегда бывают наилучшими.

Существует класс алгоритмов обнаружения турбулентности, которые были синтезированы на основе характера статистических зависимостей между параметрами сигнала и характеристиками объекту. В работе [15] синтезирован параметрический алгоритм обнаружения ЗОТ. Задача формулировалась как задача проверки параметрической гипотезы с учетом как амплитудных  $\sigma$ , так и корреляционных  $r$  параметров, а структура решающего правила определялась логарифмом отношения правдоподобия для конкурирующих гипотез.

Для обеспечения стабильности вероятности ложной тревоги порог решения  $V_p$  в параметрическом алгоритме необходимо изменять соответственно дальности. Другое решение найдено в работе [16], где синтезирован одновыборочный адаптивный алгоритм, инвариантный к мощности сигналов, который реагирует только на смену КК, игнорируя (в

информационном смысле) мощность обнаруженного отраженного сигнала, а следовательно и РО. Таким образом, он не полностью использует информацию, которая содержится в сигнале, отраженном от турбулентной зоны. Более полное использование информации с учетом данных о фоновой помехе от земной поверхности или от других неподвижных рассеивателей, которые попадают в позволяющий объем, может быть осуществлено при использовании двухвыборочного решающего правила. Соответствующий алгоритм использует две выборки – сигнальную  $x_1, \dots, x_n$ , которая может нести информацию о наличии зоны турбулентности, и обучающую  $y_1, \dots, y_n$ , в которой содержится только сигнал от фона.

Результаты сравнительного анализа [62] разных алгоритмов показаны на рис. 8.46.

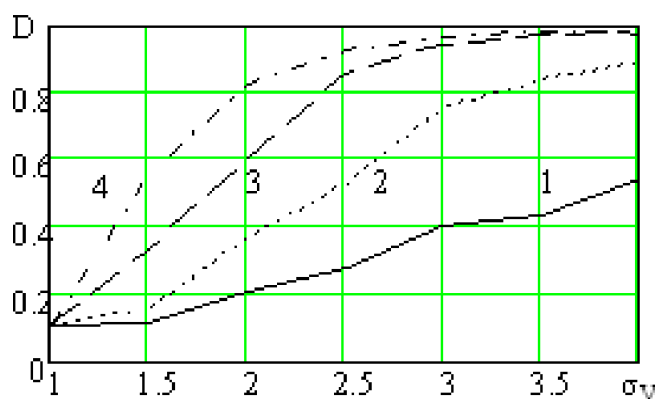


Рис. 8.46. Вероятность правильного обнаружения турбулентности.

На рис. 8.47. показана зависимость порогового уровня принятия решения от объема выборки. На рисунках кривые для разных алгоритмов обозначены таким образом: 1 - пульс-парный, 2 - адаптивный одновыборочный, 3 - адаптивный двухвыборочный, 4 - параметрический.

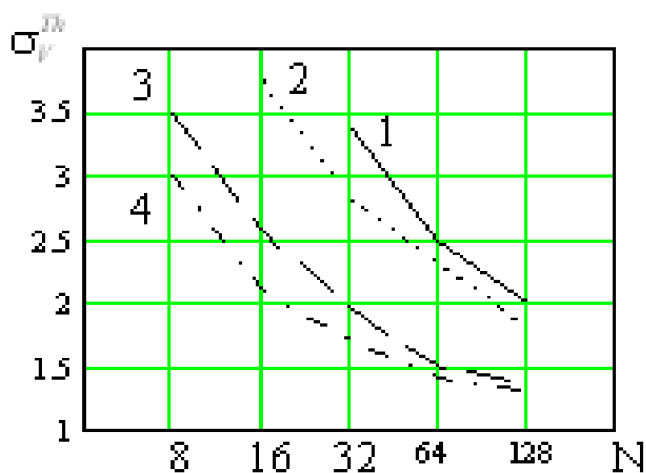


Рис. 8.47. Зависимость порогового уровня принятия решения от объема выборки.

Вполне естественно, что наибольшей эффективностью характеризуется параметрический алгоритм, самым близким к нему является адаптивный двухвыборочный алгоритм, далее следует адаптивный алгоритм. Достоверность пульс-парного алгоритма существенно снижается при низких отношениях сигнал-шум и при невысоком уровне интенсивности турбулентности. Адаптивный подход к обнаружению ЗОТ может быть применен как в некогерентных, так и в когерентных метеорологических радиолокаторах. В то же время для доплеровских радиолокаторов могут разрабатываться также алгоритмы, учитывающие среднюю доплеровскую скорость в отражающих объемах.

В последнее время бурное развитие получают доплеровско-поляриметрические методы исследования облаков и осадков. В частности, в работе [84] представлены результаты радиолокационных наблюдений дождя, которые проанализированы с целью исследования связи между интенсивностью турбулентности в дожде и спектральной дифференциальной отражаемостью (СДО)  $sZ_{dr}$  –измеряемой величиной, которая была разработана и введена в практику ДЗ атмосферы в последнее время [75]. Экспериментальные данные были получены с помощью радиолокационной системы S-диапазона TARA ( $\lambda=9$  см) на полигоне, расположенном в центральной части Нидерландов. Установлено, что СДО, и в частности ее параметр – наклон линии линейной аппроксимации кривой СДО ( $slope\ sZ_{dr}$ ), связаны с интенсивностью турбулентности. Накопленные результаты одновременных измерений SLP ( $slope\ sZ_{dr}$ ) и вклада турбулентности ( $\sigma_{Turb}$ ) в ДС показаны на рис. 8.48.

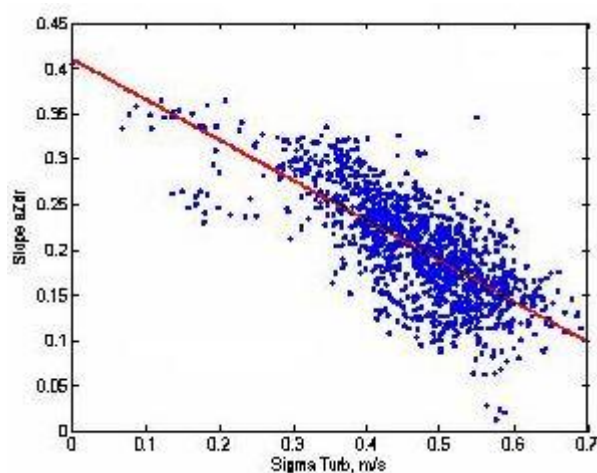


Рис. 8.48. Данные, иллюстрирующие отрицательную корреляцию между наклоном СДО и интенсивностью турбулентности.

Представлены данные для 13 временных слоев от 90 элементов дальности, то есть 1170 точек. Из графика видно, что осредненные значения SLP и  $\sigma_{Turb}$  отрицательно



коррелированы между собою, следовательно, чем больше интенсивность турбулентности, тем меньше SLP.

Соединение теории адаптивного статистического синтеза с новыми данными о связи доплеровско-поляриметрических измеряемых параметров с турбулентностью может лечь в основу разработки новых алгоритмов радиолокационного обнаружения турбулентности.

Синтез адаптивных алгоритмов является шагом вперед по сравнению с эвристическим и параметрическим подходами. Но проблема адекватности исходных моделей остается актуальной и в этом случае. С точки зрения усовершенствования методики синтеза, дальнейшее направление исследования – это синтез непараметрических алгоритмов обнаружения сигналов от турбулентных зон. Таким образом, существуют определенные возможности дальнейшего развития метеорологических радиолокаторов (бортовых и наземных) в части разработки и применения алгоритмов обнаружения турбулентности.

### 8.9.3. Сдвиг ветра

Оперативные методы обнаружения СВ как отдельного опасного метеорологического явления начали разрабатываться сравнительно недавно. В последние годы в ведущих авиационных странах мира последовательно проводятся работы по созданию надежных оперативных средств дистанционного обнаружения зон СВ и микровзрыва бортовыми и наземными средствами ДЗ. Механизм обнаружения СВ средствами ДЗ, как и в случае обнаружения турбулентности, связан с доплеровскими измерениями характеристик движения рассеивателей, которые увлекаются порывами ветра. Такими рассеивателями выступают гидрометеоры (капли, кристаллы, снежинки) или мелкие аэрозольные частички, которые всегда присутствуют в тропосфере.

**Связь СВ с шириной ДС спектра.** Слагаемое, которое описывает расширение спектра из-за СВ, которое входит в (8.223), в свою очередь, содержит три составляющих:

$$\sigma_s^2 = \sigma_{s\psi}^2 + \sigma_{s\theta}^2 + \sigma_{sR}^2, \quad (8.40)$$

которые соответствуют наклонной, азимутальной и радиальной координатам. Выражение (8.40) [49] получено при допущении, что СВ ветра постоянен по разрешаемому объему, а весовая функция может быть представлена в виде произведения функций по координатам  $\theta$ ,  $\psi$  и  $r$ . Если ветер линейно изменяется относительно  $v_0$ , то скорость ветра может быть выражена как

$$v - v_0 = k_x x + k_y y + k_z z, \quad (8.41)$$

где  $k$  с соответствующим индексом – составляющие СВ по трем осям. Сориентируем систему координат так, чтобы ось  $y$  была направлена по углу места (наклона)  $\psi$ , ось  $x$  – по азимуту  $\theta$ ,

а ось  $z$  – параллельно оси антенны. Координаты по этим осям являются составляющими вектора  $r_0-r_1$ , а начало координат определяется радиусом-вектором  $r_0$ , причем  $|r_1-r_0| \ll r_0$ . Из (8.41) вытекает, что  $\bar{v} = v_0$  при  $r_1=r_0$ . В работе [49] показано, что когда размеры отражающего объема малы по сравнению с расстоянием до него, то есть отрезки в направлениях, перпендикулярных к лучу, могут быть аппроксимированы длинами дуг, то

$$\sigma_s^2 = \sigma_{s\psi}^2 + \sigma_{s\theta}^2 + \sigma_{sr}^2 = (r_0 \sigma_\psi k_\psi)^2 + (r_0 \sigma_\theta k_\theta)^2 + (\sigma_r k_r)^2, \quad (8.42)$$

где  $k_\psi, k_\theta, k_r$  - составляющие сдвига по координатам  $\psi, \theta, r$ ;  $\sigma_\psi^2$  и  $\sigma_\theta^2$  – определяются как вторые центральные моменты в обозначенных направлениях для двукратно используемой ДН антенны по мощности;  $\sigma_r^2 = \sigma_z^2$  – второй центральный момент весовой функции, которая зависит от формы импульса и характеристики приемника. Для гауссовой ДН антенны с круговой симметрией,

$$\sigma_\psi^2 = \sigma_\theta^2 = \frac{\theta_{0.5}^2}{16 \ln 2}. \quad (8.43)$$

Для прямоугольного излучаемого импульса и гауссовой АЧХ приемника при условии согласованности полосы пропускания приемника ( $\Delta f \tau_i \approx 1,37$ ) справедливое выражение:

$$\sigma_r^2 = \left( 0.35 \frac{c\tau}{2} \right)^2. \quad (8.44)$$

Чтобы оценить величины сдвигов  $k_\psi, k_\theta, k_r$ , которые необходимо подставить в выражение (8.42), можно воспользоваться различием радиальных скоростей в сопредельных по наклону и азимуту областях в сферической системе координат, связанной с радиолокатором.

**Обнаружение СВ по полю скоростей ветра.** Доплеровские локационные приборы и системы приборов разных диапазонов (радиолокаторы, лидары, инфракрасные локационные системы, и т.п.) в принципе позволяют измерять скорости движения рассеивателей в отражающем объеме. При условии высокого пространственного разрешения один локатор без сканирования способен получать информацию об изменениях скорости ветра вдоль линии луча. При сканировании он способен получать информацию о радиальной скорости по разрезу воздушной массы или метеорологического объекту в плоскости сканирования. Два синхронно работающих локатора могли бы давать по крайней мере двухмерное поле скоростей, а многопозиционные системы, занимающие три или больше локационных позиций способны получать 3D информацию о трех ортогональных составляющих скорости ветра в зоне обзора.

**Обнаружение зон СВ с учетом характеристик самолета.** Из качественного анализа влияния СВ и микровзрыва на самолет (раздел 8.4) вытекает, что угрозу безопасности полета

представляют воздействия горизонтального СВ и нисходящего потока. Каждый из этих влияний порознь или оба совместно могут привести к критической потере высоты самолета, который садится или взлетает. Исходя из этого, в работе [43] с учетом особенностей механики полета введен безразмерный параметр F-factor, который учитывает скорость самолета. Он количественно характеризует влияние горизонтальных и вертикальных СВ на самолет. Этот параметр описывается такой формулой:

$$F = \frac{1}{g} \cdot \frac{dU_H}{dt} - \frac{w}{|\bar{V}_a|}, \quad (8.45)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения;  $U_H$  – горизонтальная составляющая скорости ветра вдоль траектории полета;  $w$  – вертикальная составляющая скорости ветра;  $\bar{V}_a$  – воздушная скорость самолета. Этот параметр рекомендован Федеральной Авиационной Администрацией США (FAA) в качестве основы для оценки СВ. Он рекомендуется ARINC 708A в качестве критерия оценки опасности СВ для бортовых метеорологических радиолокаторов.

**Перспективные исследования.** Усовершенствование методов обнаружения СВ остается актуальной задачей, над решением которой работают в многих авиационных странах мира. В рамках долгосрочного сотрудничества между TU-Delft (Нидерланды) и НАУ (Украина) предполагается выполнения проекта по созданию многопозиционной радиолокационной системы для измерения 3D поля ветра и обнаружения всех видов СВ и микровзрыва, которые могут представлять опасность для полетов в зоне аэропорта (несколько десятков километров от ВПП и до 5 км вверх), в частности, по линии глиссады посадки и взлета (рис. 8.49).

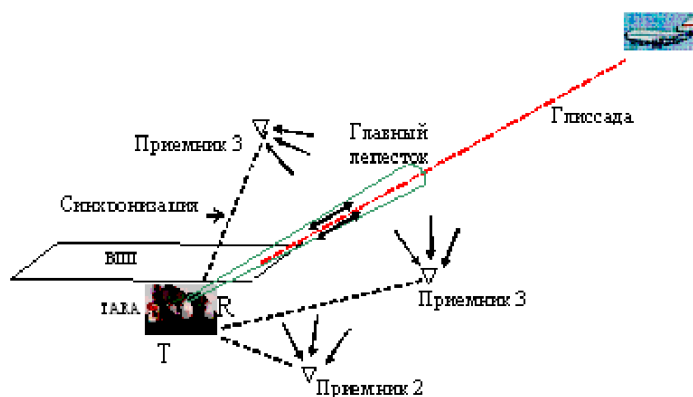


Рис. 8.49. Мультистатическая система для измерения 3D поля ветра в районе аэродрома на основе доплеровско-поляризационного радиолокатора.

Планируется выполнить исследования и разработки в развитие предложения [55] на основе полученных теоретических и экспериментальных результатов [84], новых данных,

которые должны быть получены с помощью активного радиолокатора, и специально разработанных пассивных приборов, которые образуют мультистатическую радиолокационную систему. Экспериментальная система может быть установлена в районе аэродрома для проведения ДЗ тропосферы и обнаружения 3D поля ветра с оценкой необходимых параметров и сравнением радиолокационных наблюдений с измерениями *in-situ* и объективными данными влияния СВ на самолеты.

#### **8.9.4. Молния**

Известны активные и пассивные методы обнаружения молний и зон повышенной электрической активности в атмосфере.

**Активная радиолокация.** Электрические процессы существенно влияют на формирование микроструктуры облаков. Поэтому некоторая информация об электрических процессах может быть получена с использованием активных средств ДЗ. В процессе развития мощных конвективных облаков, с того момента как в них начинается интенсивный рост частиц, который приводит к увеличению РО, происходит интенсивная электризация отдельных гидрометеоров и деление зарядов разных знаков. Основная электризация происходит в зоне, где существуют частицы в двухагрегатном состоянии (и капли, и ледяные кристаллы). Эта зона обычно имеет и наибольшую РО. Электрические силы взаимодействия также способствуют коагуляции капель. Поэтому между электрическим полем в облаке и его отражаемостью существует связь, которая основана на том, что и напряженность поля  $E$ , и РО  $Z$  растут с ростом концентрации и размеров частиц. К сожалению, эта связь прослеживается только для осредненных значений параметров. Максимальная РО кучево-дождевого облака может служить косвенным признаком его электрической активности. Иногда предельным значением РО для обнаружения грозы считают  $Z=2 \cdot 10^4 \text{ мм}^6/\text{м}^3$ .

Перспективы активной радиолокации для обнаружения зон повышенной электрической активности связаны с применением поляризационных характеристик сигналов для оценки регулярной компоненты ориентации рассеивателей, которая ассоциируется с сильным электрическим полем [28].

**Пассивные методы.** Разнообразные типы довольно интенсивного собственного ЭМИ сопровождают электрическую активность в тропосфере. Поэтому пассивное ДЗ является органичным направлением развития исследований атмосферного электричества. ЭМИ метеорологических объектов можно классифицировать как показано на рис. 8.50.



Рис. 8.50. Классификация собственного ЭМИ метеорологических объектов.

Тепловое излучение является предметом радиометрических методов [23] исследований и практически играет лишь вспомогательную роль в обнаружении ОМЯ.

Непрерывно-шумовое ЭМИ возникает в начальный период деятельности грозового облака. Оно наблюдается постоянно пока продолжаются процессы разделения зарядов и поддерживается сильное электрическое поле [10]. Спектральная плотность этого ЭМИ не очень значительна и оно почти равномерно до сотен мегагерц. Предгрозовое ЭМИ начинается за 7-15 минут перед первой активной молнией. Интенсивность излучения на всех частотах во время активной фазы грозы повышается на 2-3 порядка, причем самые интенсивные сигналы наблюдаются во время разряда. Во время активной грозы присутствуют все три типа собственного ЭМИ.

Предгрозовое ЭМИ (нетепловое и немолниевое) наблюдается в широком диапазоне частот перед первым ударом молнии, в паузах между молниями и на протяжении некоторого времени после прекращения молний. По длительности пакетов импульсов существуют: 1) предгрозовое ЭМИ с длительностью пакетов 7-10 мс; 2) ЭМИ молнии длительностью 100-120 мс; 3) непрерывно-шумовое ЭМИ с режимом длительности 0,8-2,0 мс. Данные немолниевое ЭМИ на частоте 1,7 МГц представлены в [10]. Такое ультракоротковолновое ЭМИ существует довольно продолжительное время и имеет вполне стационарную природу. Метод и устройство для обнаружения предгрозового собственного ЭМИ и оценки координат его источника с борта ВС разработано в [19]. Этот метод способен обнаруживать грозовые ячейки за 7-15 минут до начала активной грозовой деятельности.

Существует группа методов для обнаружения и определения координат электрических разрядов, которые являются источниками так называемых атмосфериков (ЭМИ молнии). Эти методы более развиты по сравнению с теми, которые касаются других типов нетеплового ЭМИ, так как молния генерирует наиболее мощный сигнал. Частотный

спектр ЭМИ молнии чрезвычайно широкий. Особенности этого ЭМИ в разных диапазонах исследованы в [1], [6]. Статистические модели атмосфериков и некоторые методы локации гроз обобщены в [11].

Задача определения направления на молнию решается довольно просто известными методами пеленгации. Трудности связаны с оценкой расстояния до источника ЭМИ, когда измерения должны быть осуществлены с одной точки, например, с борта самолета. Существует несколько различных подходов к разработке оперативных приборов. Простейший из них (АА-метод) основан на оценке величины принятых радиочастотных сигналов. В среднем, чем более интенсивен сигнал, тем меньше расстояние до его источника. Практически этот метод обеспечивает точность оценки расстояния лишь 50% из-за того, что мощность ЭМИ носит статистический характер. АА-метод использовался в дешевых бортовых штормоскопах [71]. Второй подход (ЕН-метод) основан на измерениях отношения электрической  $E$  и магнитной  $H$  компонент принятого сигнала. ЕН-метод позволяет достичь точности 10% для расстояний не более 60 км. Третий метод (НН-метод) базируется [46] на измерениях отношения двух магнитных компонент поля, которое генерируется молнией, на двух разных частотах  $H_0 = |H(\omega_1)/H(\omega_2)|$ . Он обеспечивает оценку больших дальностей. Такой метод используется в штормоскопе LSZ-850 фирмы Honeywell, которая декларирует погрешность не больше 10%. Четвертый (ЕЕ-метод) основан на измерениях напряженности электрического поля в двух ортогональных плоскостях. Он предложен и исследован в [82]. Расстояние между молнией и бортовым приемником определяется путем обработки результатов измерений напряженностей электрического поля в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Точность ЕЕ-метода определяется погрешностью из-за предположения, что высота эквивалентного диполя молнии равняется нулю. Эта погрешность уменьшается, когда расстояние возрастает. Другая составляющая погрешности возникает из-за отклонения эквивалентного диполя от вертикальной позиции. Эта погрешность может быть уменьшена путем идентификации вертикальных разрядов. ЕЕ-метод может быть реализован на одной рабочей частоте или с использованием спектра частот и специальными процедурами обработки сигналов для повышения точности. Погрешность измерений дальности до молнии всеми упомянутыми методами может быть уменьшена путем осреднения.

Классификация, показанная на рис. 8.50. включает также квази-электростатическое поле, которое лежит в основе метода электролокации. Возможность оценки электрической структуры облачности, собственного заряда самолета и прогнозирование напряженности электрического поля атмосферы по трассе полета самолета указывают на еще одну возможность оперативного обнаружения молниевой опасности. Этот подход, предложенный

в работе [14], является привлекательным в связи с указанной в разделе 8.4 опасностью возникновения молнии в негрозовых облаках под влиянием собственного заряда самолета.

### 8.9.5. Град

Отражаемость градоносных облаков в среднем выше, чем гроз без града. Если удельная ЭПР облака  $\sigma_0 > 5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^{-1}$ , то в облаке могут быть градины размером больше 1 см. Доказано, что чем выше облако и чем больше его РО, тем больше вероятность града. С точки зрения величин РО и особенностей распределения РО в облаке, известные следующие признаки градовых облаков:

- 1) величина РО превышает 30 dBZ;
- 2) вертикальная длина зоны повышенной отражаемости (ЗПО) превышает 3 км;
- 3) отношения вертикальной длины ЗПО к толщине всей зоны радиолокационного отражения – приблизительно 50%;
- 4) ЗПО располагается в средней или верхней части облака;
- 5) большая часть ЗПО располагается в зоне отрицательных температур;
- 6) вертикальная длина радиолокационного отражения не меньше 6 км и достигает высот 9 км.

Для надежного распознавания градовых облаков по РО необходимо, чтобы существовала вся совокупность указанных признаков [22]. Достичь высокой достоверности локализации ЗГО только по одному измеренному параметру РО не является возможным из-за значительной области перекрытия кривых условных вероятностей  $p(Z/\text{град})$  и  $p(Z/\text{ливень})$ . Иногда "градовым порогом" РО считают  $Z = 10^5 \text{ мм}^6/\text{м}^3 = 50 \text{ dBZ}$ . Для более надежного распознавания зон града применяют специальные радиолокационные методы, например, зондирование на двух длинах волн.

Поляризационные характеристики сигналов, отраженных от частиц разной формы и размеров с учетом характерных особенностей градин позволяют утверждать, что обнаружение града может быть осуществлено на основе оценок поляризационных параметров отраженных сигналов [28], [92], [93]. Существует ряд подходов к обнаружению града поляризационным методом [85], [83].

### 8.9.6. Обледенение самолетов

Поляризационные параметры применяются также для обнаружения ЗОО. В 1991 г. А.Б. Шупяцкий и Ф.И. Яновский получили положительное решение по заявке № 4898827

(СССР) на изобретение «Способ радиолокализации зон опасности обледенения воздушных судов». Этот метод локализации ЗОО использует чувствительность поляризации к форме рассеивателей для обнаружения переохлажденных капель [28], которые имеют практически сферическую форму. В свою очередь, наличие переохлажденной воды является основным фактором, создающим условия для обледенения ВС в полете. Для сферических капель ДО  $Z_{DR}$  близка к нулю. Для несферических частиц, которыми являются ледяные кристаллы, значения  $Z_{DR}$  отличаются от нуля тем более, чем сильнее выражена несферичность частичек. Поэтому при  $Z_{DR} > \delta$  принимается решения, об отсутствии ЗОО [85]. Но невыполнения условия  $Z_{DR} > \delta$  не является однозначным показателем ЗОО так как близкое к нулю значение ДО может быть вызвано не только сферичностью частиц, но и хаотичной ориентацией ледяных кристаллов. Для исключения предположения, что объект состоит из кристаллов, осуществляют проверку  $L_{DR} > \gamma$ . Дело в том, что наличие несимметричных (несферических) частичек, даже хаотически ориентированных, вызывает появление ортогональной поляризационной составляющей в отраженном сигнале, а значит  $L_{DR}$  возрастает. Вопрос о том, находятся ли эти капли в переохлажденном состоянии, решается путем оценки температуры [85] объекта  $t^{\circ}$ .

В последнее время исследования и разработки, посвященные развитию этого метода [87], [88] и оперативных технических средств дистанционного обнаружения зон вероятного обледенения ВС в полете [14], [86] существенно активизировались, в том числе в США, Канаде и Германии [89], [90].



## **8.10. НАЗЕМНЫЕ СРЕДСТВА ОБНАРУЖЕНИЯ ОПАСНЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ**

### **8.10.1. Метеорологические радиолокаторы**

Метеорологические радиолокаторы (МРЛ) предназначены для обнаружения гроз, ливневых осадков и облаков, определения их координат, скорости, измерения других параметров и выделение зон ОМЯ. По принципу действия МРЛ целесообразно разделить на некогерентные и доплеровские. Радиолокаторы каждого с этих двух классов могут быть поляризационными. В поляризационных МРЛ является возможность оперативно управлять поляризацией сигнала на передачу или/и на прием. Поляризационные радиолокаторы, которые обеспечивают измерение поляризационных параметров цели, называют поляриметрическими. Кроме того, различают одноволновые и многоволновые (обычно двухволновые) МРЛ. Как поляриметрические, так и многоволновые радиолокаторы являются мультипараметрическими.

Некогерентные МРЛ можно считать метеорологическими радиолокаторами первого поколения. Таковыми являются, например, советские радиолокаторы МРЛ-2, МРЛ-5 и американские WSR-57, WSR-74C. Оперативные доплеровские МРЛ - это радиолокаторы второго поколения. Наиболее распространенный в США радиолокатор такого типа - NEXRAD, или Next Generation Weather Radar (WSR-88D). Перспективными являются доплеровско-поляриметрические МРЛ. В настоящее время в Нидерландах, Великобритании, США и Германии функционируют лишь исследовательские радиолокаторы такого типа, например, Delft Atmospheric Research Radar (DARR) [61], Transportable Atmospheric Radar (TARA) [56], Передвижной радиолокатор "S-Pol" Национального центра атмосферных исследований (NCAR), опытный образец двухполяризационной версии WSR-88D [91]. Тем не менее, в США уже издана монография [44], посвященная доплеровско-поляриметрическим методам исследования атмосферы. Методы извлечения метеорологической информации из отраженного радиолокационного сигнала могут существенно отличаться для радиолокаторов разного типа. Некоторые из них рассмотренные в разд. 8.9.

### **8.10.2. Некогерентные МРЛ**

Некогерентные МРЛ способны обнаруживать отражения от метеорологических целей на фоне шума, а также могут измерять РО облаков и осадков. Интерпретация результатов

измерений осуществляется в соответствии с данными по связи РО с метеорологическими параметрами (разд. 8.8, 8.9). В зависимости от функционального назначения некогерентные МРЛ традиционно делятся на три класса. К первому классу относятся МРЛ, предназначенные для обнаружения зон облаков и осадков с целью штормового оповещения об ОМЯ. МРЛ второго класса предназначены для измерения количества и интенсивности атмосферных осадков, контроля за результатами активных воздействий на дождевые и градовые облака. С помощью МРЛ третьего класса осуществляют наблюдение за недождевой облачностью и измерение ее границ, контроль за результатами активных воздействий на недождевые облака.

Требования к МРЛ зависят от выполняемых функций. Обычно некогерентные МРЛ дают возможность получить вертикальный и горизонтальный разрезы метеорологических образований, верхнюю и нижнюю границы облачности, интенсивность осадков, водность облаков. Они также способны оценить тенденцию развития облаков и определить термодинамическое состояние атмосферы, то есть зоны конвекции, восходящие потоки воздуха, высоту тропопаузы, и т.п. Важным и сложным является вопрос об оптимальных длинах волн. Объединение двух каналов с разными длинами волн способно повысить точность метеорологической информации и расширить функциональные возможности МРЛ, хотя значительно усложняет и удорожает систему. Особенностью наблюдений с помощью МРЛ является необходимость сканирования в вертикальной плоскости для получения информации о вертикальных профилях РО и других измеряемых параметров. Важными являются также вопросы осреднения сигналов, компенсации ослабления и коррекции по расстоянию, рассмотренные в разд. 8.9.

Несмотря на то, что некогерентные МРЛ следует считать устаревшими, они до сих пор широко применяются, например, в гидрометслужбах Нидерландов, Польши, России, Венгрии, Украины, Франции, Чешской Республики и многих других стран. В странах СНГ и бывшего соцлагеря широкое применение нашли двухволновые радиолокаторы МРЛ-1 (в диапазонах 8 мм и 3 см), одноволновые МРЛ-2 (3 см) и двухволновые МРЛ-5 (3 и 10 см), а также их одноволновые модификации МРЛ-4 и МРЛ-6. Метеорологическая информация представляется в форме радиолокационной карты. Радиолокатор МРЛ-5 является специализированной двухканальной системой градозащиты. Он надежно измеряет разнообразные параметры облаков, выделяет градовые, градоопасные и потенциально градоопасные облака. Один канал работает на волне 3,2 см, а второй – на волне 10 см. Антенны МРЛ-5 в защитной оболочке могут располагаться на значительном расстоянии от пульта управления. Этот радиолокатор имеет большой энергетический потенциал и более совершенную аппаратуру обработки и регистрации метеорологической информации по

сравнению с радиолокаторами МРЛ-1 и МРЛ-2. В режиме градозащиты ДН его антенн симметричны и имеют одинаковую ширину ( $1,5^\circ$ ). В режиме штормооповещения ДН первого (3-см) канала сужается до  $0,5^\circ$ . Поляризация поля антенн – линейная, в первом канале – вертикальная, а во втором – горизонтальная.

Некогерентные МРЛ морально устарели и повсеместно вытесняются доплеровскими радиолокаторами. В то же время, потенциальные возможности некогерентных радиолокаторов не используются в полной мере. В работе [94] представлен обзор эффективных алгоритмов обнаружения зон турбулентности с помощью некогерентных радиолокаторов.

### **8.10.3. Доплеровские МРЛ**

Когерентные (доплеровские) радиолокационные станции способны оценивать метеорологические характеристики на основе измерений параметров доплеровских спектров, которые были рассмотрены в разд. 8.8. Они позволяют определять средние и турбулентные характеристики воздушного потока. Первые работы по применению эффекта Доплера в радиолокационной метеорологии появились еще в конце пятидесятих годов двадцатого века, но только в девяностых методы доплеровской радиолокации стали (в США) стандартным инструментом, который применяется в оперативных МРЛ для получения информации о динамических процессах в облаках и осадках. Эффект Доплера в сочетании с современными методами обработки сигналов дает возможность создать богатый набор автоматизированных алгоритмов. Это позволяет метеорологам более определенно идентифицировать метеорологические объекты и опасные явления, в частности, оценивать интенсивность гроз и осадков, определять положение вершин облаков, обнаруживать признаки ОМЯ (турбулентности, микровзрывов, СВ), измерять количество осадков.

Импульсная доплеровская МРЛ типа NEXRAD – это современная цифровая система разработанная в США, которая нашла широкое применение во многих регионах мира. Целесообразно выделить следующие компоненты этой системы, существенные с точки зрения получения конечной метеорологической информации и ее использования: 1) система сбора радиолокационных данных - Radar Data Acquisition (RDA); 2) система широкополосной связи - Wideband Communication Link (WCL); 3) устройство формирования радиолокационных данных - Radar Product Generator (RPG); 4) терминал (Workstation) процессора основного пользователя (Principal User Processor) - PUP Workstation; 5) пользовательский терминал (Applications Terminal); 6) основные и неосновные пользователи - Principal and Other Users.

Блок RDA является собственно радиолокатором (WSR-88D). Он состоит из антенны, передатчика, приемника и сигнального процессора. Эти узлы генерируют и излучают зондирующие импульсы, принимают отраженную энергию и обрабатывают ее (сигнал), формируя радиолокационные данные. Блок WCL обеспечивает обмен данными между RPG и RDA в режиме широкополосной полно-дуплексной связи. Блок RPG является управляющим центром всей системы. Здесь обрабатываются цифровые данные, в результате чего формируется извлеченная из сигнала радиолокационная информация (полезная продукция) и создается база данных. RPG осуществляет фильтрацию помех и прочие вспомогательные функции. PUP используется для доступа к продукции полученной с RPG, а также ее обработки и сохранения. Обычно рабочее место PUP размещается в компьютерном помещении основного метеорологического узла. Терминал пользователей - это место, откуда метеоролог манипулирует данными. Он обычно размещается близ стойки для инструктажа и оборудуется клавиатурой, мышкой и графическими мониторами. Компонент системы, названный Principle and Other Users включает компетентные органы тех организаций, которые потребляют метеорологическую информацию. В США сюда входят Министерство обороны (DOD), НМС (NWS) и Министерство транспорта (FAA). Экипажи ВС наблюдают доплеровскую информацию в метеорологическом узле или дистанционно на основе сетевой (web) технологии. При пользовании сетевой технологией или другой технологией дистанционного доступа, продукция доплеровской системы NEXRAD является вполне определенной, и обычно дополнительной информации требовать невозможно. Пользователь просто наблюдает ту информацию, которая доступна в данный момент времени, и не имеет возможности манипулировать, скажем, диапазоном углов наклона антенны или другими параметрами радиолокационных изображений.

Результаты отображаются в виде цветных имиджей, которые формируются при сканировании радиолокационного луча на  $360^\circ$  по азимуту. Центр демонстрируемого изображения обычно соответствует местонахождению базовой наземной МРЛ. Доплеровские МРЛ дают разрезы (при разных наклонах луча антенны) трех моментов доплеровского спектра: радиолокационной отражаемости, средней доплеровской скорости и среднеквадратичной доплеровской скорости (разд. 8.8). Такие радиолокаторы успешно используются для исследования воздушных потоков и турбулентности. Кроме того, они позволяют получать оценки интенсивности и микроструктуры осадков. Методы и алгоритмы обработки сигналов кратко описаны в разд. 8.8 8.9, более подробный анализ доплеровских МРЛ выполнен в [7].

Система NEXRAD может давать приблизительно 40 разных метеорологических величин. Прежде всего, это РО. Цветная шкала рядом с имиджем показывает отражаемость в

DBZ. Метеорологи могут отображать имиджи, используя разные наклоны антенны для получения необходимой информации. Кроме того, можно исследовать разные параметры отражаемости, например, ее изменения во времени и пространстве, интенсивность осадков, тенденцию развития метеообразования, и т.п. Как было указано выше, данные о РО полезны при идентификации ОМЯ, таких как грозы, град, шквалы, и т.п. Очень большие значения РО (больше 55 dBZ) могут соответствовать зонам града.

Высокая чувствительность МРЛ WSR-88D позволяет видеть также зоны без осадков, такие как отражения от земли, птиц, насекомых, и т.п. Поэтому членам экипажей всегда рекомендуется проверять присутствие неметеорологических отражений, консультируясь с метеорологом.

Измерения доплеровской скорости обеспечивают определение местонахождения и прогноз скорости ветра, СВ и микровзрыва. Эта информация позволяет службам УВД лучше управлять воздушным движением, избегая опасных ситуаций. В режиме измерения скорости МРЛ WSR-88D отрицательные значения соответствуют движению в сторону радиолокатора, а положительные – от него. Зоны сильного ветра снабжены на дисплее числовым кодом.

Система NEXRAD способна отображать профили вертикального ветра в радиусе 20 морских миль от станции. Для этого служит Vertical Azimuth Display (VAD). VAD является эффективным инструментом при инструктаже, так как способен показать ветер на разных высотах в реальном времени. Система имеет несколько возможностей анализа данных для обнаружения СВ, например, Low Level Wind Shear Alert Systems (LLWAS) и Terminal Doppler Weather Radar (TDWR). В случае обнаружения или прогноза опасного СВ пилот получает инструктаж от метеоролога станции НМС (NWS).

Некоторые станции обслуживания полетов – flight service stations (FSS) оборудованы системой TDWR. Специалисты FSS на таких позициях сертифицированы интерпретировать состояние метеообстановки по данным радиолокационного дисплея. Они могут инструктировать экипажи, пользуясь изображениями моделей погоды в зоне покрытия. В то же время инструктор пилотов FSS не уполномочен анализировать отражения от метеообразований, он просто сообщает о результатах анализа, выполненного специалистом по прогнозам из службы NWS. По доплеровскому принципу работают также специализированные радиолокационные измерители профиля ветра.

#### **8.10.4. Поляризационные доплеровские МРЛ**

Поляризационные параметры электромагнитных волн в атмосфере и принципы

получения информации об аэрозолях и гидрометеорах на основе поляризационных измерений описаны в п. 8.8. Некогерентные радиолокаторы, которые используют поляризационные измерения для извлечения информации об объектах, обычно называют радиолокационными поляриметрами. Поляризационные измерения в МРЛ сначала рассматривались как средство повышения точности определения интенсивности осадков [45]. Однако впоследствии стало ясно, что они могут быть эффективно использованы для дистанционного определения микрофизических характеристик гидрометеоров, а по ним и таких ОМЯ как ЗГО и ЗОО [85], [83], [14].

Доплеровские радиолокационные поляриметры характеризуются значительно большим информационным потенциалом, чем неполяризационные доплеровские радиолокаторы. Некоторые доплеровско-поляриметрические параметры рассмотрены в п. 8.8.4. Это направление пока что не стало достоянием повседневной практики радиолокационной метеорологии, но имеет большие перспективы [14], [44]. В настоящее время в США ведутся активно работы по модернизации системы NEXRAD с целью преобразования ее по доплеровско-поляриметрическим принципам [91].

В [97] сообщается о проекте многофункциональной радиолокационной системы на основе фазированной антенной решетки, которая объединит функции радиолокаторов УВД и метеорологических систем, в частности, аэродромного радиолокатора (ASR), трассового радиолокатора (ARSR), аэродромной доплеровской метеорологической системы (TDWR) и метеорологического радиолокатора (WSR-88D) в поляриметрическом варианте. Эта работа начата в National Severe Storm Laboratory в Норманне, США.

#### **8.10.5. Лидары**

Оптические квантовые локаторы (Lidar - от light detecting and ranging) применяются для измерения ряда важных параметров состояния атмосферы. Принципы построения оптических квантовых локаторов и взаимодействие лазерного излучения с атмосферой изложенные в работе [8]. С помощью лидаров обеспечиваются измерения температуры, влажности и газового состава атмосферы. Кроме того, применение изложенных выше принципов доплеровской локации для локаторов оптического диапазона позволяет осуществлять измерение ветра с помощью доплеровских лидаров. Учитывая то, что электромагнитные волны оптического диапазона рассеиваются аэрозолями, которые всегда в достаточном количестве присутствуют в тропосфере, в особенности на воздушных трассах, доплеровские лидары способны обнаруживать турбулентность ясного неба. Эта идея

рассматривалась в НАУ еще в конце 60-х годов [95]. Однако лидары, пригодные для практического зондирования атмосферы, появились гораздо позже.

#### **8.10.6. Радиометры**

Радиометры используются для дистанционных измерений параметров атмосферы с поверхности земли методами пассивной локации. Они являются эффективными приборами для дистанционных измерений профилей температуры и влажности в инфракрасном и СВЧ диапазонах. Принципы действия инфракрасных и СВЧ радиометров и их применение для зондирования атмосферы описаны в работе [23]. Для интерпретации данных радиометрического зондирования используют методы решения обратных задач [24].

#### **8.10.7. Радиопеленгаторы гроз**

Общие сведения о грозовых разрядах, а также методы радиопеленгации разрядов и пассивного измерения дальности до них, рассмотрены в п. 8.9.4. Но там большей частью речь шла о методах, которые применяются в бортовых приборах. Распространение атмосфериков над земной поверхностью на большие расстояния дает возможность применения пеленгаторов и сетей пеленгаторов для глобальных наблюдений за грозовой активностью [11].

#### **8.10.8. Содары**

Акустическое зондирование атмосферы дает возможность получить независимую от получаемой по другим каналам информацию о нижнем слое атмосферы. Принципы применения акустики при зондировании атмосферы изложены в [22]. Акустические локаторы называют сонарами или содарами. Название "Содар" происходит от sonic "detection and ranging" и означает то же самое, что акустический радар. Название "Сонар" происходит от "sound navigation ranging" и чаще применяется для обозначения акустических радаров, которые функционируют в водной среде (на подводных лодках). Содар – акустический локатор для зондирования атмосферы. Наиболее привлекательны доплеровские содари. В [70] описан Доплеровский содар с фазовой решеткой, который позволяет измерять скорость и направление ветра, обнаруживать вертикальные потоки воздуха, турбулентность, термическую структуру и глубину перемешивания на расстояниях от 15 м до 1000 – 5000 м в зависимости от типа антенны. В таких приборах обычно используют простые синусоподобные импульсные сигналы. В работе [72] сообщается об экспериментальном

применении шумовых сигналов в акустическом локаторе. Такие сигналы имеют очевидные преимущества, связанные с узкой диаграммой неопределенности и возможностью управлять одновременно разрешающей способностью по дальности и по скорости.

### **8.10.9. Средства обнаружения сдвига ветра**

С 1986 года NASA и FAA проводят общую работу по созданию средств и технологий предупреждения и предотвращения рисков, связанных со СВ. FAA включило в процедуру сертификации коммерческих ВС проверку средств обнаружения СВ [63]. Исследования, направленные на повышение уровня БП в условиях СВ, ведутся в следующих направлениях:

- 1) создание и внедрение бортовой аппаратуры обнаружения и индикации СВ, которая информирует пилотов о приближении этого явления (см. п. 8.9.3);
- 2) создание в аэропортах наземных систем обнаружения условий, которые вызывают или сопровождают явление СВ;
- 3) организация на основании прогнозов погоды консультативной работы, по обеспечению экипажа информацией об опасности СВ в аэропортах.

Системы наземного обнаружения и предупреждения СВ являются наиболее дорогими. Самой известной из таких систем является LLWAS. Эта система работает в большинстве аэропортов США. С помощью анемометров, установленных как на периферии, так и в центральной части аэродрома, преимущественно вблизи ВПП, она принимает данные о скорости и направлении ветра. Полученные данные обрабатываются центральным компьютером, и результаты выдаются на борт ВС, которое выполняет посадку или готовится к взлету. Однако система не может предупреждать о ситуациях, когда СВ только прогнозируется. В 1992 году была испытана наземная система прогнозирования СВ, которая получила название Terminal Doppler Weather Radar. Она создана на базе МРЛ типа NEXRAD. Испытания проходили в аэропортах Orlando, Ft и Denver Stapleton. К середине 1994 года такая система была установлена более чем в 40 аэропортах США. Однако даже при наличии этой системы необходимо ее взаимодействие с бортовыми системами обнаружения СВ в силу низкого уровня достоверности прогноза этого явления.

Заблаговременное предупреждение пилотов о приближении к зоне с СВ выполняется службой прогноза погоды. Прогнозы значительного СВ на малых высотах полетов и в нижних слоях атмосферы в районах аэропортов передаются метеослужбой в главный центр управления воздушным движением, откуда они направляются в аэропорты в виде рекомендаций, которые передаются из-за каждые 2-3 часа. Информация включает данные о направлении и скорости ветра с обеих сторон фронтальных зон, время, на протяжении



которого эти условия будут влиять на метеорологическую обстановку в аэропорте, и причину СВ. На борту ВС информация должна передаваться автоматически информационной службой аэропорта. Имеются предложения по созданию мультистатических доплеровско-поляриметрических систем, устанавливаемых в районе ВПП, для обнаружения и предсказания СВ [96].

Достоверность и своевременность информации о СВ и микровзрыве остаются недостаточными даже при использовании указанных наземных средств. Поэтому разработана и постепенно внедряется интегрированная система Integrated Terminal Weather System (ITWS), которая рассматривается в разд. 8.13. Кроме того, на борту ВС устанавливаются автономные средства обнаружения СВ в составе метеонавигационных радиолокаторов (разд. 8.11).

#### **8.10.10. Сети МРЛ**

Эффективность МРЛ повышается за счет автоматизации получения, обработки и передачи радиолокационной метеорологической информации, а также оптимального размещения МРЛ, которые объединяются в сети. Объем информации и точность метеорологических прогнозов при этом существенно увеличиваются.

Например, сеть NEXRAD состоит из метеорологических станций FAA, которые непосредственно предназначены для обслуживания полетов, а также МРЛ, которые принадлежат DOD и NWS. Сеть обслуживает все три ведомства. В соответствии с [53], все позиции МРЛ WSR-88D разделяются на следующие категории: "Сетевые", "Дополнительные" и "Несетевые". Сеть NEXRAD в США состоит из 121 сетевых позиций. Кроме того, работают 21 дополнительных и 17 несетевых доплеровских МРЛ, в том числе расположенных в стратегических точках за границей (в Португалии, Японии, Южной Корее и на разных островах). Станции DOD, которые соответствуют требованиям NEXRAD, перечисленные в приложении информационного справочника US DOD flight Information Handbook.

По данным сети МРЛ метеоролог составляет прогноз и может передать метеорологическое сообщение экипажам ВС в режиме реального времени по радиоканалам связи. Он информирует экипаж о расположении, перемещении, интенсивности, и верхние границы осадков и облаков (облаков не обязательно), но он не имеет права указывать экипажам направление полета, или проводить самолет сквозь облака или радиолокационные отражения от метеорологических объектов. Это является функцией пилота, которую он

выполняет с учетом информации, полученной с земли и по данным бортового метеорологического радиолокатора (МНРЛС).

#### **8.10.11. Автоматизированные метеорологические станции**

В подразделе 8.6 упоминались советские автоматизированные метеорологические системы КРАМС и АМИВС, которые обеспечивают информацию о базовых метеорологических величинах. В аэропортах США используется автоматизированная система метеорологического наблюдения – Automated Weather Observing System (AWOS). Она представляет собой комплекс датчиков, которые измеряют, собирают и передают метеорологические сведения, необходимые метеорологам, пилотам и диспетчерам при подготовке прогнозов погоды и планировании маршрутов. Эти станции также снабжают авиационный персонал необходимой метеоинформацией для безопасного осуществления взлета и посадки. Приборы AWOS обеспечивают ежеминутную информацию пилотам с помощью УКВ связи или из-за ненаправленный маяк. Данные, собранные AWOS, могут включать: скорость ветра, его направление и порывы; температуру и точку росы; высоту облачности и степень покрытия зоны облаками; видимость; текущую погоду (дождь, снег); характеристики дождя; наличие грозовой ситуации и молний; туман, дымка, мгла, ледяной туман.

Кроме того, существует автоматизированная система поверхностного наблюдения – Automated Surface Observing System (ASOS), которая также предназначена для получения метеорологической информации. Поверхностной она называется из-за того, что использует датчики, расположенные на поверхности земли. Система ASOS обеспечивает данные непрерывных метеорологических наблюдений, совместно со стандартизированной видимостью и измерениями состояния неба.

## **8.11. ОБНАРУЖЕНИЕ ОПАСНЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ С БОРТА ВОЗДУШНОГО СУДНА**

### **8.11.1. Функции метеонавигационных радиолокаторов (МНРЛС)**

Для обеспечения безопасности полета экипажу необходима своевременная надежная информация о расположении ОМЯ. Во время полета бортовые радиолокаторы являются основным источником оперативной информации о метеорологических условиях на маршруте. Они обеспечивают экипаж исключительно важной для безопасности полета информацией о наличии на трассе полета кучево-дождевой облачности и таких ОМЯ, как гроза, турбулентность, град, ливень. Они также дают возможность пилоту избирать приемлемую траекторию обхода зон ОМЯ в сложных метеорологических условиях.

**Обязательность применения бортовых МНРЛС.** Снижение вероятности попадания в зону ОМЯ является одним из важнейших направлений повышения безопасности полетов ВС. С увеличением интенсивности полетов возрастает роль и экономическая целесообразность средств получения оперативной информации для проводки самолетов в СМУ. Количество задержанных и в особенности отмененных рейсов из-за метеоусловий увеличивается значительно быстрее, чем интенсивность воздушного движения. Эта тенденция связана с повышением напряженности расписания, когда в период хорошей погоды становится все сложнее найти окно, необходимое для отправления задержанного прежде рейса [4]. Из необходимости обеспечить высокий уровень безопасности и регулярности полетов вытекает обязательность применения МНРЛС на борту любого ВС. Это закреплено нормами летной годности НЛГС-3, документом ARINC 708 А, стандартом DO-220 [20] и соответствующими документами ICAO.

**Многофункциональность МНРЛС.** Бортовые радиолокаторы ГА являются многофункциональными системами и используются в системе управления полетом современного самолета как датчики метеорологической информации. Для пилота они обеспечивают отображение метеорологической обстановки в передней полусфере на протяжении всего полета, а также являются автономным средством наблюдения земной поверхности. Кроме того, они используются как средство предупреждения столкновений ВС с препятствиями, а также позволяют решать некоторые навигационные задачи в полете, при доставке и сбрасывании грузов и предоставлении помощи терпящим бедствие. Бортовые метеорологические радиолокаторы (Weather Radar), которые выпускаются западными фирмами (сокращенно их обозначают WXR), как и отечественные МНРЛС, являются многофункциональными радиолокаторами. Но в англоязычной традиции название радиолокатору дает его основная функция – получение метеорологической информации. В

то же время, многофункциональность МНРЛС украинского производства, как правило, выраженная четче, чем в радиолокаторах западных фирм. Это традиционно связано с разработкой их для установки на транспортные самолеты как гражданского, так и военного назначения.

**Метеорологические функции** в современной МНРЛС являются основными функциями. Председатель ассоциации линейных пилотов США в работе [64] отметил, что некоторые пилоты ошибочно считают, будто РЛС наземной службы УВД лучше обнаруживают ОМЯ, чем бортовое оборудование. Он разъясняет, что ответственность за недопущение попадания самолета в области ОМЯ несут пилоты. Такой подход хорошо согласовывается с концепцией "Free flight".

Современные МНРЛС, как правило, имеют несколько режимов работы, связанных с выполнением метеорологических функций. Анализируя функциональные возможности МНРЛС и требования к новым образцам, можно сказать, что МНРЛС и бортовые радиолокационные комплексы (РЛК) могут решать следующие задачи в области получения метеоинформации:

- 1) обнаружение метеообразований и определения степени опасности отдельных их участков по интенсивности осадков (радиолокационной отражаемости);
- 2) обнаружение ЗОТ в метеообразованиях;
- 3) обнаружения ЗСВ на глиссаде при взлете и посадке самолета;
- 4) отображение вертикальной структуры метеообразований путем получения вертикального профиля (сечения) метеообразований на избранном курсовом угле;
- 5) обнаружение метеообразований большой интенсивности, которые расположены за зонами осадков маленькой интенсивности;
- 6) компенсация ослабления радиоволн в метеообразованиях;
- 7) предотвращение принятия пилотом неправильных решений об отсутствии опасности за зонами осадков слабой интенсивности, которые маскируют зоны осадков большой интенсивности (отображение на этих участках зон неопределенности);
- 8) обнаружение опасного метеообразования, которое находится на курсе самолета с выдачей сигнала предупреждения об опасности при отключении режима индикации информации радиолокатора на дисплее (электронной системе индикации) самолета;
- 9) определение координат метеообразований и опасных зон в них;
- 10) подавление помех от земной поверхности при обнаружении и анализе опасности метеообразований.

Конечно, ни одна МНРЛС не решает все перечисленные задачи. С другой стороны, этот список не претендует на полноту. По крайней мере, он может быть дополнен введением

режимов обнаружения ЗГО и ЗОО в будущем.

**Обнаружение сдвига ветра** – сравнительно новая функция МНРЛС, которая практически стала обязательной после выхода ARINC 708 А, и DO-220 в 1993 году, хотя исследования и работы по разработке средств повышения уровня БП в условиях СВ, начались значительно раньше как в США [63], так и в странах СНГ [9]. Первоочередным направлением в решении проблемы СВ стала концепция разработки и внедрения бортовой системы, которая формирует команды для автоматической системы управления самолетом и информирования экипажа о ЗСВ. Методы обнаружения СВ рассмотрены в разд. 8.9.3. В соответствии с требованиями ARINC 708 А, и DO-220 для обнаружения СВ бортовое радиолокационное оборудование должно обнаруживать зоны, которые характеризуются изменениями ветра в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Оно должно иметь возможность генерирования соответствующих сигналов опасности. Такой сигнал должен быть ясным, автоматическим, коротким и выразительным, чтобы пилот мог быстро и верно его интерпретировать. Переход в режим обнаружения СВ должен осуществляться автоматически, без вмешательства пилота, во время взлета и посадки.

Для реализации в бортовых МНРЛС наиболее приемлемым (а теперь и стандартным) является использование F-фактора, который учитывает скорость самолета и количественно характеризует влияние горизонтальных и вертикальных сдвигов ветра (8.45). Этот параметр (F-фактор) заложен в документе ARINC 708А, что практически регламентирует основные характеристики аппаратуры бортового метеорологического радиолокатора с возможностью обнаружения сдвига ветра [41]. При разработке систем обнаружения СВ необходимо предусматривать, что пилот должен располагать информацией об опасности СВ за 10...40 с до входа в зону СВ. Время меньшее, чем 10 с недостаточно для реакции пилота и самолета. С другой стороны, интервал, превышающий 40с, считается слишком продолжительным и не гарантирует, что в атмосфере не произойдут новые существенные изменения.

**Интегрирование функций.** Бортовой метеорологический радиолокатор прошел в своем развитии длинный путь. Сегодня он способен давать намного больше информации, чем просто обнаруживать наличие кучево-дождевых облаков в зоне обзора. Обнаружение ЗОТ и ЗСВ интегрируется в бортовых радиолокационных системах с функциями предупреждения об опасном приближении к земле и предотвращения столкновений в воздухе с другими ВС. Пилотам теперь могут предоставляться разные виды предупреждений о трех главных источниках опасности: воздушное движение, метеоявления и особенности ландшафта, причем даже с указанием того вида опасности, которому следует уделить приоритетное внимание.

Еще один аспект использования МНРЛС связан с интеграцией по линии "борт-земля".

Для наземных служб УВД до недавнего времени считалось достаточным располагать радиолокационной информацией о метеорологической обстановке в зоне аэродрома. Тем не менее, на современном этапе для работы АС УВД возникает потребность располагать информацией об ОМЯ по маршруту полета так же оперативно, как и для зоны аэродрома. Поэтому информация об ОМЯ, полученная с помощью бортового оборудования и переданная по каналам связи, играет важную роль и для функционирования всей системы УВД (см. подраздел 8.13).

Развитие американских метеорологических радиолокаторов Honeywell, AlliedSignal и других фирм идет по пути наращивания функциональных возможностей по обнаружению разных ОМЯ. Лучшие образцы радиолокаторов зарубежных фирм обнаруживают зоны повышенной интенсивности осадков, ЗОТ и ЗСВ на глиссаде во время взлета и посадки самолета. При работе совместно с бортовыми системами типа "Штормоскоп" они осуществляют обнаружение и индикацию зон повышенной грозовой деятельности.

Развитие отечественных МНРЛС ведется в направления расширения как метеорологических, так и навигационных функций. Новыми для МНРЛС являются задачи контроля захода на посадку с обнаружением и визуализацией бетонированных ВПП, визуализации при рулении рулежных дорожек и препятствий на них, препятствий на ВПП при разбеге, посадке и пробеге. Решение этих задач требует высокой разрешающей способности и улучшения точности измерения координат радиолокационных целей. Но эти функции выходят за пределы задач метеорологического обеспечения.

Метеонавигационные радиолокаторы или РЛК устанавливаются практически на всех самолетах и вертолетах гражданской авиации.

### **8.11.2. Принцип действия и особенности МНРЛС**

МНРЛС - как правило, импульсный радиолокатор. Принцип действия его при выполнении основных функций базируется на использовании вторичного излучения (отражения) радиоволн разными объектами [27]. Особенности, связанные с измерениями метеорологических параметров (компенсация ослабления, коррекция по расстоянию), рассмотрены в разделе 8.8. Особенностью МНРЛС, связанной с установкой ее на борту ВС, является наличие системы стабилизации луча антенны (ССЛА), которая служит для компенсации влияния эволюций самолета (по крену, по тангажу) на радиолокационное изображение. Как исходную информацию для этого используют сигналы датчика пространственного положения воздушного судна (ППВС). В последние годы, ведущие фирмы мира перешли к производству когерентно-импульсных бортовых РЛС.

В современных цифровых радиолокаторах, по крайней мере, после детектора сигнал преобразуется в цифровую форму, обработка сигналов и формирование радиолокационных данных выполняется цифровыми устройствами, причем все связи между блоками осуществляются в цифровой форме за исключением сверхвысокочастотной связи между антенной и приемником-передатчиком [30].

### **8.11.3. Параметры и конструктивные особенности бортовых локаторов**

Эксплуатационные, или тактические характеристики МНРЛС должны отображать требования к радиолокатору с позиций обеспечения безопасности полетов, их регулярности, удобства летной и технической эксплуатации, повышения надежности и эффективности функционирования МНРЛС. К таким характеристикам относятся, например, максимальная дальность действия, зона и время обзора, состав получаемой информации, точность измерения координат, разрешающая способность, надежность, помехозащищенность. Технические характеристики определяют, какими техническими средствами обеспечиваются заданные тактические характеристики. К ним относятся рабочая длина волны, мощность передатчика, длительность зондирующего импульса, частота повторения импульсов, коэффициент шума приемника, и т.п. Универсальной технической характеристикой бортовых МНРЛС является показатель потенциала (performance index) PI, методика расчета которого разработана фирмой ARINC. Показателю потенциала соответствует расчетная дальность действия радиолокатора. В соответствии с Госстандартом, который, правда, уже утратил юридическую силу, эта расчетная дальность должна быть не меньше 550 км для МНРЛС I класса (сверхзвуковые, дальние и средние магистральные самолеты), 350 – для II класса (ближние магистральные и тяжелые самолеты МВЛ – местных воздушных линий), 200 – для III класса (легкие самолеты МВЛ и вертолеты) и 100 – для радиолокаторов IV класса (вертолеты).

В работе [41] приведена методика расчета показателя потенциала и максимальной дальности действия МНРЛС в режиме обнаружения метеорообразований. Большинство авиакомпаний считают, что для дозвуковых самолетов наименьшая максимальная дальность действия МНРЛС должна составлять 150 морских миль. Это соответствует показателю потенциала  $PI = 204$  дБ в диапазоне частот 9,3-9,5 ГГц. Многие МНРЛС имеют  $PI > 220$  дБ. Такой PI определяет дальность обнаружения метеорообразований больше 300 морских миль, или больше 550 км, что соответствует радиолокаторам I класса.

Для бортовых радиолокаторов важными являются характеристики условий функционирования, которые включают климатические характеристики и ограничения

(например, диапазон рабочих температур  $\pm 60^{\circ}\text{C}$ , устойчивость к повышенной влажности – до 100% при температуре  $35^{\circ}\text{C}$ ).

**Основные требования к тактико-техническим характеристикам** и методика выбора и расчета основных параметров МНРЛС приведены в [40, 31]. Бортовые радиолокаторы в основном являются системами X-диапазона, то есть длина волны излучаемых колебаний приблизительно равняется 3,2 см. В этом диапазоне для бортовых метеорологических радиолокаторов выделены две частоты: 9375 и 9345 МГц. Большинство современных локаторов оборудовано антеннами типа пассивных ВЦАР. Некоторые украинские МНРЛС могут выполнять дополнительные функции, например, обнаруживать встречные ВС, измерять угол сноса ВС, обнаруживать ВПП, работать с наземными маяками-ответчиками, автоматически картографировать земную поверхность, измерять координаты ориентиров. Некоторые из них работают в диалоговом режиме. Все современные МНРЛС оборудованные встроенными системами автоматического контроля.

Как правило, разработчики МНРЛС стараются придерживаться тенденции унификации МНРЛС, которые заложены в рекомендациях ARINC 708A. Объем функциональных возможностей МНРЛС определяется ее типом, техническим назначением, массогабаритными характеристиками, потреблением электроэнергии и стоимостью. Серийные отечественные МНРЛС по своим функциональным возможностям несколько отстают от лучших зарубежных метеорологических РЛС, но МНРЛС, которые находятся в стадии разработки рабочей конструкторской документации, изготовления и испытаний исследовательских образцов, отвечают лучшим мировым образцам, а в некоторых случаях и превосходят их.

**Требования к отображению информации.** Информация о метеорологической обстановке с выделением зон ОМЯ должна предоставляться экипажу ВС в наглядной и удобной для восприятия форме в полярной системе координат "дальность-азимут", то есть в виде горизонтальных разрезов зоны обзора на высоте полета. Кроме того, обычно обеспечивается возможность наклона антенны в вертикальной плоскости, а в последнее время – возможность сканирования в вертикальной плоскости с выдачей на экран вертикальных разрезов облачности на заданном азимуте по желанию оператора.

Основным режимом получения информации об ОМЯ все же остается горизонтальное сечение. Координаты выделенных опасных зон определяются при помощи меток дальности и азимута. Подавляющее большинство членов экипажей считают [36], что в состав отображаемой информации кроме координат опасных зон необходимо включать тип опасности (ЗОТ, ЗГО, ЗМО, ЗСВ, ЗОО). Кроме того, отображаемая информация преимущественно может содержать данные о трех градациях опасности, что соответствует



трехальтернативной стратегии принятия решения, заложенной в устройство локализации зон ОМЯ (например: "безопасно", "потенциальная опасность", "ОПАСНО"). Так считают 80% опрошенных членов экипажей.

Необходимое время восстановления информации связано как со скоростью полета, так и со скоростью протекания физических процессов в метеорологических объектах. Исследования показали, что оптимальное время восстановления информации на экране лежит в пределах от 2 до 10 секунд в зависимости от скорости полета. Увеличение количества отображаемой информации ведет к росту нагрузки на пилота, что повышает вероятность ошибок при интерпретации данных и принятии оперативных решений пилотом. Иначе говоря, при постоянном наращивании информативности системы с отображением всей полезной информации существует опасность перехода в область излишка смысловой информации: информация становится слишком детальной. В связи с этим возникает необходимость создания эффективных информационных фильтров. Они могут быть реализованы в виде специальных аппаратных и программных средств [39] и использоваться в диалоговом режиме. С помощью таких средств интеллектуальной поддержки экипажа ВС должна выделяться только та (смысловая) часть результирующей информации, которая непосредственно предназначена для обоснования тех или других решений по выполнению маневра или продолжению движения в том же направлении.

**Конструкция радиолокаторов.** Бортовые радиолокаторы имеют блочную конструкцию. Основными блоками современных МНРЛС обычно являются антенна, приемопередатчик и индикатор (дисплей) с пультом управления. Внешний вид основных блоков радиолокатора "МНРЛС-85" украинского производства приведен на рис. 8.51.

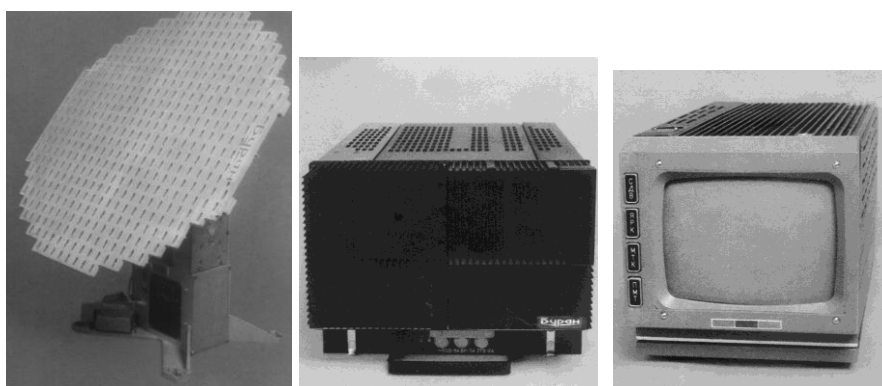


Рис. 8.51 Антенна, приемопередатчик и индикатор МНРЛС-85.

На борту современных лайнеров часто используют многофункциональную интегрированную систему индикации. В таких случаях основными блоками МНРЛС являются антенный блок, приемопередатчик и блок (панель) управления. Как правило,

антенный блок располагают в носовой части самолета под радиопрозрачным обтекателем, как показано на рис. 8.52.

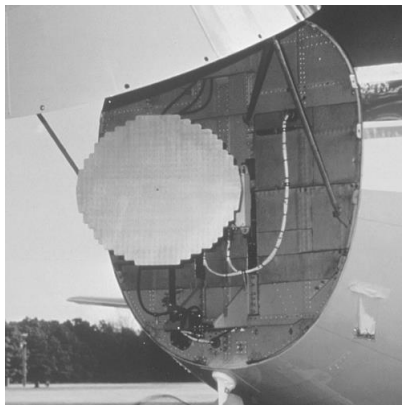


Рис. 8.52. Антенна метеонавигационного радиолокатора, установленного на самолете.

Приемо-передатчики размещают в нижнем носовом отделении за перекрытием, на котором монтируется антенна. В классических конструкциях приемо-передатчики соединяются с антенной с помощью волноводов, но известны также моноблочные конструкции, в которых антенна и приемо-передатчик конструктивно представляют собой единый блок. Это позволяет устранить волноводный тракт с вращающимся сочленением, которое является источником энергетических потерь и помех. Моноблочная конструкция, например, применена в украинской МНРЛС "Буран-А140" [40]. Индикаторы и пульта управления размещают в кабине пилотов на передней панели.

Ведущие производители бортовой авионики AlliedSignal, Collins, Honeywell, Rockwell и прочие поставляют на мировой рынок широкий спектр бортовых МНРЛС. Самолеты российского и украинского производства чаще всего оборудуются МНРЛС, которые разрабатываются Киевским НИИ "Буран" и серийно выпускаются заводом "Радар". В [98] описан новый подход к реализации режима обнаружения сдвига ветра в цифровой МНРЛС, который разработан в НИИ "Буран".

#### **8.11.4. Штормоскопы**

Существенным дополнением к радиолокационному обнаружению мощных кучево-дождевых облаков и гроз является выявление грозоактивных зон в воздушном пространстве пассивными методами, то есть путем приема сигналов собственного ЭМИ метеообразований. Пассивные методы выявления ЗМО были рассмотрены в разд. 8.9.4. Довольно широкое практическое применение нашло обнаружение ЗМО по атмосферикам.

Значительное распространение получили бортовые устройства [71], [46], [82], [12], которые способны не только обнаруживать грозовые разряды и определять направления на них (азимут), но и оценивать расстояние до источников разрядов с борта самолета. Такие устройства называют бортовыми грозопеленгаторами-дальномерами, или штормоскопами (от Stormscope). Принцип штормоскопа иллюстрируется обобщенной схемой на рис. 8.53.

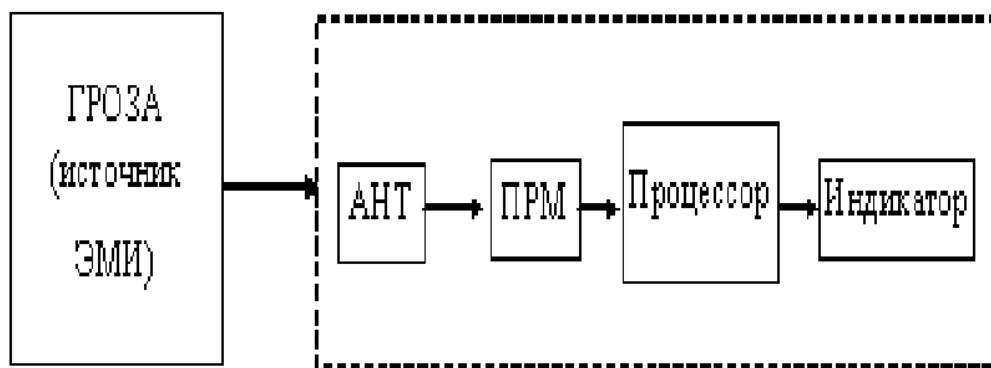


Рис. 8.53. Обобщенная схема штормоскопа.

Основная проблема таких пассивных радиолокаторов состоит в необходимости измерения дальности до источника излучения с необходимой точностью из одного пункта (с борта самолета). Методы ее решения рассмотрены в разд. 8.9.4. Известные бортовые грозопеленгаторы-дальномеры фирм Ryan, Honeywell, AlliedSignal выпускаются как отдельные приборы, а также для сопряжения с бортовыми МНРЛС. Они определяют азимут и дальность центров грозоактивных зон на основе пеленгации ЭМИ молнии и однопунктной грозодалнометрии. При этом необходимо обеспечить стабилизацию измеренных углов пеленга в горизонтальной плоскости относительно курса самолета при изменениях углового положения самолета по курсу, крену и тангажу. Результаты локализации ЗМО грозопеленгаторами-дальномерами могут быть представлены пилоту на специализированных индикаторах или выдаваться непосредственно на экраны МНРЛС. Штормоскопы намного дешевле, чем МНРЛС, имеют небольшие размеры и массу. Поэтому они также используются на малых самолетах общего пользования, где невозможно или нецелесообразно устанавливать метеорологический радиолокатор.

Методы выявления ЗМО по характерному предгрозовому радиоизлучению [19] и по напряженности электрического поля [5] являются перспективными и ждут своей реализации в бортовом оборудовании систем авионики.

### 8.11.5. Оптические локаторы

Микроволновой радиолокатор хорошо работает в условиях дождя, но намного хуже – в сухую погоду. Противоположные качества оптических локаторов делают их хорошим дополнением к МНРЛС на борту ВС. Возможности применения лидаров в наземных системах получения метеорологической информации рассмотрены в разд. 8.10.5. Принцип действия бортовых и наземных лидаров один и тот же, однако в случае применения на борту необходимо принять меры для стабилизации узкого луча оптического локатора в пространстве при изменении пространственной ориентации ВС.

**Доплеровский лидар** воспринимает аэрозоли и самые мелкие частицы влаги, которые двигаются в воздухе. Они служат рассеивателями подобно к каплям для радиолокатора, как было рассмотрено в разделе 8.8.2. Система проводит измерения и обработку доплеровских сдвигов частоты в оптическом диапазоне, используя зондирующее излучение лазерного передатчика, установленного на самолете, и отраженные сигналы от частиц влаги. Узкий луч лидара позволяет практически избежать явления интерференции сигналов, отраженных от поверхности земли, характерного для микроволнового диапазона. Однако лазерные системы недостаточно хорошо работают в условиях сильных ливней.

**Инфракрасный локатор** может быть использован для измерения изменений температуры по курсу полета самолета. В частности, система отслеживает изменения температуры двуокиси углерода, имеющиеся в воздухе, для поиска холодных потоков, которые могут быть индикатором микропорывов. В сравнении с радиолокатором сантиметрового диапазона и лидаром инфракрасный локатор наиболее дешев. Такая система может рассматриваться как косвенное средство обнаружения зон СВ, однако она не обеспечивает возможности измерения скорости ветра. Способность измерять температуру может сделать инфракрасный локатор полезным элементом системы обнаружения зон вероятного обледенения самолетов в полете [37], [85].

### 8.11.6. Комплексная локализация ОМЯ

Концепция комплексной локализации ОМЯ, разработана в НАУ и изложена, например, в работе [33]. Первый уровень комплексности касается интеграции в рамках бортовых возможностей. На этом уровне концепция охватывает такие аспекты:

1) комплекс источников опасности (турбулентность, молния, град, обледенение, сдвиг ветра и т.п.);

2) комплекс ИП, которые могут иметь разную природу как с физической, так и с математической точек зрения (амплитудные, доплеровские, поляризационные, интегральные, одноточечные, двуточечные, и т.п.);

3) комплекс каналов получения информации (активная и пассивная радиолокация, разные частотные диапазоны, лидары, термодинамическая информация, и т.п.).

Второй уровень комплексности охватывает также обмен информацией по линиям "борт-борт", "борт-земля", "борт-спутник", "земля-спутник" с конечной передачей адресной метеорологической информации на борт самолета. Некоторые аспекты такой интеграции рассматриваются в подразделе 8.13. Здесь справедливо заметить, что прогнозы и предложения относительно комплексной локализации ОМЯ, сделанные в восьмидесятые годы [38], [39] с течением времени все больше становятся реальностью.

## 8.12. СПУТНИКОВЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ

Метеорологические искусственные спутники Земли стали повседневным и необходимым элементом мировой системы метеорологического наблюдения и прогнозов. Спутники оказались удивительно удобным носителем средств ДЗ земной поверхности и атмосферы. Они дают возможность охватить большие объемы атмосферы, исследовать макромасштабные движения облачности и циклонической деятельности. В то же время применения современных приборов с высокой разрешающей способностью открывает возможность проводить довольно детальные измерения со спутников. Метеорологические спутники в зависимости от параметров обращения разделяются на геостационарные и полярные.

### 8.12.1. Геостационарные спутники

Геостационарные спутники вращаются в плоскости экватора. Скорость спутника такая же, как скорость вращения Земли, и спутник оказывается в стационарном положении над определенной точкой на экваторе. Геостационарная орбита позволяет спутнику непрерывно наблюдать одну и ту же площадь, которая составляет приблизительно 40% земной поверхности. Для того чтобы иметь глобальное покрытие с помощью геостационарных спутников, необходима сеть, состоящая из 5-6 спутников.

Оперативные метеорологические геостационарные спутники используются США (GOES), Японией (GMS), Китаем (FY-2B), Россией (GOMS), Индией (INSAT) и Европейским космическим агентством – ESA (Meteosat). Характеристики некоторых спутников:

- японский (GMS) расположен на  $140^{\circ}$  восточной долготы;
- индийский спутник (INSAT) –  $74^{\circ}$  восточной долготы;
- российский GOMS/ELEKTRO No 1 –  $76^{\circ}$  восточной долготы;
- европейский METEOSAT –  $0^{\circ}$ ;
- в США постоянно работают два геостационарных оперативных спутника, один из которых, GOES-8, запущен в апреле 1994, работает на  $75^{\circ}$  западной долготы, а другой, GOES-9, запущен в мае 1995 – на  $135^{\circ}$  западной долготы.

Спутники Meteosat, запущенные ESA, обслуживаются Европейской организацией по эксплуатации метеорологических спутников (EUMETSAT). На рис. 8.54 в качестве примера показан европейский спутник Meteosat [51] и зона земной поверхности, которую он охватывает.

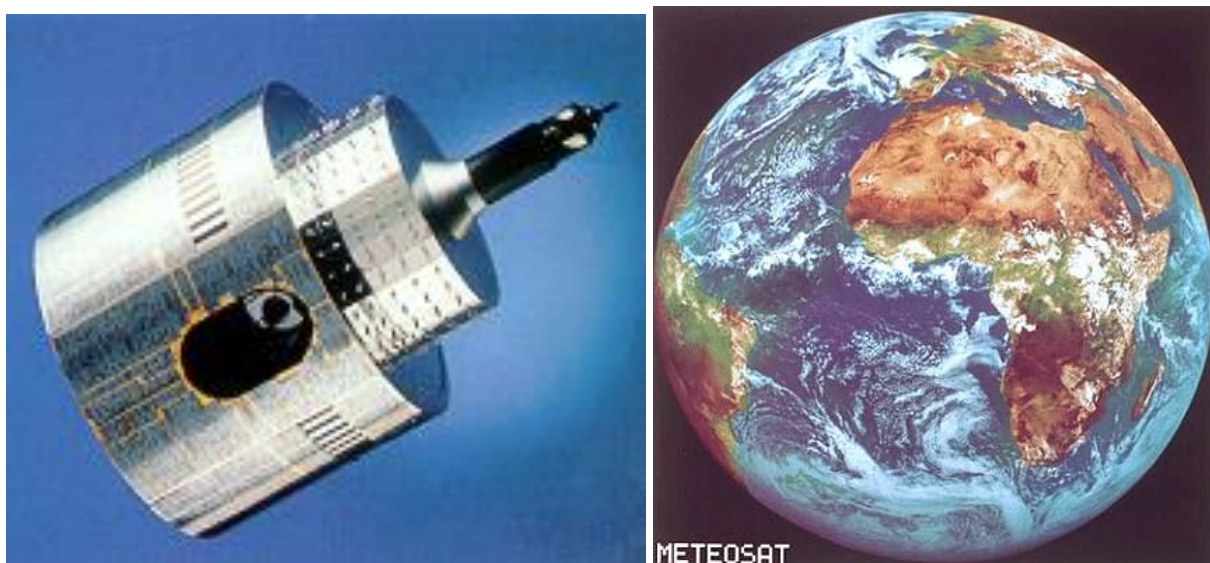


Рис. 8.54. Геостационарный спутник Meteosat и зона покрытия земной поверхности с него.

Спутник Meteosat дает метеорологические изображения земного шара с помощью радиометров, работающих в видимом и инфракрасном диапазонах волн. Радиометры сканируют пространство построчно. Область формирования изображений определяется местонахождением спутника на высоте 36000 км над точкой сечения экватора и гринвичского меридиана. С этой выгодной позиции аппаратура спутника с интервалом в полчаса посылает цифровые кодированные изображения с высокой разрешающей способностью. Изображения (инфракрасные и в диапазоне видимого света) принимаются базовой эксплуатационной станцией в Германии. Здесь сырые изображения обрабатываются, корректируются, нарезаются в виде секций 800x800 пикселей и аннотируются. Аннотированные изображения (имиджи) распространяются с помощью приемопередатчиков космическими средствами связи. Распорядок распространения данных [50] публикуется EUMETSATом с детализацией информации о том, какие именно изображения передаются, когда и по какому каналу. Версии изображений в Microsoft XL также любезно предоставляются организацией Eumetsat. Изображения поступают пользователям как в цифровой форме (зашифрованные), так и в аналоговом виде в WEFAX (Weather Facsimile) формате [74] на двух частотах передатчика с частотной модуляцией: канал A1 1691 МГц и канал A2 1694,5 МГц. Наземные станции принимают, декодируют и сохраняют WEFAX изображения, которые после этого становятся доступными через Internet. На рис. Рис. 8.55 представлен имидж, полученный по такому каналу 01.08.2003 года.



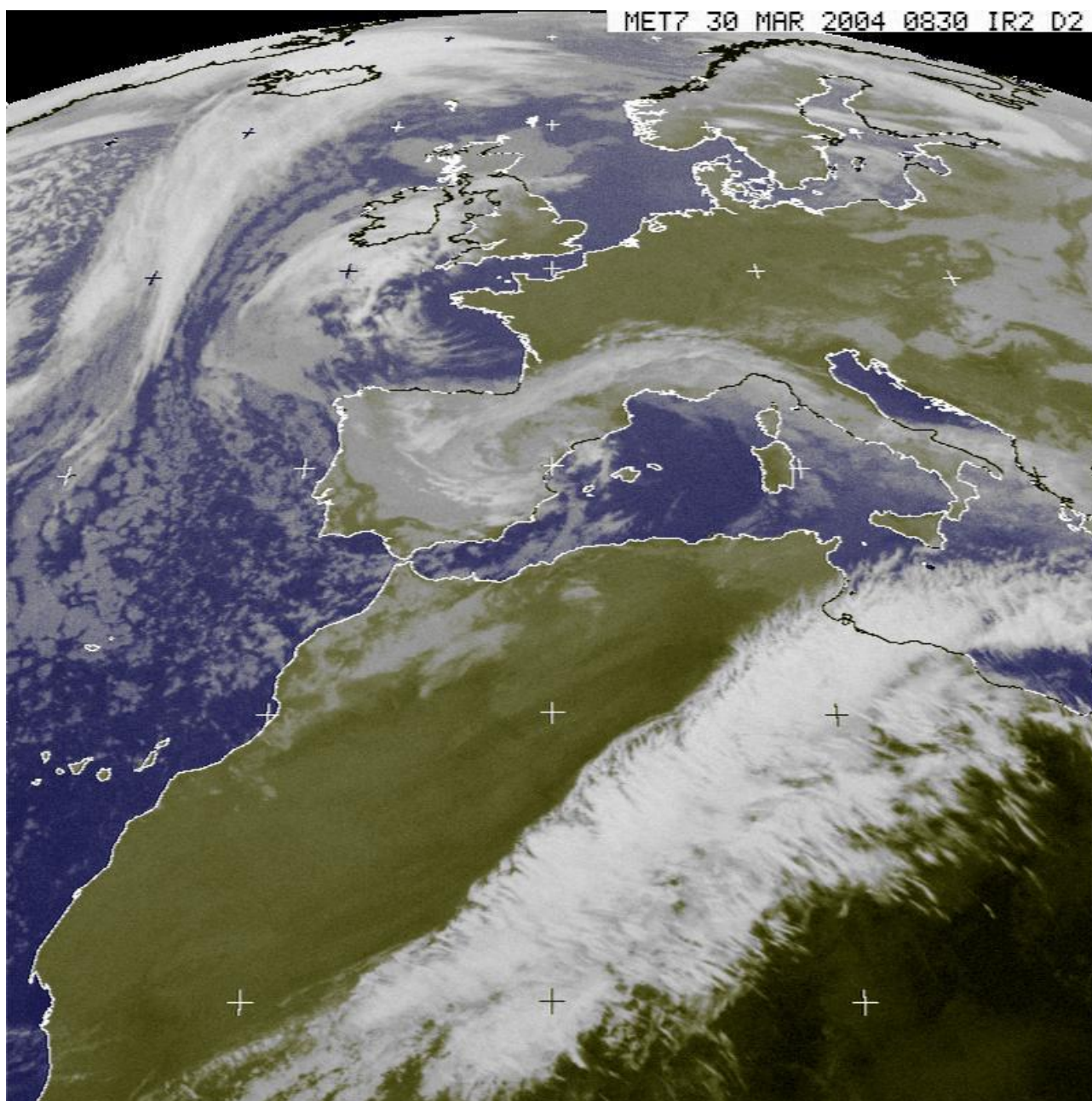


Рис. 8.55. Облачность над Западной Европой (EUMETSAT)

### 8.12.2. Полярные спутники

Геостационарные спутники не могут видеть полюса. Поэтому необходимы также полярные орбитальные спутники. Метеорологические спутники на полярных орбитах используются Россией (семейство МЕТЕОР-3), Соединенными Штатами и Китаем. Соединенные Штаты используют семейство гражданских спутников NOAA POES (Полярно-орбитальный оперативный спутник окружающей среды) рядом с семейством спутников оборонного ведомства DMSF (Оборонная метеорологическая спутниковая программа). NOAA в данное время запускает спутники на дневные и утренние орбиты, чтобы сохранить



бесперывный поток полярных данных. В настоящее время функционируют оперативные полярно-орбитальные спутники, один из которых, NOAA-14, запущен на дневную орбиту в декабре 1994 г., а второй – NOAA-12 – на утреннюю орбиту в мае 1991 г. Действующие оперативные DMSP полярно-орбитальные спутники F-12 и F-13 запущены в августе 1994 и в марте 1995 соответственно. Функционирует также полярный орбитальный метеорологический спутник FY-1, запущенный Китаем. Полярные спутники обеспечивают глобальное покрытие с одного спутника за счет вращения Земли.

### **8.12.3. Система спутникового мониторинга атмосферы**

Метеорологические спутники осуществляют оперативное наблюдение за состоянием атмосферы, океанов и суши. Современная всемирная система таких спутников состоит из 8 геостационарных спутников: GOES-W, GOES-E (США), GOMS (Россия), INSAT (Индия), GMS (Япония), FY-2 (Китай) и METEOSAT (ESA) и двух полярных спутников NOAA (США) и МЕТЕОР (Россия). Рассмотрим более подробно характеристики и особенности основных семейств спутников, запущенных разными странами.

**Система Метеор.** В соответствии с [13], российская космическая гидрологическая система Метеор эксплуатируется с целью получения данных для гидрометеорологического, гелиогеофизического и глобального экологического мониторинга. Космические аппараты (КА) этой системы функционируют на приполярных круговых орбитах (высота орбиты около 1200 км, наклон 82,5°). Бортовой комплекс штатного (постоянного) метеорологического спутника Метеор-3 включает сканирующую ТВ-аппаратуру с системой запоминания данных на борту для режима глобального обзора, сканирующую ТВ-аппаратуру для режима передачи данных на автоматический пункт приема информации (АППИ), инфракрасный (IR) радиометр для режима глобального обзора и передачи данных на АППИ, сканирующий IR радиометр, радиационно-метрический комплекс и радиолинии 46 665 МГц для передачи данных в центры и 137 850 МГц для передачи данных на АППИ.

Рассмотрим как пример комплекс научной аппаратуры на КА Метеор-3, который дает возможность оперативно и регулярно получать дважды в сутки изображения облачности и земной поверхности в видимом и инфракрасном диапазонах, данные о температуре и влажности воздуха, температуру морской поверхности и облаков. Данные о потоках корпускулярных излучений, рентгеновского излучения и суммарного энерговыделения всех излучений поступают в геофизическую службу. Осуществляется мониторинг озоносферы. Кроме штатной научной аппаратуры на КА Метеор-3 периодически устанавливается научная аппаратура экспериментального и исследовательского назначения. Например, на КА Метеор-

3 N 5 установлен сканирующий спектрометр для определения глобального распределения озона (аппаратура TOMS, разработанная и изготовленная NASA). Эта аппаратура имеет 6 спектральных каналов в ультрафиолетовой (УФ) области спектра и обеспечивает пространственное разрешение в надире  $63 \times 63 \text{ км}^2$ ; полоса обзора – около 2900 км. На КА Метеор-3 N 8 планируется установить прибор NASA SAGE-II для мониторинга распределения аэрозоля, озона, водного пара, двуокиси азота и спектрофотометр. Прибор SAGE-II работает в семи спектральных диапазонах (385, 448, 452, 525, 600, 936 и 1020 нм) и дает возможность определять вертикальные профили атмосферных компонент с вертикальным разрешением 1 км в диапазоне высот 10-40 км абсорбционным методом по ослаблению прямого солнечного излучения при прохождении его через атмосферный лимб Земли. Спектрофотометр СФМ-2 осуществляет измерения абсорбционным методом в 4 каналах в диапазоне 0,25-0,6 мкм и позволяет определять вертикальный профиль озона с разрешением порядка 5 км приблизительно до высот 80 км.

**Система GOES** принадлежит National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Геостационарные спутники GOES-W и GOES-E запущены соответственно в апреле 1994 г. и апреле 1997 г. На рис. 8.56. показаны зоны покрытия двух спутников NOAA: слева GOES-E и справа GOES-W [68].

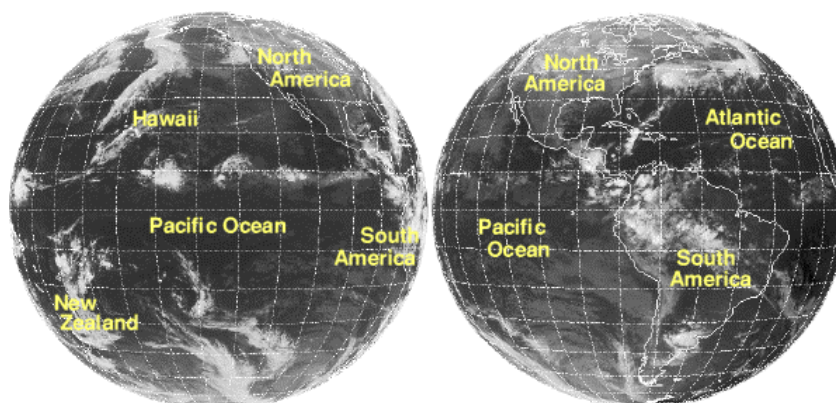


Рис. 8.56. Зоны покрытия американских спутников серии NOAA

Основным инструментом ДЗ на этих спутниках является радиометр. Аппаратура построения радиометрических изображений спутников GOES представляет собой пятиканальную систему. Канал видимого света работает в диапазоне 0,55-0,75 мкм, IR – 3,8-4,0 мкм, 10,2-11,2 мкм, 11,5-12,5 мкм и канал водяного пара – 6,5-7,0 мкм. Разрешающая способность видимого канала составляет 1 км, IR – 4 км, а канала водяного пара – 8 км. Радиометр сканирует зону обзора послойно. Каждая строка состоит из серии индивидуальных элементов изображения (пикселей). Для каждого пикселя радиометр

измеряет излучаемую энергию в разных диапазонах спектра. Данные распространяются государственной организацией NESDI – National Environmental Satellite and Information Service. Спутники GOES обеспечивают глобальные наблюдения через каждые 30 минут. Изображения Соединенных Штатов получаются каждые 15 минут. Есть возможность и более частого сканирования (даже каждую минуту), если этого требуют программы NOAA.

Еще один метеорологический спутник NOAA запущен в 2004 году и запуск следующего запланирован на 2008 год. Он будет последним из текущего ряда спутников. Новый спутник NPOESS (Национальная Полярно-орбитальная Оперативная Экологическая Спутниковая Система) запланирован к запуску в 2009. На нем будет использоваться цифровая технология отображения.

**Спутник QuickSCAT.** Из серии американских спутников NASA [68] рассмотрим спутник QuickSCAT, запущенный в июне 1999. Спутник QuickSCAT движется по солнцесинхронной орбите. Это означает, что он пересекает определенную точку над Землей всегда в одно и то же время дня. Параметры орбиты спутника: высота 800 км, наклон  $98,6^\circ$  относительно экваториальной плоскости, период обращения 102 минуты, то есть 14 оборотов в день. Внешний вид спутника показан на рис. 8.57.



Рис. 8.57. Спутник QuickSCAT, оборудованный скатерометром

Этот спутник оборудован не радиометром, как большинство других, а скатерометром. Скатерометр QuickSCAT – это радиолокатор с излучаемой частотой 13,4 ГГц (длина волны до 2,2 см), сконструированный специально для измерения скорости и направления ветра над поверхностью океана. Ветер, проходя над океаном, возмущает поверхность воды, и она

становится неровной из-за возникновения капиллярных волн сантиметрового масштаба. Это, в свою очередь, модулирует параметры сигнала, отраженного от поверхности. Этот прибор сканирует полосу шириной приблизительно 1800 км. Он позволяет накапливать приблизительно 400 тыс. измерений и охватывает 90% земной поверхности за день. Разрешающая способность прибора 25 км. Таким измерениям скорости приземного ветра практически не препятствует наличие облачности, но мешающими факторами являются все те явления, которые разрушают капиллярные волны: дождь и сильный ветер (больше 20 м/с). Точность измерения скорости в интервале между 3 и 20 м/с составляет 2 м/с, а точность оценки направления ветра – 20°.

#### **8.12.4. Метеорологическая информация**

Передача текущей метеорологической информации WEFAX осуществляется со спутников постоянно, и спутниковая метеоинформация постоянно поступает различным пользователям. Она необходима для привязки ко времени и географической привязки фотоизображений, а также для дешифровки снимков, то есть выявления особенностей облаков и их связи с синоптическими процессами. Чтобы помочь метеорологам производить корректную интерпретацию спутниковой информации используется метод улучшения изображений с помощью цвета. Цвет помогает метеорологу легко и быстро увидеть особенности, которые представляют особый интерес.

Спутниковые системы широко используются для обмена метеорологической информацией, в частности, для получения данных из ВЦЗП. Спутниковая метеорологическая информация интернациональна по своему характеру. Например, в Азербайджане, Армении, Молдавии, Эстонии, Болгарии, России и Туркмении для получения продукции ВЦЗП, расположенного в Лондоне, используются спутниковые системы SADI; в Беларуси, Литве, Латвии, Украине – системы REI и FAX-E. Ныне приемные комплексы Центра дистанционного зондирования Земли, например, Югорского НИИ информационных технологий в Ханты-Мансийском автономном округе России [29] имеют возможность принимать и обрабатывать информацию от американских спутников серии NOAA.

#### **8.12.5. Спутниковые исследования**

Научные исследования в области спутниковых технологий требуют значительных затрат, но несмотря на это, развитые страны наращивают усилия по исследовательской и оперативной работе в области спутниковой метеорологии и ДЗ.

Значительные усилия специалистов по спутниковой метеорологии направлены на дистанционное определение вертикальных профилей и горизонтальных полей температуры и водного пара. Другое направление охватывает исследования эффективности активных датчиков, размещаемых на спутниках, таких как лидары и радары, для того, чтобы определить профили ветра и другие метеорологические величины с довольно высоким вертикальным разрешением. Это необходимо для установления начальных условий и постоянного использования спутниковых данных в метеорологических моделях прогнозирования погоды.

Активно развиваются методы включения радиолокационных изображений и геосинхронных спутниковых данных в программы анализа облачности, разрабатываются новые аналитические методы спутниковой метеорологии. Цель таких исследований состоит в том, чтобы точнее определять характеристики облаков со спутника, в частности, высоту облака, его физическую и оптическую толщину, параметры размеров частиц, фазу развития облака, а также области дождя.

Разработка и усовершенствование спутниковых датчиков с целью оптимизации длины волны и полосы пропускания, улучшение пространственного разрешения и калибровка также являются важными направлениями работ в области спутниковых измерительных систем. Характерным примером является система ДЗ водяного пара, разработанная в рамках программы DMSP (Defense Meteorological Satellite Program) [48].

Важными являются исследования по обобщению экологической информации, получаемой от большого количества спутниковых измерительных платформ и датчиков. Для обеспечения оперативной работы метеорологов осуществляется идентификация облачности в необходимых пространственных масштабах на основе прямого считывания спутниковых метеорологических данных. Разработан пакет алгоритмов спутникового анализа облаков TACNEPH [42], который реализован в так называемом малом тактическом терминале (Small Tactical Terminal) DMSP.

#### **8.12.6. Погода в аэропортах**

На основе спутниковых данных функционирует станция METAR [66], которая обеспечивает доступ к метеорологической информации более чем в 3000 аэропортов во всем мире. Зайдя на сайт [66], достаточно щелкнуть на соответствующем географическом районе, чтобы приблизиться к желательному аэропорту и получить необходимую авиационную метеорологическую информацию. Например, для аэропорта Борисполь вечером 9 июля 2003 года была полученная следующая информация:

09.07.2003

Boryspil, Ukraine

The report was made **38** minutes ago, at **21:30** UTC.

Wind: **3** m/s from **west/northwest (300°)**, varying between **west (260°)** and **north/northwest (330°)**.

Temperature: **17 °C**

Dew-point: **15 °C**.

Atmospheric pressure: **1002** hPa.

Relative humidity: **88.0%**.

**a few** clouds at a height of **427** meter, **scattered cumulonimbus** clouds at a height of **975** meter, and **broken** clouds at a height of **2438** meter.

Overall visibility: greater than **10** kilometers.

Данные о погоде в аэропортах можно также заказать по электронной почте по адресу <METAR@FlightWX.com>. Запрос должен включать лишь идентификатор ICAO данного аэропорта. Для этого существует специальный бланк [54], посылка которого вызовет автоответ.

### **8.12.7. Спутники в интегрированных системах**

В спутниковых технологиях получения метеорологической информации важную роль играют системы сбора и распространения данных о погоде с использованием датчиков, размещенных на самолетах, и передачей информации на спутники.

Идея использования динамической сети с датчиками, размещенными на рейсовых самолетах, была предложена в [38], [39] и конкретизирована для данных об электричестве атмосферы. В 90-е годы XX ст. она была принята АН СССР к внедрению как концепция единой сети наблюдения динамики гроз и геофизических электромагнитных процессов в соответствии с решением Научного совета по проблеме "Статистическая радиофизика" АН СССР (протокол № 23/19 от 22.02.91). В начале 90-х годов в США независимо был начат эксперимент с ретрансляцией метеоинформации с самолетов на спутник – Aircraft to Satellite Data Relay (ASDAR), в котором были задействованы 17 самолетов международных авиалиний. В наше время это начинание стало широкомасштабной долгосрочной работой, в которой принимают участие много стран, но наибольший вклад вносят США и Великобритания [76]. Создана и развивается система автоматического сбора данных и оповещения - Automatic Meteorological Data and Reporting (AMDAR). В 2002 году количество

наблюдений в системе AMDAR, которые прошли через глобальную телекоммуникационную систему (GTS), составляло приблизительно 130 тыс. в день. Система AMDAR оказалась высоко рентабельным источником данных, который соответствует потребностям программ ВМО и приносит выгоды конечным пользователям. Более широко вопросы применения интегрированных систем получения и распространения метеорологической информации рассмотрены в разд. 8.13.

## **8.13. ИНТЕГРИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ ПОЛУЧЕНИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ И МЕЖДУНАРОДНЫЕ ПРОГРАММЫ**

### **8.13.1. Земля – спутник**

Для получения достоверной информации при ДЗ важно, что атмосферу можно зондировать в двух направлениях: с поверхности земли и со спутника. Наземные измерения необходимы для верификации спутниковых данных. Интерпретация результатов спутниковых измерений, которые охватывают большие площади и объемы атмосферы, может быть проведена более точно и эффективно при объединении этих данных с результатами измерений наземными средствами ДЗ, проведенными в ближней зоне, даже "в точке". Таким образом, один из аспектов интеграции проходит по линии "Земля-спутник".

### **8.13.2. Аэропорт**

В пределах района аэропорта может быть сконцентрировано большое количество разных средств ДЗ и контактных метеорологических измерений. Во многих случаях они могут дополнять друг друга. Поэтому вполне естественно возникает мысль о создании интегрированной системы метеорологических наблюдений. Объединение информации от разных источников, предложенное раньше для бортовых систем [33], не менее целесообразно и для зоны аэропорта. Метеорологические данные от разных источников могут быть объединены для получения более точной и детальной информации о погоде в районе аэродрома. Примером такой системы является Интегрированная метеорологическая система – Integrated Terminal Weather System (ITWS). ITWS – один из двух главных проектов, которые поддерживаются Программой развития авиационной метеорологии FAA [52]. Система ITWS, разработанная в Линкольновской лаборатории [67] Массачусетского технологического института при поддержке FAA в рамках специальной программы Aviation Weather Development Program, предназначена обеспечить повышение качества метеорологической информации путем интегрирования данных от разнообразных датчиков и метеорологических информационных систем FAA и NWS. Повышение качества метеорологической информации способствует повышению эффективности планирования, производительности и безопасности работы аэропорта.

Нелетная погода в районе аэропорта – главная причина задержек рейсов и аварий ВС. Развертывание разных систем зондирования атмосферы, в частности, таких как Terminal Doppler Weather Radar (TDWR), Airport Surveillance Radar (ASR-9), Wind Shear Processor



(WSP) и Low Level Wind Shear Alert System (LLWAS), которые были рассмотрены в разделе 8.10, значительно улучшает безопасность авиационного движения в районе аэропорта. Однако, действуя индивидуально, эти системы не могут в достаточной мере снизить количество задержек, вызванных сложными метеорологическими условиями. Даже набор упомянутых систем (или им подобных) не может решить проблему, если возникает сразу несколько требований относительно метеорологической безопасности, например, предупреждение изменений интенсивности снегопада (который влияет на необходимость принятия мероприятий против обледенения самолетов), прогнозирование СВ и идентификация опасных штормовых ячеек. Кроме того, существует насущная необходимость уменьшить нагрузки на авиадиспетчера, в особенности в условиях неблагоприятной погоды.

На рис. 8.58, [52], показаны основные источники данных для системы ITWS и главные пользователи системы. Среди источников данных показаны:

NEXRAD – доплеровский метеорологический радиолокатор NWS;

TDWR – доплеровский метеорологический радиолокатор FAA;

AWOS – автоматизированная система метеорологического наблюдения;

ASOS – автоматизированная система наблюдения поверхности;

ASR-9 – аэродромный радиолокатор наблюдения с веерной диаграммой направленности, который дополнительно к основным функциям обнаруживает и отражения от метеообразований;

LLWAS – система обнаружения сдвига ветра на малых высотах, использующая анемометры в качестве первичных датчиков.

Информация о микровзрывах, фронтах порывов ветра, местоположении и движении гроз, ливневых ячеек, ветре в районе аэродрома, торнадо предоставляется пользователям разного уровня.

Эта схема (см. рис. 8.58) подчеркивает одну из важных особенностей ITWS, а именно – объединение знаний, которые поступают из разных источников, для формирования комплекта информации об оперативно значащей метеорологической обстановке в зоне аэропорта и предоставление ее пользователям.

Традиционно РО осадков (разд. 8.9) является основным источником информации для вынесения решения о штормовом положении в районе аэропорта, а информация о ветре, температуре и влажности выводится и отдельные алфавитно-цифровые дисплеи. В то же время термодинамические параметры (температура и влажность), параметры ветра и особенности микрофизических процессов являются тоже, как и РО, для определения уровня опасности и оценки развития погодных условий во времени.



Рис. 8.58. Интегрированная метеорологическая система аэропорта.

Обоснованно используя разные источники данных, система ITWS способна создавать информацию, которую невозможно добыть из данных, получаемых отдельными датчиками. Основная задача ITWS состоит в уменьшении количества задержек рейсов. Она решается двумя путями: прямым и косвенным. Прямой путь – это предоставление информации авиационному персоналу (руководителям полетов, диспетчерам, пилотам), чтобы он имел возможность работать активнее и обеспечить эффективное и хорошо организованное воздушное движение в неблагоприятной погодной ситуации. Косвенный путь – это обеспечение метеорологической информацией системы автоматизации аэропорта (АС УВД) и консультативной системы вихревого следа (wake-vortex advisory system), чтобы оптимизировать использование доступных аэродромных маршрутов и ВПП. Дополнительный вклад в повышения уровня безопасности полетов возникает благодаря уменьшению нагрузки на диспетчера и улучшенному планированию работы аэропорта. Объем работы диспетчера благодаря внедрению системы ITWS снижается, во-первых, за счет передачи своевременной привязанной к конкретному месту информации пилотам непосредственно по каналу передачи данных, и во-вторых, благодаря уменьшению

необходимости интерпретировать информацию, которую предоставляет система. Это способствует повышению безопасности полетов.

Примеры конкретных ситуаций в аэропортах США в условиях задержки рейсов из-за метеоусловий, особенности использования разных датчиков для создания информационного продукта ITWS и работы системы в реальном времени, а также оценку ее эффективности можно найти в [67].

Новый уровень интеграции функций различных систем заложен в проекте многофункциональной радиолокационной системы на основе фазированной антенной решетки, который начат NOAA, National Severe Storm Laboratory в Норманне, Оклахома, США [97]. Эта перспективная система объединит функции аэродромного радиолокатора (ASR), трассового радиолокатора (ARSR), аэродромной доплеровской метеорологической системы (TDWR) и метеорологического радиолокатора (WSR-88D) в поляриметрическом варианте.

### **8.13.3. Борт ВС**

На борту современного самолета сконцентрированное большое количество разных датчиков и систем, которые могут прямо или косвенно служить источниками информации для выявления зон ОМЯ. Радиолокационные (активные и пассивные), оптические и термодинамические характеристики, которые могут быть измерены непосредственно на борту, а также доступные параметры движения самого самолета составляют довольно полный комплекс данных, которые целесообразно использовать для создания оперативной интегрированной метеорологической информации о состоянии атмосферы на трассе полета. Комплексная система дистанционного обнаружения ОМЯ с борта самолета с использованием информационных каналов разной физической природы разработанная в НАУ [33]. Концепция комплексной локализации зон ОМЯ кратко изложена в разд. 8.11.6.

### **8.13.4. Борт ВС – спутник – Земля**

Важные аспекты интеграции связаны с использованием рейсовых ВС как датчиков метеорологической информации и носителей метеорологического оборудования. На этой основе может быть построена динамическая сеть. Обработка данных, получаемых из такой динамической сети, дает качественно новый уровень метеорологической информации, необходимой для обеспечения безопасности полетов.

**Система AMDAR.** Системы ASDAR/AMDAR, в которых задействованные самолеты коммерческих авиалиний для сбора и передачи метеорологической информации на спутник с дальнейшей ее обработкой в наземных метеорологических центрах, были упомянуты в разд. 8.12.7. Аббревиатура AMDAR происходит от Aircraft Meteorological DATA Relay (Трансляция метеоданных с самолета); существует также другая расшифровка: Automated Meteorological Data And Reporting. Система AMDAR обеспечивает автоматические наблюдения (как минимум - ветра и температуры) по маршрутам коммерческих самолетов тех авиакомпаний, которые являются членами панели AMDAR, или наняты для участия в работе системы.

Система AMDAR обеспечивает данные о профилях метеопараметров в окрестностях главных аэропортов и на трассах. Важно, что данные вблизи аэропортов получаются на высотах выполнения полетов. Результаты измерений сети AMDAR очень полезны для верификации прогнозов погоды. Кроме того, система обеспечивает повышение количества измерений в верхней части тропосферы в регионах выполнения полетов.

Первый прототип системы AMDAR был разработан в Австралии в середине 1980-х годов по инициативе метеорологической службы. Другие НМС в скором времени стали наследовать это начинание. В 1992 в работу включился ряд авиакомпаний США, в 1993 - KLM, 1995 - Air France, 1998 - British Airways и SAS, 1999 - Lufthansa. Наибольшую активность, в том числе финансовую, в развитии системы проявляют американские компании, за ними следуют британцы [47]. В настоящее время, кроме упомянутых стран, комплекты систем AMDAR устанавливаются на самолетах авиакомпаний Испании, Аргентины и даже Саудовской Аравии и Маврикия, хотя и не принадлежат им. Первого июня 2000 года административно была основана европейская сеть E-AMDAR. Ее первыми участниками были 10 НМС. В 2001 их стало 12.

Система AMDAR занимает особое место среди других перспективных направлений развития систем получения и передачи метеорологической информации. По сути AMDAR – это совокупность систем, которая включает систему связи самолет-спутник для передачи метеорологической информации – Aircraft to Satellite Data Relay (ASDAR) и адресно-информационную систему связи фирмы ARINC, называемую Communications Addressing and Reporting System (ACARS).

Чем больше стран и авиакомпаний участвуют в развитии AMDAR, тем гуще динамическая сеть и качественнее метеорологическая информация. На рис. 8.59. показана схема покрытия земного шара рейсами, которые задействованные в системе AMDAR в течение одного дня – 22.04.2002 г. [73].

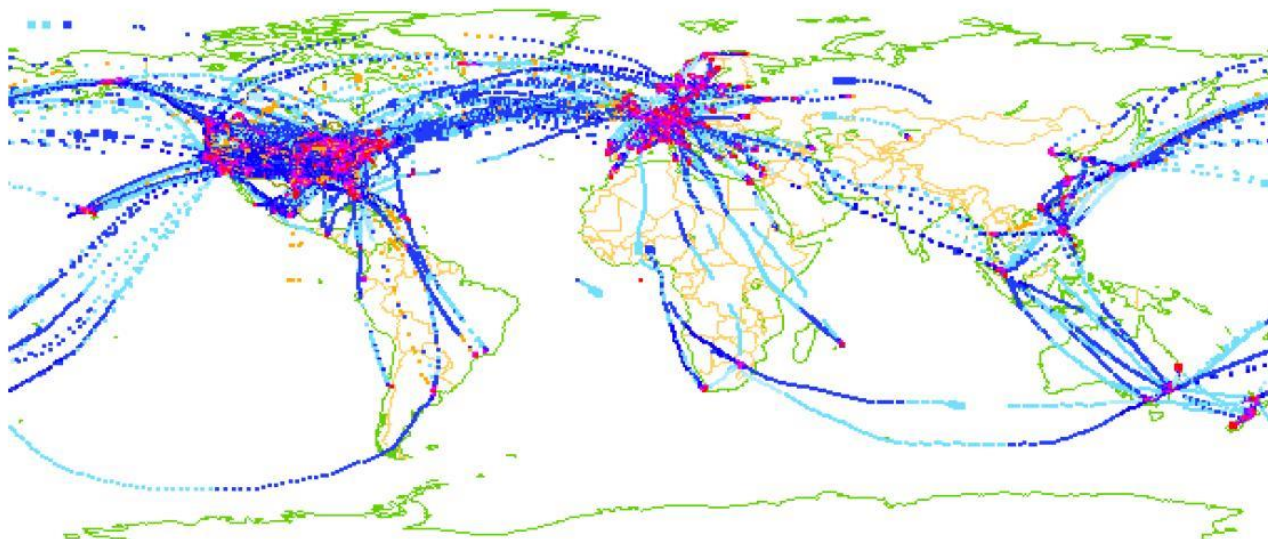


Рис. 8.59. Плотность маршрутов интегрированной системы AMDAR за один день (глобальное покрытие).

Общие усилия ARINC, NWS, и FAA обеспечивают тысячи автоматизированных метеорологических сообщений от самолетов, оборудованных системой ACARS. Наибольшая концентрация данных существует над территорией США, западной Европы и Атлантики. Информационная система метеорологических данных ARINC ACARS собирает, организует и распространяет автоматизированные сообщения место / погода для NWS. Стандартизированные метеорологические данные посылаются в NWS в двоичном универсальном формате для представления в коде метеорологических данных - Binary Universal Form Representation of Meteorological Data (BUFR). Приблизительно 150 000 сообщений AMDAR в день в разных форматах и внутренних кодах выдаются фирмой ARINC (автоматически передаются ACARS). Большой объем метеорологических сообщений, в особенности по зонам океанов и других труднодоступных зон, реализуются через спутниковые системы связи и навигационные системы. Этот источник данных представляет первостепенный интерес для США и других членов ICAO и Международной исследовательской группы автоматических самолетных данных WMO. Сохраняется намерение привлечь дополнительные авиакомпании для установки систем ASDAR, чтобы расширить географический регион охвата оперативными системами ASDAR.

Согласно [76], в странах – членах AMDAR осуществляется ряд потенциально важных для развития системы проектов, в которых принимает участие также авиационная промышленность, которая заинтересована в расширении и усовершенствовании метеорологических наблюдений на борту самолета. Среди них работы, связанные с усовершенствованием бортового программного обеспечения, которое с течением времени

должно превратиться в новый стандарт для всей отрасли, а также развитие новых систем наблюдения и обнаружения ОМЯ, например, измерение и передача информации о турбулентности, влажности и обледенении.

В 2002 г. на заседании Комиссии по аэронавигационной метеорологии [76] было заявлено о выполненной работе по учреждению системы ASDAR/AMDAR в Российской Федерации. Следует отметить, что в настоящее время транссибирские и полярные коридоры, которые проходят через малонаселенные регионы Сибири и Дальнего Востока хуже всего охвачены данными системы ASDAR/AMDAR. Международные авиалинии, маршруты которых проходят над Северным полюсом, пересекая Россию и обслуживая страны Юго-Восточной Азии, очень заинтересованы в получении дополнительной метеорологической информации. Поэтому очень важно, что данные AMDAR после охвата Российской Федерации помогут получать более точную информацию о температуре и параметрах ветра на уровнях полетов ВС для рейсов через транссибирские и полярные коридоры. Это будет существенным вкладом в безопасность и эффективность полетов.

Достоинства AMDAR состоят в высоком качестве данных о температуре воздуха и скорости ветра, доступности данных практически в реальном масштабе времени, наличии ценных результатов измерений профиля ветра, широких возможностях для наращивания системы ACARS/AMDAR и ее потенциала, в том числе путем расширения номенклатуры измеряемых параметров.

С точки зрения количества и качества метеорологической информации недостатки системы в настоящее время связаны с отсутствием измерений влажности, недостаточностью ночных измерений, ограничениями регионов измерений только проложенными маршрутами самолетов и необходимостью сертификации аппаратуры для установления ее на коммерческие самолеты. Кроме того, профили данных не могут быть вертикальными. Но большинство из этих проблем могут быть решены. Например, Комиссия по аэронавигационной метеорологии ВМО [47] отметила среди других достижений разработку единого универсального программного обеспечения для автоматических самолетных наблюдений и включение информации о турбулентности и данных о влажности в состав сообщений AMDAR. В [47] также отмечено, что важнейшим в работе системы AMDAR является обеспечение безопасности полетов.

**Автоматическое (автоматизированное) зависимое наблюдение.** Идея автоматических сообщений метеорологических данных с борта ВС тесно пересекается с принятой ICAO концепцией автоматического зависимого наблюдения - Automated Dependent Surveillance (ADS). На совместном совещании ICAO и ВМО [65] указано, что авиационные потребности в автоматизированных донесениях с борта должны удовлетворяться путем

использования блоков данных с метеорологической информацией в сообщениях ADS. Все другие типы донесений с борта (например, сведения с бортовыми метеорологическими данными системы AMDAR) считаются базовыми метеорологическими данными и поэтому рассматриваются в рамках соответствующих программ ВМО. Собрание признало, тем не менее, важность развития системы AMDAR, которая оказывает большую поддержку программам Всемирной службы погоды (ВСП) ВМО.

Подробные технические требования к метеорологическим параметрам, которые подлежат включению в блок данных с метеорологической информацией сообщения ADS, внесены в Технический регламент ВМО и ICAO [59]. Они включают подробные указания относительно представления данных о турбулентности. Такие данные предполагается представлять в виде индекса, который является функцией средней и максимальной скорости диссипации кинетической энергии турбулентности - Eddy Dissipation Rate (EDR) в течение 15-минутного периода, непосредственно предшествующего наблюдению. Параметр EDR был рассмотрен на с. 364. В соответствии с [65] величина EDR была выбрана на основе испытаний, проведенных в Австралии и Соединенных Штатах Америки, и что этот выбор обусловлен тем, что EDR будет использоваться в будущем как входная переменная в моделях прогноза погоды NWP, принятых ВЦЗП. Это может оказать положительное влияние на качество прогнозов турбулентности.

#### **8.13.5. Другие специализированные интегрированные системы**

Кроме самолетных систем AMDAR и ADS, разворачиваются и другие системы наблюдения. Например, Автоматизированная Корабельная Аэрологическая Программа - Automated Shipboard Aerological Program (ASAP) состоит из 12 систем, которые регулярно дают сообщения. Много стран, включая США, эксплуатируют испытательные сети наземных доплеровских радиолокаторов NEXRAD (разд. 8.10.10), чтобы обеспечить почти непрерывное зондирования атмосферы. С целью совершенствования методологии, которая используется в развитии и развертывании систем метеорологического наблюдения NOAA разрабатывает программу Североамериканских систем атмосферного наблюдения (NAOS).

Концепция Оперативной всемирной системы наблюдения и оценки погоды – Operational World Weather Watch Systems Evaluation (OWSE) предусматривает ее применение и как региональной структуры. Так, успешно завершено создание системы OWSE-АФРИКА, необходимой для радиосвязи и распространения метеорологических данных в Африке, а также для оценки качества самого протяженного применения геостационарного

метеорологического спутника Европейского эксплуатационного космического консорциума EUMETSAT.

Наращиваются усилия по разработке и осуществлению Глобальной системы наблюдения климата - Global Climate Observing System (GCOS), которая строится на основе системы World Weather Watch (WWW). Система WWW объединяет глобальную океаническую систему обслуживания – Integrated Global Ocean Services System (IGOSS) и другие существующие системы с целью углубления знаний об атмосферных процессах, лучшего понимания особенностей климата и прогноза его изменений.

#### **8.13.6. Глобальная система наблюдения**

Глобальная система наблюдения - Global Observing System (GOS) – это согласованная система методов, технических приемов, и средств обслуживания для выполнения погодных наблюдений в глобальном масштабе. Она является сложной системой, в которую входят подсистемы поверхностного, самолетного и спутникового базирования [79], обеспечивающие автоматизированные наблюдения атмосферы снизу (с поверхности Земли), с середины (ВС, зонды) и сверху (спутники).

Главными элементами подсистемы поверхностного (наземного) базирования являются региональные и основные синоптические станции и сети, стационарные морские пункты наблюдений, составленные из океанских метеорологических станций, стационарных и поставленных на якорь станций базовой системы, островных и прибрежных станций; к той же подсистеме относятся подвижные морские станции, включая суда и дрейфующие бакены.

Самолетные метеорологические станции, включают автоматизированные самолетные информационные системы. Подсистема космического (спутникового) базирования обеспечивает необходимую поддержку для метеорологических и гидрологических прогнозов и предупреждений. Использование спутников обеспечивает сбор данных наблюдений об окружающей среде, включая весьма отдаленные и труднодоступные места. Используются две категории метеорологических спутников: на полярных орбитах и на геостационарных орбитах (см. разд. 8.12).

Чтобы обеспечить непрерывность данных, получаемых с геостационарных орбит, подписано долгосрочное соглашение по обмену данными между NOAA и EUMETSAT. В будущем спутник POES NOAA будет соединен в единую структуру с военными системами DMSP, чтобы сформировать скоординированную систему, названную NPOESS (Национальная полярно-орбитальная оперативная спутниковая система окружающей среды). NOAA, DOD и NASA работают вместе, чтобы осуществить NPOESS. NOAA возглавляет



объединенный офис Программы IPO и отвечает за действие NPOESS, а также за связи с национальными и международными гражданскими пользователями системы. DOD несет ответственность за приобретение (снабжение) NPOESS, запуск системы и интеграцию на системном уровне. Задача NASA связана с развитием и объединением новых, рентабельных технологий, чтобы увеличить возможности NPOESS.

Радиопередача данных от американских спутников серии NOAA и серии GOES является свободной, неограниченной, и не требует никакого априорного сообщения. Данные могут быть получены непосредственно любой, надлежащим образом оборудованной, наземной станцией в границах прямой видимости спутников. Соединенные Штаты через NOAA извлекают метеорологическую информацию из этих данных для дальнейшего распространения через сеть GTS. Всемирная метеорологическая сеть WWW является гибкой системой, которая может быть приспособлена к изменяющимся технологиям и эксплуатационным состояниям. Последние технологические и научные достижения в области наблюдений, обработки данных, и радиосвязи находятся под пристальным вниманием с точки зрения усовершенствования систем GOES, GDPS, и GTS.

Развитие и функционирование интегрированных систем влияет на работу авиации, которая, с одной стороны, всегда требует более точной и детальной метеорологической информации, а с другой стороны, вносит свой весомый вклад в получение этой информации.

## 8.14. ЭФФЕКТИВНОСТЬ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ АВИАЦИИ

Воздушные перевозки должны быть безопасными и эффективными. Для обеспечения этого требуется согласованный на международном уровне свод правил полетов. Такие правила, разработанные ИКАО и включающие общие правила, правила визуального полета и правила полетов по приборам, сведены в Приложение 2 к Конвенции ИКАО и применяются без исключения над открытым морем и над территориями государств при условии, что они не противоречат правилам, действующим в государствах, над территориями которых выполняются полеты. За соблюдение правил полетов отвечает командир воздушного судна. Пилотам необходима информация об условиях погоды на маршрутах, по которым им предстоит выполнять полет, и на аэродромах назначения. Это неперемное условие безопасности полетов.

Авиационный транспорт играет уникальную роль в мировой экономике и экономике отдельных государств, в том числе Украины. Вся деятельность аэродромных метеорологических органов, по сути, подчинена решению традиционной задачи гражданской авиации: обеспечить безопасность, регулярность и экономическую эффективность воздушных перевозок.

В Приложении 3 к Конвенции ИКАО указывается, что задача метеорологического обслуживания заключается в содействии безопасному, эффективному и регулярному осуществлению аэронавигации. В этом документе говорится и о роли метеоинформации в прокладке пилотом такого курса, который позволит воспользоваться благоприятным ветром и сэкономить топливо, что особенно важно в условиях, когда цены на топливо постоянно растут. Поэтому можно говорить о высокой эффективности ВСЗП и метеорологического обслуживания аэронавигации в целом. Неоценимое положительное влияние метеорологического обеспечения на безопасность полетов очевидно, особенно, если учесть уровень влияния опасных метеорологических явлений на работу авиации (разделы 8.1-8.5).

На сайте ВМО (<http://www.un.org/russian/ecosoc/wmo/page2.htm>) приведены оценки экономической эффективности метеорологического и гидрологического обслуживания. Грубая оценка по данным 1994 года показывает, что глобальная экономическая эффективность находилась в пределах 20–40 млрд долл. США. Какая доля от этой суммы относится к метеорологическому обслуживанию авиации, сказать трудно, однако общая сумма впечатляет.

Комиссия ВМО по основным системам на внеочередной сессии [99] в 2002 году сохранила в качестве рекомендованной практики положения, касающиеся управления

качеством, Приложения 3 ИКАО/Технического регламента ВМО,[С.3.1], и рекомендовала ИКАО и ВМО провести совместную разработку руководящих материалов для оказания помощи странам-членам в создании систем управления качеством для предоставления метеорологического обслуживания международной авионавигации. Она далее отметила, что в Программу по авиационной метеорологии в проекте 6 ДП включен конкретный компонент, относящийся к системам управления качеством, предусматривающий получение больших выгод от оказания помощи поставщикам авиационного метеорологического обслуживания и их персоналу в повышении качества их услуг для авиационных пользователей и в увеличении общей эффективности.

В то же время следует признать, что существующие документы и международные соглашения мало затрагивают экономическую сторону метеорологического обслуживания авиации и не уделяют внимания методике оценки экономической эффективности. Обзор работ по вопросу оценки экономической эффективности метеорологического обеспечения приведен в [100]. Согласно [100], один из подходов предполагает, что экономический эффект достигается в основном путем задержки вылета ВС при неблагоприятной погоде в пункте посадки или по трассе полета. Этим предотвращается посадка на запасной аэродром или возврат самолета в пункт вылета. Оценка ущербов, связанных с нарушением регулярности полетов, сложна в методическом отношении.

Суть метода оценки экономической эффективности прогнозной метеорологической информации для обеспечения ГА заключается в следующем [101], [102]. За определенный промежуток времени (обычно месяц) составляется матрица соответствия прогнозов и фактической погоды. Пример такой матрицы приведен в табл. 8.7.

Таблица 8.7

Матрица соответствия прогнозов и фактической погоды

Погода по прогнозу	Фактическая погода		Сумма
	Нелетная $\Phi_1$	Летная $\Phi_2$	
Нелетная $\Pi_1$	$n_{11}$	$n_{12}$	$n_{10}$
Летная $\Pi_2$	$n_{21}$	$n_{22}$	$n_{20}$
Сумма	$n_{01}$	$n_{02}$	$n$

Здесь  $n_{11}$  – количество оправдавшихся прогнозов нелетной погоды  $\Pi_1$ ;  $n_{12}$  – количество неоправдавшихся прогнозов нелетной погоды  $\Pi_1$ ;  $n_{21}$  – количество неоправдавшихся прогнозов летной погоды  $\Pi_2$ ;  $n_{22}$  – количество оправдавшихся прогнозов

летней погоды  $\Pi_2$ ;  $n_{10}$  и  $n_{20}$  – общее количество прогнозов нелетной  $\Pi_1$  и летной  $\Pi_2$  погоды соответственно;  $n_{01}$  и  $n_{02}$  – общее количество случаев нелетной  $\Phi_1$  и летной  $\Phi_2$  погоды соответственно;  $n$  – общее количество разработанных прогнозов. При этом справедливы следующие равенства:

$$n_{10} = n_{11} + n_{12}; \quad n_{20} = n_{21} + n_{22}; \quad n_{01} = n_{11} + n_{21}; \quad n_{02} = n_{12} + n_{22}; \quad n = n_{10} + n_{20} = n_{01} + n_{02}. \quad (8.46)$$

Показателями эффективности являются три безразмерных параметра:

1) степени предупрежденности об ОМЯ  $G = \frac{n_{11}}{n_{01}};$

2) оправдываемость прогнозов о наличии ОМЯ  $\eta = \frac{n_{11}}{n_{10}};$

3) оправдываемость прогнозов об отсутствии ОМЯ  $\theta = \frac{n_{22}}{n_{20}}.$

Если количество случаев, когда летная погода сменялась нелетной за исследуемый период, обозначить  $l$ , а напряженность работы аэропорта за тот же период обозначить  $U$ , то экономический эффект можно выразить как

$$E = Ul \left[ \bar{B}_1 G + B_0 \theta - \bar{R}_L G \left( \frac{1}{\eta} - 1 \right) - \bar{L}_0 (1 - G) \right], \quad (8.47)$$

где  $\bar{B}_1$  – средний эффект одного прогноза с ОМЯ;  $B_0$  – средний выигрыш от одного оправдавшегося прогноза без ОМЯ, выданного в период нелетной погоды;  $\bar{R}_L$  – средний убыток от непроизводительного налета ВС;  $\bar{L}_0$  – средние потери при неоправдавшемся прогнозе без ОМЯ.

Величина  $\bar{B}_1 = CU/N$ , где  $C$  – эффективность одного успешного трехчасового прогноза с ОМЯ при  $N$  обслуженных условных самолето-вылетов. Величину напряженности работы аэропорта можно выразить в виде

$$U = \sum_{i=1}^m U_i d_i, \quad (8.48)$$

где  $U_i$  – количество вылетов самолетов каждого типа;  $d_i$  – весовой коэффициент для данного типа ВС, определяемый как отношение себестоимости одного часа эксплуатации ВС данного типа к себестоимости условного самолета – эталона).

Подход к оценке эффективности работы аэродромного метеорологического органа (АМО), например, АМСГ или АМЦ, предложен в [100]. Он исходит из расходов по содержанию АМО. Если принять, что основное оборудование должно обновляться примерно

один раз в 10 лет, то его амортизация составит 10% стоимости в год. С учетом нормативной прибыли ежегодные расходы на содержание АМО составят определенную сумму.

В аэропорту обслуживается  $N$  вылетов в год (около  $N/365$  вылетов в сутки). Отсюда находится стоимость метеорологического обслуживания среднего рейса. Поэтому, с одной стороны, авиапредприятие должно, скажем, ежемесячно переводить на счет АМО определенную сумму, а с другой стороны, что делать, если по вине метеослужбы наблюдался возврат (задержка) ВС или его поломка? В первом случае переведенные авиапредприятием средства являются как бы авансом, а окончательный расчет с АМО за истекший период производится в начале следующего периода по фактическому количеству обслуженных рейсов и качеству метеорологического обеспечения.

При наличии возвратов по вине метеослужбы, АМО должен возвращать авиапредприятию сумму за непроизводительный налет и так называемую упущенную выгоду. Это было бы справедливо при условии, что существующие методы прогноза ОМЯ имели стопроцентную оправдываемость. К сожалению, этого нет, и поэтому должен ли АМО нести ответственность за конкретный неоправдавшийся прогноз погоды необходимо рассматривать индивидуально. Представляется, что если синоптик использовал все рекомендованные для прогноза ОМЯ методы и получил отрицательный результат, то в этом случае АМО не должен нести материального ущерба за случившийся возврат самолета. Если же синоптик не прогнозировал наблюдавшееся ОМЯ или, спрогнозировав его, не сообщил об этом диспетчеру, то тогда все материальные потери, которые понесло авиапредприятие, должен компенсировать АМО. В этом плане необходима материальная заинтересованность синоптиков к улучшению качества работы в зависимости от уровня оправдываемости прогнозов. Вопросы, связанные с оценкой оправдываемости прогнозов, а также – с определением «виновника возврата ВС» должна рассматривать авторитетная комиссия, состоящая из специалистов метеослужбы и ГА.

Еще один вопрос возникает, когда определяется АМО, виновный в возврате самолета. Зачастую самолет возвращается на аэродром вылета из-за того, что не оправдался прогноз в пункте посадки. По существующей технологии метеорологического обеспечения полетов прогноз погоды в пункте посадки разрабатывается на АМО аэродрома посадки и отсылается в пункт вылета самолета; АМО аэродрома вылета за такой прогноз ответственности не несет. В таких случаях потери авиапредприятия должно компенсировать то метеорологическое подразделение, по неоправдавшемуся прогнозу которого было принято решение на вылет самолета.

Анализ возвратов самолетов, которые произошли по метеорологическим условиям, позволит выявить «слабые места» в методике прогноза ОМЯ. Это, в свою очередь, дает

основание поставить конкретные задачи по совершенствованию методики прогнозирования и оперативного обнаружения ОМЯ.

Таким образом, вклад метеообслуживания в безопасность и эффективность работы авиации может быть оценен и учтен. Для полного учета необходимо принимать во внимание показатели безопасности полетов, регулярности полетов и экономической эффективности воздушных перевозок. Однако Комиссия ВМО отметила [99], что дерегулирование индустрии авиации, глобализация и внедрение рыночных экономических принципов в процесс принятия решений правительствами значительно увеличили разнообразие факторов, которые должны учитываться (помимо традиционных элементов безопасности и эффективности) при определении методов предоставления метеорологического обслуживания местной и международной авионавигации. Ряд авиакомпаний, работая по лицензиям, выданным национальным регулирующим органом, развили свои собственные возможности для подготовки прогнозов, в то время как некоторые правительства заключают контракты на авиационное метеорологическое обслуживание с неправительственными и иногда "офшорными" или международными предприятиями. Тем временем, в некоторых странах национальные инфраструктуры, традиционно эксплуатируемые НМС, находятся под растущей угрозой либо за счет увеличения конкуренции за уже сокращающееся правительственное финансирование, либо в связи с внешним давлением, создаваемым присутствием работающих на глобальном уровне поставщиков обслуживания. Жизненно важно признать, что все авиационные прогнозы и предупреждения и, соответственно, безопасность авионавигации, планируемая на основе этих видов продукции, опираются на эту фундаментальную инфраструктуру, включающую сети наблюдений, системы обработки данных и телесвязи, а также международный обмен данными.

Внедрение новых методов и технических средств, описанных в разделах 8.7-8.13 наряду с совершенствованием организации метеорологического обслуживания авиации позволит улучшать полезность и экономическую эффективность метеорологических наблюдений в зоне аэропорта и по трассам полетов. Будут получены дальнейшие выгоды благодаря использованию средств имеющихся автоматизированных систем как для непосредственной поддержки авиации в зоне аэропорта, так и в качестве источника данных для поддержки прогнозирования текущей погоды и для сверхкраткосрочного прогнозирования. Количество аэродромов, совершенствующих свои программы наблюдений на базе использования автоматизированных систем, непрерывно растет. Необходимо вести дальнейшую разработку экономически выгодных способов глобального сбора и распространения автоматизированных метеорологических сводок с самолета для улучшения

Глобальной системы наблюдений и повышения точности прогнозирования опасных для авиации явлений.

Благодаря координации деятельности стран-членов с помощью группы экспертов АМДАР, при оказании помощи со стороны Секретариата, повысится поступление глобальных аэрологических данных высокого качества (включая данные о турбулентности, влажности и обледенении), в частности по районам мира, слабо освещенным данными.

### Список литературы к разделам 8.6-8.14 (Яновский)

1. Аджиев А.Х., Богаченко Е.М. Импульсно-временные характеристики электромагнитного излучения грозовых облаков в дециметровом диапазоне. Изв. АН СССР, Сер. Физ. атмосферы и океана, том.24, № 9, 1983, С.973-979.
2. Атлас Д. Успехи радарной метеорологии. Пер. с англ. под ред. К.С. Шифрина. Л.: Гидрометеиздат, 1967, 196 с.
3. Баранов А.М., О.Г. Богаткин, В.Ф. Говердовский, В.Д. Еникеева. Авиационная метеорология. Санкт-Петербург: Гидрометеиздат, 1992. - 348 с.
4. Баранов И.М., Яновский Ф.И. О необходимости решения задачи оперативного определения оптимальной траектории полета в сложных метеорологических условиях. - Вычислительная техника и моделирование сложных систем - К.: КИИГА, 1976.- Вып. 2. – С.56 -62.
5. Белкин В.В., Голубчик В.Я., Фишман Б.Е., Яновский Ф.И. Способ определения молниевой опасности на самолете, Авторское свидетельство СССР № 957625, 1981.
6. Гальперин С.М, Егоров В.Н., Петренко И.А. Длительность собственного радиоизлучения атмосферных разрядов в метровом диапазоне. Труды ГГО, 1976, вып. 383, С. 140-144.
7. Довиак Р., Зрнич Д., Доплеровские радиолокаторы и метеорологические наблюдения. Л.: Гидрометеиздат, 1989, 512 с.
8. Зуев В.Е. Распространение видимых и инфракрасных волн в атмосфере. М.: Сов. Радио, 1970.- 496 с.
9. Калинин Г.М. Индикация данных о сдвиге ветра в кабине пилотов. - В кн.: Проблемы безопасности полетов, № 2. - М.: МГА, 1993. – с. 45...53.
10. Качурин Л.Г., Кармов М.И., Медалиев Х.Х. Основные характеристики радиоизлучения конвективных облаков. Изв. АН СССР, Сер. Физ. атмосферы и океана, том.10, № 11, 1974, С.1163-1170.
11. Кононов И.И, Петренко И.А., Снегуров В.С. Радиотехнические методы местоопределения грозовых очагов.- Л.: Гидрометеиздат, 1986, 222 с.
12. Кораблев А.В., Яновский Ф.И. Анализ погрешностей НН-метода измерения дальности до источника грозового разряда. Вестник КМУГА, вып.3-4, 2000, с. 147-154.
13. Космическая метеорологическая система МЕТЕОР. 1997-2002 SMIS ИКИ РАН и НИЦ "ПЛАНЕТА" Москва, Россия < <http://sputnik.infospace.ru/>>
14. Яновский Ф.И. Обнаружение зон опасного обледенения самолета бортовым радиолокатором. Сборник материалов 10-й Юбилейной международной научной



конференции “Теория и техника передачи, приема и обработки информации”. 28 сентября-1 октября 2004, ч.1, Харьков – Туапсе, 2004, с. 214-215.

15. Прокопенко И.Г., Яновский Ф.И. Комплексный алгоритм локализации зон опасной турбулентности. Статистические методы обработки информации в авиационных радиоэлектронных системах. К: КМУГА, 1995.- С.29-35.

16. Прокопенко И.Г., Ф.И. Яновский, Л.П. Лигхарт, К.И. Прокопенко. Синтез и анализ эффективности инвариантных алгоритмов обработки сигналов от турбулентных зон в метеонавигационных радиолокационных станциях. Вісник КМУЦА, №2, 1999, С. 154-159.

17. Совершенствование американских самолетных метеорологических РЛС // Радиоэлектроника. Тетр. 3. Обзор. - НИИЭИР.- 1983.- С.41-72.

18. Пат. 16885 Україна, Спосіб регулювання коефіцієнту передачі приймального тракту радіолокаційної станції та пристрій для його реалізації / В.П. Дзюбенко, І.Ю. Трофімов. – Опубл. 29.08.97., Бюл. №4, 1997.

19. А.С. No 1170877 СССР, Способ локализации зон молниевой опасности с борта летательного аппарата. Игнатов В.А., Ильницкий Л.Я., Фишман Б.Е., Яновский Ф.И., приоритет от 21 марта 1984, опубл. 1 апр. 1985.

20. Стандарты минимальных эксплуатационных характеристик для бортовой метеорологической РЛС с возможностью обнаружения сдвига ветра DO-220. Special Committee SC-173, RTCA, 21 сентября 1993.

21. Стандарты ИКАО улучшают погоду на востоке. Новости аэронавигации, № 2, апрель, 2001, 20-21.

22. Степаненко В.Д. Радиолокация в метеорологии. Л.: Гидрометеиздат, 1973.- 344 с.

23. Степаненко В.Д., Шукин Г.Г., Бобылев Л.П., Матросов С.Ю. Радиотеплолокация в метеорологии. – Л.: Гидрометеиздат, 1987, 284 с.

24. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. – М.: Наука, 1986.- 288 с.

25. А.С. No 1334948 СССР, Устройство для индикации турбулентности атмосферы, И.Г. Прокопенко, Э.А. Корнильев, Е.П. Кириченко, С.И. Матвеев. Приоритет от 10.12.85 г.

26. А.С. No 1173367 СССР, Устройство для радиолокационного определения опасных для полетов зон в облачности, И.М. Баранов, Ф.И. Яновский, Приоритет от 22.04.83 г., БИ N 30, 1985.

27. Ширман Я.Д. Теоретические основы радиолокации. – М.: Сов. радио, 1970.- 560 с.

28. Шуляцкий А.Б., Яновский Ф.И. Влияние микрофизических и электрических характеристик неоднородностей тропосферы на преобразование поляризационных

параметров радиолокационных сигналов. Всесоюзная конференция по распространению радиоволн: Тезисы докладов, Ч.2, Харьков, 1990, С. 96.

29. Югорский НИИ информационных технологий <http://www.uriit.ru/portal/jsp/Pages/displayMainPage.jsp>

30. Яновский Ф.И. Бортовые метеонавигационные радиолокаторы. Структура системы и особенности построения передающих устройств – Киев: КИИГА, 1987.- 80 с.

31. Яновский Ф.И. Бортовые метеонавигационные радиолокаторы. Физические основы, основные параметры и принципы построения. Киев: КИИГА, 1982.- 82 с.

32. Яновский Ф.И. Влияние движения радиолокатора на ширину спектра огибающей сигнала, отраженного от облака рассеивателей. "Радиотехника и электроника", том 22, N 9, 1977, С.1972-1974.

33. Яновский Ф.И. Локализация опасных для авиации метеорологических явлений с борта воздушного судна. Киев: Общ."Знание" Украины, 1991, 28с.

34. Яновский Ф.И. Моделирование процессов взаимодействия радиолокационного сигнала с турбулизированным метеорологическим объектом. Вісник КМУЦА, вип.1, 1998, с. 125-136.

35. Яновский Ф.И. Об использовании бортовой РЛС для оценки параметров турбулентности в облаках. "Радиотехника и электроника", Том 19, N 8, 1974, С. 1963-1965.

36. Яновский Ф.И., Голубчик В.Я., Фишман Б.Е. Об основных эксплуатационных требованиях к бортовым системам отображения метеорологической информации гражданской авиации. Вопросы оптимального обслуживания и ремонта АиРЭО воздушных судов. Сб. научных трудов. Киев: КИИГА, 1985, С. 96-100.

37. Яновский Ф.И., Паниц В.А. Применение антенны с управляемой поляризацией для обнаружения зон града и обледенения. Известия вузов. Радиотехника. Т.39, №10, 1996, С.32-42.

38. Яновский Ф.И., Фишман Б.Е. Анализ возможностей повышения информативности наблюдений за атмосферным электричеством. "4 Всесоюзный симпозиум по атмосферному электричеству": Тезисы докладов, Нальчик, 1990, С. 23-24.

39. Яновский Ф.И., Фишман Б.Е. О тенденциях развития бортовых радиотехнических средств обеспечения безопасности полетов. Теория и практика функционального использования и эксплуатации радиоэлектронных систем гражданской авиации. Межвузовский сб. научных трудов. Москва: МИИГА, 1986, С.80-84.

40. Яновський Ф.Й. Метеонавігаційні радіолокаційні системи повітряних суден. – К.: Видавництво НАУ, 2003.- 302 с.

41. ARINC Characteristic 708A Airborne Weather Radar with Forward Looking Windshear Detection Capability. Published: December 27, 1993. Prepared by the Airlines Electronic Engineering Committee. Adopted by the Airlines Electronic Engineering Committee: October 21, 1993. Adopted by the Industry: December 27, 1993, 93 p.
42. Atmospheric and Environmental Research, Inc.(AER) <[http:// www. aer.com/scienceResearch/crs/m-proj/cloud\\_analysis.html](http://www.aer.com/scienceResearch/crs/m-proj/cloud_analysis.html)>
43. Bowles, R.L., Reducing windshear risk through airborne systems technology. 17th Congress of the ICAS, Stockholm, Sweenen, 1990.-27 pp.
44. Bringi, V.N., V. Chandrasecar. Polarimetric Doppler Weather Radar. Cambridge University Press, 2002, 635 pp.
45. Brylev, G.B., Melnikov, V.V., Mikhailov, N.F., Schukin, G.G., Tarabukin, I.A. Current state of radar meteorology in Russia. COST 75 Weather Radar Systems. International Seminar, Brussels, Belgium, 1994, pp. 11-18.
46. Coleman, E.W., Storm warning method and apparatus, US Patent, No 4672305, June 9, 1987.
47. Commission for Aeronautical Meteorology. Advisory Working Group, Geneva, Switzerland, 18-21 February 2002. Final report, 2002, 34 pp.
48. DMSP Homepage <<http://dmisp.ngdc.noaa.gov/dmisp.html>>
49. Doviak, R.J., and D.S. Zrnicek, Doppler radar and weather observations. Academic Press, inc., 1993, 562 p.
50. Eumetsat's dissemination schedule< <http://www.eumetsat.de/en/area3/dessemin>>
51. Europe's Meteorological Satellite Organisation <<http://www.eumetsat.de>>
52. James E. Evans and Elizabeth R. Ducot. The Integrated Terminal Weather System (ITWS). Volume 7, Number 2, 1994 The Lincoln Laboratory Journal, pp. 449-474.
53. Federal Meteorological Handbook No. 11, Doppler Radar Meteorological Observations Part A: System Concepts, Responsibilities, and Procedures FCM-H11A-2003 Washington, DC June 2003, 47 pp.
54. FlightWX Inc <[www.flightwx.com/metar.htm](http://www.flightwx.com/metar.htm)>
55. van Gorp, J.J., and L.P. Ligthart: Doppler weather radar network to measure the local wind field at an airport, , Advanced weather radar systems, COST-75 International seminar, European Commission, Locarno, Switzerland, 1998, pp. 460-466.
56. Heijnen S.H., Ligthart L.P. TARA: Development of a new Transportable Atmospheric Radar. Proc. 5th International Conf. Radar Systems, session Radar Systems 1, Brest, France, 1999.

57. Hildebrand P.H., Oye R.A., Carbone R.E., X-band vs C-band aircraft radar: the relative effects of beamwidth and attenuation in severe storm situations // Journal of Applied Meteorology. - 1981, 20, No11.- pp. 1353-1361.

58. ICAO, Annex 3 — Meteorological Service for International Air Navigation. 14th edition, July 2001, pp. 154.

59. MET/02-WP/12 CAeM-XII/Doc 12. ИКАО Специализированное совещание по метеорологии (MET) (2002), ВМО Комиссия по авиационной метеорологии. Монреаль, 9–27 сентября 2002, 7 с.

60. Kessler E., Lee J.T., Wilk K.E. Association between aircraft measurements of turbulence and weather measurements.- Bull. Amer. Meteor. Soc., 1965. - p. 443-448.

61. Ligthart L.P., Nieuwkerk L.P., van Sinttruyen J.S., FM-CW Delft Atmospheric Research Radar, IEE Proc. F, Vol 127, No 6, pp. 421-426, 1980.

62. Ligthart, L.P., F.J. Yanovsky, I.G. Prokopenko, Adaptive algorithms for radar detection of turbulent zones in clouds and precipitation. IEEE Trans. AES, Vol. 39, No 1, 2003, pp. 357-368.

63. Loper R.L., Wilson J.R. FAA moves out on solving windshear problem// Interavia. - 1989. 44, №3. - pp. 260...263.

64. Melvin W. Terminal Weather. - Flight Int., 131, No 406, 1987.- pp. 44-46,48.

65. MET/02-WP/64 CAeM-XII/Doc 64 24/9/02. ИКАО Специализированное совещание по метеорологии (MET) (2002), ВМО Комиссия по авиационной метеорологии. Монреаль, 9–27 сентября 2002, 32 с.

66. METAR : airport weather reports <[www.allmetsat.com/en/metar.html](http://www.allmetsat.com/en/metar.html)>

67. MIT Lincoln Lab <<http://www.ll.mit.edu/AviationWeather/index4.html>>

68. Home Page NASA < <http://www.nasa.gov/>>; NASA's GOES page for a wealth of related weather satellite information <http://climate.gsfc.nasa.gov/~chesters/text/goesnew.html>

69. Rees, W.G., Physical principles of remote sensing. Cambridge University Press, 1990, 247 p.

70. Remtech Inc. Sodar Technical Description. <<http://www.remtechinc.com/tech1.htm>>, (Updated: 11/2002)

71. Ryan, P. A., Spitzer, N., Device for the detection of electric activity in atmosphere, US Patent, No 4023408, May 17, 1977.

72. Sinitsyn R.B., Beletsky A.J., Yanovsky F.J., Noise signal for sodar application. International Conference on Noise Radar Technology, Kharkov, Ukraine, 2003.

73. Stewart Taylor, EUMETNET AMDAR. Workshop on the use of measurements from Commercial Aircraft. Toulouse, France - 12/13th November 2002.

74. The WEFAX dissemination standard <<http://www.nottingham.ac.uk/meteosat/wefax.html>>

75. Unal, C.M.H., D.N. Moisseev, F.J. Yanovsky, H.W.J. Russchenberg, Radar Doppler polarimetry applied to precipitation measurements: introduction of the spectral differential reflectivity. 30th International Conf. on Radar Meteorology, 19-24 July 2001, Munich, Germany, American Meteorological Society, pp. 316 – 318.

76. WMO Commission for Aeronautical Meteorology, 12th Session, Montreal, 16-20 September 2002. Abridged Final Report with Resolutions and Recommendations, 2002, 56 pp. 78.

77. WP/38 Doc 38 ИКАО Специализированное совещание по метеорологии (MET) (2002), ВМО Комиссия по авиационной метеорологии. Использование сети Интернет для предоставления авиационных метеорологических данных и прогнозов авиационному сообществу, Монреаль, 2002, 9 с.

78. De Wolf, D.A., Russchenberg, H.W.J., Ligthart, L.P., Effective permittivity of and scattering from wet snow and ice droplets at weather radar wavelengths, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 38, No 9, 1990.

79. WWW Global Observing System <[www.wmo.ch/web/www/OSY/GOS.html](http://www.wmo.ch/web/www/OSY/GOS.html)>

80. Yanovsky, F.J., Phenomenological Models of Doppler-Polarimetric Microwave Remote Sensing of Clouds and Precipitation. Proceedings, 2002 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Toronto, 2002, pp. 131-134.

81. Yanovski, F.J., L.P. Ligthart, H.W.J. Russchenberg, V.S. Fomichov, Comparison of Modeled and Measured Doppler-Polarimetric Parameters of Radar Signal Reflected from Rain, Proceedings of the 2000 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2000), vol 3, Fukuoka, Japan, 2000, pp. 951-955.

82. Yanovsky, F.J., Korablev, A.V., Use of some propagation singularities for passive determination of the distance up to lightning source. Millenium Conf. on Antennas & Propagation AP 2000, Davos, Switzerland, 9-14 April 2000, 4 p.

83. Yanovsky, F.J., R.B. Sinitsyn, and I. M. Braun, Recognition of hail areas with polarimetric radar by the Method of Potential Functions. IEEE IGARSS, Toronto, Canada, 2002. Vol. 5, pp. 2835 –2837.

84. Yanovsky, F.J., C.M.H. Unal, H.W.J. Russchenberg, Doppler-Polarimetric Radar Observations of Turbulence in Rain. Report IRCTR-S-006-03, TU-Delft, The Netherlands, 2003, 102 pp.

85. Yanovsky, F.J., Use of signal polarization properties – the way to improvement of weather radar parameters. Proceedings of the Third International Workshop on Radar Polarimetry, March 21-23, 1995, Nantes, France, pp. 578-589.

86. Yanovsky F.J. Polarimetric Technique for Aircraft Icing Alert Using Airborne Radar. Proceedings of the European Radar Conference EuRAD 2004, Amsterdam, 2004, pp. 33-36.

87. Yanovsky F.J. Doppler-Polarimetric Approach for Supercooled Water Detection in Clouds and Precipitation by Airborne Weather Radar. Proceedings. International Radar Symposium. Warsaw, 2004. pp. 93-100.

88. Pitertsev A., Yanovsky F. Mathematical Modeling and Simulation of Backscattering from Hydrometeors of Different Types. Proceedings 10th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory, Dnipropetrovsk, Ukraine, Sept. 14-17, 2004, pp. 292-294.

89. Icing hazard avoidance system and method using dual-polarization airborne radar, United States Patent No 6377202 / Kropfli R.A., et al., April 23, 2002

90. Isaac G.A., Cober S.G., Strapp J.W., Korolev A.V., Tremblay A., Marcotte D.L. Recent Canadian Research on Aircraft In-Flight Icing. Canadian Aeronautics and Space Journal, Vol. 47, No. 3, September 2001, pp. 1-9.

91. Doviak, R. J., V. Bringi, A. Ryzhkov, A. Zahrai, and D. Zrnica, Considerations for polarimetric upgrades to operational WSR-88D radars. J. Atmos. Oceanic Tech., 17, 2000, 257-278.

92. F.J. Yanovsky, I.M. Braun. Models of Scattering on Hailstones in X-band. Proceedings of the European Radar Conference EuRAD 2004, Amsterdam, 2004, pp. 229-232.

93. Ф.И. Яновский, И.М. Браун. Экспериментальные исследования поляризационных характеристик облаков и осадков. Сибирский поляризационный семинар СибПол 2004. Доклады. Сургут, Россия, 2004.- С. 80-87.

94. Ю.А. Авер'янова, І.Г. Прокопенко, К.І. Прокопенко, Ф.Й. Яновський. Некогерентні метеорологічні радіолокатори: адаптивні алгоритми виявлення турбулентних зон. Вісник НАУ, К.: НАУ, 2004.- с. 41-51.

95. Яновский Ф.И. Об экспериментальном исследовании влияния параметров турбулентности на рассеяние лазерного излучения. Сб. научных трудов "Вопросы авиационной радиотехники", Вып. 7, Киев, 1972, С. 24-26.

96. Yanovsky F. Airport weather radar system for wind shear detection and prediction (AWERS/WISDP), IRCTR-S-006, Delft, The Netherlands, 19 pp.

97. Zrnica D.S., Forsyth D.E. Multipurpose Phased Array Radar – Civilian Applications? Proceedings Microwaves, Radar and Remote Sensing International Workshop (MRRS 2005), Kiev, Ukraine, 2005, pp. 62-70.

98. Pokrovsky V.I., Belkin V.V., Yanovsky F.J. Airborne Weather Radar for Windshear Detection. Proceedings 18<sup>th</sup> International Conference on Applied Electromagnetics and Communications (ICECom 2005), Dubrovnik, Croatia, 2005, pp.357-360.

99. Всемирная Метеорологическая Организация. Комиссия по основным системам. Внеочередная сессия. КЭРНС, 4–12 ДЕКАБРЯ 2002 г. Сокращенный окончательный отчет с резолюциями и рекомендациями. ВМО-№ 955, Секретариат ВМО, Женева, Швейцария 153 с.

100. Богаткин О.Г., Еникеева В.Д. Анализ и прогноз погоды для авиации. С.-Петербург, Гидрометеиздат, 1992, 272 с.

101. Монокрович Э.И. Гидрометеорологическая информация в народном хозяйстве. – Л.: Гидрометеиздат, 1980. – 176 с.

102. Хандожко Л.А. Оценка экономической эффективности прогнозов погоды. – Л.: ЛГМИ, 1987. – 50 с.