РД 52.27.339—93

Руководящий документ

Руководство по диагнозу и прогнозу опасных и особо опасных осадков, града и шквалов по данным метеорологических радиолокаторов и искусственных спутников Земли

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА РОССИИ
ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ И МОНИТОРИНГУ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ
МОСКВА
1996

ПРЕДИСЛОВИЕ

1. УТВЕРЖДЕН	Росгидрометом
2. РАЗРАБОТЧИКИ	Н. И. Глушкова, канд. физ.-мат. наук, с. н. с. ; В. Ф. Лапчева, канд. физ.-мат. наук, с. н. с.
3. ОДОБРЕНО	ЦМКП Росгидромета от 10.04.93 г. № К-111
4. ЗАРЕГИСТРИРОВАН	ЦКБ ГМП за № РД 52.27.339—93 от 13.09.93 г.
5. ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ	„Руководство по диагнозу и прогнозу опасных и особо опасных осадков, града и шквалов по данным метеорологических радиолокаторов и искусственных спутников Земли"

Содержание

Введение VIII

1 Область применения 1

2 Нормативные ссылки 1

3 Сокращения 3

4 Основные особенности метеорологической информации МРЛ, используемой в диагнозе и прогнозе конвективных явлений 4

4.1 Метеорологические радиолокаторы 4

4.2 Ограничения радиолокационного метода наблюдений 4

4.3 Метеорологическая эффективность данных МРЛ 5

4.3.1 Вероятность обнаружения форм облаков 6

4.3.2 Точность измерения пространственных параметров метеоцели . . 6

4.3.3 Точность измерения интенсивности радиоэха (отражаемости) . . . 7

4.4 Основы метеорологической интерпретации радиолокационных данных . . 8

4.5 Сроки наблюдений МРЛ 12

4.6 Формы представления радиолокационных данных в оперативном режиме 12

4.7 Сравнение радиолокационной и наземной метеорологической информации об облаках и связанных с ними явлениях погоды 14

4.7.1 Эффективность метеорологической информации, получаемой МРЛ 14

4.7.2 Определение типа погоды с осадками, грозами, градом и с отсутствием осадков по данным МРЛ 15

4.8 Связь радиолокационных параметров облаков с термодинамическими параметрами, рассчитанными по данным о стратификации температуры и влажности 17

4.9 Диагноз кучево-дождевых облаков без гроз, грозовых, градовых и шквалоных облаков и количества осадков по данным МРЛ 18

4.9.1 Диагноз грозовых и градовых облаков по температуре воздуха на высоте верхней границы радиоэха от конвективных облаков . . . 18

4.9.2 Оценка интенсивности осадков и графические методы оценки количества выпавших осадков по данным МРЛ 20

4.10 Метод обнаружения облаков со шквалами, имеющими скорость ветра не менее 15 м/с, по данным МРЛ 24

5 Использование информации с ИСЗ для диагноза и прогноза конвективных осадков . . . 27

5.1 Основные особенности метеорологической информации, получаемой с ИСЗ . . . 27

5.2 Дешифровочные признаки . . . 30

5.3 Использование информации с ИСЗ для определения верхней границы облачности и упорядоченных вертикальных движений . . . 31

5.3.1 Способ определения высоты верхней границы облачности $H_в$ по данным о радиояркостной температуре, поступающим с ИСЗ . . . 31

5.3.2 Результаты сопоставления картин облачности на снимках с ИСЗ с полями восходящих крупномасштабных вертикальных движений . . . 34

5.4 Использование информации с геостационарного ИСЗ „Метеосат" для диагноза зон осадков . . . 35

5.4.1 Обзор способов определения зон осадков . . . 36

5.4.2 Диагноз зон осадков теплого полугодия . . . 37

5.4.3 Диагноз количества осадков . . . 38

5.4.4 Определение и прогноз скорости и направления перемещения облаков и облачных систем . . . 39

5.5 Эволюция облачности, отображенная на снимке с ИСЗ и на картах данных сети МРЛ . . . 42

5.5.1 Диагноз продолжительности существования облаков и облачных систем . . . 43

5.5.2 Эволюция облачных систем . . . 43

6 Временное и пространственное распределение стихийных явлений погоды, связанных с конвекцией . . . 47

6.1 Повторяемость СГЯ с учетом ущерба по России и БТ СНГ . . . 47

6.1.1 Повторяемость СГЯ по БТ СНГ . . . 52

6.1.2 Повторяемость СГЯ по территории России . . . 53

6.2 Повторяемость сильных и очень сильных осадков в холодный период года . . . 60

7 Условия формирования и механизм образования СГЯ, связанных с конвекцией . . . 63

7.1 Механизм образования осадков . . . 63

7.1.1 Условия, приводящие к выпадению осадков из конвективных облаков . . . 63

7.1.2 Расчет количества осадков . . . 64

7.1.3 Связь скорости восходящих потоков и интенсивности осадков с типом радиоэха . . . 65

7.1.4 Взаимосвязь параметров облаков и атмосферы с количеством выпадающих осадков . . . 67

7.2 Механизм образования града в облаках . . . 67

7.2.1 Условия образования града в облаках . . . 68

7.2.2 Особенности развития градовых облаков . . . 70

7.3 Условия формирования и механизм развития сильных шквалов и смерчей . . . 71

7.3.1 Общие сведения о шквалах . . . 71

7.3.2 Условия формирования шквалов в градациях ОЯ и СГЯ . . . 73

7.3.3 Условия формирования сильных шквалов по картам данных МРЛ и по снимкам облачности с ИСЗ . . . 73

7.3.4 Характер облачности на снимке с ИСЗ при развитии шквалов в градациях ОЯ и СГЯ . . . 78

7.3.5 Примеры картин облачности для случаев наличия и отсутствия шквалов . . . 79

7.3.6 Статистический анализ параметров Х.Ск.Сb по снимкам с ИСЗ . . . 86

7.3.7 Статистический анализ параметров радиоэха при развитии шквалов . . . 88

7.3.8 Механизм развития сильных шквалов . . . 88

7.4 Смерчи . . . 90

7.4.1 Общие сведения о смерчах . . . 90

7.4.2 Условия развития смерчей . . . 91

7.4.3 Примеры картин облачности на снимках с ИСЗ при возникновении смерчей . . . 93

7.5 Условия формирования и механизм развития сильных (ОЯ) и очень сильных (СГЯ) осадков в холодный период года . . . 99

7.5.1 Общие сведения . . . 99

7.5.2 Результаты анализа крупномасштабных процессов при развитии осадков ОЯ и СГЯ . . . 101

7.5.3 Мезомасштабные особенности атмосферы при формировании осадков ОЯ и СГЯ в холодный период года . . . 104

7.5.4 Радиолокационные параметры радиоэха осадков, характеризующие мезомасштабные процессы в холодный период года . . . 107

7.5.5 Особенности облачных систем при осадках ОЯ и СГЯ, определенные по данным с ИСЗ . . . 108

7.5.6 Взаимосвязь параметров, характеризующих процессы микро-, мезо- и макромасштабов в холодный период года 109

8 Методы диагноза и прогноза стихийных явлений, связанных с конвекцией . . 112

8.1 Теоретические предпосылки методов прогноза ливней 112

8.2 Прогноз осадков 116

8.2.1 Прогноз максимального количества фронтальных осадков по радиолокационным, спутниковым и метеорологическим данным наблюдений на текущий день 116

8.2.2 Прогноз количества осадков не менее 30 мм и не менее 50 мм по данным МРЛ и данным о вертикальных упорядоченных движениях на уровне 850 гПа 117

8.2.3 Прогноз максимального количества осадков по данным с ИСЗ на текущие сутки 120

8.2.4 Прогноз максимального и среднего количества осадков по данным с ИСЗ на последующие сутки 121

8.2.5 Прогноз максимального и среднего количества осадков по данным с ИСЗ „Метеосат" на текущие сутки для Москвы и Московской области 123

8.3 Град 126

8.3.1 Прогноз опасного и особо опасного града с грозой 126

8.4 Прогноз сильных шквалов с использованием данных ИСЗ и МРЛ . . 129

8.4.1 Обоснование методов прогноза 129

8.4.2 Прогноз сильных шквалов по комплексу данных МРЛ и ИСЗ . . 138

8.4.3 Прогноз сильных шквалов по данным МРЛ 145

8.4.3.1 Прогноз сильных шквалов по территории 147

8.4.3.2 Способ прогноза сильных шквалов для пункта 150

8.4.4 Прогноз сильных шквалов по данным ИСЗ 152

8.4.4.1 Прогноз сильных шквалов по территории 153

8.4.4.2 Прогноз сильных шквалов для пункта 155

8.4.5 Сверхкраткосрочный прогноз места возникновения сильных шквалов с заблаговременностью 2 —5 ч 155

8.4.6 Прогноз места возникновения сильных шквалов по данным МРЛ в пункте прогноза 156

8.4.7 Прогноз места возникновения сильных шквалов по ежедневным картам погоды 157

8.4.8 Оценка прогнозов сильных шквалов по данным МРЛ и ИСЗ . . 157

8.5 Прогноз максимального количества осадков, в том числе сильных, в холодный период года с использованием данных МРЛ и ИСЗ 157

8.5.1 Общая характеристика методов 157

8.5.2 Прогноз сильных и очень сильных осадков по комплексу термодинамических, радиолокационных и спутниковых данных . . 160

8.5.3 Прогноз сильных и очень сильных осадков по комплексу термодинамических и спутниковых данных 168

8.5.4 Прогноз сильных и очень сильных осадков по комлексу термодинамических и радиолокационных данных 170

Приложение А (справочное) Основные принципы радиолокации 172

Приложение Б (справочное) Библиография 176

Введение

Предлагаемый Руководящий документ обобщает результаты более чем 25-летнего периода проведенных в Гидрометцентре России исследований условий возникновения и развития явлений погоды, связанные с зонами активной конвекции (ливней, града, шквалов, осадков холодного периода), и разработки методов их прогноза (в том числе в градациях опасных и стихийных) с использованием данных метеорологических спутников Земли и радиолокаторов.

Этому периоду предшествовали исследования механизма образования ливней, гроз и града, проведенные в 1957—1968 гг. на специальных полигонах в Высокогорном геофизическом институте (г. Нальчик).

Существующие расчетные термодинамические и гидродинамические методы прогноза указанных явлений погоды позволяют прогнозировать их достаточно надежно лишь при отсутствии обширных облачных систем, когда данные радиозондирования достоверно отражают стратификацию атмосферы. Эти методы не удовлетворяют требования, предъявляемые к прогнозам конвективных явлений в градациях опасных (ОЯ) и стихийных (СГЯ).

Выполненные исследования позволили уточнить механизм образования ливней и града. Выявлено, что опасные и стихийные конвективные явления образуются в результате сложного взаимодействия атмосферных процессов всех масштабов. Опасные и стихийные явления, связанные с конвекцией, относятся к мезометеорологическим явлениям. Масштаб этих явлений значительно меньше расстояния между метеорологическими станциями. Существующая сеть метеорологических наблюдений, таким образом, не обеспечивает оптимальное обнаружение этих явлений и определение условий, способствующих их возникновению. Этим объясняется низкая вероятность их обнаружения и низкая оправдываемость прогнозов явлений в градациях ОЯ и СГЯ при помощи существующих термодинамических методов.

Поскольку указанные явления погоды связаны с облачностью, образующейся в результате взаимодействия атмосферных процессов макро-, мезо- и микромасштаба, то ее характер, отображаемый на снимках с ИСЗ, и параметры радиоэха на картах сети МРЛ использованы как самостоятельные предикторы в описаниях условий возникновения и развития этих явлений.

Совместное использование снимков облачности с ИСЗ и карт с данными сети МРЛ позволяет определить характер атмосферных процессов и их активность одновременно с большой территории. Непрерывная по площади информация с ИСЗ и МРЛ позволяет устранить недостаток данных редкой сети метеорологических и аэрологических наблюдений и получить дополнительную информацию о характере атмосферных процессов, обусловливающих развитие явлений в градациях ОЯ и СГЯ.

На основе выполненных исследований разработаны методы диагноза и прогноза ливней, града, шквалов и осадков в холодный период года (в том числе в градациях опасных и стихийных) с использованием комплекса термодинамических, спутниковых и радиолокационных данных на текущие сутки.

Не во всех УГМС имеется необходимый комплекс синхронных данных об облачности с ИСЗ и МРЛ, поэтому предусмотрены разные варианты методов прогноза ОЯ и СГЯ как с использованием комплекса указанных данных, так и с автономным использованием данных МРЛ или ИСЗ в комплексе с термодинамическими параметрами атмосферы.

Хотя автономные методы прогноза ОЯ и СГЯ по данным МРЛ или ИСЗ уступают в эффективности комплексному методу, они тем не менее позволяют прогнозировать эти явления в тех районах, где отсутствует один из видов информации, что расширяет сферы использования этих методов.

Успешность изложенных в данном РД методов прогноза ОЯ и СГЯ не зависит от физико-географических условий, так как в их основу положен механизм развития явлений.

Все указанные методы разработаны в рамках НИР и ОКР ГКНТ, испытаны в разных УГКС СНГ и УГМС России, рассмотрены на Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим прогнозам Росгидромета и рекомендованы к внедрению.

Исследования последних лет в Гидрометцентре России посвящены изучению стихийных конвективных явлений погоды в зависимости от вида явлений и характера ущерба.

Собран каталог СГЯ за 10 лет и построены карты их повторяемости по европейской части СНГ и территории России. Полученные карты в совокупности с прогнозом этих явлений позволяют локализовать район возможного их развития.

Руководящий документ подготовлен ведущими научными сотрудниками Гидрометцентра России, ответственными исполнителями всех НИР и ОКР ГКНТ по разработке методов прогноза ливней, града, шквалов и осадков холодного периода, в том числе в

градациях опасных и стихийных с использованием данных ИСЗ и МРЛ.

Авторы выражают благодарность с.н.с. А. А. Алексеевой, принимавшей участие в выполнении научных исследований и авторских испытаниях. Свою благодарность и признательность за помощь в выпуске настоящего РД авторы выражают руководству УКОС Росгидромета и Гидрометеоиздата.

РД рассчитан на специалистов по спутниковой и радиолокационной метеорологии, синоптиков и студентов учебных заведений метеорологического профиля и всех, кто в своих исследованиях использует данные МРЛ и ИСЗ.

РУКОВОДЯЩИЙ ДОКУМЕНТ

Руководство по диагнозу и прогнозу опасных и особо опасных осадков, града и шквалов по данным метеорологических радиолокаторов и искусственных спутников Земли

Дата введения 1994-01-01

1 ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ

Настоящий руководящий документ (РД) устанавливает общие правила использования информации с искусственных спутников Земли и метеорологических радиолокаторов для диагноза и прогноза опасных и особо опасных осадков, града и шквалов. Положения РД обязательные для гидрометцентров и других прогностических подразделений Российской Федерации.

2 НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

В настоящем РД использованы ссылки на следующие нормативные документы:

— Код для передачи данных наблюдений метеорологических радиолокаторов (международная форма FM 20-V RADOB). — Л.: Гидрометеоиздат, 1981.

— Методические рекомендации по результатам разбора синоптической ситуации, определившей возникновение стихийных явлений в г. Ленинграде и в Карельской АССР 21 июля 1988 г. и об использовании данных МРЛ и ИСЗ для прогноза шквалов. — М.: Изд. ГМЦ СССР, 1989.

— Методические указания. Метод прогноза максимального количества осадков, в том числе сильных, в холодный период года с использованием данных наблюдений с ИСЗ и МРЛ. — М.: Изд. ГМЦ СССР, 1988.

— Методические указания. Метод прогноза сильных осадков с заблаговременностью 12—36 ч по данным об облачности с ИСЗ. — М.: Изд. ГМЦ СССР, 1988.

— Методические указания по использованию радиолокационных данных в синоптическом анализе и краткосрочном прогнозе погоды. — М.: Гидрометеоиздат, 1981.

— Методические указания по определению шквалов с использованием данных МРЛ. — Л.: Гидрометеоиздат, 1988.

— Методические указания. Прогноз сильных и очень сильных осадков по территории с использованием радиолокационных, спутниковых и аэросиноптических данных наблюдений. — М.: Изд. ГМЦ СССР, 1990.

— Методические указания. Прогноз сильных шквалов (25 м/с и более) на текущий день по территории с использованием спутниковых, радиолокационных и аэросиноптических данных наблюдений. — М.: Изд. ГМЦ СССР, 1990.

— Методические указания. Усовершенствованный метод прогноза количества осадков по данным об облачности с ИСЗ. — М.: Изд. ГМЦ СССР, 1966.

— Методическое письмо. Прогноз фронтальных осадков по данным наблюдений МРЛ и ИСЗ/ Глушкова Н. Н., Лапчева В. Ф. — Л.: Гидрометеоиздат, 1980.

— Наставление по службе прогнозов. Раздел 2. Ч. 3—5. — М.: Гидрометеоиздат.

— Руководство по использованию спутниковых данных в анализе и прогнозе погоды. — Л.: Гидрометеоиздат, 1982.

— Руководство по краткосрочным прогнозам погоды. Ч. 1. — Л.: Гидрометеоиздат, 1986.

— Руководство по прогнозированию метеорологических условий для авиации. — Л.: Гидрометеоиздат, 1985.

— Руководство по производству наблюдений и применению информации с радиолокаторов МРЛ-1 и МРЛ-2. — Л.: Гидрометеоиздат, 1974.

— Руководящий документ. Методические указания по проведению производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов. РД 52.27.284—91. — СПб: Гидрометеоиздат, 1991.

3 СОКРАЩЕНИЯ

ИСЗ	— искусственный спутник Земли
СГЯ	— стихийное гидрометеорологическое явление
МРЛ	— метеорологический радиолокатор
ОЯ	— опасное явление
ЕТ	— европейская территория
ЦЧО	— Центрально-Черноземная область
ГГО	— Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова
РКО	— радиоэхо кучевообразное
РКСО	— радиоэхо кучевообразное со слоистообразным
Cb	— кучево-дождевое облако
Х.Ск.Cb	— характерные скопления кучево-дождевых облаков
КМС	— крупномасштабная система
РСО	— радиоэхо слоистообразное
ТВ	— видимый участок спектра
ИК	— инфракрасный участок спектра
УГМС	— управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды
ГМЦ	— Гидрометцентр России
АКСОПРИ	— автоматизированный комплекс сбора, обработки, передачи радиолокационной информации
РЛС	— радиолокационная станция
Ns	— слоисто-дождевые облака
Sc	— слоисто-кучевые облака
RADOB	— код для передачи данных метеорологических радиолокаторов
„Метеосат"	— геостационарный метеорологический спутник Земли
ММЯ	— мезометеорологические явления
МКК	— мезометеорологические конвективные комплексы
СГВ	— среднее гринвичское время

4 ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ МРЛ, ИСПОЛЬЗУЕМОЙ В ДИАГНОЗЕ И ПРОГНОЗЕ КОНВЕКТИВНЫХ ЯВЛЕНИЙ

4.1 Метеорологические радиолокаторы

Все отечественные радиолокаторы по их назначению можно разделить на следующие группы:

1) МРЛ, данные которых поступают оперативно в соответствующие подразделения и используются в следующих целях:

— для обеспечения авиации (МРЛ-1, МРЛ-2 и их автоматизированный вариант „Метеоячейка"),

— для диагноза и прогноза погоды, в том числе стихийных явлений, связанных с конвекцией (МРЛ-1, МРЛ-2, автоматизированный комплекс АКСОПРИ),

— в системе градозащиты (МРЛ-4, МРЛ-5, МРЛ-6);

2) опытные варианты МРЛ, работающие по принципу Доплера, радиотеплолокации и др., используемые в основном в исследовательских целях, в том числе бортовые радиолокаторы, устанавливаемые на ИСЗ.

Поляриметрические и доплеровские РЛС позволяют изучать микро- и мезомасштабное строение поля движения и микрофизику формирования осадков, града, нисходящих порывов (микрошквалов), связанных с интенсивной конвекцией.

В настоящем Руководстве изложены методы диагноза и прогноза СГЯ с использованием данных МРЛ-1 и МРЛ-2, оперативно поступающих во все подразделения гидрометеорологического обеспечения в виде карт с данными одного МРЛ или сети МРЛ, а также в виде кода RADOB.

Метеорологический радиолокатор МРЛ-1 представляет собой передвижной вариант станций с $\lambda = 3{,}2$ и 0,8 см и предназначен для установки в аэропортах. В отличие от первого МРЛ-2 с $\lambda = 3{,}2$ см выполнен в стационарном варианте и предназначен для установки в зональных обсерваториях и гидрометцентрах.

Основы радиолокации и особенности радиолокационной информации, получаемой с МРЛ-1 и МРЛ-2, изложены в Приложении А и в Руководстве по производству наблюдений и применению информации с радиолокаторов МРЛ-1 и МРЛ-2 (см. п. 2).

4.2 Ограничения радиолокационного метода наблюдений

Предельная дальность обнаружения ($r_{пред}$) метеообъектов радиолокатором ограничена дальностью прямой радиовидимости. В

принципе, РЛС может принимать отраженный сигнал от всех облаков, вершины которых расположены выше линии радиогоризонта.

При расстоянии 100 км и больше от РЛС часть облаков, имеющих небольшую вертикальную протяженность, не обнаруживается из-за того, что их вершины лежат ниже линии радиогоризонта. По этой же причине на расстоянии свыше 100—120 км нельзя измерять интенсивность осадков. Высокие местные предметы (здания, горы, башни и др.) вокруг РЛС создают углы закрытия. Поэтому возрастает минимальная высота обнаружения облачности, находящейся в азимутах расположения высоких местных предметов.

С увеличением расстояния возрастает минимальная отражаемость $Z_{мин}$, которую при заданном потенциале РЛС ($П_м$) дает радиоэхо на экране радиолокатора. Поэтому облака, отражаемость которых меньше $Z_{мин}$, на некотором расстоянии радиолокатор уже не обнаруживает.

Из-за сильного ослабления в облаках и осадках РЛС также может не обнаружить те облака, перед которыми находятся другие метеоцели (см. Приложение А и Руководство по производству наблюдений и применению информации с радиолокаторов МРЛ-1 и МРЛ-2).

Для облаков, расположенных за зоной выпадающих осадков, РЛС с $\lambda = 3{,}2$ см всегда дает заниженное значение $\lg Z$.

С увеличением расстояния от РЛС резко падает ее разрешающая способность по угловым координатам. Диаграмма направленности антенны становится настолько широкой, что не позволяет с удовлетворительной точностью измерять высоты и площади радиоэха. Так, на расстоянии 300 км при $\theta = 1^{\circ}$ линейные размеры сечения диаграмы направленности антенны составляют 5 км, а на расстоянии 30 км они равны 0,5 км. Это определяет зависимость точности определения высоты и площади радиоэха от расстояния до метеоцели.

4.3 Метеорологическая эффективность данных МРЛ

Метеорологическая эффективность МРЛ определяется объемом и качеством полученных сведений об облаках и осадках. В понятие метеорологической эффективности входит следующее:

1) вероятность обнаружения на разных расстояниях облаков и осадков,

2) точность определения вертикальных границ облаков и горизонтальной протяженности зон осадков,

3) точность и диапазон измерения интенсивности радиоэха (отражаемости).

4.3.1 Вероятность обнаружения форм облаков

Вероятность обнаружения всех форм облаков убывает с увеличением дальности обнаружения, которая увеличивается при увеличении следующих параметров:

1) потенциала РЛС $П_м$;

2) отражаемости облаков Z;

3) высоты облаков H, для которых $Z > Z_{мин}$ (таблица 4.1).

Вероятность обнаружения метеоцели при заданном потенциале РЛС определяется микроструктурными характеристиками облаков и осадков, зависящими от временных и физико-географических условий.

Таблица 4.1. — Вероятность обнаружения облаков с осадками метеорологическими радиолокаторами МРЛ-1 и МРЛ-2, %

Явление	Расстояние, км	Лето	Зима
Осадки из Sc	30—100	70	50
Обложные осадки из Ns	50—100	90	70
	100—150	70	40
	150—200	30	< 5
Негрозовые ливни (Cb)	30—100	100	70
	100—150	95	20
	150—200	70	< 5
	150—300	20	—
Грозы и грозовые облака (Cb)	50—100	100	—
	100—150	95—100	—
	150—200	80	—
	200—300	30	—

4.3.2 Точность измерения пространственных параметров метеоцели

Радиоэхо метеообъектов имеет следующие основные параметры:

1) верхняя граница радиоэха,

2) горизонтальная протяженность метеообъектов.

Точность измерения этих параметров зависит от потенциала станции, удаления метеоцели и микроструктуры облаков.

Пространственные параметры радиоэха от облаков искажаются следующими основными факторами:

1) шириной диаграммы направленности антенны МРЛ;

2) затуханием (ослаблением) распространяющихся радиоволн в тропосфере, облаках и осадках;

3) неравномерностью пространственного распределения отражаемости в облака.

Чем меньше расстояние до метеоцели, тем точнее можно определить ее вертикальную границу и горизонтальную протяженность. В таблице 4.2 приведены средние вероятные ошибки определения границ облаков. Данные, приведенные в таблице, получены при значении потенциала МРЛ $\lg П_м \geq 47$ дБ. Если значение $\lg П_м < 47$ дБ, то ошибки возрастают.

На расстоянии более 200 км от МРЛ данные о высоте верхней границы Cb, превышающей 10 км, как правило, завышены на 2 км. Максимальные ошибки могут быть больше ошибок, указанных в таблице, примерно в 3 раза.

Таблица 4.2 — Средние вероятные ошибки определения границ облаков, м

Форма облаков	Удаление от МРЛ, км					
	30	31—50	51—100	101—150	151—200	201—300
Все формы (кроме Ns и Cb)	±150	—	—	—	—	—
Ns	±150	±150	—	—	—	—
Cb	±150	±200	±300	±500	±700	±1000

4.3.3 Точность измерения интенсивности радиоэха (отражаемости)

Точность измерения радиолокационной отражаемости Z зависит от способа измерения мощности отраженного сигнала и от точности калибровки аппаратуры и ее стабильности.

Для МРЛ-1 и МРЛ-2 средняя квадратическая погрешность измерения $\lg Z$ не превышает 3,3 дБ.

4.4 Основы метеорологической интерпретации радиолокационных данных

Методика[1] распознавания явлений, связанных с Cb, основана на измерении параметров радиоэха ($H_в$ и $\lg Z_{макс}$) и на результатах радиолокационного исследования структуры облачности с осадками.

Вид явления, связанного с Cb, определяется структурой радиоэха. Структуру радиоэха учитывают по значениям $\lg Z_{макс}$, определенным на следующих уровнях:

1) на уровне нулевой изотермы H_2 ($\lg Z_{макс_2}$);

2) на уровне, расположенном на 2,0—2,5 км выше нулевой изотермы H_3 ($\lg Z_{макс_3}$);

3) на уровне 1 км от поверхности Земли H_1 ($\lg Z_{макс_1}$).

Все Cb делят на три класса[2]:

1) I — градоопасные и грозовые облака с градом;
2) II — грозоопасные облака и ливневой дождь с грозой;
3) III — негрозовые конвективные облака и ливни.

МРЛ не фиксирует грозовые разряды, поскольку вероятность обнаружения радиоэха молнии на длине волны 3 см ничтожно мала из-за кратковременности существования молнии и узкой диаграммы направленности антенны. Поэтому грозовое состояние облака радиолокационным способом определяют по косвенным признакам, опираясь на известный факт, что наивысшая активность молний связана с районом наибольшей активности осадков. Поэтому радиолокационная классификация явлений несколько отличается от общепринятой метеорологической.

Для распознавания I класса явлений определен однозначный критерий $\lg Z_{макс_2} \geq 4{,}5$ или $\lg Z_{макс_3} \geq 4{,}5$. При выполнении этого условия вероятность P совпадения радиолокационной и наземной информации о наличии града превышает 90 %.

Для II класса однозначным критерием является значение $\lg Z_{макс_2} \geq 3{,}5$ или $\lg Z_{макс_3} \geq 3{,}5$. Вероятность совпадения радиолокационной и наземной информации о наличии грозы не менее 90 %.

Для распознавания грозовых и градовых облаков используют также комплексный критерий грозоопасности, учитывающий особенности радиолокационной структуры Cb:

$$J = H_{макс} \lg Z_{макс}, \qquad (4.1)$$

[1] Руководство по производству наблюдений и применению информации с радиолокаторов МРЛ-1 и МРЛ-2 (см. п. 2).
[2] Там же.

где $H_{макс}$ — максимальная высота радиоэха, км.

Для II и III классов явлений $J = 6...25$. Для II класса явление достоверным признаком является $J \geq 25$, что обеспечивает не менее 90 % вероятности совпадения гроз по радиолокационным и наземным наблюдениям.

Данные о II классе явлений на бланке карты данных МРЛ (рисунок 4.1) в зависимости от значения критерия J обозначают следующим образом:

1) R — при $J_{кр} \geq 25$ вероятность $P \geq 90$ %,
2) R) — при $J = 20...25$ вероятность $P \geq 75...80$ %,
3) (R) — при $J_{кр} = 10...20$ вероятность $P = 30...70$ %.

Явления III класса могут возникать в тех ячейках, где характер явлений остался нераспознанным.

Максимальную интенсивность выпадающих ливневых осадков можно оценить в радиусе до 90 км, где измеряется $\lg Z_{макс_1}$. Вероятность совпадения радиолокационных и визуальных данных в этом радиусе значительно выше.

Конвективные облака без явлений в радиусе 90 км определяют, измеряя высоту нижней границы радиоэха. Для таких облаков нижняя граница радиоэха не должна сливаться с радиоэхом земной поверхности.

В холодный период года при температуре воздуха у поверхности Земли ниже минус 2 °С опасными считают ливневой снег и зимние грозы.

Грозы в холодный период года выявляют по следующим значениям параметров радиоэха:

1) $H_{в_{макс}} \geq 4$ км,

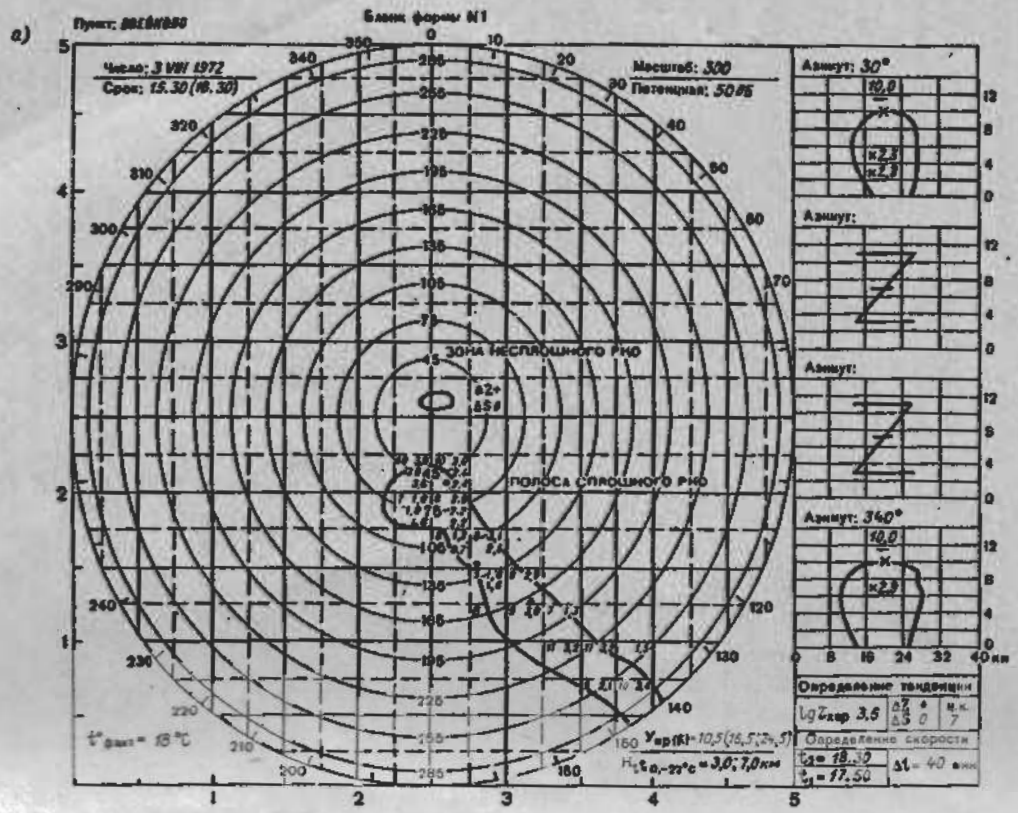
2) $\lg Z_{макс} > 2{,}0...2{,}5$ независимо от уровня.

Это означает, что совпадение радиолокационной и визуальной информации о характере явлений, сопровождающих конвективную облачность, имеет вероятность 30—70 %. Когда для РКО или для РКСО $\lg Z_{макс} \geq 1{,}3$, то с ним связывают выпадение ливневого снега и ставят следующие обозначения:

1) $\overset{*}{\nabla}$ — при расстоянии от МРЛ до метеоцели менее 90 км,

2) $\overset{*}{\nabla}$) — при расстоянии до метеоцели более 90 км.

Наиболее эффективным радиусом обзора МРЛ, в котором радиолокационная отражаемость и линейные размеры вертикальной и горизонтальной протяженности радиоэха от облаков и зон осадков определяются с достаточно высокой точностью, является расстояние от РЛС до метеоцели 150—200 км в теплый период и 100—150 км — в холодный.



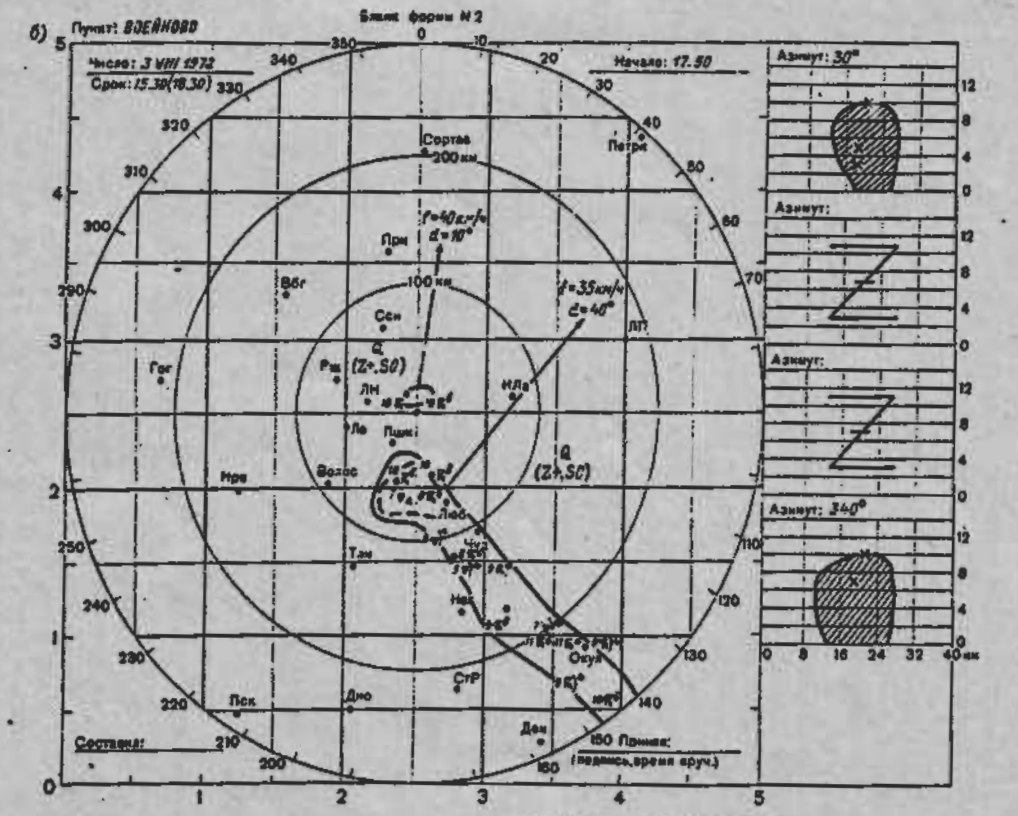


Рисунок 4.1 — Бланки-карты МРЛ формы № 1 (*а*) и № 2 (*б*).

РД 52.27.339—93

4.5 Сроки наблюдений МРЛ

Радиолокационные наблюдения ведут на МРЛ АМСГ в следующие сроки:

1) основные (синоптические),
2) ежечасные,
3) дополнительные (режим „шторм").

В синоптические сроки данные наблюдений МРЛ передают в узел связи УГМС каждые 3 ч (00, 03, 06, 09, 12, 15, 18 и 21 ч СГВ) в виде телеграмм не позднее часа конкретного синоптического срока, используя код RADOB для сообщения данных радиолокационных наблюдений (см. п. 2).

Ежечасные наблюдения проводят в оперативных подразделениях по указанию дежурного синоптика в периоды сложных погодных условий. Их проводят только с согласия дежурного синоптика.

В режиме „шторм" МРЛ работает постоянно и информацию можно обновлять каждые 10—15 мин по требованию дежурного синоптика.

Данные ежечасных наблюдений можно передавать при необходимости в родственные подразделения по факсимильным средствам связи.

В режиме „шторм" штат МРЛ обязан начать работу без указания синоптика. При появлении опасных явлений следует немедленно поставить его в известность и передавать кодом RADOB данные о наличии шторма в узел связи для передачи в другие заинтересованные инстанции.

4.6 Формы представления радиолокационных данных в оперативном режиме

Данные МРЛ представляют следующим образом:

1) в виде карт сети МРЛ в масштабе 1 : 5 000 000 по ЕТ СНГ каждые 3 ч (рисунок 4.2),

2) в виде карты-бланка данных одного МРЛ (в радиусе 300 км) ежечасно (в масштабе 1 : 2 500 000) (см. рисунок 4.1).

Карту данных сети МРЛ по ЕТ СНГ составляют только по данным МРЛ оперативных подразделений гидрометслужбы (АМСГ, зональных обсерваторий, гидрометцентров).

Радиолокационные данные на карте сети МРЛ (см. рисунок 4.2) представляют по квадратам 60× 60 км, в центре которых символом указывают вид явления (рисунок 4.3). Слева от символа указывают максимальную высоту радиоэха в километрах (в нечетных цифрах — по коду RADOB), справа внизу указывают интенсивность

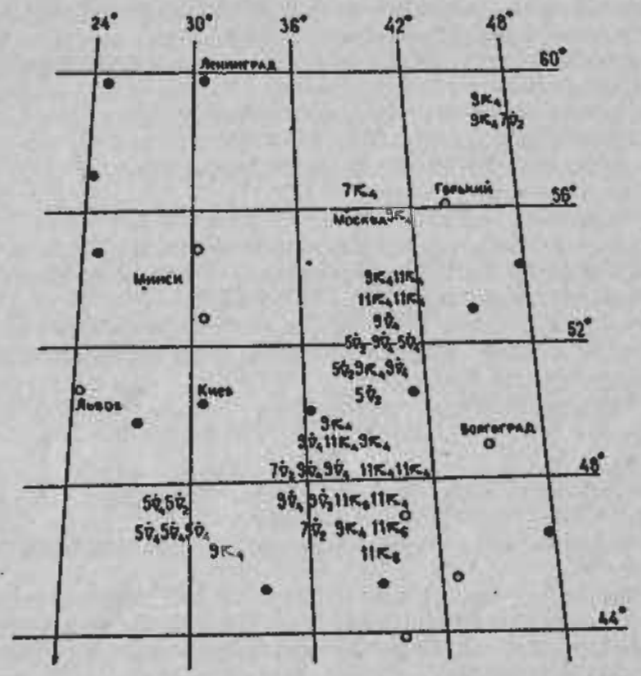


Рисунок 4.2 — Пример карты данных сети МРЛ по ЕТ СНГ 03.08.89 г. в 03 ч СГВ.

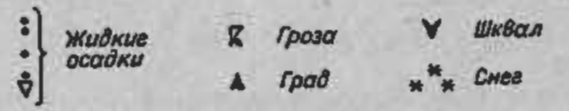


Рисунок 4.3 — Условные обозначения, применяемые на карте данных МРЛ.

радиолокационной отражаемости $\lg Z_{макс}$ в цифрах кода. В точке пункта МРЛ обозначают тенденцию развития радиоэха:

1) знак „плюс" — развивается,
2) знак „минус" — рассеивается,
3) нуль — без изменений.

В этой же точке указывают направление и скорость перемещения радиоэха в форме, применяемой на синоптических картах.

Карты-бланки с данными одного МРЛ (см. рисунок 4.1) составляют ежечасно в двух формах (№ 1 и № 2).

В форме № 1 (рисунок 4.1 *а*) приводят по квадратам 30× 30 км следующие данные:

1) измеренные значения $H_в$ в километрах;

2) значения $\lg Z_{макс}$ на трех уровнях:

— на высоте 1,5 км от поверхности земли (1),

— на высоте изотермы 0 °С (2),

— на высоте 2,5 км выше изотермы 0 °С (3);

3) тенденцию развития радиоэха по значению радиолокационной отражаемости ($\pm Z$) и по изменению площади радиоэха ($\pm S$);

4) формы облачности (РКО, РСО, РКСО).

Форму № 2 (рисунок 4.1 *б*) составляют на основе формы № 1. В форме № 2 по квадратам 30× 30 км указывают следующие данные:

1) вид явления в символах,

2) максимальную высоту радиоэха в километрах,

3) максимальную радиолокационную отражаемость $Z_{макс}$ в цифрах кода,

4) контуры зон осадков,

5) тенденцию развития поля радиоэха,

6) скорость и направление перемещения облачных систем в радиусе 300 км.

В форме № 2 справа дают вертикальные разрезы радиоэха в различных заданных направлениях (азимутах), на которых указывают нижнюю и верхнюю границы радиоэха, структуру радиоэха и форму облачности.

4.7 Сравнение радиолокационной и наземной метеорологической информации об облаках и связанных с ними явлениях погоды

4.7.1 Эффективность метеорологической информации, получаемой МРЛ

Эффективность данных МРЛ, восполняющих информацию об облаках, о факте осадков, о случаях без осадков, о случаях гроз и града выявляются с учетом локального характера развития конвективных явлений. При этом сравнивают число дней с фактом осадков, число дней без осадков, число дней с градом и грозами, зафиксированное для пункта и для территории радиусом 100 км вокруг пункта по квадратам пространства 30× 30 км. Число дней определяют по ежечасным данным МРЛ, по данным полной сети метеорологических наблюдений (в том числе по данным метеостанций и метеопостов) и по данным только метеорологических станций.

Радиолокационная информация уступает метеорологическим наблюдениям при определении некоторых форм мелкокапельных облаков. Однако радиолокационные характеристики можно получить за очень короткий срок одновременно по большой площади и в тех условиях, когда наземные наблюдения затруднены (ночью и при облачности нижнего яруса). Радиолокационный метод наблюдений дает информацию, которую невозможно получить визуальными методами.

Радиолокационный метод наблюдений дает следующую принципиально новую информацию:

1) о вертикальном распределении основных видов облачности в радиусе до 40 км и осадков в радиусе 150—200 км,

2) о местоположении и числе грозовых ливней[1],

3) о верхних границах слоистообразных и кучево-дождевых облаков,

4) о площадях, занятых различными видами осадков (ливнями, градом, обложными осадками), и о мгновенной интенсивности осадков,

5) об эволюции кучево-дождевых облаков и тенденции развития радиолокационных характеристик облачных систем в мезомасштабе,

6) о направлении и скорости перемещения зон осадков.

4.7.2 Определение типа погоды с осадками, грозами, градом и отсутствием осадков по данным МРЛ

С учетом редкого расположения пунктов метеорологических наблюдений и важности дополнительной информации об облаках, осадках, грозах и граде, привлекаемой для оценки методов прогноза, в Росгидрометцентре оценена вероятность точного определения типа погоды по данным различных источников:

1) по данным МРЛ,

2) по данным полной сети метеорологических наблюдений,

3) по данным только метеорологических станций.

Пример — Данные полной сети метеорологических наблюдений в Москве и в радиусе 100 км от границ Москвы приняты за абсолютно правильную информацию о факте осадков, гроз и града в этом районе. Информация о факте этих явлений определена за период метеорологических полусуток (таблица 4.3).

Данные примера показывают, что и МРЛ, и метеостанции не фиксируют отдельные случаи выпадения слабых и локальных

---

[1] Сравнение данных МРЛ и визуальных наблюдений для ЕТ СНГ показывает, что МРЛ в радиусе 150—200 км может обнаруживать в 1,5—2,0 раза больше очагов гроз, чем дает достаточно густая сеть метеорологических станций.

Таблица 4.3 — Число дней с явлениями, определенное по данным полной сети наблюдений, по данным ограниченного числа станций и по данным МРЛ для г. Москвы (числитель) и для территории радиусом 100 км (знаменатель)

Вид явления	Сеть наблюдений				МРЛ	
	полная		ограниченная			
	Число случаев	%	Число случаев	%	Число случаев	%
Без осадков	134/80	100/100	165/110	123/137	149/97	106/121
Осадки	233/289	100/100	202/259	86/89	224/272	96/93
Гроза	107/205	100/100	72/167	67/76	112/203	104/99
Град	22/70	100/100	4/45	18/64	29/45	131/64

Примечания — 1. За 100 % принято число случаев, зафиксированное полной сетью наблюдений. 2. В качестве ограниченной сети для пункта использованы 3 метеостанции, для территории — 11 метеостанций.

осадков: МРЛ — за счет специфики радиолокации метеобъектов, метеостанции — за счет редкой сети размещения.

По данным таблицы 4.3, информация о погоде с грозой, определенная по данным МРЛ, близка к информации, полученной по данным полной сети станций [21].

Использование данных МРЛ для определения факта града приводит к завышению фактического числа случаев с градом на 31 % для пункта и к его занижению на 36 % — для территории. Использование данных только метеорологических станций для определения факта града как для пункта, так и для территории приводит к большой потере информации по сравнению с использованием данных полной сети станций.

Таким образом, приведенные в примере данные показывают, что для определения типа погоды с фактом осадков, грозой и градом как для пункта, так и для территории радиусом 100 км следует использовать данные МРЛ, так как они полнее характеризуют тип погоды с грозой и градом по сравнению с данными редкой стандартной сети метеорологических наблюдений.

4.8 Связь радиолокационных параметров облаков с термодинамическими параметрами, рассчитанными по данным о стратификации температуры и влажности

Существует связь между характеристиками конвективной неустойчивости и радиолокационными параметрами радиоэха от облаков. Количественные соотношения статистических радиолокационных характеристик полей радиоэха от кучево-дождевых облаков и таких характеристик конвективной неустойчивости атмосферы, как высота уровня конвекции $H_к$ и средняя скорость конвективных вертикальных движений $\overline{W}_к$ впервые исследованы в работе [48].

Увеличение скорости конвективного потока в облаке приводит к укрупнению частиц. При этом, в свою очередь, увеличивается интенсивность радиоэха. Существует хорошая корреляционная связь высот радиоэха $H_{макс}$ с высотой уровня конвекции $H_к$, а также связь интенсивности радиоэха $\lg Z_{макс}$ со средней скоростью вертикальных движений $\overline{W}_{макс}$ [48].

Уравнения регрессии для расчета $H_{макс_{МРЛ}}$ и максимальной скорости конвективного потока $W_{макс}$ имеют следующий вид:

$$H_{макс_{МРЛ}} = 0{,}86 + 0{,}90H_к, \tag{4.2}$$

$$W_{макс} = 0{,}36H_{макс_{МРЛ}} \lg Z_{макс} + 3{,}60. \tag{4.3}$$

Зависимость (4.3) имеет коэффициент корреляции $r = 0{,}82$ [7].

Связь радиолокационных параметров и массовой доли влаги в облачном слое Q' имеет вид:

$$H_{макс_{МРЛ}} \lg Z_{макс} = 0{,}57Q' - 10{,}5. \tag{4.4}$$

Коэффициент корреляции связи (4.4) $r = 0{,}99$.

Величину Q' можно определить по формуле

$$Q' = a\,\overline{\rho}\,\Delta q\,\Delta H, \tag{4.5}$$

где a — коэффициент перехода от размерности [г/см^2] к размерности [мм];

$\overline{\rho}$ — средняя плотность воздуха в облачном слое;

Δq — разность массовой доли влаги на уровнях конденсации и конвекции;

ΔH — мощность облака.

Произведение радиолокационных параметров $H_{макс}$ $\lg Z_{макс}$ хорошо коррелирует с характеристикой неустойчивости атмосферы, которая определяет развитие кучево-дождевых облаков, следовательно, радиолокационные параметры можно использовать для прогноза конвективных облаков и явлений, как и термодинамические параметры.

Радиолокационная отражаемость в некоторых случаях занижается из-за ослабления радиоволн в облаках и осадках[1]. Однако уменьшение параметра $\lg Z_{макс}$ существенно лишь для случаев с развитием нескольких мощных Cb, следующих друг за другом к пункту прогноза.

Зависимость между $W_{макс}$ и $H_{макс_{МРЛ}}$ и формой облачности имеет следующий вид:

1) для конвективных облаков

$$W_{макс} = 0{,}18 H^2_{макс_{МРЛ}}, \qquad (4.6)$$

коэффициент корреляции $r = 0{,}88$;

2) для кучево-дождевых облаков Cb на фоне слоисто-дождевых

$$W_{макс} = 0{,}09 H^2_{макс_{МРЛ}}, \qquad (4.7)$$

коэффициент корреляции $r = 0{,}78$.

4.9 Диагноз кучево-дождевых облаков без гроз, грозовых, градовых и шквалоовых облаков и количества осадков по данным МРЛ

4.9.1 Диагноз грозовых и градовых облаков по температуре воздуха на высоте верхней границы радиоэха от конвективных облаков

Высота верхней границы радиоэха облаков $H_в$ зависит от физико-географических условий района, поэтому не может объективно характеризовать явление, связанное с этими облаками.

Температура воздуха $t_в$ на высоте $H_в$ является объективной характеристикой состояния активности и микроструктуры конвективных облаков. Методы определения вида явлений, связанных с Cb, по температуре воздуха на верхней границе радиоэха изложены в [16, 17, 19, 22].

---

[1] Руководство по производству наблюдений и применению информации с радиолокаторов МРЛ-1 и МРЛ-2.

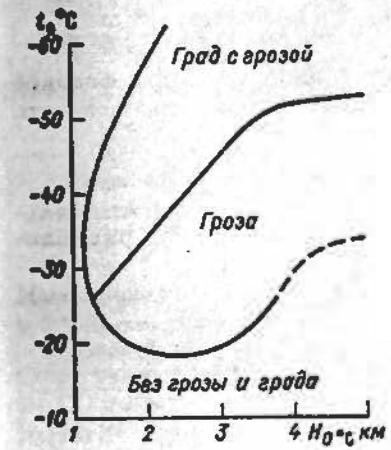


Рисунок 4.4 — Связь условий возникновения гроз и града с температурой воздуха на верхней границе радиоэха ($t_в$) и с высотой изотермы 0 °C ($H_{0°C}$).

Предложены следующие критерии высоты верхней границы радиоэха $H_в$ в зависимости от высоты изотерм минус 30 и минус 40 °C [17]:

1) $H_в \le H_{-30°C}$ — ливни без гроз ($P = 82$ %),

2) $H_{-30°C} \le H_в \le H_{-40°C}$ — грозы без града ($P = 87$ %),

3) $H_в \ge H_{-40°C}$ — град ($P = 77$ %).

Вероятность выпадения града на поверхность земли зависит от размера града в облаке и от высоты нулевой изотермы. Для распознавания грозовых и градовых облаков предложен график зависимости $t_в$ и $H_{0°C}$ (рисунок 4.4).

Этот график используют при составлении прогноза гроз и града на текущие сутки при значении упорядоченных восходящих движений воздуха на уровне 850 гПа $\tau_{850} < -100$ гПа/12 ч.

При $\tau_{850} > -100$ гПа/12 ч конвекция подавляется. Кучево-дождевые облака Cb, которые обусловливают развитие гроз и града, лишаются притока влаги и как бы утопают в обширных системах слоисто-дождевых облаков. В этих случаях грозы и град не образуются.

Данный метод распознавания гроз и града использован в методе прогноза гроз и града по данным МРЛ. Метод испытан и внедрен в ЗапСибРНИИГМИ и в Росгидрометцентре. При испытании в 1979 г. он получил оправдываемость 86 % по пункту и 100 % по территории [62, 63].

4.9.2 Оценка интенсивности осадков и графические методы оценки количества выпавших осадков по данным МРЛ

Мгновенную максимальную интенсивность жидких осадков можно оценить качественно по радиолокационной отражаемости, выраженной в цифрах кода (таблица 4.4).[1]

Таблица 4.4 — Оценка теоретической мгновенной максимальной интенсивности жидких осадков по радиолокационной отражаемости

Цифра кода	$\lg Z_{макс}$ мм^6/м^3	Максимальная интенсивность	Теоретическая мгновенная максимальная интенсивность, мм/ч
2	0,0—0,1	Слабая	0,5—2,9
4	1,2—2,7	Умеренная	3,0—25,0
6	2,8—3,9	Сильная	25,1—140,0
8	3,9	Очень сильная	140,0

Максимальную сумму осадков за полусутки $Q^*_{радио}$ можно оценить по данным о типе и высоте радиоэха (таблица 4.5) [20].

Максимальную предельно возможную сумму осадков за полусутки можно оценить по зависимости $Q^*_{макс}$ от максимальной высоты радиоэха $H^*_{в_{макс}}$, определенной за полусутки по заданной территории с учетом вида сопутствующих осадкам конвективных явлений (ливней, гроз, града) (рисунок 4.5 *а*).

Максимальную сумму осадков за полусутки можно также оценить по зависимости $Q^*_{макс}$ от максимальной радиолокационной отражаемости от облаков на уровне 1,5—2,0 км над поверхностью Земли ($\lg Z^*_{макс_1}$) и на уровне, превышающему изотерму 0 °С на 1,5 км ($\lg Z^*_{макс_2}$) за полусутки (рисунок 4.5 *б*).

Все указанные параметры определяют по данным наблюдений в основные синоптические сроки 06, 12, 15 и 18 ч СГВ.

[1] Руководство по производству наблюдений и применению информации с радиолокаторов МРЛ-1 и МРЛ-2 (см. п. 2).

Таблица 4.5 — Определение суммы выпавших осадков за полусутки по типу и высоте радиоэха за полусутки [20]

Преобладающая картина распределения и тип радиоэха	Высота радиоэха, км		Максимальная сумма осадков, мм
	преобладающая	максимальная	
Изолированные очаги РКСО и РКО	4—5	7	3,0
Сочетание сплошных систем РКСО и РКО с изолированными очагами Сb	5—6	7 (10)	3,1—10,0
Сплошная система РКСО и сочетание РКО и РКСО	6—7	10	10,1—20,0
Сплошная система РКСО и РКО	9—10	12—14	20,1—30,0
То же	9—10	12—14	> 30

Примечание — В скобках приведены данные изолированных очагов Сb.

Графики на рисунке 4.5 позволяют оценить предельно возможную сумму осадков за полусутки с вероятностью соответственно 98 и 97 % [29].

Максимальную сумму осадков за 12 ч можно определить по ее зависимости от площади, занимаемой зоной интенсивной конвекции, сопровождаемой, как правило, грозами (рисунок 4.6). Площадь, занятую зоной конвекции, выражают через число ячеек $N_{яч}$.

На рисунке 4.6 *а* приведена зависимость $Q^*_{макс}$ за полусутки от площади зоны, занимаемой общей конвекцией ($\Sigma N_{яч}$ с $H_в \geq 5$ км), и зоны, занимаемой наиболее интенсивной конвекцией ($\Sigma N_{яч}$ с $H_в \geq 8$ км). Здесь $N_{яч}$ — число ячеек размером 30×30 км на картебланке данных одного МРЛ, для которых высота верхней границы радиоэха $H_в$ соответственно не менее 5 и не менее 8 км.

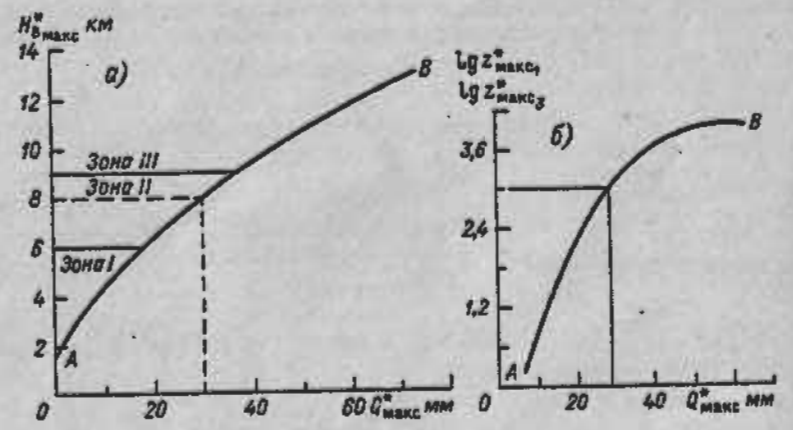


Рисунок 4.5 — Связь максимальной суммы осадков за 12 ч с максимальной высотой радиоэха за 12 ч (*а*) и с максимальной радиолокационной отражаемостью на первом ($\lg Z^*_{макс_1}$) или третьем ($\lg Z^*_{макс_3}$) уровне за 12 ч (*б*).

Зона	Вероятность явления, %		
	Осадки	Гроза	
		без града	с градом
I	79	18	3
II	27	55	18
III	100	50	50

Приведенный график позволяет оценить вероятность выпадения максимального количества осадков по градациям $Q^*_{макс} \geq 00$, $Q^*_{макс} \geq 2{,}0$ мм, $Q^*_{макс} \geq 3{,}0$ мм, $Q^*_{макс} \geq 12{,}0$ мм и $Q^*_{макс} \geq 20$ мм в зависимости от мощности радиоэха и площади зоны осадков.

Вероятность определения $Q^*_{макс} \geq$ в каждой из градаций равна 76—100 %.

На рисунке 4.6 *б* приведена зависимость $Q^*_{макс}$ за полусутки от площади зоны, занимаемой интенсивной конвекцией, для которой высота верхней границы радиоэха не менее 8 км ($\Sigma N_{яч}$ с

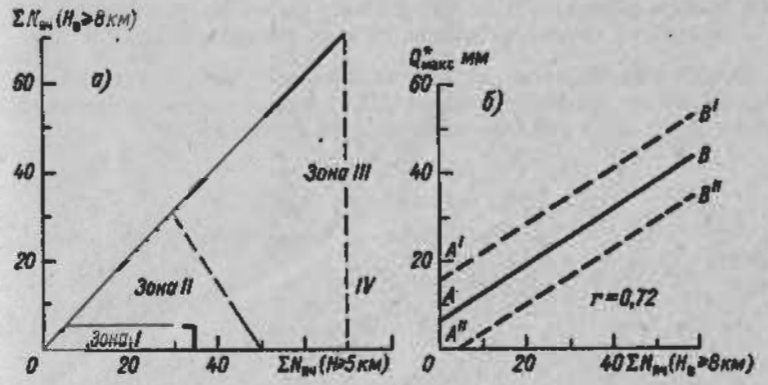


Рисунок 4.6 — Связь максимальной суммы осадков за 12 ч с площадью зоны общей конвекции ($\Sigma N_{яч}$ с $H_в \geq 5$ км) и интенсивной ее части ($\Sigma N_{яч}$ с $H_в \geq 8$ км).

а)

Зона	$Q^*_{макс}$ мм	Вероятность, %
I	> 0	97
II	> 2	76
III	> 3	100
IV	> 12	94
	> 20	83

б) *A' B' B'' A''* — область, где лежит 68 % всех точек; *AB* — линия регрессии.

$H_в \geq 8$ км) и в которой создаются благоприятные условия для развития гроз и града. Коэффициент корреляции этой связи $r = 0{,}72$. Коэффициент корреляции, определенный при проверке данной зависимости на материале лет, различающихся погодными условиями, в среднем составил 0,71.

Все параметры определяются по данным МРЛ в основные синоптические сроки 06, 12, 15 и 18 ч СГВ.

Во всех способах оценки максимального количества осадков величина $N_{яч}$ представляет собой сумму $\sum N_{яч}$ с соответствующей высотой, определяемую во все синоптические сроки с 06 до 18 ч СГВ.

4.10 Метод обнаружения облаков со шквалами, имеющими скорость ветра не менее 15 м/с, по данным МРЛ[1]

Возможность образования шквалов ($v_в \geq 15$ м/с) по району оценивают по графику (рисунок 4.7), когда максимальная высота радиоэха от Cb достигает значения не менее 10 км.

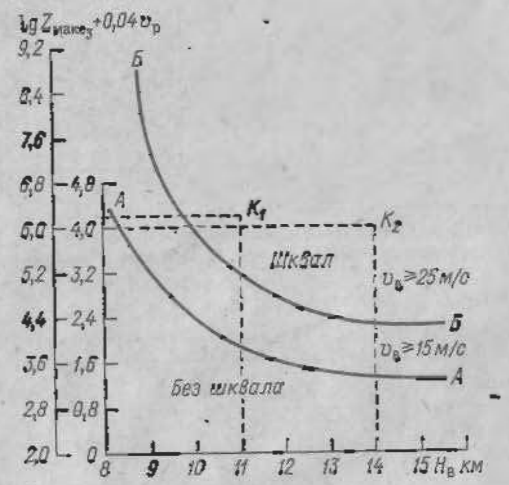


Рисунок 4.7 — Определение ситуации без шквала и со шквалом.

На данном графике $\lg Z_{макс_3}$ — радиолокационная отражаемость на уровне 2,5 км выше изотермы 0 °С; $v_р$ — скорость переноса радиоэха по данным МРЛ или скорость ветра на уровне 700 гПа, км/ч; $H_в$ — высота радиоэха, км.

При диагнозе „шквал" по графику на рисунке 4.7 скорость ветра при шквале оценивают по следующим формулам:

$$v = 13{,}9 + 0{,}16\, v_р - 0{,}30 \lg Z_{макс_3} \quad \text{для } H_в = 10 \text{ км}, \qquad (4.8)$$

[1] Методические указания по определению шквалов с использованием данных МРЛ (см. п. 2).

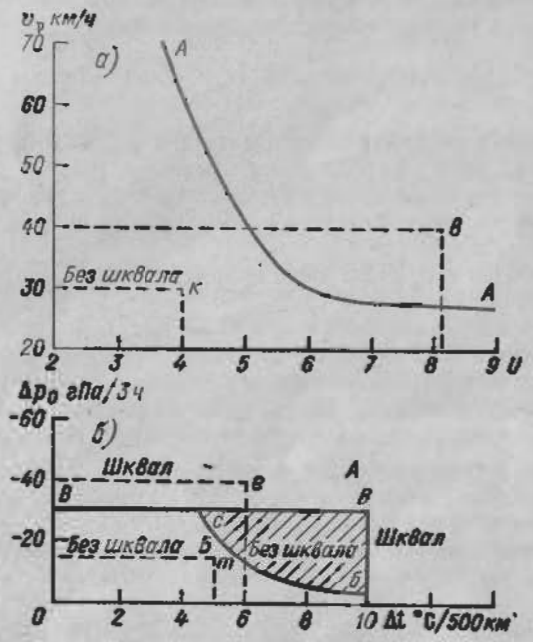


Рисунок 4.8 — Определение условий возникновения сильных шквалов с $v_в \geq 25$ м/с по параметрам U и $v_р$ (*а*) и Δt и p_0 (*б*).

$$v = 17{,}7 + 0{,}07\, v_р - 0{,}20 \lg Z_{макс_3} \quad \text{для } H_в = 11...12 \text{ км}, \qquad (4.9)$$

$$v = 15{,}7 + 0{,}22\, v_р - 1{,}20 \lg Z_{макс_3} \quad \text{для } H_в = 13...17 \text{ км}. \qquad (4.10)$$

На рисунке 4.7 зона без шквала расположена ниже кривой *АА*, выше ее расположена зона шквалов с $v_в \geq 15$ м/с, а выше кривой *ББ* расположена зона шквалов с $v_в > 25$ м/с.

Для диагноза сильных шквалов с $v_в \geq 25$ м/с используют график на рисунке 4.8, по которому определяют ситуацию без шквала и со шквалом и уточняют значения параметров атмосферы для сильных шквалов.

Для определения вероятности развития шквалов по графику на рисунке 4.8 *а* рассчитывают дискриминантную функцию:

$$U = 0{,}2 \lg Z_{\text{макс}_3} + (H_т - H_э) - 0{,}1 t_в, \qquad (4.11)$$

где $H_т$ — высота тропопаузы по данным радиозондирования в срок, близкий к сроку определения шквалов, км;

$t_в$ — температура на уровне верхней границы радиоэха;

$v_р$ — скорость перемещения радиоэха или скорость ветра на уровне 700 гПа, км/ч.

При $H < 10$ км и $v_р \geq 25$ км/ч ставят диагноз „отсутствие сильного шквала".

Если точка с координатами $v_р$ и U на рисунке 4.8 *а* попадает в зону ниже кривой *AA*, то ставят диагноз „без сильных шквалов".

Если такая точка попадает в зону выше кривой *AA*, то диагноз „сильный шквал" уточняют по графику на рисунке 4.8 *б*, на котором Δp_0 — максимальная разность тенденций давления, гПа/3 ч; Δt — максимальная разность температуры в пределах полосы длиной 500 км от пункта установки МРЛ в сторону притекающей воздушной массы и шириной 300 км, °С/500 км.

При диагнозе „сильный шквал" скорость ветра оценивают по формуле

$$v_р = 26{,}6 + 0{,}08\, v_р - 1{,}05 \lg Z_{\text{макс}_3} \quad \text{для } H_э = 10...17 \text{ км}. \qquad (4.12)$$

5 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНФОРМАЦИИ С ИСЗ ДЛЯ ДИАГНОЗА И ПРОГНОЗА КОНВЕКТИВНЫХ ОСАДКОВ

Опасные и особо опасные конвективные явления (ливень, град, шквалы) связаны в основном с мезомасштабными возмущениями, которые очень часто нельзя обнаружить при помощи традиционных методов наблюдений, так как эти наблюдения дискретны. Спутниковые и радиолокационные наблюдения за облаками и явлениями обладают достаточным пространственно-временным разрешением и расширяют возможности изучения физики облаков и улучшения качества прогнозов опасных и особо опасных конвективных явлений. Изображение облачной системы на снимке облачности с ИСЗ содержит косвенную информацию о мощности облаков, процессах циркуляции в атмосфере, водозапасах облаков и зонах конвергенции в глобальном масштабе. Снимки с ИСЗ[1] показывают практически одновременное распределение облачности на значительной территории [3, 12].

5.1 Основные особенности метеорологической информации, получаемой с ИСЗ

Информация с ИСЗ поступает в цифровом виде или в качестве изображения в видимом (ТВ) и инфракрасном (ИК) участках спектра [47].

В видимом участке спектра объектами прослеживания со спутников являются облака и открытые участки земной поверхности. Обнаружить облачность на фоне подстилающей поверхности можно по их различной способности отражать падающую на них прямую и рассеянную радиацию, благодаря чему на снимках они характеризуются различной яркостью. В видимом участке спектра альбедо облаков в основном определяется их вертикальной мощностью, водностью, фазовым состоянием и высотой Солнца. Установленная на метеорологических ИСЗ ИК-аппаратура позволяет по разнице излучения отличать облака от подстилающей поверхности или выделять облака различных ярусов.

Проходя через атмосферу, ИК-излучение частично поглощается. В основном его поглощают водяной пар, углекислый газ и озон. Преобладающее значение в поглощении длинноволновой радиации принадлежит водяному пару. Лучи разной длины волны поглощаются в разной степени.

---

[1] Руководство по использованию спутниковых данных в анализе и прогнозе погоды (см. п. 2).

Наибольшая прозрачность атмосферы наблюдается при длине волн 3,2—4,8 и 8,0—12,0 мкм. Учитывая, что на диапазон длин волн приходится максимум энергии, излучаемой земной поверхностью и облаками, рабочую полосу ИК-аппаратуры на МИСЗ выбирают также в диапазоне длин волн 8—12 мкм.

Так как облака (за исключением тонких Ci) непрозрачны для ИК-излучения в интервале 8—12 мкм, радиометром измеряют энергию, излучаемую поверхностью Земли в районах, свободных от облаков, или излучаемую верхней границей облачного покрова. ИК-снимки получаются благодаря наличию энергетических контрастов между подстилающей поверхностью и облаками. Обычно на ИК-снимках объекты, имеющие более высокую температуру, т. е. излучающие большое количество лучистой энергии, изображаются в виде более ярких областей, чем объекты с меньшей температурой.

Чтобы приблизить зрительное восприятие ИК-снимков к снимкам, сделанным в видимом участке спектра, в практике используют негативные отпечатки ИК-снимков, на которых более холодная облачность имеет более светлый тон изображения.

Одновременный анализ ТВ- и ИК-снимков помогает уточнить типы облачности и определить наиболее активные ее участки в местах совпадения яркости изображений. Мощные кучево-дождевые облака имеют высокую отражательную способность и на ТВ- и ИК-снимках имеют одинаковую яркость.

Пример — На рисунке 5.1 приведена облачная система в виде вихря в районе Москвы. Как следует из сравнения облачности на ТВ- и ИК-снимках, в районе Москвы наблюдается низкая облачная система.

Различие в яркости на ТВ-снимках связано с различной отражательной способностью объектов, а на ИК-снимках — с различной температурой излучающей поверхности. Более яркие участки на ИК-снимках соответствуют облакам, расположенным выше и имеющим наиболее низкую температуру верхней границы. Менее яркие участки соответствуют более низким облакам.

По измерениям радиации в интервале длин волн 8—12 мкм можно достаточно точно определить температуру верхней границы подстилающей поверхности. Чувствительность измеряющей ИК-аппаратуры составляет при положительных значениях температуры 2 °С, при отрицательных – 4 °С.

Данные геостационарных спутников имеют большую информативность с точки зрения анализа мезомасштабных процессов и особенно динамики конвективных облаков. В сочетании с аэросиноптическими данными спутниковые данные несут информацию

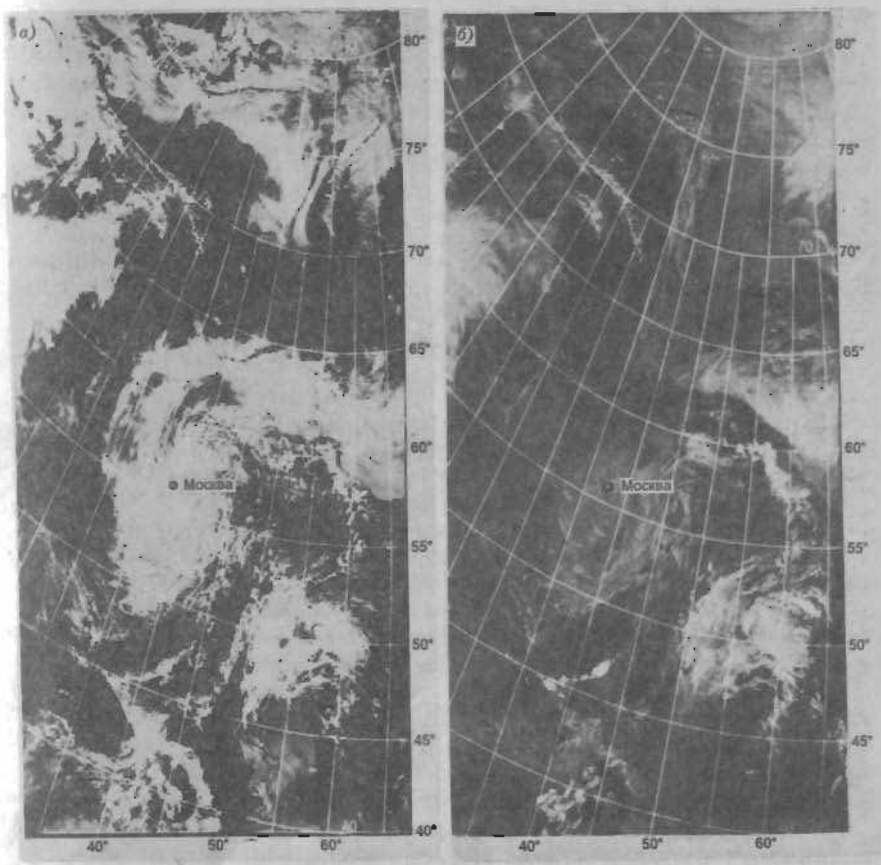


Рисунок 5.1 — Фото облачности, переданное с ИСЗ 21.06.90 г.
а — ТВ-изображение, *б* — ИК-изображение.

о зонах осадков с высоким пространственным и временным разрешением.

Если на снимок облачности с искусственных спутников Земли нанести данные наблюдения МРЛ, то можно определить следующее:

1) характер и конфигурацию облачности,

2) горизонтальные и вертикальные размеры,
3) интенсивность и вид явления на большой территории.

Сборные карты облачного покрова, построенные по телевизионным снимкам, обладают большой информативностью, они отображают пространственную структуру и другие характеристики облачности.

5.2 Дешифровочные признаки

Основными дешифровочными признаками, позволяющими различать изображение облаков разного типа и земной поверхности, являются тон (яркость) и рисунок изображения.

При интерпретации фотографий облаков следует учитывать следующие характеристики:
1) яркость,
2) текстуру,
3) структуру,
4) форму,
5) тип и размеры облаков и облачных систем.

Яркость изображения облаков наиболее трудна для определения. Она зависит не только от метеорологических, но также и от особенностей приемно-передающей аппаратуры. Яркость связана с природой облаков. Альбедо или отражательная способность облаков на ТВ-снимках возрастает с увеличением мощности облаков, а на ИК-снимках — с увеличением высоты их верхней границы.

В циклонических облачных системах существует весьма тесная связь между яркостью и мощностью облаков. Также существует связь между яркостью и интенсивностью осадков. Более ярким облакам соответствует более мощная облачность и, следовательно, зоны более существенных осадков.

Текстура облаков на снимке с ИСЗ показывает: размыты облака или имеют четкую форму, однородные они или неоднородные.

Форма облачных элементов, определяемая по снимку с ИСЗ, — важная характеристика облачности. Летом в области антициклона единственным показателем облачности может служить необычайно бледно-серая пелена над сушей. К полудню развивается кучевая облачность, которая становится различимой, а более мощные облака становятся очень яркими.

Кучево-дождевые облака яркие, выглядят четко, с резкими границами, округлой или овальной формы.

Слоистые формы облачности имеют вид сплошного покрова, кучевые формы облачности имеют вид отдельных облаков с четкими границами, а перистые формы облачности имеют вид тонкострунных волокнистых или нитевидных облаков, которые почти всегда формируются в верхней части тропосферы. Облачная структура определяется характером барического поля и имеет макро-, мезо- и микромасштабы. Структура облачной системы связана с определенной циркуляционной системой атмосферы.

5.3 Использование информации с ИСЗ для определения верхней границы облачности и упорядоченных вертикальных движений

5.3.1 Способ определения высоты верхней границы облачности $H_в$ по данным о радиояркостной температуре, поступающим с ИСЗ

Данные измерений уходящей длинноволновой радиации в диапазоне 8—12 мкм, поступающие с искусственных спутников Земли, позволяют определить высоту верхней границы облачности по радиояркостной температуре $T_{ярк}$ на основании средних климатических вертикальных профилей температуры [4]. Сравнивая высоту верхней границы облаков, рассчитанную по радиационной температуре, определенной по квадратам 150×150 км на картах в масштабе 1 : 15 000 000, с данными радиолокационных измерений по ЕТ СНГ, можно получить средние относительные ошибки расчета этих величин при разных горизонтальных размерах облачных систем. Результаты такого сравнения приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 — Относительная погрешность определения верхней границы облака $\Delta H/H$ по данным наблюдений с ИСЗ

Тип облачности на ИК-снимке	Число случаев	$\Delta H/H$
Яркие обширные Cb, Nb, St с горизонтальным размером L ≥ 400 км	36	0,18
Скопление ярких Cb с горизонтальным размером L ≥ 400 км	19	0,13
Яркие очаги Cb на фоне низкой серой облачности	13	0,52
Изолированные Cb и Cu	30	0,62

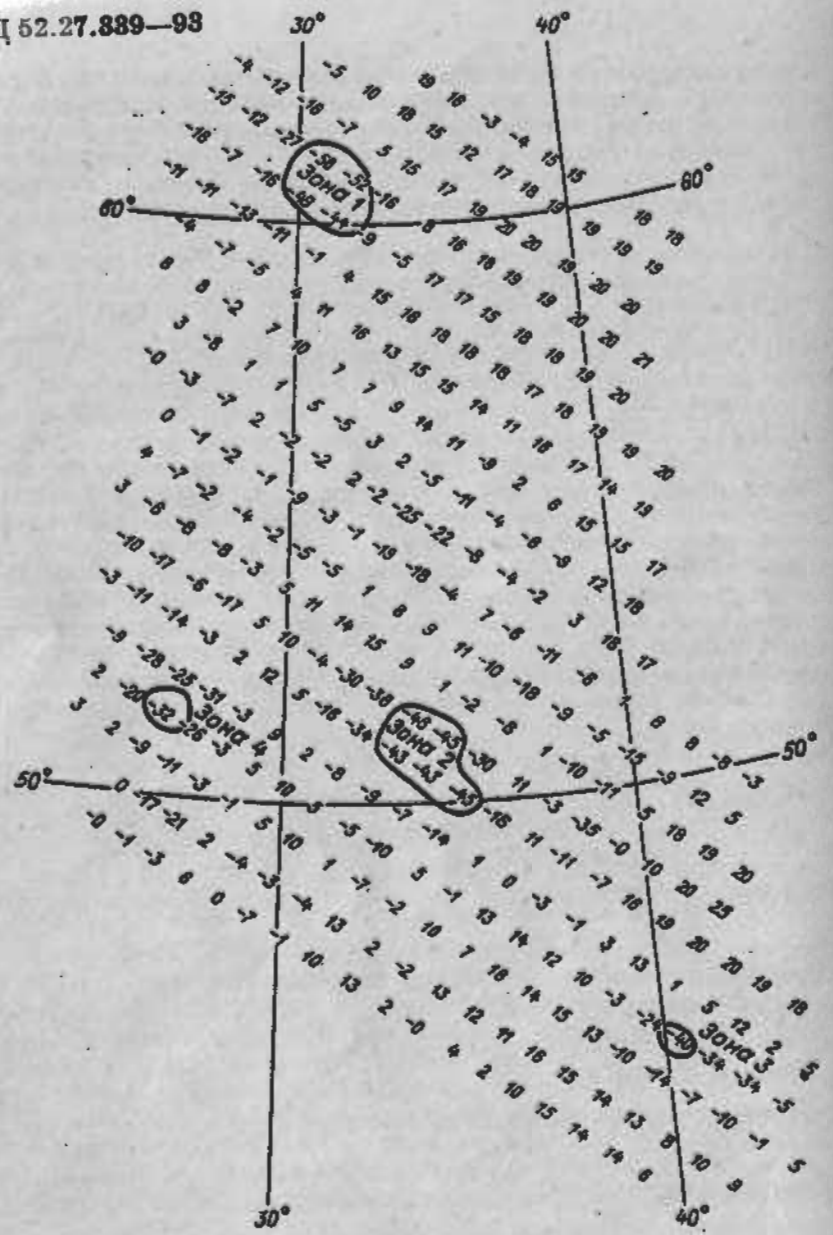


Таблица 5.2 — Математические ожидания высоты верхней границы облаков в ИК-участке спектра на снимке с ИСЗ при разных картинах облачных систем

Характеристика облачности на снимке с ИСЗ	$H_в$, км	
	днем	ночью
Кучево-дождевая облачность в виде округлых пятен с четкими границами отдельных облаков	12(1,41)	10(1,3)
Облачность смешанных форм, кучево-дождевая со слоистообразной	10(1,22)	8(1,3)
Облачность смешанных форм в окклюдированном циклоне, в заполняющихся ложбинах	7(1,41)	5(1,41)

Примечание — В скобках приведены среднеквадратические отклонения.

В обширных облачных системах относительная ошибка расчета высоты верхней границы облака по данным наблюдений с ИСЗ в среднем 18 %, что соизмеримо с относительной ошибкой измерения высоты верхней границы облака по данным МРЛ. Однако в мезомасштабных облачных системах, а также в изолированных Cu и Cb относительная ошибка определения высоты верхней границы может достигать 91 %, составляя в среднем 62 %, что связано с осреднением температуры подстилающей поверхности на большой территории.

Как правило, в районах с развитием кучево-дождевых облаков горизонтальный градиент температуры превышает 6 °С на 75 км, а температура $T_{ярк} \leq -30$ °С. Для летнего периода по ЕТ СНГ получена эмпирическая зависимость между высотой верхней границы

Рисунок 5.2 — Карта радиояркостной температуры подстилающей поверхности (по данным ИК-изображений, переданных с ИСЗ 21.07.88).

конвективных облаков Cb и радиояркостной температурой подстилающей поверхности:

$$H_в = -0{,}245T_{ярк}. \qquad (5.1)$$

Коэффициент корреляции этой зависимости $r = 0{,}66$. Средняя квадратическая ошибка равна 1,2.

Данных о радиояркостной температуре в региональных гидрометцентрах нет, поэтому в Росгидрометцентре проведен статистический анализ данных о высоте верхней границы облаков, измеренной МРЛ, и снимков облачности с ИСЗ в зависимости от ее формы и структуры. Значения математических ожиданий $H_в$ для разных картин облачных систем в инфракрасном участке спектра на снимке облачности с ИСЗ приведены в таблице 5.2.

Коэффициент корреляции между фактическими и рассчитанными значениями $H_в$ равен 0,68. Максимальная относительная погрешность расчета не превышает 35 %. Оценка $H_в$ по данным таблицы 5.2 внедрена в Грузинском УГМС.

Пример — На рисунке 5.2 выделены четыре зоны облаков конвективных форм. Наименьшие значения $T_{ярк} = -56$ °С относятся к северо-западу, в районе Украины $T_{ярк} = -46$ °С и $T_{ярк} = -32$ °С, в районе Северного Кавказа $T_{ярк} = -46$ °С.

Все четыре зоны можно отнести к конвективной облачности. Это же подтверждается на снимке облачности с ИСЗ (см. рисунок 5.1).

Значения $H_в$ рассчитаны по формуле (5.1). В первой зоне $H_в = 13{,}7$ км, во второй — 7,8 км, в третьей — 11,2 км, в четвертой — 8 км. Фактические максимальные значения $H_в$ соответственно равны 13, 9, 13 и 9 км. Средняя относительная ошибка расчета $H_в$ по формуле (5.1) составляет 25 %.

5.3.2 Результаты сопоставления картин облачности на снимках с ИСЗ с полями восходящих крупномасштабных вертикальных движений

Поля восходящих крупномасштабных движений совпадают с районами развития облачных систем, а нисходящих — с безоблачными районами. На основе статистического анализа зависимости вертикальных движений от формы и вида облачной системы на снимке с ИСЗ получены значения математических ожиданий диагностических вертикальных токов в зависимости от картины облачности на снимке с ИСЗ при малоградиентных полях давления (таблица 5.3). Коэффициент корреляции между рассчитанными и диагностическими значениями вертикальных упорядоченных токов, определенными по таблице 5.3, равен 0,6.

Таблица 5.3 — Значения математических ожиданий τ_{850} вертикальных токов в зависимости от характера облачности

Характер облачности	τ_{850} гПа/12 ч
Скопление кучево-дождевых облаков или облачный вихрь с горизонтальными размерами $L \geq 400$ км и с четкими границами	−50(5,47)
Облачная полоса кучево-дождевых облаков с горизонтальными размерами $L \geq 250$ км, но $L < 400$ км	−20(4,47)
Остальные виды облачности	0(4,47)

Примечание — В скобках приведены средние квадратические отклонения.

5.4 Использование информации с геостационарного ИСЗ „Метеосат" для диагноза зон осадков

Информация, поступающая с „Метеосат", так же как и с других геостационарных спутников, позволяет в оперативном режиме вычислять скорость и направление перемещения облачной системы путем интерполяции между последовательными снимками (с учетом широты места) в зависимости от стадии развития облачной системы.

В Росгидрометцентре с 1986 г. установлена и оперативно эксплуатируется станция приема и обработки спутниковых изображений со спутника „Метеосат". Анализ информации производится на дисплее станции. Для этого наряду с черно-белым изображением предусмотрено цветное изображение в шкале 4, 8 и 16 цветов, которые непосредственно устанавливает оператор любым полутоновым уровнем (всего 64 уровня). На ИК-изображении цвета передают температуру подстилающей поверхности (суши или океана). Шкала соответствия температуры и цвета дана под снимком. На изображениях поверхности облаков цвета эквивалентны яркостным полутонам. Для получения оптимального изображения возможно линейное перемещение цветовой шкалы. Можно выделять участки с температурой, соответствующей высоте облаков 7 км и выше.

Структуру поля температуры воздуха на верхней границе облачности можно проанализировать, используя 4, 8 и 16 цветов. В настоящее время для анализа облачной системы по ИК-снимкам выбраны 4 цвета. Оператор устанавливает их на нужный режим наблюдений в интервале температуры минус 60 — плюс 30 °С. Последовательно увеличивая (до 16 раз) размер интересующего района в цветном и черно-белом изображении, можно детально рассмотреть отдельные участки облачности. Последовательный просмотр изображений одной и той же территории через небольшие промежутки времени (1—2 ч) создает дополнительную картину развития облачных систем, тем самым можно уточнить направление их перемещения и эволюцию.

5.4.1 Обзор способов определения зон осадков

Из-за недостаточной разрешающей способности аппаратуры на снимке с ИСЗ видны не отдельные облака, а их скопления, и вероятность правильного определения по спутниковым снимкам тех форм облаков, из которых выпадают осадки, достаточно велика. Это позволяет использовать снимки облачного покрова для анализа и прогноза зон осадков. Осадки выпадают в тех местах, где на снимках видна облачность кучево-дождевых или слоистых форм, а также облачность, которая представляет собой сочетание кучево-дождевых и слоистых облаков.

Изображение облачной системы содержит косвенную информацию о водозапасах облаков, о зонах конвергенции и дивергенции в глобальном масштабе. Использовать качественную информацию, которую дает изображение облачной системы, в количественном диагнозе и прогнозе осадков можно только тогда, когда установлены статистические связи между предиктором (снимок) и предиктантом (количество облаков, мощность облака и т. д.) [34, 47, 58].

В работе [62] разработан способ калибрации яркости изображения на спутниковых фотографиях по данным радиолокационных измерений осадков. Яркость облачного массива на фотографиях со спутников зависит от многих переменных, однако самые яркие облачные массы обычно совпадают с радиоэхом от облаков с зонами осадков. Более светлые облачные массы обычно не имеют радиоэха осадков.

Связь между облачными массивами, видимыми со спутников, и зонами выпадающих осадков изучена в работе [14]. Установлено, что зона осадков чаще всего занимает 0,2—0,5 площади облачного массива и совпадает с очагами наиболее мощных кучево-дождевых облаков, наиболее ярко выделяющихся на ИК-изображении.

В работах [14, 59] исследована связь осадков с формой облачных систем. Повторяемость случаев выпадения дождя возрастает по мере увеличения размеров отдельных облаков и увеличения общего количества облачности. Из облачных полос осадки выпадают в 80 % случаев, из вихрей — в 87 %, а из облаков нерегулярной формы — в 90 %.

Снимки облачного покрова в видимой части спектра можно использовать как дополнительную информацию для расчета суммы осадков, основанного на связи суммы осадков с содержанием водяного пара в атмосфере [51]. Для юга Польши в 1978 г. при прогнозе максимальных осадков используют такие характеристики облачности, как вид облаков и крупномасштабная форма облачной системы.

Картина системы облаков на спутниковом изображении зависит от всех факторов, учитывающихся в моделях прогнозов осадков. Картина системы облаков является результатом хода этих факторов в прошлом, поскольку именно эти факторы и их развитие над данной территорией стали причиной того, что система облаков имеет свою конкретную форму.

5.4.2 Диагноз зон осадков теплого полугодия

Вид осадков теплого полугодия зависит от характеристик облачных систем на снимках с ИСЗ, сделанных в видимом участке спектра.

Разрывность облачного покрова является самым лучшим индикатором вида осадков:

1) обложные осадки преобладают при сплошном облачном покрове из слоистых облаков во всех системах, кроме нерегулярной;

2) ливневые или смешанные осадки с одинаковой вероятностью выпадают из систем с несплошным облачным покровом;

3) ливневые осадки с вероятностью 60—65 % выпадают из систем с разрывами, состоящих из кучевых или смешанных облаков.

Толщину облачных слоев и высоту верхней границы облака можно качественно оценить при помощи яркостных характеристик изображений одной и той же облачности, получаемых одновременно в видимом и в ИК-участках спектра.

Получены качественные правила, позволяющие обнаруживать зоны дождя[1]:

---

[1] Руководство по использованию спутниковых данных в анализе и прогнозе погоды (см. п. 2).

1) дожди с большой суммой осадков выпадают там, где располагаются облачные системы, имеющие одинаково большую яркость на изображениях и в ИК- и в видимом участках спектра;

2) дожди почти всегда выпадают в тех местах, где располагаются нерегулярные облачные системы, яркие на изображениях в видимом участке спектра и имеющие неравномерную яркость на ИК-изображениях;

3) дожди не выпадают в местах расположения облачных систем, которые имеют очень большую яркость на ИК-изображениях и очень серые или невидимые на ТВ-изображениях.

5.4.3 Диагноз количества осадков

Суточная сумма осадков зависит от вида системы облаков. Картина системы облаков является показателем состояния тех факторов, которые отвечают за то, какой процент воды, содержащейся в тропосфере, перейдет в осадки. И поэтому картина системы облаков может нести информацию о максимальном количестве осадков, при известном содержании водяного пара в тропосфере. Выделены следующие особенности:

1) при одном и том же содержании водяного пара в тропосфере на территориях, занятых кучевыми системами, максимальная сумма осадков больше, чем на территориях, занятых слоистообразными системами;

2) при одном и том же содержании пара на территориях, занятых системами в виде вихрей, максимальное количество осадков значительно выше, чем на территориях, занятых системами в виде полос или нерегулярными системами;

3) при одном и том же содержании водяного пара в системах с разрывами осадков будет меньше, чем в сплошных системах.

Характерно, что картина облаков в начале осадочного цикла должна быть ярче, чем картина этой же облачности, полученная раньше. Завершение цикла можно определить на снимке по изменению яркости. Картина облаков становится более серой, в компактных системах становятся заметны прямые полосы без завихрения. Наиболее информативными параметрами, определяющими количество осадков по данным об облачности с ИСЗ, являются форма и ширина облачной системы по направлению перемещения облака.

С вероятностью 90—100 % значительные осадки выпадают при ширине облачного массива 301—600 км, а при ширине массива менее 300 км вероятность выпадения таких осадков уменьшается до 0—7 %.

Среднее количество осадков рассчитывают по полям радиояркостной температуры [34]. При определении роли того или иного механизма образования осадков необходимо учитывать следующие параметры:

1) температуру на основании облака,
2) мощность облака,
3) температуру на верхней границе облака,
4) вертикальные движения.

Учет первых двух факторов позволяет определить водозапас облака и образование капель дождя путем коагуляции. Последние два фактора играют решающую роль в образовании кристаллической фазы в облаке, приводящей в действие механизм осадкообразования.

При анализе условий осадкообразования температура на верхней границе облачной системы может служить признаком не только наличия или отсутствия осадков, но позволяет в какой-то мере судить и об их количестве в зонах резко выраженных фронтов с мощными облачными системами, указывающими на наличие интенсивных вертикальных движений. Данные о радиояркостной температуре, измеренной метеорологическими спутниками вместе с данными о вертикальных движениях можно использовать для определения основных характеристик фронтальных облаков и зон выпадающих осадков с ориентировочной оценкой их средней суммы [34].

В США предложена следующая методика восстановления данных об осадках для внетропического циклона по ИК-данным геостационарных спутников:

1) зону внетропического циклона делят на конвективный и фронтальный секторы, вклад осадков за счет фронтальной облачности среднего и верхнего ярусов составляет 13 %;

2) сумму конвективных осадков за 90 мин (R_{90}) рассчитывают по эмпирической зависимости:

$$R_{90} = 0{,}00025\,(5 - T_p)^{2{,}61},$$

где T_p — радиационная температура, ... °С [47].

5.4.4 Определение и прогноз скорости и направления перемещения облаков и облачных систем

При прогнозе осадков по спутниковой информации об облачности необходимо сопоставить распределение облачности с высотными потоками и рассмотреть возможность увеличения облачнос-

ти за счет объединения и взаимодействия облачных систем (конвергенция облачности) [35].

При слиянии двух облачных систем увеличиваются интенсивность и количество выпавших осадков [10, 47, 59]. Возможность слияния облачных систем можно оценить, определяя по последовательным снимкам с ИСЗ или картам сети МРЛ смещение мезомасштабных зон конвергенции и учитывая их связь с двумя близко расположенными фронтальными системами.

Прогноз перемещения систем выполняют в следующей последовательности:

1) если ожидается конвергенция облачных систем, то по разности скоростей их перемещения и расстоянию между ними прогнозируются время и место их объединения;

2) далее строят траекторию воздушных частиц, перемещающихся на обслуживаемую территорию, и прогнозируют площадь облачного массива, переносимого ими.

Если ширина конвективной или сплошной облачности по потоку достигает 300 км и более, то следует ожидать выпадения значительных осадков на трех и более станциях. При слиянии облачных систем [59] увеличивается интенсивность осадков.

Прогноз облачности основан на следующем:

1) на выявлении перемещающейся к пункту прогноза облачной системы,

2) на определении ее эволюции и времени прохождения через район прогноза.

Скорость и направление перемещения облачных систем определяют по общепринятым правилам[1] [7]. Облака перемещаются по направлению ветра на уровне 700 или 500 гПа в зависимости от высоты их верхней границы.

Облака с высотой верхней границы $H_в \geq 7$ км перемещаются со средней скоростью ветра по траектории, определенной по уровню 500 гПа на карте АТ. В основном это яркие облака молодого циклона или скопление кучево-дождевых облаков, связанных с активной конвекцией.

Облака с $H_в < 7$ км перемещаются со средней скоростью ветра по траектории на уровне 700 гПа. В основном это облака в окклюдированном циклоне, в заполняющихся ложбинах, на размывающихся фронтах.

---

[1] См. п. 2: 1. Методическое письмо. Прогноз фронтальных осадков по данным наблюдений МРЛ и ИСЗ. 2. Руководство по краткосрочным прогнозам погоды. Ч. 1.

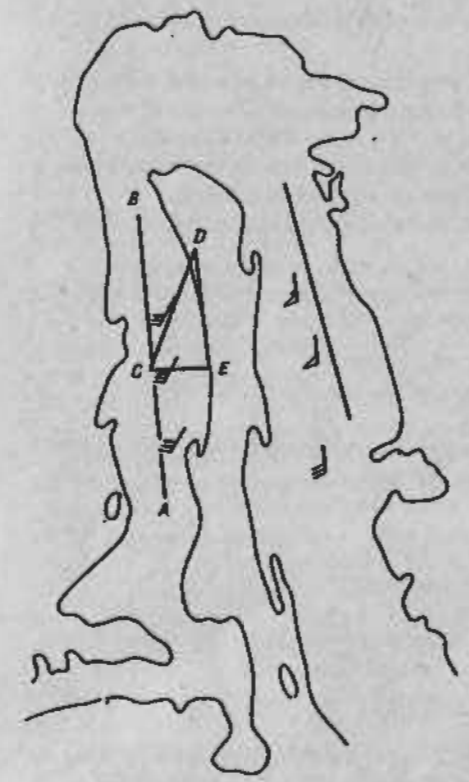


Рисунок 5.3 — Пример расчета скорости и направления перемещения облачных систем по картине облачности, переданной с ИСЗ.

Для определения периода прохождения отдельных облаков используют координаты прогностической траектории на карте АТ:

1) для облаков с $H_в \geq 7$ км — на уровне 500 гПа,

2) для облаков с $H_в \leq 7$ км — на уровне 700 гПа.

Для определения периода прохождения облачных систем используют направление и скорость перемещения барических систем, с которыми они связаны.

Для определения направления и скорости перемещения облачных систем дополнительно используют следующие правила, изложенные в Руководстве по использованию данных наблюдений с ИСЗ в анализе и прогнозе погоды (см. п. 2):

1) на снимке облачности (рисунок 5.3) проводят линию AB, параллельную гряде облачности;

2) наносят направление и скорость ветра на уровне 500 гПа и строят вектор CD, параллельный направлению ветра;

3) из точки D проводят прямую ED, параллельную AB;

4) из точки C к прямой ED опускают перпендикуляр, указывающий направление перемещения облачной системы;

5) скорость перемещения облачной системы определяют по формуле

$$V_{\text{п}} = V_{\text{в}} CD/CE, \qquad (5.2)$$

где $V_{\text{п}}$ — скорость перемещения облачности,

$V_{\text{в}}$ — скорость ветра на уровне верхней границы облака,

CD и CE — длины векторов;

6) время приближения облачной системы циклона или фронта к пункту прогноза рассчитывают по формуле

$$t_{\text{н}} = t_0 + L' / \overline{V}, \qquad (5.3)$$

где $t_{\text{н}}$ — время приближения облачности;

t_0 — срок наблюдения с ИСЗ;

L' — расстояние по снимку облачности с ИСЗ от пункта прогноза до яркой части облачной системы, км;

$\overline{V}$ — средняя скорость перемещения облачной системы фронта или циклона, км/ч.

Если $t_{\text{н}} > 24$ ч, т. е. возникает переход на следующие сутки, то от полученного времени следует вычесть 24 ч и определить $t_{\text{н}}$ в последующие сутки.

5.5 Эволюция облачности, отображенная на снимке с ИСЗ и на картах данных сети МРЛ

Диагноз продолжительности существования и определение эволюции облачности являются важными компонентами прогнозов конвективных явлений [47][1].

[1] См. также п. 2: 1. Методическое письмо. Прогноз фронтальных осадков по данным наблюдений МРЛ и ИСЗ. 2. Руководство по краткосрочным прогнозам погоды. Ч. 1.

5.5.1 Диагноз продолжительности существования облаков и облачных систем

Продолжительность жизни отдельного кучево-дождевого облака составляет 1,5—2,0 ч, а поля конвективных облаков могут сохраняться более суток.

Продолжительность существования поля конвективных облаков, связанных с фронтальной облачной полосой и облачным вихрем, более 12 ч наблюдается в 100, а более 24 ч — в 85 % общего числа случаев [8, 10].

Снимки с геостационарных спутников поступают каждые 30 мин и дают наилучшие представления об эволюции конвективных систем. Максимальная высота верхних границ облаков, находящихся в максимальной стадии развития и имеющих максимальную радиолокационную отражаемость, устойчива во времени и сохраняется до тех пор, пока сохраняется та синоптическая ситуация, в которой развивалась данная облачность.

Активность облачной системы и параметры радиоэха достигают максимальных значений, когда кучево-дождевые облака развиваются в следующих условиях:

1) впереди холодного фронта с волнами,

2) на фронте окклюзии в теплом секторе фронта,

3) в центре циклона, формирующегося на вершине волны.

Если радиоэхо от облака появляется при указанных синоптических ситуациях, то кучево-дождевые облака развиваются в течение суток, не менее.

5.5.2 Эволюция облачных систем

Выпадению осадков в градациях ОЯ и СГЯ за 6—12 ч предшествуют появление мощного радиоэха от облаков и развитие конвективной облачности. Чтобы выпало такое количество осадков, скопления облаков в облачной системе должны при слиянии достигать горизонтальных размеров не менее 250 км на снимке ИСЗ.

При наличии термодинамической неустойчивости и конвергенции в нижних слоях атмосферы развивается мощная конвективная облачность, площадь которой со временем увеличивается, и только после появления скопления кучево-дождевых облаков с горизонтальными размерами на снимке с ИСЗ не менее 250 км отмечается выпадение осадков в градации ОЯ и СГЯ.

Уменьшение высоты верхней границы облака за один и тот же срок наблюдений текущих и предыдущих суток является признаком перехода атмосферы из неустойчивого термодинамического состояния в более устойчивое. Поэтому при изменении $H_{\text{в}}$ за ночные сроки наблюдения текущих и предыдущих суток следует

ожидать такого же изменения радиолокационных параметров за дневные сроки наблюдения [8].

Первому появлению радиоэха на экране МРЛ при отсутствии адвективных процессов предшествует с заблаговременностью 7—12 ч появление на снимке с ИСЗ кучевообразных облаков, имеющих вид точек, или пелены облачности на фоне безоблачного неба. В этих случаях прогноз ОЯ и СГЯ составляют по аэросиноптическим данным наблюдений одним из методов, перечисленных в Руководстве по краткосрочным прогнозам погоды (см. п. 2).

Чтобы выяснить эволюцию верхней границы облака при указанных в данном пункте синоптических ситуациях с заблаговременностью 12 и 24 ч, определяют высоту верхней границы облака в начальной и конечной точках траектории перемещения облаков. Взаимосвязь между значениями $H_в$ в начальной ($H_{в_ф}$) и конечной ($H_{в_{пр}}$) точках траекторий имеет следующий вид:

1) для заблаговременности 12 ч:

$H_{в_{пр}} = 1{,}23 H_{в_ф}$, коэффициент корреляции $r = 0{,}76$;

2) для заблаговременности 24 ч:

$H_{в_{пр}} = 1{,}01 H_{в_ф}$, коэффициент корреляции $r = 0{,}73$.

Если $H_в \geq 13$ км, то эволюцию параметра $H_в$ не учитывают.

Параметр $\lg Z_{макс}$ при указанных выше синоптических ситуациях изменяется следующим образом: если прогноз составляют на текущий день, а горизонтальный градиент температуры на уровне 850 гПа не менее 1,6 °С на 100 км, то к значению $\lg Z_{макс} < 6$ в цифрах кода прибавляют 2.

При малоградиентном поле давления у поверхности Земли и при конвергенции облачности прогностические вертикальные токи нужно уточнять по таблице 5.3 в зависимости от типа ожидаемой облачной системы.

При скоплении ярких белых облаков в виде облачного вихря на снимке с ИСЗ в начальной точке траектории осадки количеством менее 20 мм не выпадают.

Если в начальной точке траектории безоблачно, то осадки количеством более 10 мм не выпадают. Такие осадки могут выпадать из внутримассовой облачности, продолжительность жизни которой не более 1—2 ч и которая не фиксируется на снимке облачности с ИСЗ.

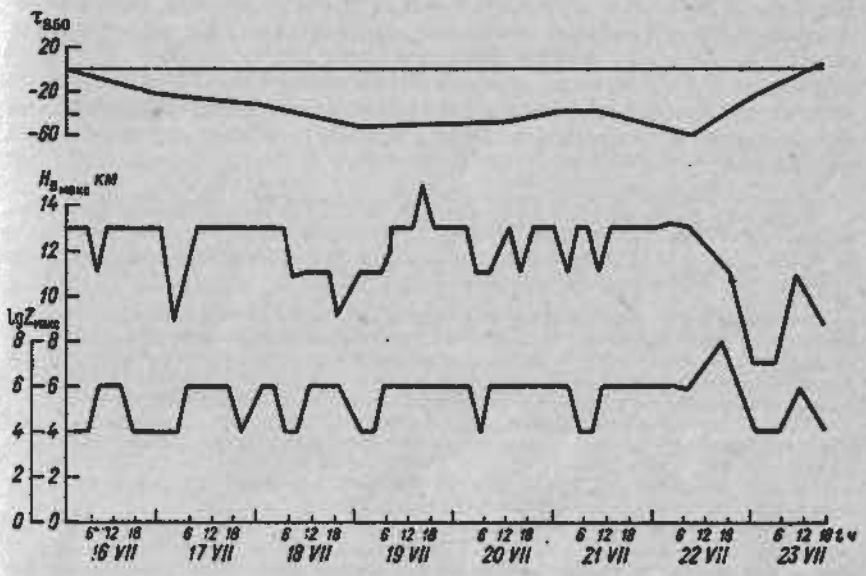


Рисунок 5.4 — Изменение τ_{850}, $H_{в_{макс}}$ и $\lg Z_{макс}$ в облачной системе циклона над Украиной 16—23.07.88 г.

Облачные системы, связанные со значительными и сильными осадками, всегда фиксируются на снимке с ИСЗ с большой заблаговременностью (36 ч и более).

При слиянии двух облачных систем увеличиваются интенсивность и количество выпавших осадков [10, 47, 59]. Оценивая по последовательным снимкам с ИСЗ или по картам сети МРЛ смещение мезомасштабных зон конвергенции и учитывая их связь с двумя фронтальными системами, близко расположенными друг к другу, можно оценить возможность слияния этих облачных систем.

Синоптическая ситуация указывает на возможность развития крупномасштабных вертикальных движений, а для развития упорядоченной конвекции необходимо одновременно с этим наличие термодинамической неустойчивости в атмосфере.

Развитие мощных конвективных облаков связано не только с термодинамической неустойчивостью воздушных масс, но и с макромасштабной конвергенцией, то есть с возмущениями круп-

ного масштаба. Когда мощные конвективные облака расположены в области со слабыми восходящими движениями, они изолированы и из них выпадает небольшое количество осадков. Для развития мощных кучево-дождевых облаков с опасными и особо опасными конвективными явлениями необходима определенная взаимосвязь мезомасштабных и макромасштабных вертикальных движений.

Пример — На рисунке 5.4 приведены изменения макромасштабных вертикальных токов на уровне 850 гПа τ_{850}, радиолокационных параметров облака $H_{e_{макс}}$ и $\lg Z_{макс}$ с 16 по 23 июля 1988 г. в облачной системе циклона над Украиной.

Максимальные значения высоты верхней границы облака и радиолокационной отражаемости не менялись в течение всех дней, а 19 июля верхняя граница облака достигла высоты 15 км. Осадки наибольшей интенсивности наблюдались 19 июля, а также в ночь с 21 на 22 июля и днем 22 июля, когда их выпадение отмечалось на большой площади, а количество выпавших осадков составило 100—150 мм.

С 16 июля погода на Украине обусловливалась циклоном и связанным с ним стационарным холодным фронтом с волнами. Контраст температуры на фронте на уровне 850 гПа увеличивался от 1—4 °С/500 км 16 июля до 10—11 °С/500 км 22 июля, а на карте $ОТ_{2500/1000}$ — от 6—9 дам/1000 км до 20—22 дам/1000 км 22 июля. Циклон стал постепенно заполняться 23 июля.

Высота верхней границы конвективных облаков косвенно характеризует мезомасштабные конвективные потоки, а крупномасштабные можно определить по численной модели диагноза и прогноза параметров атмосферы. Наибольшей интенсивности осадки достигли тогда, когда одновременно с мощной конвекцией отмечались значительные вертикальные упорядоченные движения 19, 21 и 22 июля (рисунок 5.4).

6 ВРЕМЕННО́Е И ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СТИХИЙНЫХ ЯВЛЕНИЙ ПОГОДЫ, СВЯЗАННЫХ С КОНВЕКЦИЕЙ

6.1 Повторяемость СГЯ с учетом ущерба по России и ЕТ СНГ

Стихийное бедствие — это катастрофическое последствие природного явления или сочетания явлений, результатом которого являются гибель людей и экономический ущерб в относительно больших размерах, а также существенное нарушение человеческой деятельности.

В настоящем РД рассмотрены явления, связанные с развитием зон активной конвекции (ЗАК): сильные дожди, град, шквалы и смерчи, осадки в холодный период года (таблица 6.1).

Таблица 6.1 — Критерии, определяющие СГЯ, связанные с активной конвекцией

СГЯ	Критерий
Сильный дождь в теплый период года	Максимальная сумма осадков $Q_{макс} \geq 50$ мм выпадает за период времени не более 12 ч на площади $S \geq 30$ % площади обслуживаемой территории, а в пределах города зафиксированная хотя бы одной станцией
Крупный град	Диаметр градин $d \geq 20$ мм
Сильный шквал	При порывах скорость ветра $v_в \geq 25$ м/с
Смерч	Скорость ветра $v_в \geq 25$ м/с
Очень сильные осадки в холодный период года	Максимальная сумма осадков за 12 ч и менее $Q_{макс.} \geq 20$ мм выпадает на площади $S \geq 30$ % обслуживаемой территории, а в пределах города зафиксированная хотя бы одной станцией

Примечание — Критерии параметров даны по Наставлению по службе прогнозов. Раздел 2. Ч. 3—5.

В 95 % случаев явления, приведенные в таблице 6.1, сопровождаются грозами. В 5 % случаев осадки в градации СГЯ связаны с обложными продолжительными дождями без гроз.

Примеры:

1) на Северном Кавказе градобития занимают второе место после засухи по уровню наносимого ущерба.

Смерч с крупным градом, наблюдавшийся 22 июня 1990 г. в Веселовском районе Ростовской области на территории совхоза Бабаевский, проследовал через поселок и повредил 52 дома, сломал много деревьев, повалил бетонные опоры ЛЭП, поднял в воздух трех человек и легковую машину;

2) на Северном Кавказе ливень с градом в июне 1992 г. нанес ущерб на сумму более 240 млн руб. в ценах 1990 г., а 18 мая 1970 г. градовая полоса длиной 175 и шириной 30 км уничтожила полностью весь урожай;

3) на Украине ливень с градом 12 июня 1988 г. местами с суммой осадков 115 мм и градом с диаметром градин d 2,5 см нанес ущерб, исчисляемый миллионами рублей, в Киевской, Житомирской, Харьковской и Черкасской областях.

Характер и повторяемость СГЯ, описанных в данном РД, изучены по следующим источникам:

1) журналам оперативных донесений о СГЯ Росгидрометцентра;

2) техническим обзорам СГЯ, составленным в региональных гидрометцентрах;

3) картам подтвержденных осадков и ветра.

Для определения характера и степени опасности СГЯ проанализированы данные за 2 года наблюдений об ущербе для европейской части СНГ, фиксируемые в журнале донесений Росгидрометцентра. По результатам анализа, характер ущерба и экономический ущерб от СГЯ определяются следующим:

1) видом конвективного явления (дожди, град, шквал, смерч);

2) совокупностью нескольких явлений, одно из которых достигает критерия СГЯ;

3) интенсивностью и продолжительностью СГЯ;

4) характером подстилающей поверхности.

Если СГЯ отмечаются в необжитых степных и пустынных районах, то они редко наносят ощутимый ущерб народному хозяйству.

С сильными ливнями чаще всего связаны сели, паводки, затопления, повреждения бахчевых культур и пр. С градом связаны повреждения сельскохозяйственных и садовых культур, построек и автотранспорта. Со шквалами и смерчами связаны крупные разрушения жилых и хозяйственных помещений, мостов, повреждения различных технических средств (подъемных кранов, автомашин), нередки человеческие жертвы.

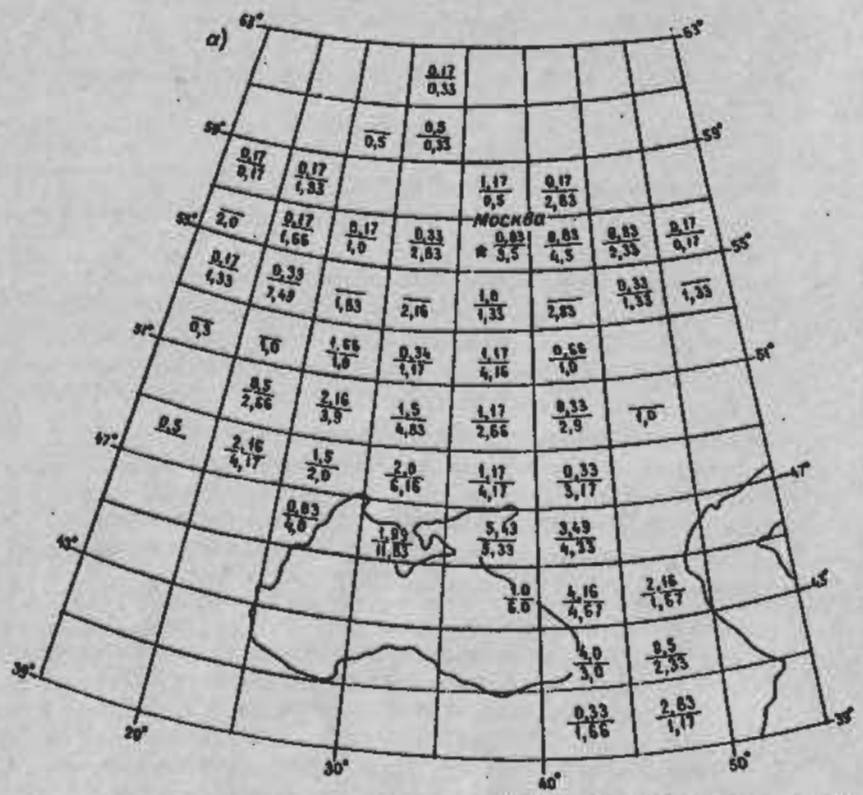
На основе разрозненных сведений нельзя получить более или менее полное представление о размере ущерба. Как правило,

Таблица 6.2 — Категории ущерба в зависимости от его степени

Индекс категории	Степень ущерба
1	Ущерб не отмечен либо нет сведений о нем
2	Незначительные повреждения посевов, садов, бытовых производственных объектов
3	Существенный ущерб: гибель посевов и скота, существенные повреждения жилых, производственных объектов и ЛЭП на сравнительно небольшой площади, непродолжительные нарушения ритма производства либо ущерб на сумму не более 2 млн руб. в ценах 1991 г.
4	Чрезвычайный ущерб, нередко с человеческими жертвами, существенным повреждением промышленных объектов, домов, мостов, транспорта, приведший к длительному нарушению ритма производства и жизни людей на большой территории, оценивающийся в сумму не менее 2,5 млн руб. в ценах 1991 г.

Таблица 6.3 — Повторяемость СГЯ в зависимости от категории ущерба (числитель — число случаев СГЯ; знаменатель — повторяемость, %)

СГЯ	Общее число случаев СГЯ	СГЯ без ущерба	СГЯ с ущербом			
			незначительным	существенным	чрезвычайным	Σ
Ливень	279/100	233/83	14/5	19/7	13/5	46/17
Град с ливнем	66/100	52/80	7/10	2/3	5/7	14/20
Шквал с ливнем	61/100	29/47	5/9	19/31	8/13	32/53
Ливень с градом и шквалом	36/100	11/30	6/17	13/36	6/17	25/70
Итого	442/100	325/73	32/7	53/13	32/7	117/27



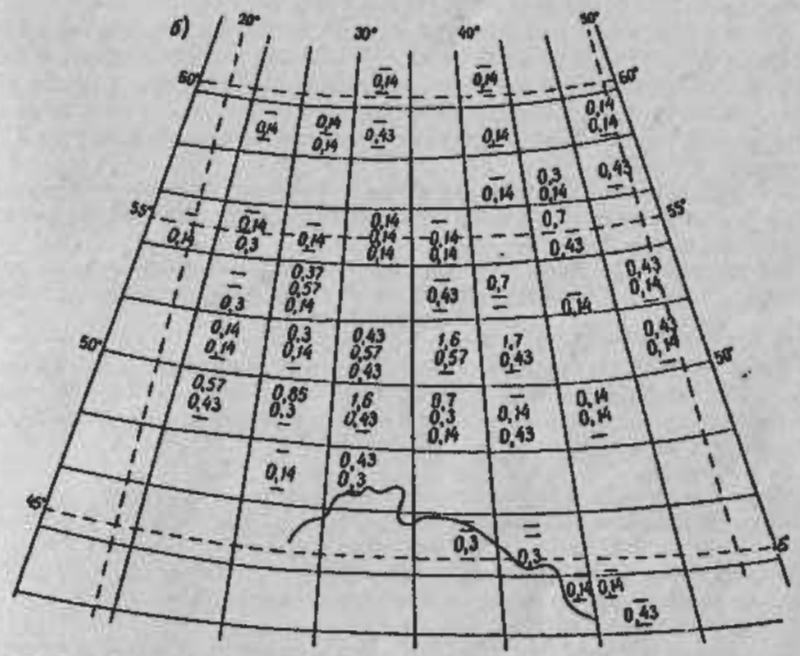


Рисунок 6.1 — Повторяемость СГЯ
а — град (числитель) и ливни (знаменатель), *б* — смерчи (верхняя цифра), по ЕТ СНГ, приведенная к 1 году.
шквалы (средняя цифра) и сильные шквалы (нижняя цифра).

ущерб оценивают только в случаях, когда его можно выразить в конкретных единицах: по степени разрушения жилья и производственных помещений, по площади поврежденных сельскохозяйственных культур, по числу обрывов ЛЭП и пр. Если же явление, достигшее степени СГЯ, прошло над лесом, пахотой и т. п., то повреждения от него не фиксируют и определяют его как СГЯ без ущерба. Поэтому приведенные в таблицах 6.2 и 6.3 оценки о степени ущерба носят качественный характер. В донесениях ущерб от СГЯ чаще всего оценивается по площади, на которой отмечено повреждение сельскохозяйственных культур, и (или) в рублях.

По анализу данных об ущербе за май—сентябрь 1988—1989 гг. все СГЯ распределены по степени ущерба на несколько категорий (таблица 6.2).

В таблице 6.3 приведена суммарная повторяемость СГЯ по ЕТ СНГ в зависимости от вида СГЯ и категории ущерба в течение теплого сезона (май—сентябрь) 1988—1989 гг. Из всех СГЯ лишь 27 % нанесли ущерб, причем чрезвычайный ущерб нанесли 7 % СГЯ, существенный — 13 %. Чаще всего (70 % случаев) ущерб отмечался при СГЯ, сочетающих ливни, град и шквалы с грозой, когда хотя бы одно из этих явлений достигало критерия СГЯ.

На долю случаев ущерба от шквалов пришлось 68 %. Существенно реже ущерб отмечался при граде (20 %) и ливнях с градом и без него (17 %).

Из всех видов СГЯ на ЕТ СНГ чаще всего отмечаются ливни (63 %), реже — шквалы (14 %) и град (15 %).

Из-за сложности учета повреждений от СГЯ и короткого ряда наблюдений приведенные оценки ущерба носят качественный характер. Однако относительное распределение случаев ущерба по видам явления правильно отражает степень угрозы от них народному хозяйству. СГЯ со шквалами значительно чаще других СГЯ приводят к ущербу.

Распределение СГЯ по виду и по связанному с ними ущербу по территории России и ЕТ СНГ приведено на картах, представляющих собой сетку 250× 250 км.

На рисунке 6.1 показано распределение повторяемости за год ливней, града, шквалов и смерчей по ЕТ СНГ, приведенное к 1 году.

6.1.1 Повторяемость СГЯ по ЕТ СНГ

На рисунке 6.1 *а* приведена повторяемость ливней и града в градациях СГЯ, рассчитанная по данным за 1977—1984 и 1989—1990 гг.

Максимум повторяемости ливней в градации СГЯ отмечен в следующих районах:

1) в Крыму — 11 раз в год;
2) в Белоруссии и Прибалтике — не менее 7 раз в год;
3) на Черноморском побережье Кавказа, в Краснодарском и Ставропольском краях, Кабардино-Балкарии и в ЦЧО — 4—6 раз в год.

Максимум повторяемости града отмечен в следующих районах:

1) на Северном Кавказе и в Закавказье — 4—5 раз в год;
2) на Украине — 2 раза в год.

В остальных районах ЕТ СНГ повторяемость града с диаметром градин $d \geq 2$ см очень мала. Град в градации СГЯ отмечен за указанный период на территории вплоть до 63° с. ш.

На рисунке 6.1 *б* приведено распределение приведенной к 1 году повторяемости смерчей, сильных шквалов и шквалов со скоростью ветра $v_в = 20...24$ м/с по ЕТ СНГ, рассчитанное за 1977—1984 гг. Наиболее часто смерчи отмечаются в Краснодарском крае, на Черноморском побережье Кавказа, в центральных районах Украины, на юге Литвы и в Верхнем Поволжье. В этих районах смерчи появляются каждые 2—3 года.

Максимум повторяемости сильных шквалов отмечен в центральной и восточной частях Украины (каждые 1—2 года), в западной части Украины, Литве и Верхнем Поволжье, в ЦЧО и Краснодарском крае (каждые 2 года). Реже (каждые 2—3 года) они отмечены на черноморском побережье Украины и в Ставропольском крае.

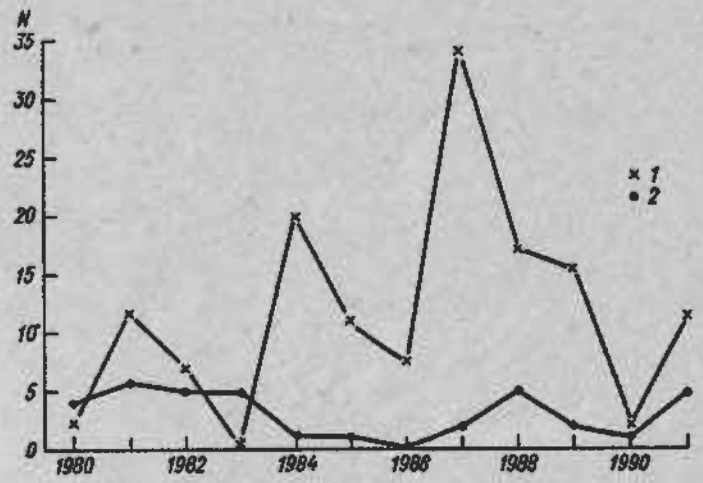


Рисунок 6.2 — Распределение числа случаев с сильными шквалами и смерчами на ЕТ СНГ.
1 — шквалы, *2* — смерчи.

Умеренные шквалы ($v_в = 20...24$ м/с) чаще всего наблюдаются в центральной и восточной частях Украины и в районе ЦЧО. В этих районах они возникают 2—3 раза в сезон.

На рисунке 6.2 показано распределение повторяемости сильных шквалов и смерчей по ЕТ СНГ за 1980—1991 гг. Большинство случаев сильных шквалов отмечено в 1981, 1984, 1987 и 1990 гг., а смерчей — в 1982, 1985 и 1988 гг.

На этом сравнительно коротком периоде статистического ряда просматривается чередование максимумов повторяемости каждые 3 года и относительное увеличение числа случаев с сильными шквалами и смерчами последние 4 года.

Смерчи отмечаются почти равновероятно в течение всего теплого сезона, но чаще всего в июне и июле, а сильные шквалы — также в июне и августе. Смерчи могут возникать и в холодный период в южных районах ЕТ СНГ. Один смерч отмечался в декабре 1980 г. в районе Большого Сочи.

6.1.2 Повторяемость СГЯ по территории России

На рисунках 6.3 и 6.4 приведена повторяемость СГЯ с мая по сентябрь по территории России, приведенная к 1 году и рассчитанная за 1982—1991 гг.

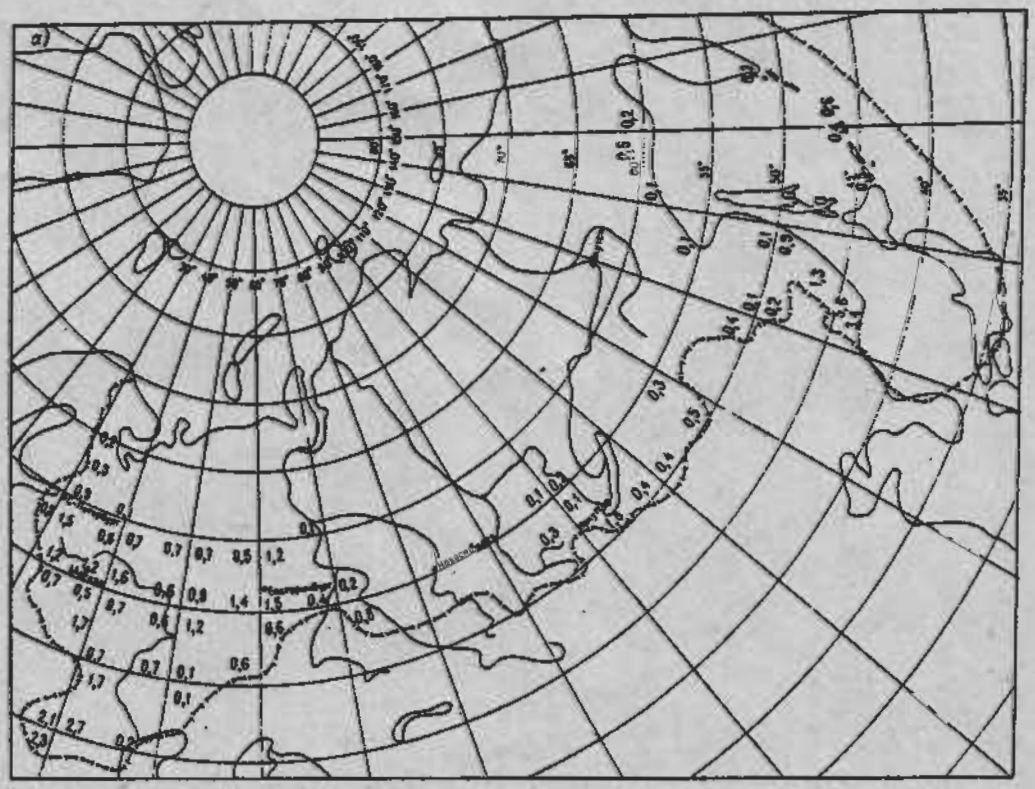


Рисунок 6.3 *а* — Повторяемость СГЯ (ливней), приведенная к 1 году.

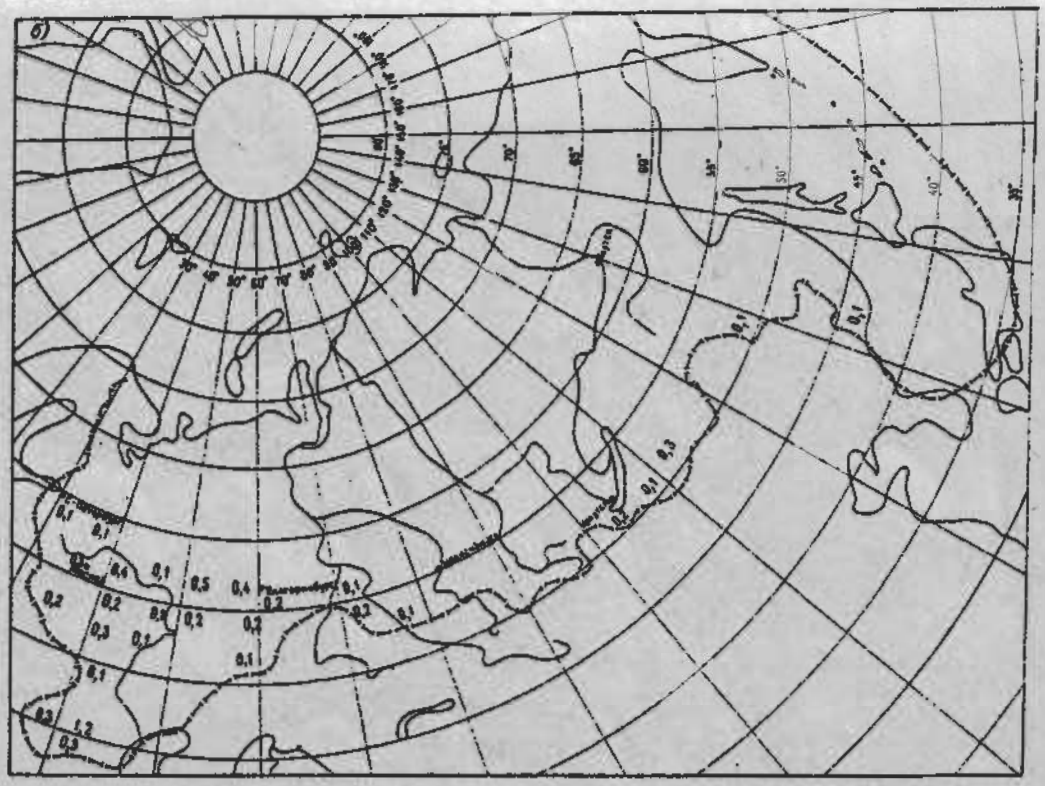


Рисунок 6.3 *б* — Повторяемость СГЯ (града), приведенная к 1 году.

Рисунок 6.8 *б* — Повторяемость всех СГЯ (ливней и снегопадов), приведенная к 1 году.
В скобках — повторяемость снегопадов.

Рисунок 6.8 *в* — Повторяемость всех СГЯ в целом, приведенная к 1 году.

Наибольшее число сильных ливней отмечается в Ставропольском крае (до 4 раз в год) и на Дальнем Востоке (5—6 раз в год), а также в Краснодарском крае (более 2 раз в год). В районе ЦЧО и Среднем Поволжье сильные ливни отмечаются 1—2 раза в год. В остальных районах повторяемость этих СГЯ составляет 1 раз в 1—2 года. На части европейской территории России, расположенной севернее 62° с. ш., на Среднем Урале, в Красноярском крае, южнее Магадана и в районе Комсомольска-на-Амуре сильные ливни отмечаются 1 раз в 10 лет.

Сильный град чаще всего наблюдается на Северном Кавказе (не менее 1 раза в год), в Верхнем Поволжье (1 раз в 2 года). На остальной территории сильный град отмечается почти равномерно 1—3 раза в 10 лет на европейской части России, на Южном Урале и в Иркутской области. На Дальнем Востоке сильный град — очень редкое явление, здесь он выпадает 1 раз в 10 лет.

Сильные шквалы и смерчи наиболее часто отмечаются в европейской части России, реже на Южном Урале и совсем не отмечаются на Дальнем Востоке.

Смерчи почти равномерно отмечаются на всей европейской части России, расположенной южнее 60° с. ш. и западнее 50° в. д. Большинство их (не реже 1 раза в 2—3 года) отмечается в Верхнем и Среднем Поволжье, в Ставропольском крае и на побережье Черного моря.

Та же картина наблюдается и в распределении сильных шквалов. Максимальная их повторяемость выявлена в Верхнем Поволжье и в ЦЧО (2 раза в год), в Ставропольском крае 1 раз каждые 1,5 года. Не менее 1—2 раз в летний сезон сильные шквалы возникают в Среднем Поволжье ($\lambda = 53°$ в. д., $\varphi = 56°$ с. ш.). На остальной части ЕТ России они отмечаются 1 раз в 4—5 лет почти равномерно по территории вплоть до 60° с. ш. На Дальнем Востоке сильные шквалы не отмечены ни разу за указанный период, а на юге Иркутской области они отмечаются редко, 1 раз в 10 лет. В таблице 6.4 приведены сведения о числе смерчей в различных районах СНГ, отмеченных с 1954 г.

Таблица 6.4 —Число смерчей в различных районах

Прибалтика	21 (0,110)	Черное море (вблизи Черноморского побережья Кавказа)	2 (—)
Балтийское море	2 (—)	Волго-Вятский район	14 (0,060)
Северо-Западный район	2 (0,007)	Поволжский район	2 (0,006)
Белоруссия	31 (0,150)	Северный район	14 (0,013)
Украина	48 (0,080)	Урал	13 (0,020)
Молдова	5 (0,150)	Юг Западной Сибири	8 (0,011)
Центральный район	22 (0,080)	Средняя Азия	6 (0,011)
Центрально-Черноземный район	24 (0,160)	Озеро Байкал	3 (0,100)
Северный Кавказ	11 (0,020)		

Примечание — В скобках приведена вероятность возникновения смерчей на 1000 км².

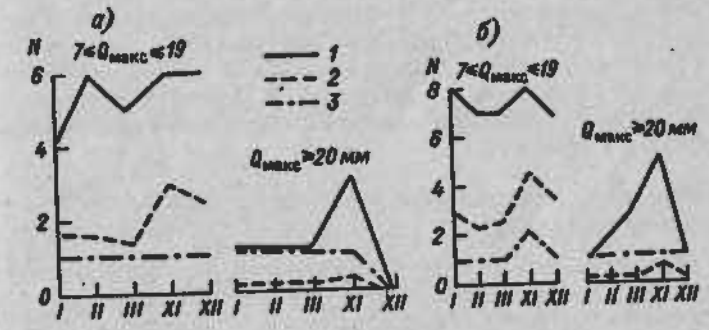


Рисунок 6.4 — Максимальная (1), средняя (2) и минимальная (3) повторяемость случаев (N) сильных и очень сильных осадков в Москве (а) и Московской области (б) по месяцам за 1965—1980 гг.

Частота СГЯ, связанных с сильными шквалами и смерчами, отмеченных на ЕТ России, не уступает частоте этих явлений в Белоруссии, Прикарпатье и на Украине. Следует также отметить, что СГЯ, отмеченные в ЕТ СНГ, достаточно равномерно распределены по территории с запада на восток. Причем наиболее часто они отмечаются на территории, ограниченной 48—57° с. ш. и 28—45° в. д. В этом районе отмечается более 72 % всех случаев смерчей и сильных шквалов на рассмотренной территории.

Наибольшая повторяемость суммы всех конвективных СГЯ на территории России отмечается в Ставропольском и Краснодарском краях (более 3—4 раз в год), в районе ЦЧО (2—3 раза в год), Верхнем Поволжье и на Южном Урале (более 2 раз в год). На островах Дальнего Востока СГЯ наблюдаются 1 раз в 2—3 года.

Чрезвычайные СГЯ, с которыми связаны большие повреждения объектов народного хозяйства, нередко с человеческими жертвами, по территории России чаще всего наблюдаются в Ставропольском крае и на черноморском побережье (1 раз каждые 1,5 года), в Псковской и Новгородской областях, в Верхнем Поволжье и Среднем Поволжье (каждые 2 года). В Приморском крае такие СГЯ, преимущественно обусловленные сильными ливнями, отмечаются чаще 1 раза в год.

6.2 Повторяемость сильных и очень сильных осадков в холодный период года

По Наставлению по службе прогнозов (см. п. 2), сильными осадками в холодный период года считают осадки с суммой Q = 7...19 мм за 12 ч (ОЯ), очень сильными — осадки с $Q \geq$ 20 мм за 12 ч (СГЯ).

Сведения о характере и повторяемости указанных осадков приведены по результатам их исследования в центральном районе ЕТ России. При этом использованы данные о суточных осадках из климатических справочников за 1965—1980 гг., данные полусуточных осадков всех метеорологических станций и постов за 1975—1990 гг. и данные журнала СГЯ Гидрометцентра России за тот же период. Полные сведения о результатах указанных исследований изложены в работе [26]. Чаще всего осадки указанных градаций отмечаются в ноябре. Максимальное число случаев с сильными осадками в отдельные годы достигает 6 раз в месяц, а в среднем оно составляет не менее 2 раз, а в ноябре до 4 раз в месяц.

Очень сильные осадки выпадают значительно реже. Так, в среднем в разные месяцы они выпадают реже 1 раза в месяц. Максимальное число случаев с очень сильными осадками достигает 5 раз в месяц и чаще всего наблюдается в ноябре (рисунок 6.4).

Из-за локального характера выпадения сильных и очень сильных осадков приобретает особое значение вопрос их обнаружения при разработке методов прогноза и для их оценки. В разработках используются данные из различных источников информации, чаще всего данные метеорологических станций. Следует также использовать данные метеорологических постов, число которых в отдельных районах бывает значительно больше, чем число метеорологических станций [21].

Данные о числе случаев обнаружения осадков суммой 7—19 мм, определенные по различным источникам информации, приведены в таблице 6.5, из которой следует, что наибольшее число случаев с указанными осадками зафиксировано полной сетью наблю-

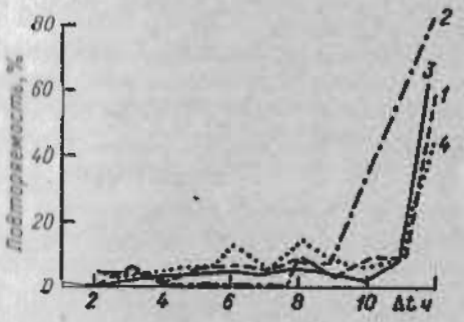


Рисунок 6.5 — Повторяемость продолжительности выпадения осадков разных градаций в холодный период года.
1 — $Q_{макс} \geq$ 20 мм,
2 — 7 мм $\leq Q_{макс} <$ 19 мм,
3 — 4 мм $\leq Q_{макс} <$ 7 мм,
4 — 0 мм $\leq Q_{макс} <$ 4 мм.

дений. Данные о сильных осадках, выбранные только из журнала СГЯ, составляют лишь 76 % случаев, зафиксированных полной сетью наблюдений. Данные метеорологических станций о сильных осадках составляют всего 43 % случаев, т. е. потеряно более половины информации о сильных осадках по сравнению с данными полной сети наблюдений.

Наибольшая продолжительность выпадения Δt сильных и очень сильных осадков составляет 11—12 ч, т. е. зимние осадки независимо от их максимальной суммы довольно продолжительны (рисунок 6.5). Большая продолжительность осадков в этот период года обусловлена тем, что они формируются главным образом за счет крупномасштабных упорядоченных вертикальных движений в циклонах и на атмосферных фронтах, при которых образуются обширные облачные системы.

Степень опасности явления определяется не только максимальной суммой осадков, выпавших за 12 ч, но и площадью, на

Таблица 6.5 — Число случаев обнаружения осадков суммой 7—19 мм по данным разных источников

Осадки за 24 ч по климатическому справочнику за период зимних месяцев 1975—1980 гг.	Осадки за 12 ч за один и тот же период по данным		
	полной сети наблюдений	журнала СГЯ	метеорологических станций
284	187(100)	142(76)	80(43)

Примечание — В скобках — проценты.

которой они отмечаются. Поэтому важно знать площадь, на которой выпадают осадки той или иной интенсивности.

Площадь распространения осадков с заданной максимальной суммой S_Q можно определить в процентах по отношению числа станций, на которых отмечены осадки данной градации, к общему числу станций на данной территории:

$$S_{ОЯ} = 100N_{ОЯ}/N_{общ}, \quad (6.1)$$

$$S_{СГЯ} = 100N_{СГЯ}/N_{общ}, \quad (6.2)$$

где $N_{ОЯ}$ — число станций, отметивших осадки в градации ОЯ ($7 \leq Q \leq 19$ мм за 12 ч);

$N_{СГЯ}$ — число станций, отметивших осадки в градации СГЯ ($Q > 20$ мм за 12 ч);

$N_{общ}$ — общее число станций на данной территории.

7 УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ И МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ СГЯ, СВЯЗАННЫХ С КОНВЕКЦИЕЙ

7.1 Механизм образования осадков

7.1.1 Условия, приводящие к выпадению осадков из конвективных облаков

Такие условия изучены в работах [6, 32, 33, 38, 39, 42, 44, 45, 47, 48].Основной причиной укрупнения капель является миграция паров от переохлажденных капель к ледяным кристаллам в верхней смешанной, состоящей из переохлажденных капель и кристаллов, части облаков. В облаке, которое состоит из смеси водяных капель и ледяных кристаллов, наблюдается перенасыщение водяного пара над частицами льда и неполное насыщение над капельками, в результате чего первые будут расти за счет уменьшения размера последних. Осадки образуются за счет ледяных кристаллов в переохлажденном водяном облаке, когда вершина облака достигает высот, на которых достаточно низка температура воздуха [33, 38, 48, 50].

Рост облачных капель определяется водностью и мощностью облака. Капли, достигшие критического диаметра, равного 2,5 мм, неустойчивы и разбрызгиваются, когда подвергаются удару при порывах ветра. Порыв ветра 9 м/с достаточен, чтобы разрушить каплю диаметром 2,5 мм [33, 38].

Восходящие потоки в облаках, препятствующие выпадению дождевых капель, а также распад капель приводят к накоплению большого количества жидкой влаги в облаке. По мере накопления жидкой влаги восходящие потоки тормоаятся, и в результате обрушивания накопившейся влаги возникают с и л ь н ы е л и в н и. Выпадения осадков за счет накопившейся в облаке влаги подтверждены в работах [32, 33].

Водность в зоне аккумуляции (q) конвективной ячейки с максимальной скоростью восходящего потока можно определить по формуле

$$q = \bar{\rho}\,(w^2_{макс} - v^2_к)/(2g\,\Delta h), \quad (7.1)$$

где g — ускорение свободного падения;

$v_к = 10$ м/с — критическая скорость разбрызгивания крупной капли [38];

$w_{макс}$ — максимальная скорость восходящего потока, м/с;

$\bar{\rho}$ — средняя плотность воздуха в облаке, г/см^3;

Δh — мощность зоны аккумуляции.

7.1.2 Расчет количества осадков

На основе предположения, что ливневые осадки выпадают за счет накопившейся влаги над уровнем максимальной скорости ветра количество осадков можно рассчитать по формуле [39]

$$Q = \bar{\rho}\, w^2_{макс} /(2g)\,. \qquad (7.2)$$

Максимальное количество осадков определяется следующим соотношением [32]:

$$Q = \frac{1}{g}\int_0^t\int_{P_0}^{P} \frac{dq}{dt}\, dPdt + \frac{1}{g}\int_0^t\int_{P_0}^{P} v\nabla q\, dPdt + \frac{1}{g}\int_0^t\int_{P_0}^{P} q\nabla v dPdt - E, \qquad (7.3)$$

где E — количество испарившейся влаги;

$\frac{dq}{dt}$ — массовая доля влаги при максимальном насыщении;

v — горизонтальная скорость ветра;

P и P_0 — давление на верхней и нижней границе облака соответственно;

∇v — дивергенция горизонтальной скорости ветра;

∇q — дивергенция водности.

Первое слагаемое правой части уравнения (7.3) определяет количество сконденсированной в облаке влаги. Второе и третье слагаемые правой части уравнения учитывают влияние дивергенции и горизонтальной скорости ветра на количество выпавших осадков.

Количество сконденсированной в облаке влаги Q' (при условии, что весь водяной пар конденсируется) можно рассчитать по формуле [7]

$$Q' = \bar{\rho}\, \Delta q\, \Delta H, \qquad (7.4)$$

где Δq — разность значений массовой доли влаги при насыщении на нижней и верхней границах облака;

ΔH — мощность облака.

Из уравнения (7.3) следует, что количество осадков определяется не только массовой долей влаги в облачном слое, но и дивергенцией и конвергенцией горизонтальной скорости и водности:

$$Q = k_0\, Q'\,, \qquad (7.5)$$

где параметр k_0 косвенно учитывает влияние дивергенции и конвергенции водности и горизонтальной скорости ветра на массовую долю влаги, участвующей в осадкообразовании, и определяет относительную долю сконденсированной в облаке влаги, участвующей в осадкообразовании.

7.1.3 Связь скорости восходящих потоков и интенсивности осадков с типом радиоэха

В таблице 7.1 приведены значения $w_{макс}$ при выпадении осадков $Q \geq 30$ мм для разных типов радиоэха. Значения $w_{макс}$ рассчитаны по методике, изложенной в работе [39]. Из данных таблицы 7.1 следует, что конвективные ОЯ и СГЯ (ливни $Q \geq 30$ мм) отмечаются при $w_{макс} \geq$ 21 м/с. В таблице 7.2 приведены значения интенсивности осадков I для различных типов радиоэха от облаков при выпадении осадков $Q \geq 30$ мм. Наиболее интенсивные осадки связаны с конвективной облачностью (РКО).

Максимальная интенсивность осадков, выпадающих из облаков с типом радиоэха РКСО и РКО, в 100 % случаев превышает 1,01 мм/мин.

Продолжительность выпадения ливневых осадков в градациях ОЯ и СГЯ равна 1,0—2,5 ч. Ливневые осадки обусловлены термодинамической неустойчивостью атмосферы, когда развиваются большие конвективные скорости (таблицы 7.1 и 7.2).

Механизм образования ливневых осадков отличается от механизма образования обложных, в котором выпадение осадков связано с псевдоадиабатическим охлаждением, когда вся влага конденсируется при температуре насыщения и выпадает в виде осадков.

Таблица 7.1 — Повторяемость значений $w_{макс}$ в облачных системах различных типов, % общего числа случаев

Тип радиоэха	$w_{макс}$ м/с					
	12—15	15,1—20,9	21—29,9	30—40	40,1—50	50
РКО	—	—	—	—	95	5
РКСО с одной конвективной ячейкой	—	—	60	20	20	—

Примечание — Тип радиоэха определен согласно Руководству по производству наблюдений и применению информации с радиолокаторов МРЛ-1 и МРЛ-2 (см. п. 2).

Таблица 7.2 — Повторяемость значений средней и максимальной интенсивности осадков при сильных ливнях для облачных систем различных типов, % общего числа случаев

Тип радиоэха	Число случаев	Средняя I мм/мин						
		0,06—0,1	0,11—0,19	0,20—0,31	0,32—0,5	0,51—0,8	0,61—1,0	1,1—1,4	≥ 1,4
РКО	16	—	—	—	—	—	50	—	50
РКСО	28	—	80	50	—	—	20	—	—
Тип радиоэха	**Число случаев**	**Максимальная I мм/мин**							
		0,6—0,7	0,71—0,79	0,80—0,90	0,91—1,0	1,01—1,5	1,51—2,0	≥ 2,0	
РКО	16	—	—	—	—	50	10	40	—
РКСО	28	—	—	—	—	80	20	—	—

7.1.4 Взаимосвязь параметров облаков и атмосферы с количеством выпадающих осадков

В результате исследования взаимосвязи между различными параметрами облака и атмосферы получены следующие значения параметра k_0 (см. п. 7.1.2):

Тип облаков	Внутримассовые	Фронтальные и предфронтальные	Циклонические на стадии развития $Z_в$
k_0	0,11	0,28	0,48

Эмпирическая зависимость между суммой выпадающих осадков и максимальной скоростью восходящего потока в облаке получена в работе [7]:

$$Q_{макс} = 4{,}36\ k_0\ w_{макс}\,, \tag{7.6}$$

где $k_0 = Q_ф/Q_t'$

$Q_ф$ — фактическая сумма выпавших осадков.

Параметр k_0 зависит от значений упорядоченных вертикальных движений в гектопаскалях за 12 ч на уровне 850 гПа [8]:

$$k_0 = 0{,}2 - 0{,}0058\tau_{850}\,, \tag{7.7}$$

где τ_{850} — значение упорядоченных вертикальных движений на уровне 850 гПа.

Для зависимости (7.7) коэффициент корреляции $r = 0{,}76$.

7.2 Механизм образования града в облаках

Град представляет собой ледяные частицы сферической или несферической формы. Их диаметр изменяется от размера средних капель дождя до 2,5 см и более. Градины состоят из прозрачного льда или из чередующихся слоев прозрачного и матового льда. Чаще всего встречаются сферические формы градин.

Теоретические и экспериментальные исследования развития градовых облаков приведены в работах [38, 39, 43, 56, 63]. В начале 60-х годов создана рабочая модель градового облака [38].

Продолжительность выпадения града — от 10 с до 45 мин. Медианное значение продолжительности выпадения града 5 мин, а наиболее часто встречающиеся значения 1—15 мин. Связь между продолжительностью выпадения града и размером выпадающих градин не отмечается.

7.2.1 Условия образования града в облаках

В настоящее время принято мнение, что градины растут преимущественно за счет слияния с переохлажденными каплями воды и что сублимация водяного пара играет второстепенную роль.

Фазовое состояние накапливаемой влаги над уровнем максимальной скорости зависит от температуры воздуха на этом уровне. Зародышами градин являются замерзшие капли [38].

Плотность ледяных наслоений градин зависит от термодинамических условий роста градин, в основном от водности переохлажденной части облака, за счет которой растет градина, от температуры окружающего воздуха и размера растущей градины.

Наиболее благоприятна для роста града температура воздуха в переохлажденной части облака от минус 10 до минус 25 °С.

Зона зарождения и роста града в облаке формируется в области сильных восходящих потоков, скорость которых может достигать 30 м/с и более [38, 39, 43, 53, 60].

Зависимость уровня естественной кристаллизации от максимальной скорости восходящего потока в облаке получена в работе [43]. На рисунке 7.1 приведена зависимость фазового состояния осадков в облаке от максимальной скорости восходящего потока и температуры на уровне максимальной скорости [6]. Кривая *AB* ограничивает область критической температуры кристаллизации. Таким образом, если зона аккумуляции располагается в зоне града, то градины растут за счет слияния зародышей града (замерзшей крупной капли) с переохлажденными каплями. Из приведенных данных следует, что температура естественной кристал-

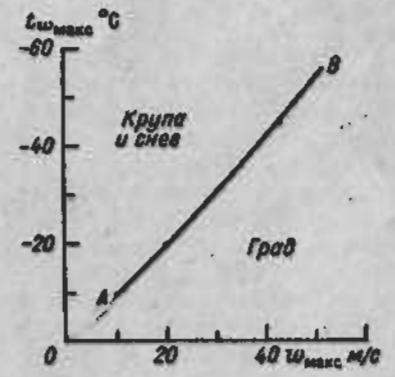


Рисунок 7.1 — Зависимость фазового состояния осадков от $t_{w_{макс}}$ и $w_{макс}$.

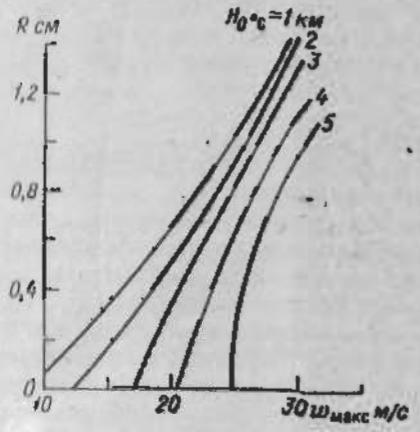


Рисунок 7.2 — Зависимость конечного радиуса градин R от $w_{макс}$ и H_0 °с.

лизации определяется не только температурой на верхней границе облака, но и максимальной скоростью восходящего потока $w_{макс}$. Для выпадения града необходимо, чтобы температура на верхней границе облака (на уровне конвекции) $t_в$ и скорость $w_{макс}$ способствовали кристаллизации водяных капель, а зона аккумуляции располагалась в области переохлажденных капель.

Мощные грозово-градовые облака развиваются, когда зона роста градин в облаке при заданных $w_{макс}$ и $t_{w_{макс}}$ расположена в области, где преобладают переохлажденные капли, а значения температуры на уровне конвекции $t_в$ °С попадают в область, благоприятную для замерзания капель — зону крупы (см. рисунок 7.1).

Радиус градин в облаке можно определить по формуле

$$R_{гр} = w^2_{макс}/\gamma^2, \tag{7.8}$$

где $\gamma = 2{,}63 \cdot 10^3$ см$^{-1}$ для градин с плотностью $\rho = 0{,}9$ г/см^3.

Рабочая формула для расчета радиуса градин в облаке имеет вид:

$$R_{гр} = 0{,}0012\, w^2_{макс}, \tag{7.9}$$

где $R_{гр}$ в сантиметрах,

$w^2_{макс}$ — в метрах в секунду.

Град начинает выпадать после того, как скорость его падения превышает максимальную скорость восходящего потока $w_{макс}$,

При падении через теплую часть облака градины тают. На рисунке 7.2 приведена зависимость конечного радиуса градин от $w_{макс}$ и H_{0C}, рассчитанная на основании экспериментальных исследований.

7.2.2 Особенности развития градовых облаков

Согласно новой модели образования крупного града [63], циркуляционная ячейка, в которой образуется град, длительное время может существовать в квазистационарном состоянии. Такие облака образуются при больших сдвигах ветра, что является причиной, упорядочивающей внутриоблачную циркуляцию благодаря разделению восходящего и нисходящего потоков.

Градины, состоящие из смеси воды и льда, образуются, когда приток тепла за счет замерзания захваченной воды, конденсации или испарения превышает конвективный отток с поверхности растущей градины и вода на поверхности градины замерзает неполностью [53, 55, 56]. При этом какая-то часть влаги, не уносимая потоком с поверхности градины, образует жидкие медленно замерзающие включения. В результате этого образуется град с плотностью 0,92 г/см^3.

Структура выпавшего града показывает, что град, приносящий ущерб посевам, образуется при влажном режиме роста и представляет собой водно-ледяную смесь.

Радиолокационные исследования последних лет позволили разделить градовые процессы по структуре и динамике развития на четыре основных типа:

— одноячейковые,
— многоячейковые неупорядоченные,
— многоячейковые упорядоченные,
— суперячейковые.

Одноячейковые градовые облака имеют малое время существования (30—40 мин), малоподвижны или перемещаются, подчиняясь орографии. Град выпадает из них в виде отдельных пятен, что приводит к незначительному ущербу.

Многоячейковые неупорядоченные облака существуют непродолжительное время, имеют среднюю интенсивность развития. Град из них также выпадает пятнами.

Из многоячейковых упорядоченных облаков град выпадает в виде нескольких дорожек.

Суперячейковые облака существуют продолжительное время (60—80 мин). С ними, как правило, связан существенный ущерб от градобития.

В большинстве случаев градовые облака имеют многоячейковую структуру. Периодически эта структура преобразуется в одну сверхмощную ячейку. Наиболее устойчивые скорости восходящего потока для интенсивных облаков до 20—30 м/с и более.

В результате взаимодействия макро- и мезопроцессов на участках длиной до 100 км развиваются системы ячеек мощных градовых штормов.

Анализ зондирований окружающей атмосферы к моменту максимального развития конвекции обнаруживает наличие значительной неустойчивости в атмосфере в дни с сильными градовыми штормами. Высота слоя потенциальной неустойчивости атмосферы в среднем составляет 4 км.

Неравномерная интенсивность термической адвекции в интенсивных бароклинных зонах, распространяющихся на средних уровнях (600—500 гПа), в теплом секторе впереди положения холодного фронта у поверхности Земли создает мощный слой потенциальной неустойчивости, реализующийся даже при слабом подъеме воздушных масс.

Вместе с термическими факторами роль спускового механизма играет конвергенция в приземном слое, с которой связаны сильные восходящие движения в нижней тропосфере. Мощная конвекция возникает в узких устойчивых агеострофических зонах, располагающихся впереди холодного фронта у поверхности Земли и образующихся благодаря наличию на нижних уровнях контраста теплого и влажного воздуха.

Таким образом, для развития мощных градовых облаков необходимы большая термодинамическая неустойчивость в среднем слое тропосферы и конвергенция в приземном слое.

Из формулы (7.9) следует, что град диаметром $d \geq 2$ см выпадает при $w_{макс} \geq 30$ м/с при прочих благоприятных условиях, а диаметром $d \geq 1$ см — при $w_{макс} \geq 20$ м/с.

7.3 Условия формирования и механизм развития сильных шквалов и смерчей

7.3.1 Общие сведения о шквалах

Шквалы и смерчи относятся к локальным явлениям погоды. Они возникают внезапно (чаще после полудня), кратковременны (часто несколько минут) и охватывают сравнительно небольшие площади (от нескольких десятков до сотен квадратных метров). Это определяет трудности их исследования и прогноза.

Шквалом называют резкое усиление ветра с изменением направления в течение короткого времени. Скорость ветра при

шквале нередко достигает 25—30 м/с, что намного превышает скорость обычного градиентного ветра. Максимальная повторяемость шквалов отмечается в послеполуденные и вечерние часы суток. Они обыкновенно связаны с грозами, но нередко наблюдаются и как самостоятельные явления.

Шквал — это вихрь с горизонтальной осью вращения. Шквалы всегда связаны с развитием активной конвекции и часто сопровождаются осадками интенсивностью более 20 мм/12 ч и градом.

Шквалы делят на внутримассовые и фронтальные. Внутримассовые шквалы связаны с мощными конвективными облаками — кучево-дождевыми облаками, развивающимися в однородной воздушной массе ($v_в \leq 5$ м/с) в жаркую летнюю погоду. Эти шквалы носят локальный характер, и скорость ветра при них редко превышает 20 м/с. Серьезной опасности они не представляют. Фронтальные шквалы образуются на атмосферных фронтах, преимущественно холодных, вблизи быстро движущихся центров волновых возмущений или молодых циклонов, возникающих у точки окклюзии старых малоградиентных барических депрессий. Шквалы сопровождаются облаками типа Cb с весьма низким основанием и очень высокой вершиной. Где более мощные Cb, там сильнее шквалы [15].

Шквал — одно из проявлений интенсивной конвекции, имеющее ряд особенностей, затрудняющих изучение и прогнозирование этих СГЯ.

Специальные исследования динамики мощных кучево-дождевых облаков и распределения метеорологических элементов в Cb и вблизи них, а также результаты численного моделирования развитой конвекции позволили выявить, что в образовании вихрей с продольной осью под Cb на фронтах и во внутримассовых грозовых Cb определяющую роль играет взаимодействие процессов фронтального и конвективного масштабов.

Выпадение интенсивных ливневых осадков вызывает интенсивные нисходящие движения. Нисходящий поток воздуха с верхних уровней, на которых ветер слабее, переносит вниз некоторое количество движения и кинетической энергии. Этот воздух, попадая в нижние слои, тормозится из-за трения о земную поверхность и столкновения с теплыми воздушными массами, лежащими перед фронтом. В результате образуется ветровой вал (шквал), направленный в сторону движения грозового очага. На рисунке 7.3 показаны воздушные течения в кучево-дождевом облаке при развитии шквала.

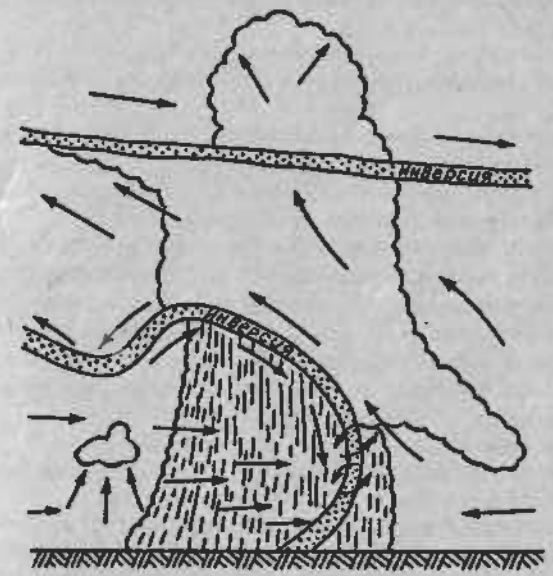


Рисунок 7.3 — Распределение воздушных течений при холодных вторжениях со шквалом.

7.3.2 Условия формирования шквалов в градациях ОЯ и СГЯ

Сильные шквалы, как и другие явления погоды, связанные с зонами активной конвекции, образуются в результате сложного взаимодействия атмосферных процессов всех масштабов:

1) к макропроцессам относятся характерные типы синоптических ситуаций, упорядоченные вертикальные токи, облачные системы синоптического масштаба;

2) к мезопроцессам относятся атмосферные фронты, мезометеорологические конвективные комплексы, отображаемые на снимках с ИСЗ и на картах сети МРЛ;

3) к микропроцессам относятся процессы, описываемые параметрами радиоэха отдельных Cb.

Условия возникновения и развития облаков со шквалами определяются следующими параметрами атмосферы:

1) максимальной температурой и влажностью у поверхности Земли,

2) массовой долей влаги и ветром в слое поверхность Земли — уровень 500 гПа,

3) индексом неустойчивости $U = t_{500} - t_{850}$,

4) градиентом скорости ветра в слое поверхность Земли — уровень 850 гПа,

5) упорядоченными вертикальными движениями (диагностическими и прогностическими значениями).

Указанные параметры атмосферы определяют степень термодинамической неустойчивости атмосферы.

Накопленная энергия неустойчивости атмосферы выделяется при соответствующей синоптической ситуации, обеспечивающей благоприятные условия для подъема воздушных масс и развития механизма нисходящих движений в кучево-дождевых облаках, сопровождаемых ливнями, градом, грозами, шквалами и смерчами. Механизмом реализации энергии неустойчивости могут быть следующие динамические факторы:

1) атмосферные фронты,

2) градиенты температуры воздуха у поверхности Земли,

3) тенденции давления у поверхности Земли,

4) упорядоченные вертикальные движения τ.

Результаты анализа и расчета различных параметров для случаев наличия и отсутствия шквалов приведены в таблицах 7.3—7.5.

Максимальная температура воздуха у поверхности Земли $t_{макс}$ при шквале с $v_в \geq 25$ м/с в 70 % случаев превышает 25 °С.

Сумма недостатка насыщения в слое 850—500 гПа $\sum_{850}^{500} d$ в 42 % случаев менее 10 и в 72 % менее 20 °С.

Индекс неустойчивости U в 75 % случаев превышает 25 °С.

При шквалах с $v_в$ = 21...24 м/с и $v_в \leq 20$ м/с и при сильных шквалах значения параметров указанных элементов погоды различаются незначительно. Нет также заметного различия в термогигрометрическом состоянии атмосферы для случаев сильных шквалов и шквалов с $v_в < 25$ м/с, а для случаев отсутствия шквалов они заметны [28].

По данным таблицы 7.6, сильные шквалы (СГЯ) преимущественно развивались на атмосферных фронтах (87 %). Повторяемость их на фронте окклюзии составляет 29 %. В районах смыкания облачности близко расположенных фронта окклюзии и фронта с волнами повторяемость 35 %, на фронтах с волнами — 14 %, на холодных фронтах в теплом секторе циклона — 9 %. Реже

Таблица 7.3 — Повторяемость термогигрометрических параметров, %

Скорость ветра при шквале, м/с	Общее число случаев со шквалами	$t_{макс}$ у поверхности Земли, °С				$\sum_{850}^{500} d$ °С				$U = t_{500} - t_{850}$ °С			
		≤ 20	21—25	26—30	≥ 31	≤ 10	11—20	21—29	≥ 30	≤ 24	25—30	≥ 31
≥ 25	32	—	80	40	30	42	30	16	12	25	55	20
21—24	25	1	24	45	30	36	22	—	42	33	66	1
≤ 20	34	19	20	39	22	31	45.	12	12	30	60	10
Отсутствие шквала	38	25	38	25	12	5	15	15	65	52	35	13

Таблица 7.4 — Повторяемость термогидродинамических параметров атмосферы, %

Скорость ветра при шквале, м/с	Общее число случаев со шквалами	Градиент температуры у поверхности Земли, °С/100 км		Вертикальные токи, гПа/12 ч			
		максимальный	средний	минимальный	70	50...0	0...−50	−70
≥ 25	35	5,0	1,7	0	1	43	55	1
21—24	30	3,3	0,9	0	15	15	45	25
≤ 20	35	3,0	0,7	0	4	44	39	13
Отсутствие шквала	32	1,8	0,3	0	35	9	16	40

Таблица 7.5 —Повторяемость градаций скорости ветра, % (числитель — поверхность Земли, знаменатель — уровень 500 гПа)

Скорость ветра при шквале, м/с	Общее число случаев со шквалами	Скорость ветра, м/с							
		0	1—5	6—10	11—15	16—20	21—23	24
≥ 25	38	—/—	80/15	20/25	—/35	—/10	—/15	—/—
21—24	80	—/—	85/12	15/40	—/12	—/6	—/12	—/12
≤ 20	34	—/—	88/35	8/35	—/6	—/6	—/6	—/12

Таблица 7.6 —Повторяемость синоптических ситуаций и параметров атмосферы при шквалах, %

Скорость ветра при шквале, м/с	Общее число случаев со шквалами	Теплый сектор	Фронт окклюзии	Близко расположенные фронты и фронты с волнами	Холодный фронт	Фронт с волнами	Малоградиентное поле	Тенденция давления у Земли, гПа		
								максимальная	средняя	минимальная
≥ 25	38	7	25	39	9	14	6	−3,5	−1,2	1,1
21—24	80	10	18	18	20	42	—	−2,1	−0,9	1,6
≤ 20	38	—	30	—	40	20	10	−2,0	−0,8	1,1
Отсутствие шквала	32	—	5	—	35	—	60	−1,0	0,06	1,0

шквалы возникают в малоградиентном поле вдали от атмосферных разделов — повторяемость 6 %.

Шквалы ОЯ ($v_в$ = 21...24 м/с) чаще связаны с фронтами с волнами (42 %), холодным фронтом (20 %) и с близко расположенными фронтами с волнами (8 %). Реже они развиваются на теплых фронтах (10 %).

Слабые шквалы ($v_в$ < 20 м/с) чаще возникают на холодных фронтах (40 %), на фронтах окклюзии (30 %); реже — на фронтах с волнами (20%).

Тенденция давления ΔP у поверхности Земли при развитии сильных шквалов СГЯ и ОЯ заметно различается. Так, в среднем при сильных шквалах она составляет минус 1,2 гПа за 3 ч, а может достигать и минус 3,5 гПа за 3 ч. При отсутствии сильных шквалов тенденция давления не превышает минус 1,0, а в среднем составляет 0,06 гПа за 3 ч.

Градиент температуры воздуха у поверхности Земли (см. таблицу 7.4) при сильных шквалах в среднем составляет 1,7 °С на 100 км, а может достигать 5 °С на 100 км. Эти значения $\Gamma_{t_з}$ заметно выше соответствующих для случаев со шквалами с $v_в \le 24$ м/с. Для случаев без шквалов $\Gamma_{t_з}$ в среднем составляет 0,8 °С/100 км.

Упорядоченные вертикальные движения при сильных шквалах в 98 % случаев изменяются от плюс 50 до минус 50 гПа/12 ч. В 13—25 % случаев шквалов с $v_в \le 24$ м/с характерно, что значение τ бывает меньше минус 70 гПа/12 ч. При отсутствии шквалов повторяемость значений τ в пределах от плюс 50 до минус 50 гПа/12 ч составляет всего 25 % [28].

В таблице 7.5 приведены данные о повторяемости скорости ветра у поверхности Земли и на уровне 500 гПа. Более чем в 80 % случаев шквалов всех градаций у поверхности Земли отмечается слабый ветер ($v_в \le 5$ м/с). Различие для этих случаев отмечается в скорости ветра на уровне 500 гПа. Так, при сильных шквалах в 60 % случаев $v_{500} \ge 11$ м/с, а при шквалах с $v_в \le 24$ м/с значения $v_{500} \ge 11$ м/с отмечаются лишь в 18—30 % случаев.

Таким образом, при шквалах в градации ОЯ отмечается сравнительно слабый ветер, не превышающий 10 м/с по всей толще тропосферы.

Сильные шквалы развиваются при некоем критическом состоянии термодинамической неустойчивости атмосферы. Однако критерии термодинамических параметров при сильных шквалах и шквалах со скоростью 21—24 м/с и меньше 20 м/с существенно не различаются. Это подтверждает выводы о том, что при одних и тех же значениях термодинамических параметров атмосферы

могут наблюдаться не только сильные шквалы, но и шквалы ОЯ и слабые, а также другие явления, связанные с зонами активной конвекции — ливни, град, смерчи. Заметна лишь разница значений градиента температуры воздуха у поверхности Земли (Γ_1) и тенденция изменения давления (ΔP) у поверхности Земли для случаев сильных шквалов и шквалов со скоростью не более 24 м/с.

7.3.3 Условия формирования сильных шквалов по картам данных МРЛ и по снимкам облачности с ИСЗ

Данные метеорологических и аэрологических наблюдений даже в районах с наиболее плотной сетью станций не обеспечивают необходимого пространственно-временного разрешения для выявления сильных шквалов и смерчей и определения условий их возникновения.

Данные ИСЗ и МРЛ являются основными источниками информации о мезомасштабной структуре облачности и атмосферных движений и используются наряду с традиционной синоптико-метеорологической информацией.

Радиолокационные данные на картах сети МРЛ с большой территории поступают в оперативные подразделения гидрометслужбы каждые 3 ч, а изображения облачного покрова с полярно-орбитальных спутников Земли не реже 3—4 раз в сутки.

В данном РД приведены примеры случаев с явлениями, имеющими разные градации, и случаи отсутствия явлений, что позволило выделить критические значения рассматриваемых параметров атмосферы и облачности при развитии сильных шквалов. Сведения о характере ОЯ и СГЯ, о времени их возникновения и о продолжительности взяты из журнала донесений СГЯ Росгидрометцентра и карт подтвержденного ветра.

Облачность является индикатором атмосферных процессов, поэтому для анализа случаев наличия и отсутствия шквалов разной интенсивности используют карты облачности и ее параметры, отображаемые на снимке с ИСЗ в ИК-диапазоне, а также радиоэхо на картах МРЛ.

7.3.4 Характер облачности на снимке с ИСЗ при развитии шквалов в градациях ОЯ и СГЯ

Анализ облачности на снимках с ИСЗ в дни с развитием шквалов разных градаций и их отсутствием показал следующее.

Перед возникновением шквалов в районах их развития или вблизи этих районов уже в ночные и предутренние часы выявляются характерные скопления Cb (Х.Ск.Cb), имеющие следующие параметры:

1) округлую, овальную и в редких случаях неправильную форму с четкими границами;

2) линейные размеры скоплений в 90 % случаев лежат в пределах L = 100...450 км, в 10 % случаев L > 450 км и всегда более 100 км.

Если Х.Ск.Cb появляются в дневное время, то с ними могут быть связаны только слабые шквалы.

7.3.5 Примеры картин облачности для случаев наличия и отсутствия шквалов

На рисунках 7.4 и 7.5 приведены примеры картин облачности в утренние и последующие сроки наблюдений для случаев развития сильных шквалов и их отсутствия.

Примеры — 1. На рисунке 7.4 *а* выделены рамкой два Х.Ск.Cb округлой формы. Первое отмечено в районе с координатами λ = 30° в. д. и φ = 57...59° с. ш., его диаметр не превышает 300 км.

С этим Х.Ск.Cb днем в Ленинграде и вблизи Ладожского озера были связаны шквалы ОЯ и СГЯ со скоростями 21—24 м/с и 21—28 м/с соответственно. Второе Х.Ск.Cb отмечено в районе с координатами λ = 30,0...31,5° в. д. и φ = 50° с. ш., его диаметр составляет примерно 350 км. С ним были связаны шквалы СГЯ со скоростью 23 м/с. При этом вместе со шквалом выпадал град с $d \approx$ 0,7 см и осадки с Q_{max} = 21 мм за 12 ч.

На рисунке 7.4 *б* выделены рамкой овальные Х.Ск.Cb. Одно расположено в районе с координатами λ = 23° в. д. и φ = 52,5° с. ш. Оно изолированное, имеет четкие границы, его диаметр около 250 км. С этим скоплением Cb днем были связаны шквалы СГЯ со скоростью 26 м/с.

Другое скопление Cb расположено в районе с координатами λ = 42...45° в. д. и φ = 51...52° с. ш. Оно также изолированное, имеет четкие границы, его диаметр не превышает 100 км. Сведений о шквалах со скоростью 20 м/с и более в этом районе не поступало.

На рисунке 7.4 *в* выделено рамкой Х.Ск.Cb неправильной формы, расположенное в районе с координатами λ = 25° в. д. и φ = 54...55° с. ш. Оно изолированное, с четкими границами, его диаметр по направлению перемещения (на юг) примерно 250 км. С ним были связаны сильные СГЯ шквалы скоростью 30 м/с и порывами до 40 м/с и с осадками с Q_{max} = 33 мм за 12 ч, отмеченными в 12^{30}—12^{45} СГВ в районе Унита. РМС Лукоя отметила шквалы СГЯ с порывами до 24 м/с.

На рисунке 7.4 *г* показано скопление Cb в районе с координатами λ = 33° в. д. и φ = 52° с. ш. Его диаметр меньше критического диаметра, необходимого для развития сильных шквалов. Кроме того, его юго-восточная периферия размыта, не имеет четкой границы. Действительно, в районе обнаружения данного скопления Cb днем в 17^{30} СГВ отмечались слабые шквалы скоростью 15—20 м/с, однако сильные шквалы не отмечались.

На рисунке 7.4 *д* в районе с координатами λ = 45° в. д. и φ = 50...52° с. ш. видна фронтальная облачная система, периферийная область которой достаточно интенсивна, ее тыловая часть имеет четкие границы. Однако эту область нельзя харак-

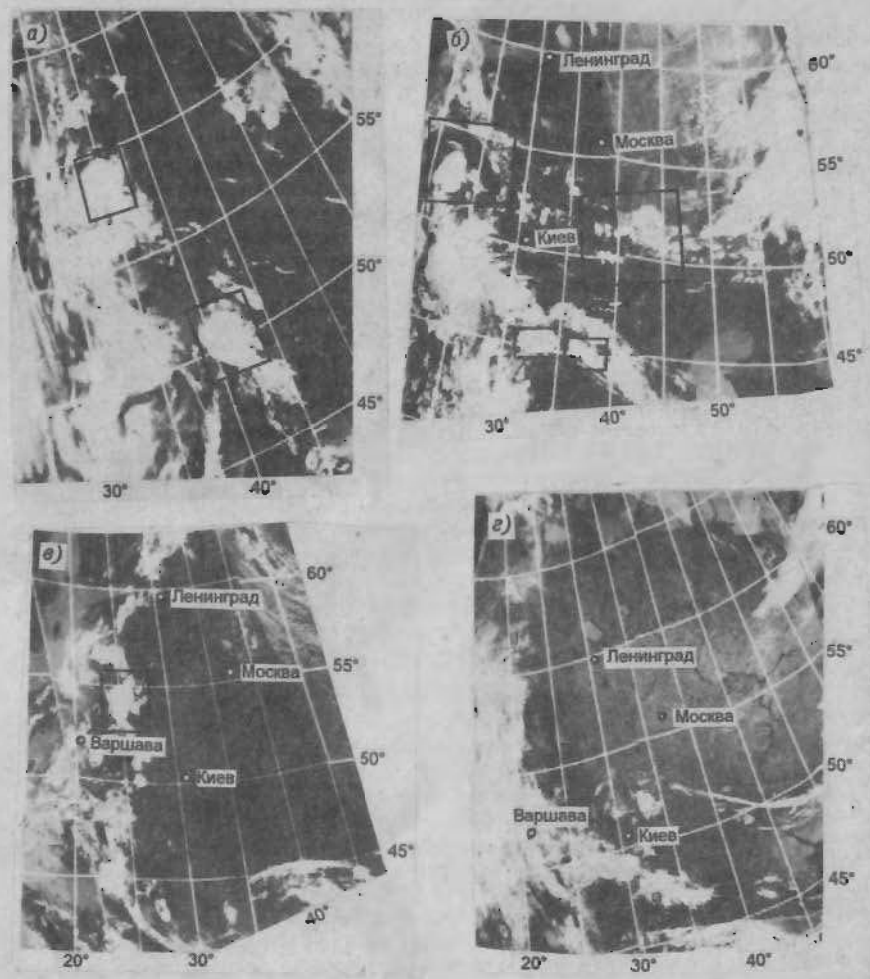
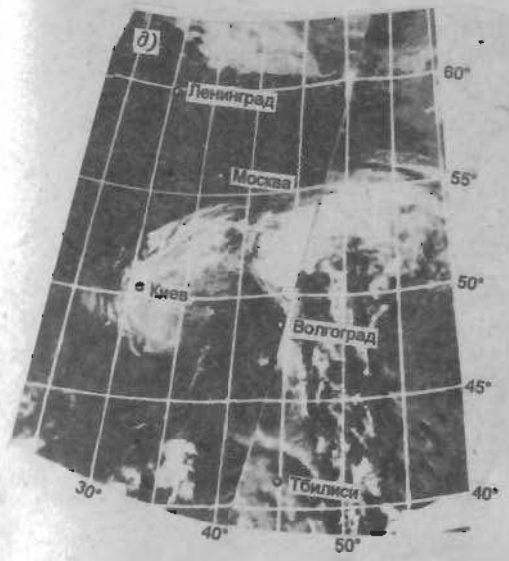
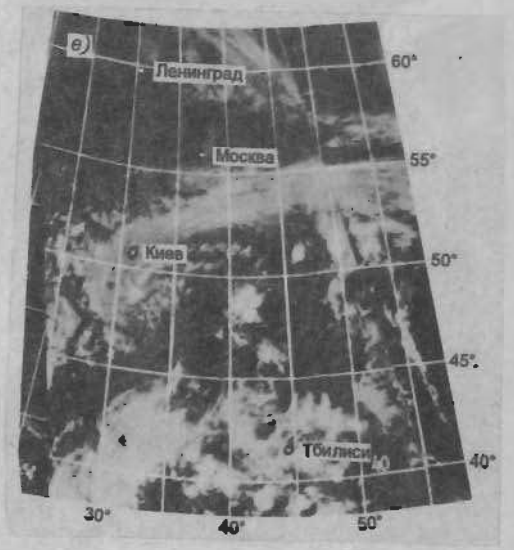
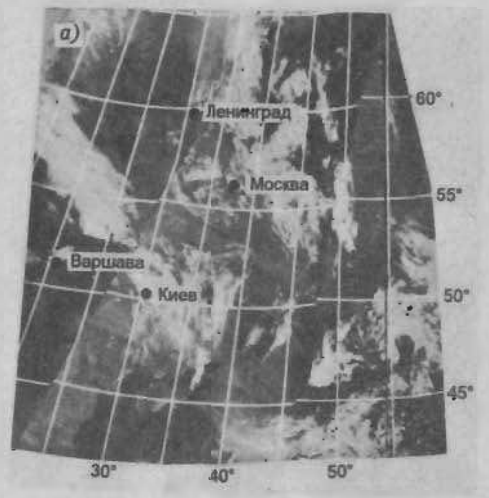
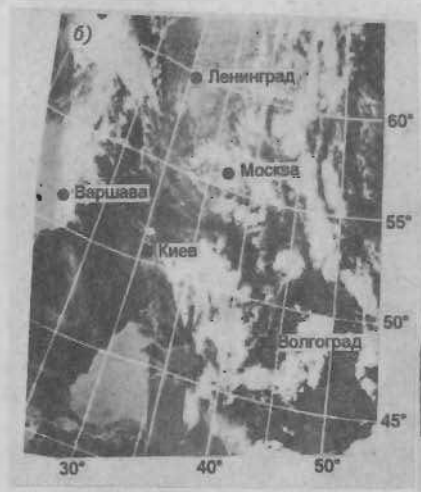


Рисунок 7.4 — Картины облачности на фотографиях, сделанных с ИСЗ.
а **— Х.Ск.Cb округлой формы, фото 21.07.88 г.;** ***б*** **— Х.Ск.Cb овальной формы, фото 11.06.86 г., в 2 ч 50 мин СГВ;** ***в*** **— Х.Ск.Cb неправильной формы, фото 13.06.86 г. в 1 ч 33 мин — 3 ч 14 мин СГВ;** ***г*** **— скопление Cb по критерию, не соответствующему Х.Ск.Cb, фото 12.06.86 г. в 00—02 ч СГВ;** ***д, е*** **— отсутствие Х.Ск.Cb для случая отсутствия сильных шквалов, фото 28.05.85 г. в 1 ч 4 мин СГВ (*д*) и в 15 ч 54 мин СГВ (*е*).**









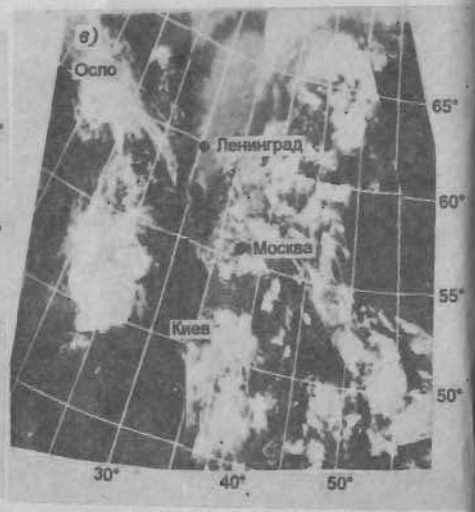
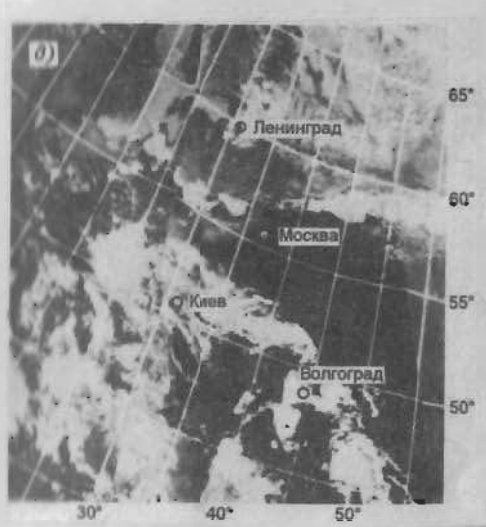
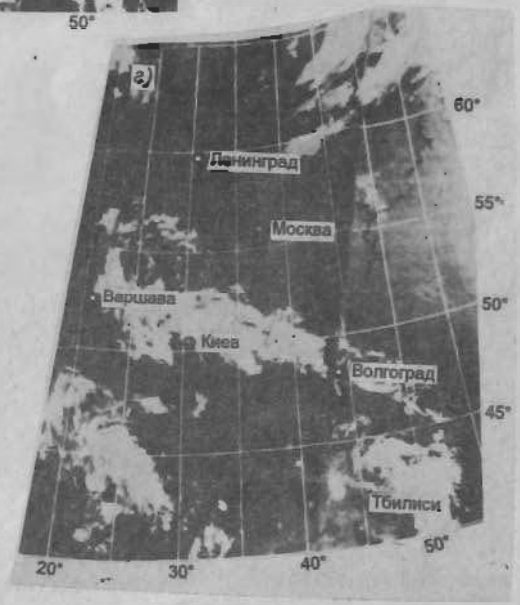
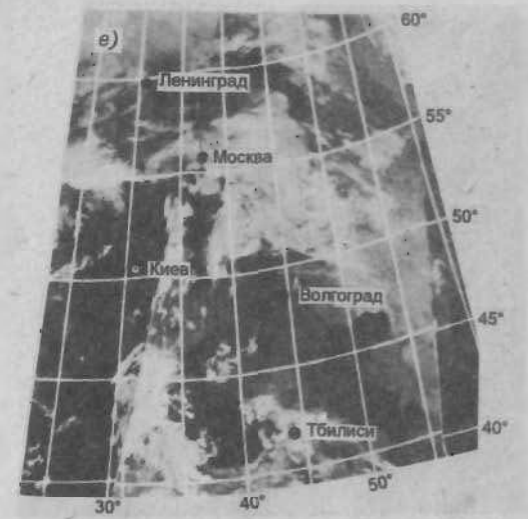


Рисунок 7.5 — Эволюция облачности по данным ИСЗ при отсутствии сильных
а — в — фото 06.07.88 г. в 0 ч 30 мин СГВ (*а*), в 12 ч 04 мин СГВ (*б*) и в





шквалов на ЕТ СНГ.
16 ч 45 мин СГВ (*в*); *г, д* — фото 14.07.82 г. в 1 ч 18 мин СГВ (*г*) и в 11 ч 10 мин СГВ (*д*).



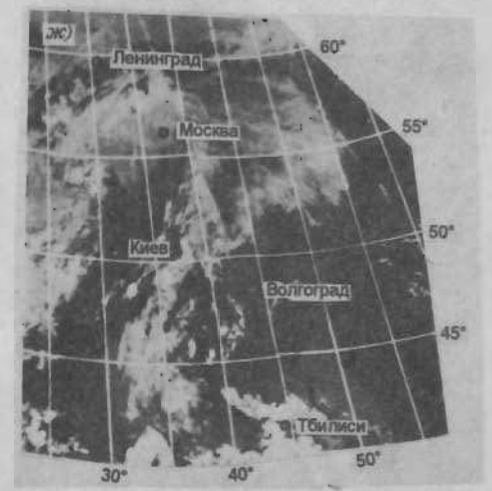


Рисунок 7.5 (*продолжение*) — **Эволюция облачности по данным ИСЗ при отсутствии сильных шквалов на ЕТ СНГ.**

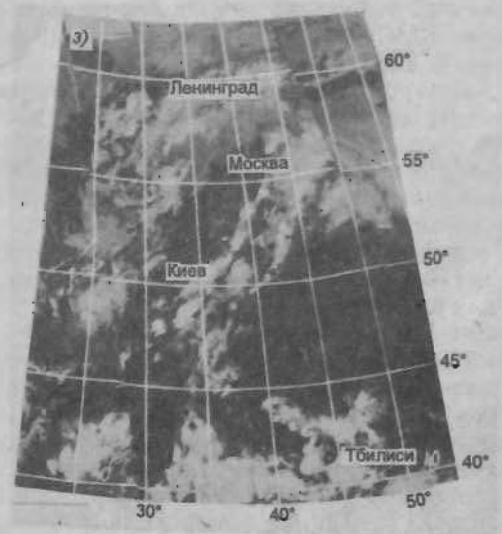
е—з — **фото 24.06.85 г. в 0 ч 4 мин СГВ (*е*), в 11 ч 31 мин СГВ (*ж*) и в 15 ч 50 мин СГВ (*з*).**

теризовать как Х.Ск.Сb, так как этот участок облачности не изолирован и размеры его превышают 350 км.

На рисунке 7.4 *е* активная область фронтальной облачной системы уже отсутствует. В этот день на рассматриваемой территории не отмечались шквалы, в том числе и относящиеся к градации сильных и очень сильных.

2. На рисунке 7.5 показана серия снимков облачности для случая отсутствия Х.Ск.Сb. В 0 ч 30 мин СГВ Х.Ск.Сb отсутствовали (см. рисунок 8.5 *а*). В 12 ч 04 мин СГВ в связи с активизацией термической конвекции на атмосферных фронтах в районе с координатами $\lambda = 45^\circ$ в. д. и $\varphi = 52^\circ$ с. ш. возникали мощные скопления Сb, по виду соответствующие даже Х. Ск.Сb (см. рисунок 7.5 *б*). Однако к вечеру активность их уменьшилась, размеры сократились, форма изменилась (см. рисунок 7.5 *в*). В этот день отмечались только слабые шквалы скоростью 10—15 м/с с порывами до 20 м/с в районе с координатами $\lambda = 40^\circ$ в. д. и $\varphi = 59^\circ$ с. ш. В районе с координатами $\lambda = 40^\circ$ в. д. и $\varphi = 59^\circ$ с. ш. отмечались шквалы скоростью 15 м/с с порывами до 25 м/с. Порыв ветра 25 м/с при шквале 15 м/с не относился к случаю сильного шквала.

На рисунке 7.5 *е* на всей рассмотренной территории Х.Ск.Сb отсутствуют. Нет изолированных скоплений Сb с четкими границами и диаметром, превышающим 100 км.



В период активизации термической конвекции в районе с координатами $\lambda = 44°$ в. д. и $\varphi = 47°$ с. ш. видно скопление Cb, по характеру напоминающее Х.Ск.Cb (см. рисунок 7.5 *б*). Скопление Cb в районе с координатами $\lambda = 25°$ в. д. и $\varphi = 50...52°$ с. ш. не имеет четких границ. С этим скоплением Cb были связаны осадки с $Q_{мах} = 60$ мм за 12 ч без шквалов. Сведения о сильных шквалах в этот день отсутствовали.

На рисунке 7.5 *е* хорошо выражена облачная система атмосферных фронтов, однако Х.Ск.Cb не выявляются ни на фоне фронтальной облачности, ни вблизи ее. При дальнейшей эволюции этой облачной системы, несмотря на ее активизацию в дневное время суток, так и не образовались Х.Ск.Cb, с которыми связаны сильные шквалы (см. рисунок 7.5 *ж, з*) В этот день на рассмотренной территории по фактическим наблюдениям сильные шквалы, ливни и град не отмечались. В районе Карпат во второй половине дня с этим фронтом были связаны шквалистые усиления ветра с порывами до 20 м/с.

7.3.6 Статистический анализ параметров Х.Ск.Cb по снимкам с ИСЗ

В таблице 7.7 приведена повторяемость характерных картин облачности на снимке с ИСЗ при развитии шквалов разных градаций. Это крупномасштабная система облачности (КМС), как правило, связанная с циклонами или другими регулярными барическими системами. При сильных шквалах Х.Ск.Cb отмечаются в 90 % случаев, причем в 42 % случаев они изолированы и в 48 % — выделяются на фоне КМС. В 5 % случаев при сильных шквалах линейные размеры Х.Ск.Cb меньше (80 км) или больше (450 км) критических размеров. При шквалах со скоростью 20—24 м/с Х.Ск.Cb отмечаются лишь в 30 % случаев, в 5 % случаев линейные размеры Х.Ск.Cb меньше и в 15 % — больше критических размеров, необходимых для сильных шквалов. При слабых шквалах Х.Ск.Cb с линейными размерами, характерными для сильных шквалов, не выявлялись. Лишь в 40 % случаев слабые шквалы были связаны с изолированными Х.Ск.Cb, но линейные размеры их были меньше (10 %) или больше (30 %) критических размеров, необходимых для сильных шквалов.

Форма облачности и ее интенсивность в ночные сроки наблюдений могут быть индикатором энергетического состояния атмосферы, необходимого для развития СГЯ, а положительная эволюция Х.Ск.Cb, определенная по данным в ночные и предутренние (около 03 ч) сроки наблюдений, указывает на сохранение условий, благоприятных для генерации энергии неустойчивости. Оперативно рассчитать эти параметры атмосферы при помощи численных моделей пока нельзя, но можно определить их, используя снимки облачности с ИСЗ.

Таблица 7.7 — Повторяемость характерных картин облачности на снимках ИСЗ при шквалах, %

Скорость ветра при шквале, м/с	Общее число случаев со шквалами	Наличие Х.Ск.Cb с линейными размерами, км			КМС		Облачные полосы	Отсутствие облачности на снимке в 00 ч СГВ
		≤ 100	100—450	≥ 450	без Х.Ск.Cb	вблизи Х.Ск.Cb		
≥ 25	38	—	90	5	5	—	—	—
21—24	32	5	30	25	—	20	15	5
≤ 20	40	10	—	30	20	30	5	5
Отсутствие шквала	35	—	—	5	10	10	40	35
Наличие смерча	12	—	91	9	—	—	—	—

7.3.7 Статистический анализ параметров радиоэха при развитии шквалов

В таблице 7.8 приведена повторяемость параметров радиоэха от Cb. При сильных шквалах в 99 % случаев $H_в \geq 11$ км и во всех случаях цифра кода $\lg Z_{макс}$ не менее 4. Число ячеек размером 60×60 км с Х.Ск.Cb в 100 % случаев не превышало 4 и в 64 % было не более 2. По мере уменьшения силы ветра при шквалах повторяемость указанных значений параметров радиоэха уменьшается. При слабых шквалах только в 38 % случаев $H_в = 11$ км, в 62 % значение $H_в \leq 9$ км, значение $H_в = 13$ км не отмечалось ни разу. Цифра кода $\lg Z_{макс}$ в 100 % случаев не превышала 4, а число ячеек в 40 % случаев было больше 5. Эти данные показывают, что сильные шквалы связаны с развитием глубокой конвекции, сопровождающейся образованием мощных Cb и их скоплений, линейные размеры которых ограничены критическими значениями [25].

Основными параметрами, по которым можно выявить условия, благоприятные для развития сильных шквалов, являются:

1) характер облачности на снимках с ИСЗ,

2) параметры радиоэха на картах с данными МРЛ.

Сильные шквалы отмечаются лишь в тех случаях, когда при определенных высоких значениях термодинамических параметров атмосферы на снимках облачности с ИСЗ и картах сети МРЛ выявляются Х.Ск.Cb. При отсутствии Х.Ск.Cb сильные шквалы ($v \geq 25$ м/с), как правило, не выявляются, но могут отмечаться шквалы скоростью 15—23 м/с с порывами до 25 м/с при сильных ливнях.

7.3.8 Механизм развития сильных шквалов

Исследование нелинейной динамики горизонтального вращения вихрей в пограничном слое атмосферы с помощью численной спектральной модели показало, что вращательные движения в этом слое атмосферы с термически неустойчивой стратификацией поддерживают силы плавучести и генерирование энергии за счет составляющей скорости ветра, поперечной оси вращения [61].

Особо мощные Cb могут существовать в течение нескольких часов лишь потому, что существует непрерывный приток в облако теплого влажного воздуха, который обеспечивается большими скоростями ветра на уровне основания облака (20—25 м/с), т. е. примерно на уровне 850 гПа [32]. Это способствует переносу влаги в верхние слои атмосферы и созданию больших запасов потенциальной энергии неустойчивости, которая выделяется, как прави-

Таблица 7.8 — Повторяемость радиолокационных параметров радиоэха, %

Скорость ветра при шквале, м/с	Общее число случаев со шквалами	$H_в$, км				Цифры кода $\lg Z_{макс}$			Число ячеек размером 60×60 км			
		≥ 13	11	≤ 9	Отсутствие радиоэха	≤ 2	4	≥ 6	1—2	3—4	≥ 5
≥ 25	35	20	79	1	—	—	75	25	64	36	—
21—24	28	12	76	12	—	23	66	11	50	10	40
≤ 20	38	—	38	62	—	30	70	—	30	30	40
Отсутствие шквала	20	—	—	20	80	75	25	—	—	—	—
Наличие смерча	18	83	11	6	—	—	—	100	—	—	—

ло, после полудня при развитии мощной конвекции на атмосферных фронтах, играющих роль спускового механизма.

Если при высокой неустойчивости атмосферы ветер в подоблачном слое слабый, то непрерывность восходящего потока тормозится и облако, не получая подпитки, разрушается. Если при этом неустойчивость не исчезла, то возникает новая ячейка (новый восходящий поток). В этих условиях за счет слияния облаков возможны локальные шквалы с $v < 25$ м/с. Слияние близко расположенных мощных конвективных облаков может приводить к увеличению скорости восходящего потока до 60 м/с [59]. Этот процесс носит дискретный характер. Чем больше плотность конвекции и чем более она развита, тем интенсивнее развиваются вихревые возмущения [32].

В малоградиентных полях Х.Ск.Сb образуются примерно в 25 % случаев, и с ними иногда связаны отдельные локальные (отмеченные на одной станции) шквалы с порывами до 28 м/с.

Таким образом, динамические условия в нижнем слое тропосферы играют существенную роль в формировании структуры Сb и определяют динамику их развития. В предлагаемом методе прогноза сильных шквалов этот процесс учтен при помощи градиента скорости ветра в слое поверхность Земли — уровень 850 гПа.

Пространство, охваченное восходящими движениями, определяется размером Х.Ск.Сb на снимке с ИСЗ или на карте сети МРЛ, а глубина конвекции — по данным высоты радиоэха ($H_{макс}$) от грозовых облаков $\lg Z_{макс} \geq 2{,}7$ (или при цифре кода 4).

Можно констатировать, что сильные шквалы развиваются, когда вблизи Х.Ск.Сb имеются мощные Сb при характерном поле ветра у поверхности Земли и в нижнем слое тропосферы, тормозящие одно из облачных скоплений Сb, что приводит к их слиянию. Этот процесс приводит к усилению восходящего потока, рождающего компенсационный интенсивный нисходящий поток, который при определенных условиях образует сильный шквал (вихрь с горизонтальной осью вращения).

7.4 Смерчи

7.4.1 Общие сведения о смерчах

О происхождении смерчей известно значительно меньше, чем о других СГЯ, связанных с конвекцией.

О природе смерчей можно судить лишь по визуальным наблюдениям за облачностью и состоянием погоды, по характеру разрушения, связанному с ними, и по анализу аэросиноптических условий, предшествующих этому явлению.

В настоящее время ведутся работы по моделированию и исследованию природы смерчей на основе законов гидродинамики, а также изучаются причины их образования и возможность их предсказания на основе анализа синоптических факторов [2, 36].

Шквалы, особенно сильные, имеют много общего со смерчами [15].

Смерчем называют вихрь с вертикальной осью вращения (в отличие от шквала с горизонтальной осью), сопровождающийся колоссальными скоростями ветра. Большинство смерчей связано с линиями шквалов[1] или активными холодными фронтами с грозами. Они, как правило, сопровождаются шквалами. Наиболее благоприятные условия для образования смерчей имеются непосредственно на линии приземного фронта, вблизи от поверхности Земли (это узкая полоса шириной около 50 км по обе стороны линии фронта).

Обычно при смерче из грозового облака как бы отщепляется облачный столб в виде воронки с отростком, напоминающим собой хобот слона.

Смерч имеет значительную скорость и большую разрушительную силу. Смерч вырывает с корнем деревья, срывает крыши, иногда разрушает каменные постройки и часто разбрасывает различные предметы на большие расстояния. Скорость ветра внутри смерча может достигать 100 м/с и более. Диаметр его над сушей бывает порядка 100—1000 м, иногда до 2 км. Видимая высота хобота составляет 800—1500 м.

Минимально возможная высота очагов зарождения смерчей лежит в пределах 0,5—1,0 км, а максимальная высота — до 3 км. При более высоком уровне зарождения смерчу труднее пробить ниже лежащий слой воздуха для достижения поверхности Земли. Следует отметить, что смерч имеет много названий. В зависимости от вида поверхности, над которой он проходит (вода или суша), его именуют торнадо, тромбом или смерчем. Однако природа всех этих явлений совершенно одинакова.

7.4.2 Условия развития смерчей

В таблице 7.9 приведены параметры атмосферы по данным аэросиноптических, радиолокационных и спутниковых наблюдений, характеризующие ее состояние при развитии смерчей и сильных шквалов.

---

[1] Руководство по использованию спутниковых данных в анализе и прогнозе погоды (см. п. 2).

Таблица 7.9 — Характеристики состояния атмосферы при развитии смерчей и сильных шквалов по данным МРЛ, ИСЗ и аэросиноптических карт

Явление	Данные МРЛ		Данные ИСЗ		Характерное термобарическое поле на аэросиноптической карте
	0 ч СГВ	3—6 ч СГВ	0 ч СГВ	2—4 ч СГВ	
Смерчи со шквалами и без них	$H_э \geq 10$ км ($\lg Z_{макс}$ при цифрах кода 6 и 8)	$H_э \geq 13$ км ($\lg Z_{макс}$ при цифрах кода 6 и 8)	Округлые, овальные, неправильной формы скопления Cb с четкими краями, размером 100—400 км в зонах облачных вихрей и во фронтальных облачных системах	Сохранение или усиление характерных скоплений Cb. При прогнозе перемещения облачных систем возможно их слияние	Развитые циклоны с характерной фронтальной системой, фронтом окклюзии в темном секторе Горизонтальные градиенты температуры у Земли и на AT_{850} равны 2 °C/100 км и более Район возможного возникновения: смыкание холодного фронта с фронтом окклюзии в теплом секторе или холодного с вторичным холодным На карте относительной топографии — это точка окклюзии
Сильные шквалы	$H_э \geq 10$ км ($\lg Z_{макс}$ при цифрах кода 4, 6 и 8)	$H_э \geq 13$ км ($\lg Z_{макс}$ при цифрах кода 4, 6 и 8)	То же, размер скоплений Cb 100—350 км в зонах облачных полос	Сохранение, усиление или незначительное ослабление (уменьшение размера) скоплений	Фронты с волнами, ориентированные меридионально, образование молодого циклона на волне с примыкающим к нему фронтом окклюзии Горизонтальный градиент температуры у Земли и на AT_{850} равен 2 °C/100 км и более Район возможного возникновения: узкий теплый сектор, точка окклюзии

Наиболее благоприятными для развития смерчей являются следующие условия:

1) наличие развитых мощных скоплений Cb, которые хорошо выявляются по данным карт сети МРЛ и по снимкам облачности с ИСЗ на большой территории. В 83 % случаев смерчи связаны с облаками, высота радиоэха от которых достигает и превышает 13 км, и в 91 % случаев — с характерными скоплениями Cb (Х.Ск.Cb) (таблица 7.9), горизонтальные размеры которых в 83 % случаев составляют 200—400 км;

2) наличие фронта с большими градиентами скорости ветра по высоте, способствующими образованию вихрей. Изменение скорости ветра с высотой должно достигать 2—3 м/с на 100 м высоты, что в свободной атмосфере на широте $\varphi = 50°$ равноценно наличию горизонтальных градиентов температуры у поверхности Земли $\Gamma_t = 6...9$ °C/100 км;

3) наличие большой неустойчивости и большой массовой доли влаги во всей толще теплой воздушной массы. Эти условия способствуют образованию облаков на низких уровнях у земной поверхности.

В этих условиях обеспечивается конвергенция ветра в мощном слое атмосферы, что является важным фактором в процессе смерчеобразования. Таким образом, сверхкритические значения градиента скорости ветра с высотой и горизонтальные градиенты температуры воздуха в сочетании с мощным слоем конвергенции ветра при наличии мощных скоплений Cb приводят к развитию вихрей с вертикальной осью вращения.

Наличие характерной облачности можно выявить на снимке с ИСЗ.

7.4.3 Примеры картин облачности на снимках с ИСЗ при возникновении смерчей

Пример 1 — Описание картин облачности на снимке с ИСЗ для случая развития смерча 06.09.85 г.

В окрестностях г. Морозовска Ростовской области (φ = 48°21″ с. ш., λ = 41°52′ в. д.) 06.09.85 г. в 14 ч 40 мин — 14 ч 50 мин СГВ наблюдался смерч в виде вертикального столба диаметром 30—40 м, который развивался по вертикали. В результате деятельности этого смерча приподнят кран массой 41 т.

Синоптическая ситуация. Указанный смерч связан с вторжением ультраполярного обширного циклона с хорошо выраженной активной системой атмосферных фронтов, который принес в район образования смерча влажную и относительно холодную массу воздуха. На рисунке 7.6 показана схема барического поля и атмосферных фронтов. В 0 ч СГВ упорядоченные вертикальные токи на уровне 850 гПа составляли −150 гПа/12 ч.

Характер атмосферных процессов. Накануне, 05.09.85 г., в районе г. Морозовска развивалась активная конвективная деятельность, связанная с фронтом окклюзии над Северным Кавказом (рисунок 7.7 *а* и *б*). Это способствует усиленно-

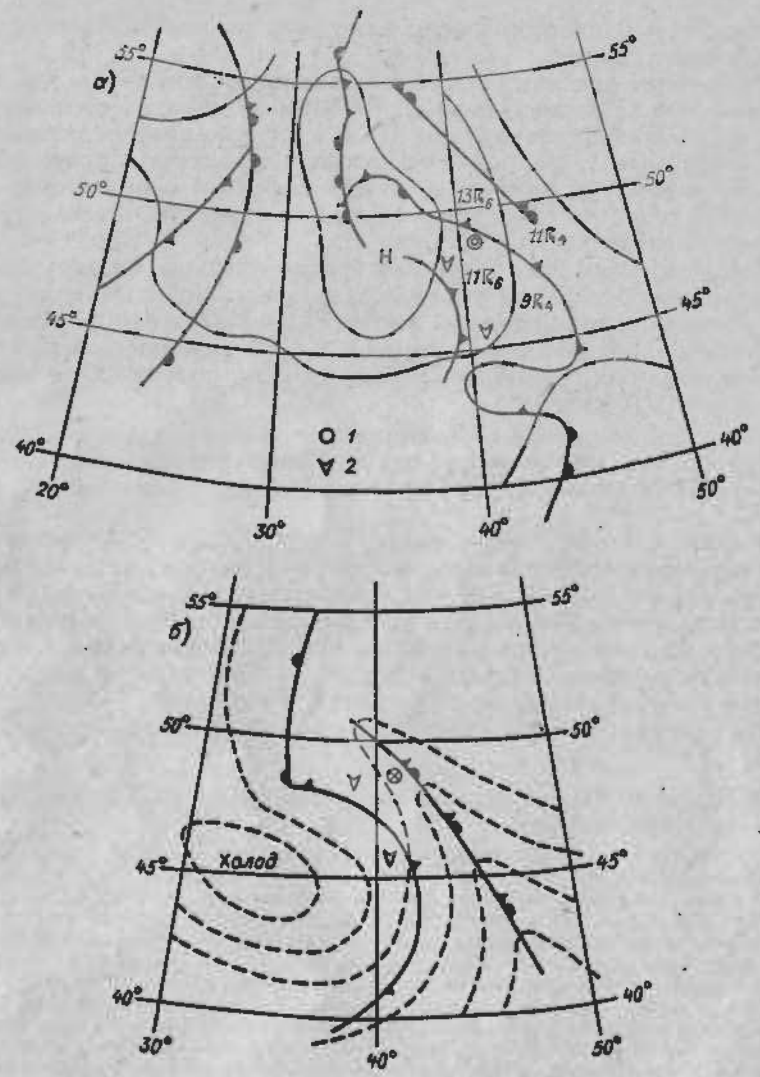
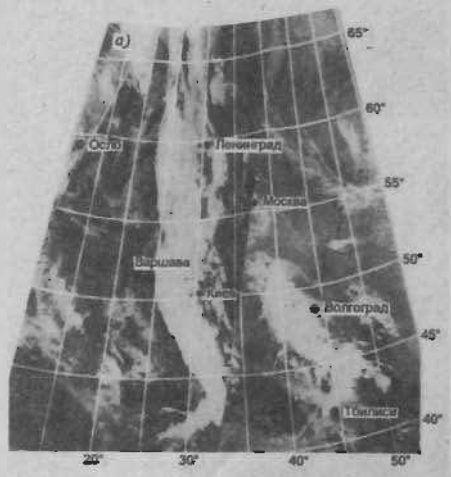


Рисунок 7.6 — Барическое поле и атмосферные фронты 06.09.85 г. на приземной карте (*а*) и на карте $ОТ_{500/1000}$ (*б*).
***1* — смерч, *2* — шквалы.**



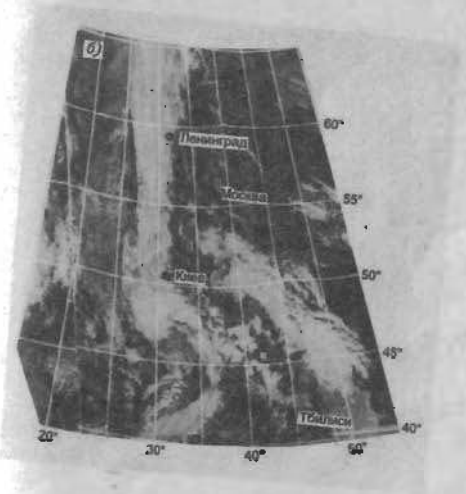
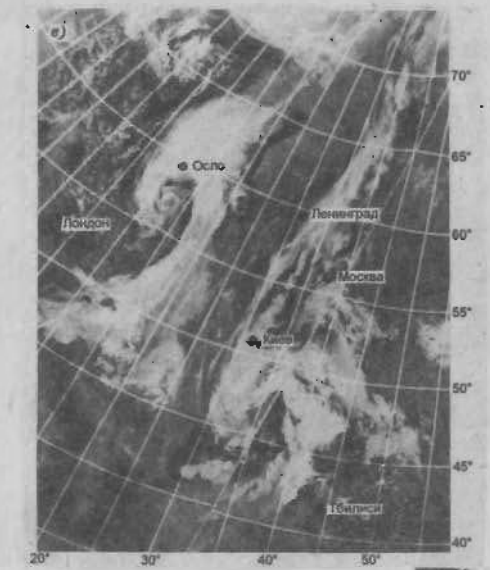
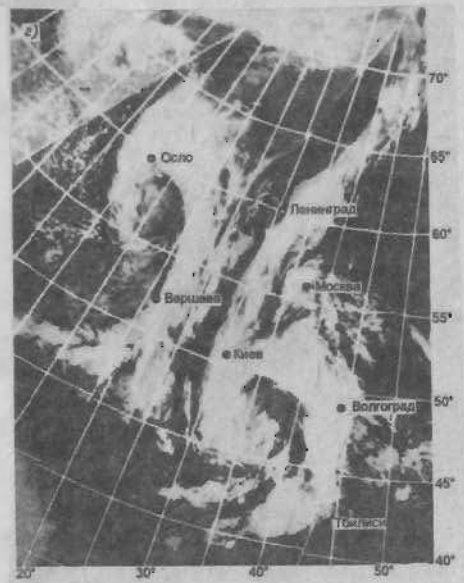
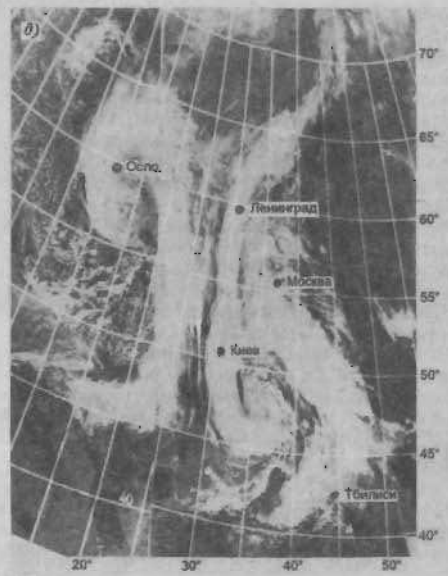


Рисунок 7.7 — Эволюция облачности по данным ИСЗ для случая развития смерча в Ростовской области 06.09.85 г.
***а*, *б* — фото 05.09.85 г. (за сутки до развития смерча) в 0 ч 3 мин СГВ (*а*) и в 11 ч 36 мин СГВ (*б*).**







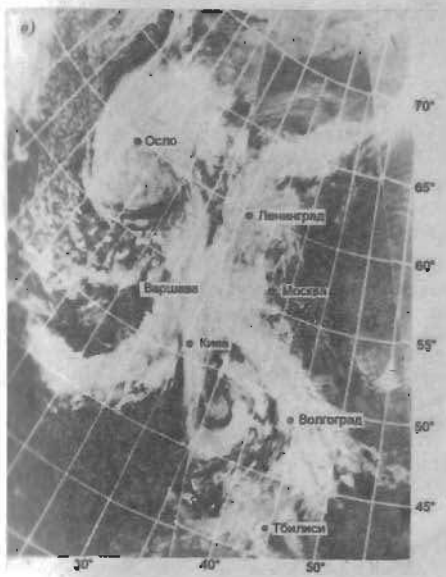


Рисунок 7.7 (*продолжение*) — Эволюция облачности по данным ИСЗ для случая развития смерча в Ростовской области 06.09.85 г.

а, г — фото 06.09.85 г. (в день развития смерча) в 1 ч 32 мин СГВ (*а*) и в 5 ч 59 мин СГВ (*г*).

б, е — фото с ИСЗ 06.09.85 г. за 2 ч 30 мин до смерча (*б*) и через 2 ч 00 мин после смерча (*е*).

му переносу влажных теплых воздушных масс в верхние слои атмосферы, что увеличивает потенциальную неустойчивость ее верхних слоев в этом районе [32]. Облачность этого фронта со временем соединилась с облачностью холодного фронта с волнами. Расстояние между этими обширными конвективными облачными системами не превышало 300 км. Циркуляция воздуха в этом районе благоприятствовала их сближению. Фронт окклюзии над Северным Кавказом был малоподвижен. Холодный фронт смещался в сторону фронта окклюзии. На рисунке 7.7 *б* видны мощные скопления Cb между этими двумя облачными системами. Падение давления в районе развития скоплений Cb способствовало сближению конвективных облачных систем.

Развитию мощных скоплений Cb и смещению облачных систем фронта окклюзии и холодного фронта с волнами способствовали усиливающаяся адвекция холода в приземном слое и интенсивная адвекция тепла в нижней тропосфере.

При смыкании облачных систем образовался облачный вихрь (см. рисунок 7.8 *в*). В головке вихря на фоне облачности вихря наблюдаются мощные скопления Cb. В 5 ч 59 мин СГВ вблизи района смерча образовались изолированные мощные скопления Cb, позже сформировавшиеся в линию шквалов (см. рисунок 7.7 *г*). Этот процесс способствовал генерации огромной энергии атмосферы в рассматриваемом районе, так как слияние близко расположенных мощных конвективных облаков может приводить к увеличению скорости восходящего потока до 50 м/с [32]. На рисунке 7.7 *д*, *е* показана картина облачности на снимке с ИСЗ до и после смерча.

Таким образом, из примера 1 следует, что развитию смерча способствовали следующие условия:

1) длительное по времени (около 1 сут) развитие мощных Cb, связанных с регенерацией атмосферных фронтов;

2) накопление в данном районе огромной потенциальной энергии в верхнем слое атмосферы вследствие развития Cb;

3) последующее слияние двух мощных конвективных облачных систем близко расположенных фронтов, ставшее мощным импульсом для начала перераспределения энергии и образования смерча.

Пример 2 — Случай развития сильных шквалов и смерча 12.06.88 г. в Житомирской области ($\lambda = 31°$ в. д., $\varphi = 48{,}5°$ с. ш.). От смерча пострадали жилые дома и хозяйственные постройки.

На рисунке 7.8 в районе с координатами 34° в. д. и 50° с. ш. отмечено изолированное скопление Cb, которое по критериям, приведенным в таблице 7.9, соответствует Х.Ск.Cb. В 100 км на юго-запад от него ($\lambda = 30°$ в. д., $\varphi = 49°$ с. ш.) видно второе изолированное скопление Cb. Оба Х.Ск.Cb изолированы и имеют четкие границы. В данном случае они имеют неправильную форму, их диаметр по направлению перемещения (на юго-запад) около 175 км, т. е. более 100 и менее 450 км.

По фактическим данным наблюдений, в районе расположения Х.Ск.Cb ($\lambda = 34°$ в. д., $\varphi = 50°$ с. ш.) в 13 ч 10 мин отмечались шквалы с $v_к = 26$ м/с, а в 18—19 ч в районе с координатами 30° в. д. и 49° с. ш. отмечался смерч, вызвавший незначительные повреждения объектов народного хозяйства. Образование смерча, возможно, обусловлено взаимодействием (слиянием) двух близко расположенных Х.Ск.Cb. Расстояние между ними в утренние часы не превышало 100 км. В результате активизации термической неустойчивости в дневное время при небольшой скорости перемещения воздушных масс (5 м/с) происходило усиление и распространение мощных конвективных облаков и их слияние.

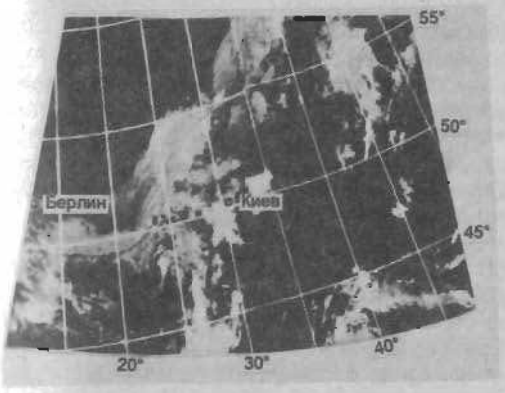


Рисунок 7.8 — Картина облачности на фото с ИСЗ в ИК-диапазоне 12.06.88 г. в 1 ч 33 мин СГВ.

В примере 2 развитию смерча также предшествовало слияние двух изолированных Х.Ск.Cb, однако их размеры были значительно меньше размеров облачных систем в примере 1. Судя по характеру повреждений, смерч 12.06.88 г. был по силе воздействия намного слабее смерча 06.09.85 г.

7.5 Условия формирования и механизм развития сильных (ОЯ) и очень сильных (СГЯ) осадков в холодный период года

7.5.1 Общие сведения

В умеренных широтах сколько-нибудь значимые осадки выпадают из слоисто-дождевых облаков с вкраплением в них кучево-дождевых облаков, в которых создаются условия для превышения скорости падения водяных капель или ледяных кристаллов над скоростью восходящих движений воздуха. В настоящем разделе изложен механизм формирования и условия развития осадков в холодный период года в градациях опасных ($7 \le Q_{макс} \le 19$ мм за 12 ч и менее) и особо опасных ($Q_{макс} \ge 20$ мм за 12 ч и менее).

В холодный период года осадки указанных градаций формируются при подъеме влажных теплых воздушных масс в циклонах и на атмосферных фронтах при упорядоченных вертикальных движениях и развитии конвективных движений с низких уровней тропосферы (850 гПа) на фронтах в теплой воздушной массе [1, 24].

Продолжительные по времени и интенсивные восходящие движения в циклонах и на атмосферных фронтах способствуют подъему влажных воздушных масс воздуха, что приводит к накоплению больших запасов влаги в облачных системах, а меха-

низм циркуляции воздушных частиц в облачных системах — к образованию и выпадению осадков.

Проявления процесса развития сильных осадков в холодный период года описаны на основе результатов комплексного исследования макро-, мезо- и микромасштабных атмосферных процессов и связанной с ними облачности, обусловливающих ОЯ и СГЯ, при использовании комплекса синхронных метеорологических, аэрологических, спутниковых и радиолокационных данных наблюдений.

При исследовании зимних осадков используют следующее:

1) данные карт сети МРЛ на ЕТ СНГ и данные МРЛ Росгидрометцентра за основные синоптические сроки наблюдений;

2) фотомонтажи снимков облачности с метеорологических ИСЗ за все имеющиеся сроки наблюдений (не менее четырех сроков);

3) синоптические карты и карты барической топографии основных изобарических поверхностей (850, 700, 500 и 300 гПа) в 0 ч и 12 ч СГВ;

4) карты вертикальных движений τ (диагноз и прогноз);

5) данные наземных метеорологических наблюдений за зимний период (январь—март, ноябрь, декабрь).

Данные МРЛ и ИСЗ в условиях редкой сети наблюдений — это существенная информация о мезомасштабном состоянии атмосферы.

Поскольку облачность, с которой связаны осадки, отражает механизм взаимодействия атмосферных процессов при их развитии и является его результатом, то характер облачности и ее параметры, отображаемые на снимках с ИСЗ и картах сети МРЛ, использованы как самостоятельные предикторы в исследовании условий формирования опасных и особо опасных осадков.

Данные ИСЗ по картине облачности, отображенной на снимке в ИК-диапазоне, позволяют судить о характере синоптического процесса, выделять области пространства с восходящими и нисходящими упорядоченными и конвективными движениями воздуха, определять наличие циклонов, атмосферных фронтов, скорость и направление их перемещения, эволюцию и параметры облачности (яркость, конфигурацию, горизонтальную протяженность).

Данные МРЛ позволяют объективно судить о природе осадков (обложные, ливневые), мощности слоя осадкообразования (по мощности радиоэха), их эволюции, скорости и направлении перемещения, площади распространения и продолжительности выпадения.

В холодный период года по параметрам радиоэха можно определить следующее:

1) наличие в атмосфере условий, необходимых для образования сильных осадков;

2) степень неустойчивости атмосферы.

Параметры радиоэха в совокупности с данными об облачности, поступающими с ИСЗ, дают объективную картину распределения влаги и характера атмосферной циркуляции в макро- и мезомасштабах.

Радиоэхо от осадков — результат взаимодействия всех факторов осадкообразования, в том числе влияния подстилающей поверхности. Поэтому на основе данных о радиоэхе при разработке методов прогноза осадков в холодный период года принято допущение, что основной вклад в процесс формирования и эволюции КМС и связанных с ними осадков вносят следующие процессы:

1) адвекция воздушных масс,

2) характер циркуляции атмосферы.

7.5.2 Результаты анализа крупномасштабных процессов при развитии осадков ОЯ и СГЯ

Осадки в холодный период года формируются в циклонах и на атмосферных фронтах при адвекции теплых влажных масс воздуха, перемещающихся преимущественно с юга, юго-запада и запада.

Очень сильные осадки (СГЯ) связаны с прохождением через пункт хорошо развитых глубоких циклонов преимущественно с юга (таблица 7.10).

На снимке с ИСЗ хорошо развитым южным циклонам соответствуют обширные облачные вихри с $L_{ИСЗ} \geq 500$ км и зоны осадков по данным МРЛ с верхней границей радиоэха $H_в \geq 7$ км.

Сильные осадки (ОЯ) формируются в хорошо развитых циклонах на теплых фронтах и фронтах окклюзии преимущественно при южном и юго-западном перемещении воздушных масс, они в 88 % случаев наблюдаются при адвекции тепла и высокой массовой доле влаги воздуха в слое 850—500 гПа (в 97 % случаев недостаток насыщения $\sum_{850}^{500} d \leq 8$ °С). Осадки количеством $Q_{макс} \geq 7$ мм всегда связаны с адвекцией зон осадков, для которых верхняя граница радиоэха $H_{макс} \geq 4$ км и $L_{МРЛ} \geq 150$ км.

Сильные и очень сильные осадки никогда не отмечаются при перемещении воздушных масс с севера, северо-востока, востока, юго-востока (таблицы 7.10 и 7.11).

Упорядоченные вертикальные движения τ являются одним из основных факторов механизма формирования осадков в холодный период года.

При очень сильных осадках (СГЯ) максимальную повторяемость на уровне 850 гПа имеют значения $\tau_{850} \geq -250$ гПа/12 ч.

При сильных осадках (ОЯ) максимальную повторяемость на уровне 850 гПа имеют значения $\tau_{850} \geq -50...-150$ гПа/12 ч (рисунок 7.8) [24].

Таблица 7.10 — Повторяемость случаев осадков различной интенсивности при различных направлениях перемещения воздушных масс, %

Сумма осадков за 12 ч и менее, мм	Число случаев, % от общего числа	Направление перемещения								Циклон	Ложбина
		С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ		
≥ 20 СГЯ$_{инт}$	2	—	—	—	—	100	—	—	—	—	—
СГЯ$_{ср}$	3	—	—	—	—	33	67	—	—	—	—
СГЯ$_{сл}$	9	—	—	—	—	11	55	—	—	22	12
≥ 7 ОЯ$_{инт}$	44	—	—	—	—	36	39	9	—	16	—
ОЯ$_{ср}$	31	—	—	—	—	26	36	6	10	16	6
ОЯ$_{сл}$	63	—	—	—	1	6	50	12	24	6	1
3—6	92	9	3	—	8	9	38	9	24		
0—2	69	6	4	3	7	9	33	16	22	—	—
Общее число случаев	313	11	6	2	12	52	125	30	55	16	4

Примечания. — 1. Индексы обозначают площадь S, на которой зарегистрированы осадки: „инт" — $S \geq 30$ %, „ср" — $S = 10...30$ %, „сл" — $S < 10$ % обслуживаемой территории. 2. СГЯ: $Q \geq 20$ мм, ОЯ: $Q = 7...20$ мм.

Таблица 7.11 — Повторяемость случаев осадков различной интенсивности при различных синоптических ситуациях, %

Число случаев, % общего числа случаев	Сумма осадков за 12 ч и менее, мм	Циклон				Фронт				Серия фронтов	Гребень, малоградиентное поле без фронтов	Другие ситуации
		СЗ	З	ЮЗ	Ю	теплый	холодный	окклюзии	с волнами			
8	≥ 20	—	25	—	75	—	—	—	—	—	—	—
26	7—19	—	7	4	—	50	4	23	4	8	—	—
20	4—6	5	—	—	—	30	15	20	10	10	—	10
66	0—3	—	—	—	—	12	27	33	—	—	18	9
Общее число случаев	120	1	4	1	6	27	22	32	3	4	12	8

Таблица 7.12 — Повторяемость термогидродинамических параметров атмосферы, %

Сумма осадков за 12 ч и менее, мм	Число случаев	d_{500} °С				Σ d °С				t_3 °С						d_3 °С			
		0—1	2—3	4—5	6	0—3	4—6	7—9	10	10	9—5	4—0	0...−5	−6...−10	−10	0	1—2	3—5	6
≥ 20	14	70	30	—	—	100	—	—	—	11	22	44	11	12	—	11	78	11	
ОЯ$_{инт}$	58	36	55	7	2	36/79	47/13	11/4	6/4	5	46	26	10	13	—	15	70	15	
ОЯ$_{ср}$	32	37	49	7	7	47/84	25/6	9/9	19/10	3	4	33	37	23	—	13	70	17	
ОЯ$_{сл}$	68	30	50	10	10	29/70	28/9	18/6	25/15	3	10	30	33	15	9	6	72	21	1
7—20	153	18	62	8	12	38/80	32/10	14/4	16/6	6	8	39	25	18	4	13	75	10	2
3 ≤ 6	93	10	46	18	26	16/49	30/24	17/8	37/19	—	9	35	26	17	13	8	65	27	
≤ 2	72	4	25	14	57	4/22	16/20	8/8	72/50	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Примечания — 1. Числитель — сумма значений недостатка насыщения в слое 850—500 гПа, знаменатель — в слое 700—500 гПа. 2. t_3 и d_3 — температура воздуха и недостаток насыщения у поверхности Земли соответственно. 3. Индексы „инт", „ср", „сл" — см. таблицу 7.10.

7.5.3 Мезомасштабные особенности атмосферы при формировании осадков ОЯ и СГЯ в холодный период года

Мезомасштабные особенности атмосферы определяются следующими процессами (таблица 7.12):

1) изменением температуры и влажности воздуха у поверхности Земли и в слое 850—500 гПа в дневное (15 ч) и ночное (3 ч) время суток,

2) адвективными изменениями температуры воздуха на поверхности 850 гПа,

3) стратификацией воздушных масс в слое 850—500 гПа.

Сильные и очень сильные осадки в холодный период года в основном выпадают при положительном значении температуры воздуха у поверхности Земли и высокой влажности воздуха как у поверхности Земли, так и в слое 850—500 гПа:

Очень сильные осадки (СГЯ)

Температура воздуха у поверхности Земли	> 0 °С (77 % случаев) 0...−10 °С (23 % случаев)
Недостаток насыщения на уровне 500 гПа	≤ 1 °С (70 % случаев) ≤ 3 °С (100 % случаев)
Сумма значений недостатка насыщения в слое 850—500 гПа	≤ 3 °С (100 % случаев)

Сильные осадки (ОЯ)

Температура воздуха у поверхности Земли	0...−4 °С (39 % случаев) 0...−10 °С (77 % случаев)
Недостаток насыщения на уровне 500 гПа	≤ 3 °С (91 % случаев)
Сумма значений недостатка насыщения в слое 850—500 гПа	≤ 6 °С (83 % случаев) ≤ 9 °С (94 % случаев)

Таблица 7.13 — **Повторяемость случаев осадков разной интенсивности в зависимости от изменений температуры воздуха на уровне 850 гПа, %**

Сумма осадков за 12 ч и менее, мм	Число случаев	Адвективные изменения температуры воздуха, °С				
		5	3...4	0...2	−1...−2	−3
≥ 6	52	50	—	38	6	16
< 6	38	5	10	14	48	14

Исследование знака и адвекции температуры воздуха на уровне 850 гПа показало, что сильные осадки с $Q_{макс} \geq 6$ мм наблюдаются в 88% случаев при адвекции тепла на этой поверхности, а осадки с $Q_{макс} < 6$ мм отмечаются при адвекции тепла всего лишь в 29 % случаев (таблицы 7.11—7.13).

Характер стратификации воздушной массы в слое 850—500 гПа перед выпадением сильных осадков определяют путем расчета разности изменений температуры воздуха за сутки на уровнях 850 и 500 гПа:

$$\Delta t = (t_i - t_{i-1})_{850} - (t_i - t_{i-1})_{500}, \qquad (7.10)$$

где t_i и t_{i-1} — температура воздуха в 3 ч текущих i-х и в 3 ч предыдущих $i-1$-х суток соответственно.

Положительные значения Δt указывают на то, что в слое 850—500 гПа состояние атмосферы неустойчиво, т. е. в нижнем слое тропосферы располагается теплая воздушная масса, а выше — холодная или относительно холодная.

В 100 % случаев при сильных осадках отмечались положительные значения t_{i-1} в слое 850—500 гПа, т. е. состояние атмосферы в этом слое неустойчиво. При осадках $Q_{макс} \leq 6$ мм значение $t_{i-1} \geq 0$ °С в 42 % случаев, $t_{i-1} < 0$ °С в 52 %, $t_{i-1} = 0$ °С в 6 % случаев.

Такое распределение температуры воздуха с высотой способствует развитию конвекции в среднем слое атмосферы в зоне фронтов, преимущественно в теплом воздухе над фронтом, независимо от его типа [1, 24].

Совместный анализ особенностей макро- и мезомасштабных свойств воздушных масс показал, что сильные (ОЯ) и очень сильные (СГЯ) осадки в холодный период года определяются следующими факторами:

1) упорядоченными вертикальными движениями, возникающими за счет нестационарности и приземного трения у поверхности Земли на фронтах;

2) скоростями вертикальных движений, возникающих за счет термодинамической неустойчивости атмосферы в слое 850—500 гПа.

Этот вывод подтверждают также результаты анализа радиолокационных данных для случаев наличия ОЯ и СГЯ и их отсутствия.

Рассчитать термодинамическую неустойчивость атмосферы в холодный период года невозможно, так как в обширных облачных системах данные радиозонда нерепрезентативны. Анализируя облачность по снимкам с ИСЗ и по данным МРЛ, можно учесть взаимодействие всех факторов осадкообразования, в том числе влияние подстилающей поверхности.

7.5.4 Радиолокационные параметры радиоэха осадков, характеризующие мезомасштабные процессы в холодный период года

На преобладающий механизм развития восходящих движений при ОЯ и СГЯ косвенно указывает тип радиоэха (таблица 7.14).

В холодный период года в 50 % случаев при СГЯ отмечалось радиоэхо от кучевых со слоистообразными (РКСО) и в 50 % случаев — от слоисто-дождевых (РСО).

ОЯ в 62—67 % случаев связаны с РКСО и в 33—38 % — с РСО. Осадки с $Q_{макс} = 4...6$ мм за 12 ч отмечались примерно при одинаковом с ОЯ соотношении РКСО и РСО. А небольшой снег ($Q_{макс} = 0...3$ мм за 12 ч) в 74 % случаев отмечался при РСО.

Водность облака можно косвенно определить по двум основным параметрам радиоэха — $H_в$ и $\lg Z_{макс}$, из которых менее всего подвержен временной флюктуации параметр $H_в$ — верхняя граница радиоэха. Поэтому при исследованиях целесообразно использовать в основном данные о максимальной преобладающей высоте радиоэха. В 100 % случаев СГЯ отмечались при $H_в \geq 4$ км, в 72 % случаев — при $H_в \geq 7$ км, в 22 % случаев — при $H_в \geq 10$ км (таблица 7.14).

В 67 % случаев ОЯ преобладала $H_в = 4...6$ км. Все СГЯ и ОЯ за небольшим исключением (2—3 %) отмечались при $H_в \geq 4$ км.

Таблица 7.14 — Повторяемость случаев осадков различной интенсивности при различных значениях радиолокационных параметров, %

Сумма осадков за 12 ч и менее, мм	Число случаев	Тип радиоэха			$H_в$			
		РКО	РКСО	РСО	3	4—6	7—9	10
≥ 20 (СГЯ)	14	—	50	50	—	28	50	22
≥ 7								
$ОЯ_{инт}$	58	—	62	38	2	33	58	7
$ОЯ_{ср}$	32	—	67	33	—	67	26	7
$ОЯ_{сл}$	68	1	63	36	3	67	24	6
4—6	90	6	54	40	9	56	33	2
0—3	88	6	20	74	15	54	31	—

Примечание — Индексы „инт", „ср", „сл" — см. таблицу 7.10.

С увеличением интенсивности ОЯ максимальную повторяемость имеют более высокие значения $H_{макс}$, т. е. максимальная высота радиоэха является косвенным показателем интенсивности осадков (таблица 7.14). Так, в зимний период года значение $H_в$ = = 4 ± 1 км может служить критерием распознавания условий, благоприятных для выпадения сильных и очень сильных осадков. При $H_в$ < 4 км такого количества осадков ожидать не следует.

Повторяемость линейных размеров зон радиоэха можно определять по данным карт сети МРЛ ($L_{МРЛ}$). Сведения об осадках на этой карте представлены в квадрате 60× 60 км. Для этого случая значение $L_{МРЛ}$ оценено с погрешностью примерно 30 км. Из 52 случаев ОЯ в 89 % значение $L_{МРЛ}$ > 150 км:

$L_{МРЛ}$ км	≤ 150	160—350	350—500	< 500
P %	11	40	39	10

7.5.5 Особенности облачных систем при осадках ОЯ и СГЯ, определенных по данным с ИСЗ

Данные о повторяемости вида облачности на фотоснимках с ИСЗ при разных градациях осадков приведены в таблице 7.15. Облачность на снимках с ИСЗ, сделанных в ИК-диапазоне в холодный период года, можно разделить на следующие группы:

1) облачные вихри;

2) облачные полосы;

3) обширные облачные системы неопределенной формы, разной структуры и плотности.

В 100 % случаев СГЯ на фото с ИСЗ отмечены центральные части облачных вихрей, что хорошо согласуется с данными анализа барического поля (таблица 7.15).

В 58 % случаев ОЯ отмечены облачные полосы, причем в 43 % отмеченных случаев ОЯ эти полосы яркие и широкие. В 33 % случаев ОЯ отмечен облачный вихрь или его периферия, в 15 % случаев ОЯ — центральные части вихря и в 9 % случаев ОЯ — обширные системы с однородной плотностью.

Таким образом, в 91 % случаев опасные снегопады можно связать с облачностью циклонов и атмосферных фронтов.

7.5.6 Взаимосвязь параметров, характеризующих процессы микро-, мезо- и макромасштабов в холодный период года

Облака и связанные с ними осадки являются результатом взаимодействия процессов разного масштаба:

— микромасштаба (Cb, развивающиеся на фронтах);

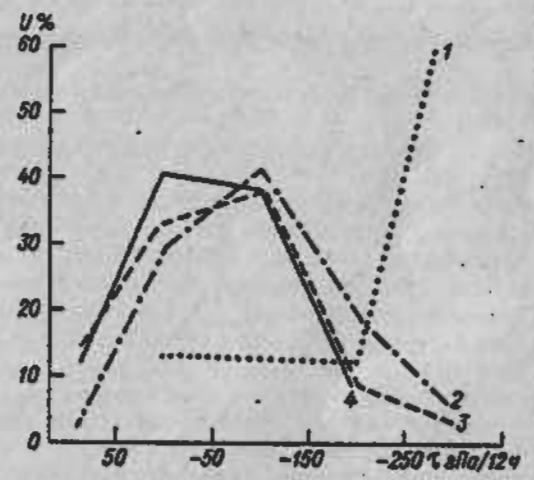


Рисунок 7.9 — Повторяемость значений упорядоченных вертикальных движений τ на поверхности 850 гПа при осадках различных градаций в холодный период года [24].

1 — 00, 2 — ОЯ, 3 — умеренные, 4 — слабые.

Таблица 7.15 — Повторяемость случаев ОЯ при различных

Сумма осадков за 12 ч и менее, мм	Число случаев, % общего числа	Облачный вихрь				Облачная	
		Центральная часть	Облачность циклона		Периферия	яркая широкая	средней интенсивности
			сплошная	размытая			
0	9	—	—	—	—	—	—
0,1—3,0	56	—	—	4	14	—	9
4—6	16	6		31	13	—	—
7—19	21	15	9	5	4	43	10
≥ 20	5	100	—	—	—	—	—
Общее число случаев	107	9	2	8	11	9	7

— мезомасштаба (тип облачной системы, связанной с фронтом);

— макромасштаба (упорядоченные вертикальные движения на уровне 850 гПа).

На рисунке 7.9 показана взаимосвязь этих процессов для осадков разных градаций.

С увеличением τ повторяемость случаев радиоэха от кучевых облаков больше, чем от слоистообразных. Так, при τ=−150...−300 гПа/12 ч радиоэхо от кучевых облаков отмечается в 67 % случаев (таблица 8.15). Наибольшим значениям $H_э$ соответствуют сравнительно небольшие значения τ. Так, при $Q_{макс} \geq 7$ мм наиболее мощное радиоэхо (большое значение $H_э$) отмечалось при τ = −40...−200 гПа/12 ч. Но уже при τ > −200 гПа/12 ч $H_э$ несколько ниже.

Эти результаты можно объяснить тем, что при наличии термодинамической неустойчивости атмосферы определенные значения упорядоченных вертикальных движений τ =−40...−200 гПа/12 ч способствуют развитию конвекции со средних уровней атмосферы (850—700 гПа) в циклонах и на фронтах. Однако при τ < −200 гПа/12 ч эти движения начинают подавлять конвекцию. Такую ситуацию можно объяснить тем, что при больших значениях τ циклон быстро заполняется и температура воздуха в нем вы-

картинах облачности на снимках с ИСЗ, %

полоса		Обширная облачная система			Пелена неопределенной формы	Периферия КМС и изолированные очаги с горизонтальными размерами 100 км
узкая неяркая	периферия	однородной плотности	неоднородной плотности	перистая слабая		
—	—	—	—	11	67	22
14	14	8	9	12	18	8
12	—	—	—	—	19	19
5	—	9	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—
11	8	4	5	8	16	9

равнивается, что ведет к ослаблению термодинамической неустойчивости.

Таким образом, развитие конвекции на атмосферных фронтах играет существенную роль в формировании в холодный период года осадков разной интенсивности, в том числе и сильных и очень сильных [26].

8 МЕТОДЫ ДИАГНОЗА И ПРОГНОЗА СТИХИЙНЫХ ЯВЛЕНИЙ, СВЯЗАННЫХ С КОНВЕКЦИЕЙ

Опасные и особо опасные конвективные явления развиваются в основном в мезомасштабных облачных системах. Эти системы не всегда можно выявить в полях температуры и влажности. На снимке с ИСЗ и картах сети МРЛ эти облачные системы появляются за 6—12 ч до возникновения явления. Поэтому большое значение имеет методика прогноза конвективных опасных и особо опасных явлений с использованием всей совокупности спутниковых и радиолокационных данных [11].

Классификация методов, описанных в данном РД, приведена в таблице 8.1.

Прогнозы всех указанных явлений составляют по следующей схеме:

1) определяют (рассчитывают) траекторию перемещения облачной системы на период прогноза, при составлении прогнозов для пункта см. п. 5.4.4;

2) определяют исходные данные (параметры) в облачной системе вдоль траектории перемещения или по квадратам пространства 300× 300 км по наблюдениям в 0 ч СГВ;

3) определяют эволюцию параметров облачности по правилам, изложенным в п. 5.5;

4) рассчитывают (определяют) прогнозируемое явление по формулам или графикам.

Прогнозы можно составлять для территории в радиусе 150 км от пункта и по квадратам пространства 300× 300 км (см. п. 8.4.2).

8.1 Теоретические предпосылки методов прогноза ливней

Уравнения[1] для расчета $Q_{макс}$ и $\overline{Q}$ [9] имеют вид:

$$Q_{макс} = 0{,}87 w_{макс} - 0{,}023 w_{макс}\, \tau_{850}\,, \qquad (8.1)$$

$$\overline{Q} = 0{,}30 Q_{макс}\,. \qquad (8.2)$$

Когда в ночные и утренние сроки наблюдения не ожидается прохождение облачных систем, уравнения (8.1) и (8.2) можно использовать для расчета количества осадков по данным аэрологического радиозондирования способом, описанным в Руководстве по краткосрочным прогнозам погоды (см. п. 2). Параметр $w_{макс}$

[1] Методические указания. Усовершенствованный метод прогноза количества осадков по данным об облачности с ИСЗ (см. п. 2).

можно выразить через произведение радиолокационных параметров облаков $H_{в_{макс}} \lg Z_{макс}$ или через максимальную верхнюю границу облака $H_{в_{макс}}$ и форму облачности. С учетом зависимостей (7.6) и (7.7) формула для расчета максимального количества осадков[1] принимает вид:

$$Q_{макс} = \beta H^2_{в_{макс}} (1 - \alpha \tau_{850})\,, \qquad (8.3)$$

где $\beta = 0{,}17$ мм$^{-1}$ для облачных систем конвективных форм;
$\beta = 0{,}075$ мм$^{-1}$ для слоисто-дождевых облаков;
$\alpha = 0{,}026/12$ ч/гПа.

В формулу (8.3) подставляют значение $H_{в_{макс}}$, измеренное в миллиметрах. Для этого значение $H_{в_{макс}}$, измеренное в километрах, умножают на 10^{12}.

Подставляя значение $w_{макс}$ из уравнения (4.3) в уравнение (8.1), получают разделяющие функции:

1) для количества осадков не менее 80 мм:

$$L_1 = 0{,}31 H_{макс} \lg Z_{макс} - 0{,}0082 H_{макс} \lg Z_{макс}\, \tau_{850} - 0{,}083\, \tau_{850} - 26{,}9, \qquad (8.4)$$

если $L_1 \geq 0$, то возможное количество осадков не менее 80 мм;

2) для количества осадков не менее 50 мм:

$$L_2 = 0{,}31 H_{макс} \lg Z_{макс} - 0{,}0082 H_{макс} \lg Z_{макс}\, \tau_{850} - 0{,}083\, \tau_{850} - 46{,}9, \qquad (8.5)$$

если $L_2 \geq 0$, то возможное количество осадков не менее 50 мм.

Количество осадков рассчитывают, используя результаты исследований зависимости относительной массовой доли влаги в облачном слое, участвующем в осадкообразовании (k_0), от типов и формы облачных систем, отображенных на снимках с ИСЗ (см. п. 5.2).

Для прогноза града используют зависимости размера градин в облаке от максимальной скорости восходящего потока $w_{макс}$ и от

[1] Методические указания. Метод прогноза сильных осадков с заблаговременностью 12—36 ч по данным об облачности с ИСЗ (см. п. 2).

Таблица 8.1 — Классификация методов прогноза ОЯ и СГЯ

Вид СГЯ	Метод прогноза	Данные ИСЗ						Данные МРЛ			
		Х.Ск.Сл	Класс облачности	Горизонтальные размеры L	Высота верхней границы $H_в$	Радиояркостная температура		Максимальная высота верхней границы $H_{в\,макс}$	Максимальная радиолокационная отражаемость Z	Горизонтальные размеры L	Число ячеек $N_{яч}$
Ливень	По комплексу термодинамических, спутниковых и радиолокационных данных		+	+				+	+		
	По данным МРЛ							+	+		
	По данным ИСЗ		+		+						
	По данным ИСЗ „Метеосат"		+		+	+					
Град	По комплексу данных		+	+	+						
Шквал	По комплексу данных	+		+				+	+		
	По данным МРЛ							+	+		+
	По данным ИСЗ	+									
Осадки в холодный период года	По комплексу данных		+	+				+	+	+	
	По данным МРЛ							+		+	
	По данным ИСЗ		+	+	+						
Комплекс явлений в градациях ОЯ и СГЯ	По комплексу данных		+					+			

* Используют при отсутствии одного из видов информации (МРЛ или ИСЗ)

по виду используемых в прогнозе данных

Термодинамические параметры атмосферы							Градиент				
Высота изотермы 0 °С $H_{0°C}$	Скорость упорядоченных вертикальных движений τ_{850}	$q_з$	Δq в слое $H_{в\,макс}$ — H_{850}	Температура на верхней границе облака $t_в$	Скорость конвективных движений $w_{макс}$	Характер барического поля	температуры на уровне 850 гПа	давления на уровне 500 гПа	ветра в слое уровень 850 гПа — поверхность Земли	Тенденция давления у поверхности Земли	Скорость ветра на уровне 500 гПа
		+									+
	+										+
	+										+
	+										+
+				+	+						+
							+*	+*	+*		+
											+
							+*		+*	+*	+
			+			+	+				+
			+			+	+*				+
			+			+	+				+
	+	+	+								+

или при нечетком изображении облачности на снимке с ИСЗ.

высоты изотермы 0 °С, а также зависимость уровня естественной кристаллизации от температуры на верхней границе облака и $w_{макс}$.

8.2 Прогноз осадков

8.2.1 Прогноз максимального количества фронтальных осадков по радиолокационным, спутниковым и метеорологическим данным наблюдений на текущий день[1]

Данный метод прогноза фронтальных осадков дополняет существующие термодинамические методы [39] в тех случаях, когда ожидается прохождение фронтальной или циклонической облачности через район прогноза.

Когда в момент составления прогноза на снимке с ИСЗ отмечают перистую облачность или следы облачности, то прогноз составляют по методам, рассмотренным в Руководстве по краткосрочным прогнозам погоды (см. п. 2).

Таблица 8.2 — Перевод значений интенсивности $\lg Z_{макс}$ в цифрах кода в истинное значение

Интенсивность, обозначенная у символа явления на карте данных МРЛ	$\lg Z_{макс}$	Примечание
2	1,1	
4	1,6	Если на карте МРЛ отсутствуют грозы
	2,7	Если индекс интенсивности стоит у символа грозы
6	3,5	Расчетное количество осадков определяют с погрешностью 25 %
8	4,0	То же

Когда фронтальная облачность проходит через район прогноза, количество осадков определяют следующим образом.

В ожидаемой облачной системе по данным карты сети МРЛ в 00 ч СГВ определяют:

[1] Методическое письмо. Прогноз фронтальных осадков по данным наблюдений МРЛ и ИСЗ (см. п. 2).

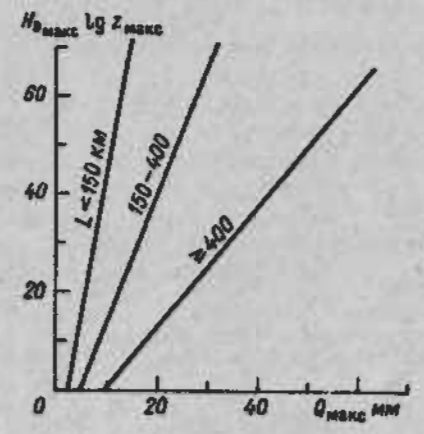


Рисунок 8.1 — График для расчета максимального количества осадков по произведению $H_{в_{макс}} \lg Z_{макс}$ для облачных систем разных размеров.

1) значение $\lg Z_{макс}$ в цифрах кода (его переводят в истинное значение по таблице 8.2) с учетом эволюции,

2) максимальную высоту радиоэха $H_{в_{макс}}$ в километрах с учетом эволюции.

Значение $Q_{макс}$ рассчитывают, используя график на рисунке 8.1, построенный для различных облачных систем:

1) для скоплений кучево-дождевых облаков с горизонтальными размерами $L \geq 400$ км или когда ожидается слияние облаков:

$$Q_{макс} = 0{,}84 H_{в_{макс}} \lg Z_{макс} + 8{,}86\,; \qquad (8.6)$$

2) для облачных систем на снимке с ИСЗ в виде полосы при $L = 50...400$ км:

$$Q_{макс} = 0{,}40 H_{в_{макс}} \lg Z_{макс} + 4{,}25\,; \qquad (8.7)$$

3) для изолированных конвективных облаков с горизонтальными размерами $L < 150$ км:

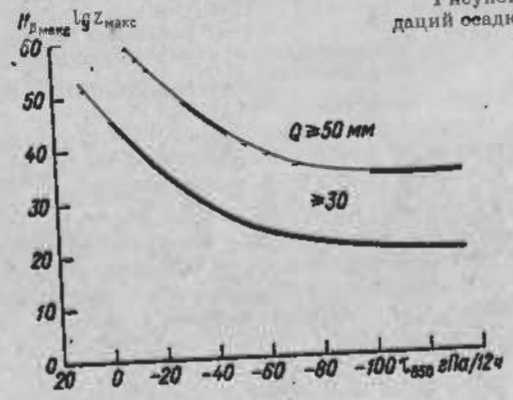
$$Q_{макс} = 0{,}24 H_{в_{макс}} \lg Z_{макс} + 2{,}46\,. \qquad (8.8)$$

8.2.2 Прогноз количества осадков не менее 30 и не менее 50 мм по данным МРЛ и данным о вертикальных упорядоченных движениях на уровне 850 гПа

В ожидаемой облачной системе определяют с 00 ч СГВ следующее:

1) максимальную высоту радиоэха $H_{в_{макс}}$ с учетом эволюции,

Рисунок 8.2 — График для прогноза градаций осадков.



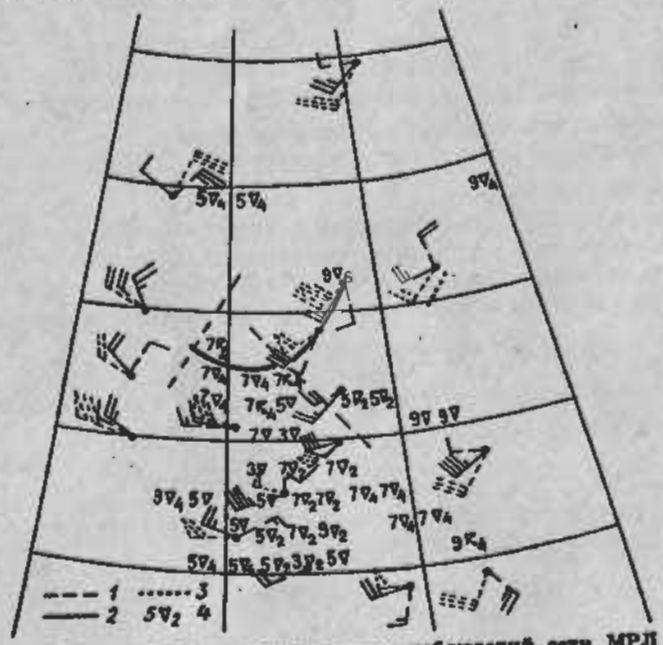


Рисунок 8.3 — Карта данных наблюдений сети МРЛ 17.06.78 г. 00 ч СГВ.

1—3 — направление и скорость ветра на уровнях 850, 700 и 500 гПа соответственно; 4 — верхняя граница облака, вид явления, интенсивность в цифрах кода.

2) максимальную радиолокационную отражаемость lg $Z_{макс}$ с учетом эволюции,

3) упорядоченные вертикальные движения на уровне 850 гПа τ_{850}.

При малоградиентных полях давления у поверхности Земли параметр τ_{850} определяют в узле сетки по направлению перемещения облачных систем и по данным таблицы 5.3. Из определенных значений τ_{850} выбирают то, к которому относится наиболее опасная градация осадков.

Градации осадков определяют по рисунку 8.2 или рассчитывают по формулам (8.4) и (8.5).

Пример — Составление прогноза количества осадков на 17.06.78 г.

Вначале определены направление и скорость перемещения облачной системы к Москве. На рисунке 8.3 проведена траектория перемещения облаков на теку-

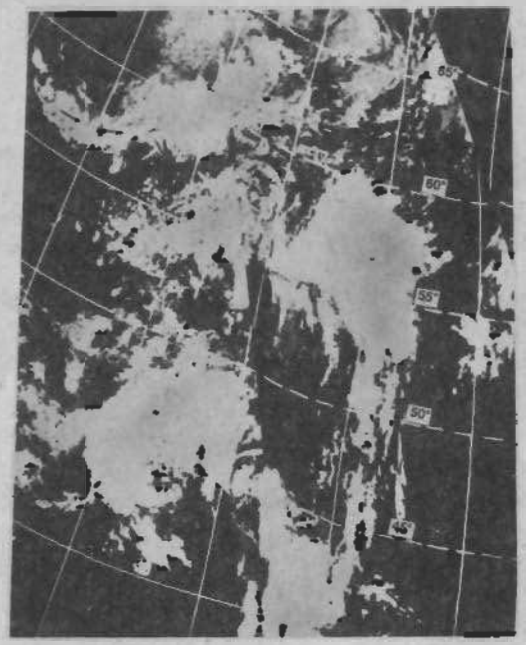


Рисунок 8.4 — Снимок облачности с ИСЗ за 16.06.78 г. 20 ч 28 мин СГВ.

щий день. По длине траектории определены значения $H_{в_{макс}} = 7$ км и $\lg Z_{макс} = 4$ (в цифрах кода) для смещающихся облачных систем. С учетом эволюции днем ожидалось значение $H_{в_{макс}} = 9$ км, а значение $\lg Z_{макс}$ не изменялось, так как горизонтальный градиент температуры на уровне 850 гПа $\Gamma_t < 1{,}6$ °С/100 км.

По таблице 8.2 определено значение $\lg Z_{макс} = 2{,}7$.

Произведение $H_{в_{макс}} \lg Z_{макс} = 24{,}3$.

Размеры облачной системы $L \geq 400$ км (рисунок 8.4).

По рисунку 8.2 определено $Q_{макс} > 30$ мм.

8.2.3 Прогноз максимального количества осадков по данным с ИСЗ на текущие сутки

В ожидаемой облачной системе по снимку с ИСЗ определяют следующее:

1) характер облачности по таблице 8.3,
2) высоту верхней границы облачности по таблице 5.2,
3) форму облачности по п. 5.2,
4) градацию ожидаемого значения $Q_{макс}$ по графику (рисунок 8.5).

Графики на рисунке 8.5 рассчитаны по формуле

$$Q_{макс} = \gamma \lambda H^2_{в_{макс}}, \qquad (8.9)$$

где λ — коэффициент, зависящий от типа облачной системы, который определяют по таблице 8.3;

$\gamma = 0{,}087$ — для конвективных облаков;

$\gamma = 0{,}048$ — для слоисто-дождевых облаков.

Таблица 8.3 — Зависимость λ от характера облачности на снимке ИСЗ

Характеристика облачности	λ
Изолированные кучево-дождевые облака с линейными размерами $L \leq 150$ км, когда в тылу нет крупномасштабной облачной системы	1
Фронтальная облачность с $L \leq 300$ км	2
Скопление кучево-дождевых облаков с $L = 300...500$ км и изолированные конвективные облака, примыкающие к крупномасштабной облачной системе	3
Скопления кучево-дождевых облаков с $L > 500$ км	4
Облачность при конвергенции крупно- и мезомасштабной или двух крупномасштабных облачных систем	5

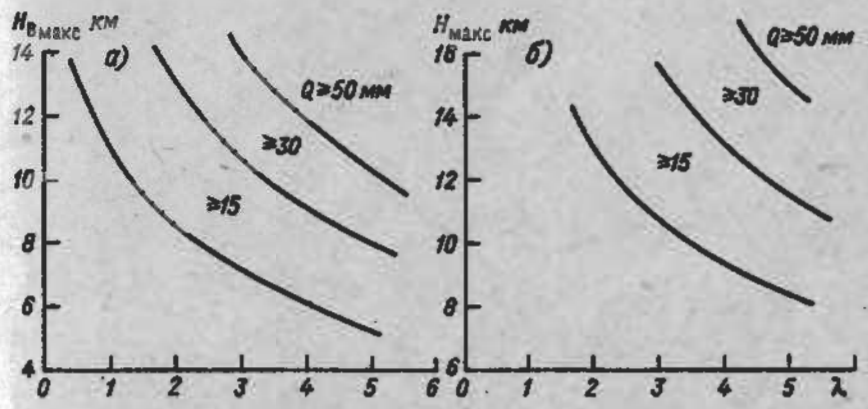


Рисунок 8.5 —График для расчета градации максимальных осадков по данным снимка облачности с ИСЗ.

а — конвективная облачность, б — слоисто-дождевая облачность.

8.2.4 Прогноз максимального и среднего количества осадков по данным с ИСЗ на последующие сутки

При составлении прогноза определяют следующее:

1) высоту верхней границы облачности $H_{в_{макс}}$ по таблице 5.2. При наличии данных МРЛ в этой облачной системе $H_{в_{макс}}$ лучше определять по этим данным с учетом эволюции;

2) упорядоченные вертикальные движения τ_{850} в узле сетки по направлению перемещения облачной системы на карте прогностических значений τ_{850}.

Прогноз $Q_{макс}$ составляют по графикам (рисунок 8.6) в зависимости от формы облачности. Графики рассчитаны по формулам (8.2) и (8.3).

Прогноз среднего количества осадков Q составляют по графику (рисунок 8.7) или по формуле 8.4.

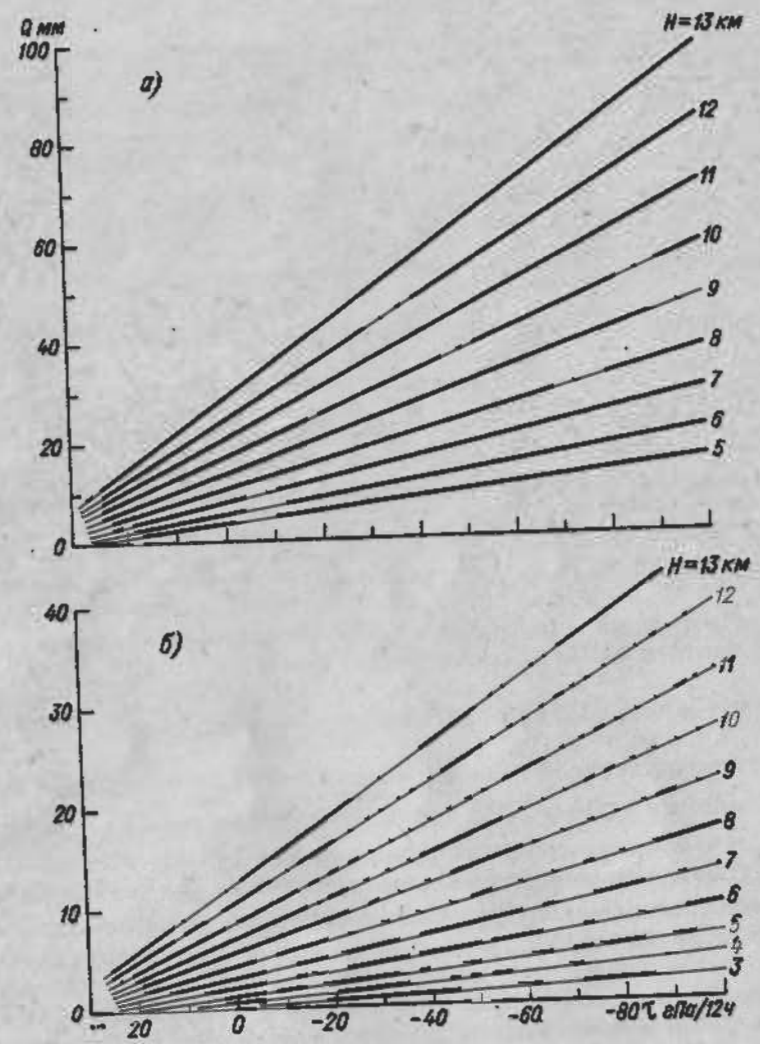


Рисунок 8.6 — График для расчета количества осадков, выпадающих из конвективной облачности (а) и из слоисто-дождевых облаков (б).

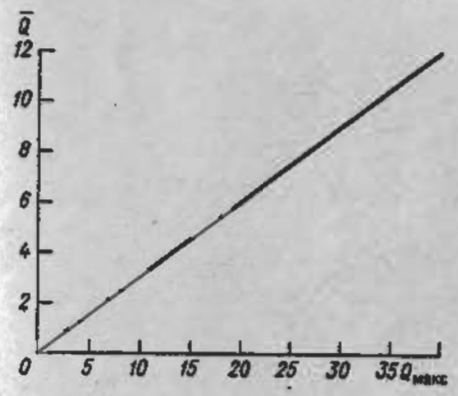


Рисунок 8.7 — График для расчета среднего количества осадков.

8.2.5 Прогноз максимального и среднего количества осадков по данным с ИСЗ „Метеосат" на текущие сутки для Москвы и Московской области

Последовательно просматривая изображения одной и той же территории через небольшие промежутки времени (1—2 ч) на дисплее станции, можно определить динамическую картину развития облачных систем, тем самым уточняя направление их перемещения и эволюцию.

Информация, получаемая ИСЗ „Метеосат", позволяет вычислять скорость и направление перемещения облачной системы путем интерполяции между последовательными снимками (с учетом широты места) в зависимости от стадии развития облачной системы.

Прогноз по данным наблюдений ИСЗ „Метеосат" состоит из следующих этапов:

1) выявляют на экране дисплея активную часть конвективной системы, ожидаемой на текущий день в Москве и области, и измеряют температуру на верхней границе, превышающей все вершины облаков. При отсутствии конвективных облаков определяют температуру верхней границы слоисто-дождевых облаков;

2) зная температуру на верхней границе облака, по данным карт барической топографии или по данным радиозондирования атмосферы определяют параметр $H_{в_{макс}}$;

3) определяют значение τ_{850} по способу, изложенному в п. 8.22;

4) количество осадков $Q_{макс}$ и $\overline{Q}$ рассчитывают по формулам (8.1) и (8.2) или графикам, приведенным на рисунках 8.5—8.7 в зависимости от формы облачности.

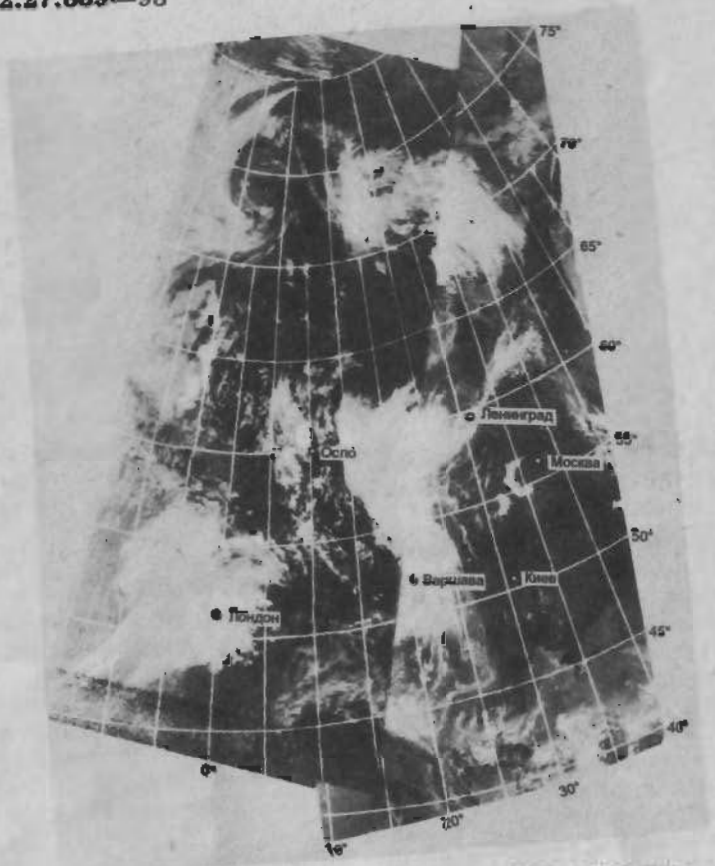


Рисунок 8.8 — Снимок облачности с ИСЗ за 28.07.88 г. 06 ч 20 мин СГВ.

Пример — Прогноз СГЯ составлен 28 июля 1988 г. для районов Прибалтики по данным наблюдений с ИСЗ.

Через районы Прибалтики 28—29 июля 1988 г. смещался глубокий активный циклон, сформировавшийся на волне холодного фронта над территорией Польши. Температура воздуха в теплом секторе циклона составляла 20—27 °С, в тыл циклона осуществлялась адвекция холодного воздуха с районов Финляндии, что обусловило понижение температуры воздуха на юго-западе Латвии до 12—16 °С.

Значительный термический контраст в области фронтальных разделов и усиленная циркуляция воздуха вблизи центра циклона создали благоприятные условия для интенсивного восходящего движения влажного воздуха.

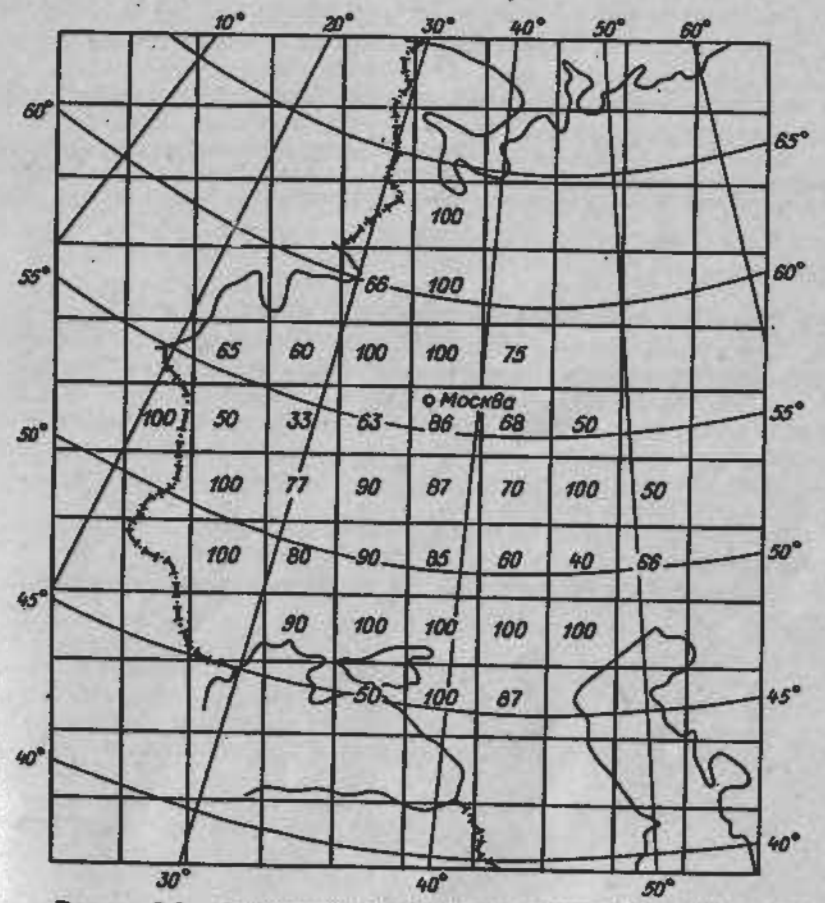


Рисунок 8.9 — Распределение вероятности развития ОЯ и СГЯ по ЕТ СНГ.

Вероятность дана в процентах.

На снимке облачности с ИСЗ за 06 ч 20 мин СГВ 28 июля выделяется конвективное облако над районами Прибалтики в виде скоплений Cb округлой формы (рисунок 8.8). По данным наблюдений МРЛ за 06 ч СГВ, в этой облачности отмечены грозовые облака с верхней границей $H_{в_{max}}$ = 11 км, с учетом эволюции $H_{в_{max}}$ = 13 км.

По данным диагностических карт вертикальных токов, значение $\Delta\tau_{850}$ = = −110 гПа/12 ч. Облачность конвективная.

По данным таблицы 8.3, значение $\lambda = 4$, фактическое значение $H_{в_{макс}} = 10$ км, а с учетом эволюции $H_{в_{макс}} = 13$ км. По рисунку 8.5 определена градация количества осадков $Q_{макс} \geq 50$ мм.

В последующие сутки $H_{в_{макс}} = 13$ км, $\tau_{850} = -110$ гПа/12 ч. По рисунку 8.6 определено значение $Q_{макс} = 90$ мм.

По рисунку 8.9 составлен прогноз СГЯ в районах Прибалтики. В этих районах выпало от 75 до 99 мм осадков, а с 17 до 20 ч у побережья Рижского залива наблюдался сильный шквал, в результате которого имелись человеческие жертвы.

8.3 Град

8.8.1 Прогноз опасного и особо опасного града с грозой

Для определения возможности образования и выпадения града на поверхность Земли используют зависимости (рисунок 8.10), основанные на механизме образования града (см. п. 7.2). Предполагают, что для образования града необходимо, чтобы верхняя граница облака достигала уровня естественной кристаллизации влаги. Вероятность выпадения града определяют с учетом высоты изотермы 0 °С.

Для прогноза града в градациях ОЯ и СГЯ необходимы следующие материалы:

1) снимки облачности с ИСЗ в ночные и предутренние часы суток,

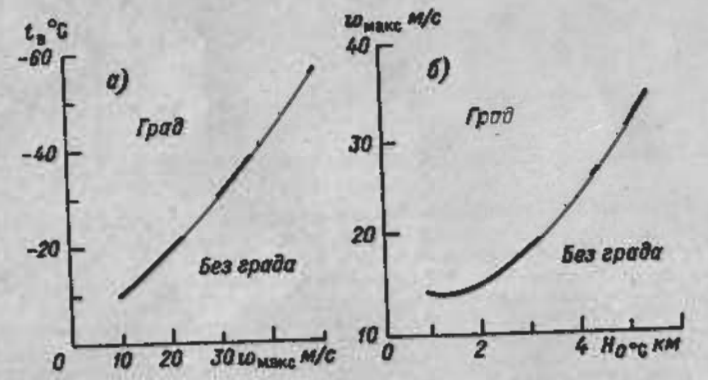


Рисунок 8.10 — График для определения зоны града в облаке (*а*) и на поверхности Земли (*б*) по параметрам $t_в$, $w_{макс}$ и $H_{0°С}$.

2) карта данных МРЛ в 00 и 08 ч СГВ,

3) данные радиозондирования в 00 ч СГВ.

Прогноз составляют в следующей последовательности:

1) определяют характер ожидаемой облачности. Опасный и особо опасный град возникает в определенных облачных системах, выделяющихся на снимке с ИСЗ:

— в скоплениях кучево-дождевых облаков с четкими границами овальной, круглой или грибообразной формы, нередко с „ножкой гриба" в виде пальца с горизонтальными размерами $L \geq 300$ км;

— в зонах конвективной облачности молодого циклона с активным холодным фронтом.

Если прогнозируемая облачная система соответствует одному из таких типов, то определяют параметр $H_{в_{макс}}$.

Если на снимке отсутствуют картины облачности, характерные для развития града, то дают прогноз „без града";

2) определяют параметр $H_{в_{макс}}$. Данный параметр определяют по снимкам с ИСЗ, используя таблицу 5.2, или по данным МРЛ. Если $H_{в_{макс}} \geq 10$ км, то по данным карт барической топографии или по данным радиозондирования атмосферы рассчитывают температуру $t_в$ на высоте $H_{в_{макс}}$ и высоту изотермы 0 °С $H_{0°С}$;

3) определяют параметр $w_{макс}$. Используя значение $H_{в_{макс}}$, определяют по графику (рисунок 8.11) параметр $w_{макс}$ только для конвективных облаков;

4) определяют возможность образования града. Прогноз образования града в облаке составляют по графику (рисунок 8.10 *а*). При положительном результате прогноза определяют возможность выпадения града на поверхность Земли по графику (рисунок 8.10 *б*).

Град диаметром не менее 1 см может выпасть при $w_{макс} \geq 20$ м/с, что соответствует высоте верхней границы облака $H_{в_{макс}} = 10$ км.

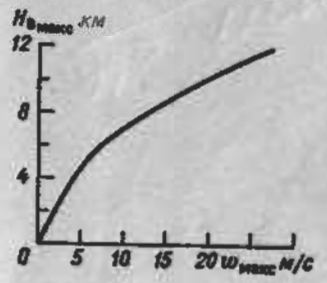


Рисунок 8.11 — График для определения $w_{макс}$.

Пример — Прогноз особо опасного града составлен на 2 июня 1990 г. для района Северного Кавказа.

Анализ снимка облачности за 1 июня 16—19 ч 35 мин СГВ показал, что над районами Украины и Северного Кавказа расположен облачный вихрь, связанный с циклоном, впереди которого отдельные неяркие конвективные облака (рисунок 8.12). На снимке за 1 июня 22 ч 44 мин СГВ в районе Тихорецка $\lambda = 40°$, $\varphi = 45°$ отчетливо видна конвективная облачность грибообразной формы с „ножкой", вытянутой в виде пальца (рисунок 8.12 *б*).

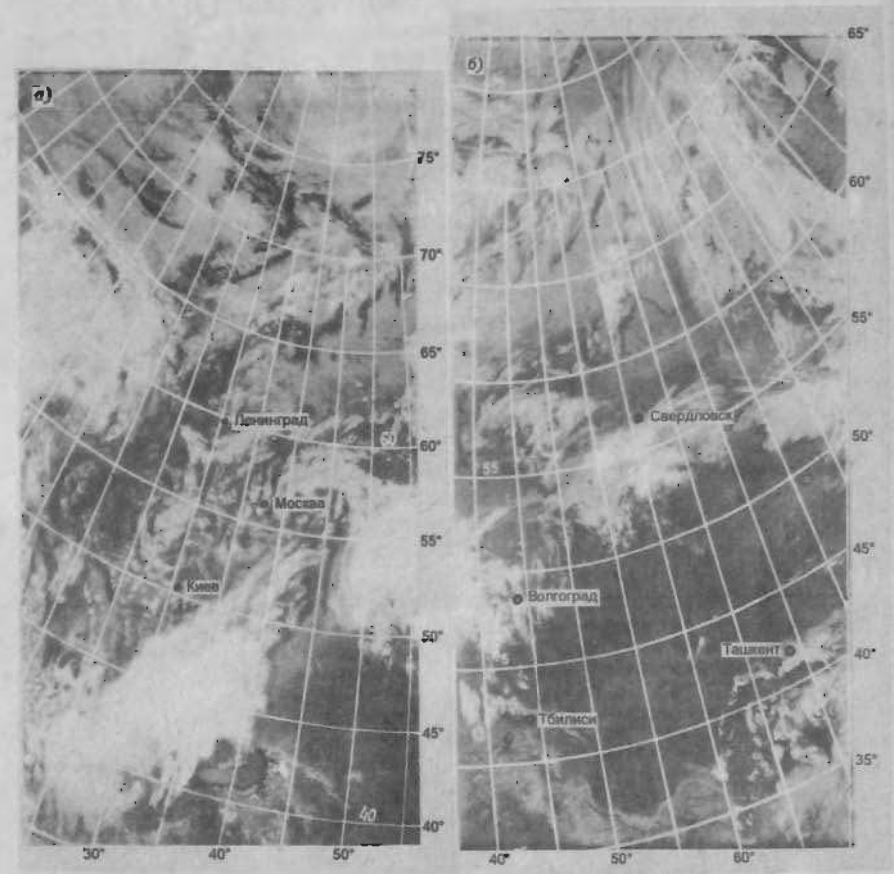


Рисунок 8.12 — Картины облачности на снимке с ИСЗ за 01.06.90 г. в 16—19 ч 35 мин СГВ (*а*) и 22 ч 44 мин СГВ (*б*).

По таблице 5.2, высота верхней границы облака $H_{в_{макс}}$ = 12 км; по данным МРЛ, $H_{в_{макс}}$ = 13 км. Температура на этой высоте $t_в$ = −50 °С.

Высота изотермы 0 °С $H_{0°C}$ = 3,6 км.

При $H_{в_{макс}}$ = 12 км значение $w_{макс}$ = 28,8 м/с; при $H_{в_{макс}}$ = 13 км значение $w_{макс}$ = 33,8 м/с.

На графиках (рисунок 9.15) данные значения параметров попадают в зону града с возможным диаметром не менее 1 см.

Фактическая погода: в Тихорецке был ливень и выпал град диаметром 3 см.

8.4 Прогноз сильных шквалов с использованием данных ИСЗ и МРЛ

8.4.1 Обоснование методов прогноза

Сильные шквалы относятся к мезомасштабным явлениям погоды (ММЯ). Сложность исследования механизма их развития и разработки методов их диагноза и прогноза определяются небольшим масштабом этих явлений как во времени, так и в пространстве и редкой сетью станций метеорологических и аэрологических наблюдений. Расстояние между станциями превосходит линейные размеры масштаба ММЯ.

До настоящего времени нет численных моделей по расчету конвективных ММЯ, работающих в реальном масштабе времени[1]. Существующие же автоматизированные и ручные термодинамические методы, построенные на применении статистических зависимостей, имеют низкую оправдываемость при прогнозе градаций сильных и очень сильных конвективных ММЯ (ливни, град, шквалы).

Для прогноза шквалов рекомендованы несколько неавтоматизированных синоптико-термодинамических методов[2]. По данным таблицы 8.4, в методах П. Г. Пантелеева, Т. О Решетова, Фобуша—Миллера и Р. А. Ягудина использованы в основном параметры, характеризующие термодинамическое состояние атмосферы, а в методе Пескова—Снитковского учтены динамика атмосферы в слое поверхность Земли — уровень 500 гПа и мощность слоя неустойчивости $\Delta H^{конв}_{конд}$.

---

[1] Руководство по краткосрочным прогнозам погоды. Ч. 1 (см. п. 2).

[2] Там же и в Руководстве по прогнозированию метеорологических условий для авиации (см. п. 2).

Таблица 3.4 — Термодинамические параметры атмосферы, используемые в различных методах прогноза шквалов [18]

Метод	$H_{инд}$, гПа	$\sum_{0}^{500} V_{\theta}$, м/с	T_{max} Земли, °С	T_d Земли, °С	ΔT^{θ}_{500}, °С/100 км	Δp за фронтом, гПа за 3 ч	ΔT^{θ}_{m}, °С	ΔT^{500}_{m}, °С	$\sum_{500}^{600} (T - T_d)$, °С	$\Delta T = T_m - \theta_m$	$\Delta T = T_m - \theta'_m$
Пескова — Ситкевского	+	+									
Пантелеева			+	+	+	+					
Решетова							+	+	+		
Фобуша — Миллера										+	
Фобуша — Ягудина											+

В оперативном режиме при прогнозе сильных шквалов эти методы имели низкую оправдываемость. Это можно объяснить тем, что для прогноза сильных шквалов необходимо учитывать некое недостающее звено, образующееся в результате комплексного взаимодействия атмосферных процессов всех масштабов при их развитии.

Комплексное использование аэросиноптических, спутниковых и радиолокационных данных наблюдений позволило определить некоторые характерные особенности состояния атмосферы и облачности на снимке с ИСЗ и картах сети МРЛ при развитии сильных шквалов.

При развитии сильных шквалов в дневное время суток уже накануне, независимо от рассчитанного состояния неустойчивости, в ночные и предутренние часы (00 ч — 03 ч СГВ) на снимке ИСЗ в ИК-диапазоне обнаруживаются Х.Ск.Сb (см. рисунок 7.4 *в—е*), имеющие определенную форму и вполне определенные размеры. Сопоставление синхронных данных наблюдений ИСЗ и МРЛ для этих случаев показывает, что высота радиоэха от Х.Ск.Сb в 87 % случаев превышает 13 км, в 10 % случаев составляет 10—12 км и в 3 % случаев составляет 9 км. Это свидетельствует о том, что сильные шквалы связаны с зонами развития очень мощной конвекции, имеющими определенные ограниченные размеры. По терминологии, употребляемой в зарубежной литературе, Х.Ск.Сb относятся к мезомасштабным системам глубокой конвекции. В последние годы, особенно в США, для обозначения скоплений Сb квазикруговой формы введен термин „мезомасштабный конвективный комплекс" (МКК), МКК генерируют такие опасные явления погоды, как торнадо, крупный град, интенсивные ливни, паводки, катастрофические порывы ветра (шквал) и грозовую деятельность [30]. Почти каждый пятый МКК приводит к разрушениям и человеческим жертвам. Согласно классификации Мэддокса [30], выявленные Х.Ск.Сb близки к системам симметричного типа, к которым относятся скопления Сb и МКК α - и β-мезомасштаба [25, 27, 40].

Отличительными особенностями таких МКК в умеренных широтах являются компактность их облачной системы и развитие, происходящее преимущественно в вечерние и ночные часы. МКК по своей морфологии схожи с выявленными Х.Ск.Сb.

До настоящего времени нет достаточной информации для выявления внутренней динамики кучево-дождевых облаков, обусловливающих сильные шквалы. Можно лишь утверждать, что последние развиваются в условиях специфического взаимодействия атмосферных процессов всех масштабов, способствующих развитию мезовихря с горизонтальной осью вращения.

Эти условия трудно рассчитать в оперативном режиме даже при наличии достаточной информации. Однако их можно определить с заблаговременностью 6—12 часов по значениям пространственных параметров и эволюции облачности в ночные и предутренние часы суток.

Пример — На рисунке 7.4 *а* приведено фото облачности с ИСЗ 2 ч 56 м СГВ. На этом фото видно Х.Ск.Cb, расположенное в 50—200 км к югу и юго-востоку от Ленинграда, что указывает на благоприятные условия для развития сильных шквалов [20, 25, 27]. Выявленное Х.Ск.Cb имело округлую форму с четко выраженными границами, линейные размеры которого, согласно масштабу снимка, соответствуют 250 км, т. е. линейные размеры данного МКК соответствуют критерию Х.Ск.Cb: $100 \leq L \leq 450$ км. Наличие Х.Ск.Cb указывает на благоприятные условия для развития сильных шквалов.

На рисунке 8.13 *а* приведена пространственная картина радиоэха в радиусе обзора МРЛ Ленинграда в 03 ч СГВ — срок, синхронный со сроком наблюдений за облачностью с ИСЗ (02 ч 50 мин СГВ).

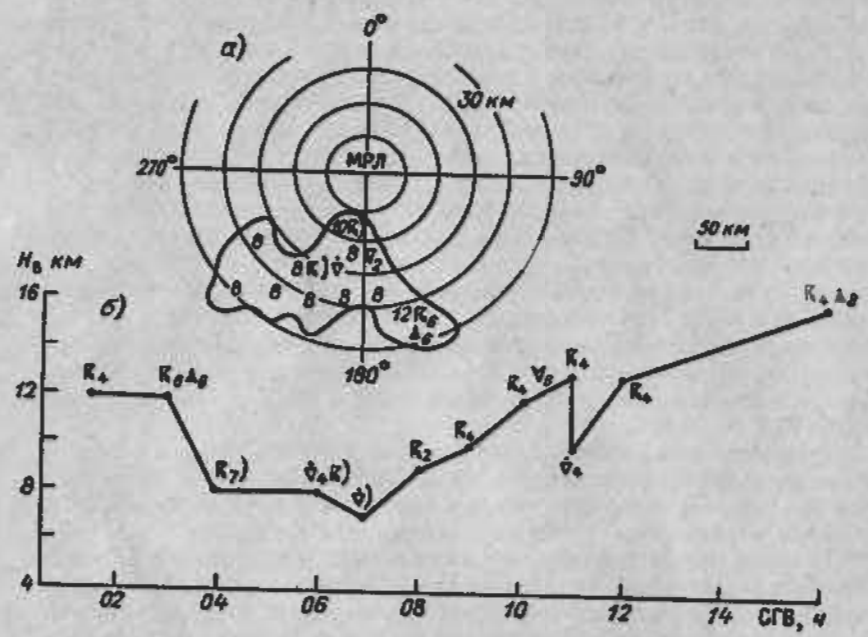


Рисунок 8.13 — Карта данных МРЛ в 03 ч СГВ 21.07.88 г. (*а*) и изменение высоты и интенсивности радиоэха от Х.Ск.Cb по времени (*б*).

В азимуте 145—160° на расстоянии 120—150 км к юго-юго-востоку от Ленинграда отмечено мощное радиоэхо от Х.Ск.Cb с $H_в$ = 12 км и $\lg Z_{макс}$ = 6 в цифрах кода, а также с грозой и градом. В 60 км к югу от города отмечено радиоэхо от грозового облака, для которого $H_в$ = 10 км. Согласно синоптическому анализу, эти значения радиоэха связаны с облачностью холодного фронта с волнами, сместившегося вместе с депрессией к северо-северо-востоку.

На рисунке 8.13 *б* приведено также изменение во времени $H_в$ от Х.Ск.Cb, сместившихся к городу за период от 5 ч до 20 ч мск. Следовательно, уже в предутренние часы суток (02—04 ч СГВ) эти Х.Ск.Cb имели $H_в$ = 11 км. В дальнейшем интенсивность радиоэха ослабла, что выражено в понижении $H_в$ до 8 км в период 05—09 ч СГВ. По мере прогрева подстилающей поверхности и усиления термодинамической неустойчивости мощность радиоэха увеличивалась. Одновременно зона высокой мощности радиоэха перемещалась к северу в сторону города. Около 11—12 ч СГВ мощность радиоэха увеличивалась: $H_в$ = 13 км; $\lg Z_{макс}$ = 6 в цифрах кода.

По данным метеорологических наблюдений, с этим значением радиоэха связаны шквалы с $v_в$ = 21...24 м/с в самом городе. Падение давления в городе еще в утренние часы составляло около 2,0 гПа/3 ч. Горизонтальный градиент составлял к 15 ч 1—2 °С/100 км. Это указывает на существование благоприятных условий для сохранения и усиления конвекции.

Второй очаг радиоэха от Х.Ск.Cb, увеличиваясь в дневное время, перемещался к северо-востоку от города. Одновременно смыкались два радиоэха от облачных систем, принадлежащих двум близко расположенным фронтам с волнами. При их слиянии значение $H_в$ увеличилось до 15 км (рисунок 8.13 *б*). С этими облаками связаны шквалы $v_в$ = 24...28 м/с. В районе развития шквалов горизонтальный градиент температуры составлял около 3 °С/100 км.

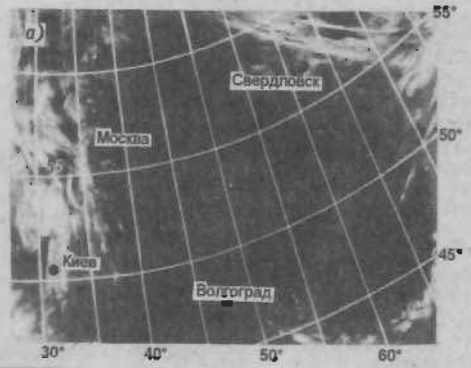
Таким образом, по приземным картам масштаба 1 : 2 500 000 можно достаточно точно определить место возникновения сильных шквалов, прослеживая картину распределения значений радиоэха от облачных систем, их перемещение и эволюцию по данным одного МРЛ в радиусе его обзора и выявляя по пути их перемещения участки с большими градиентами температуры воздуха и тенденцией давления.

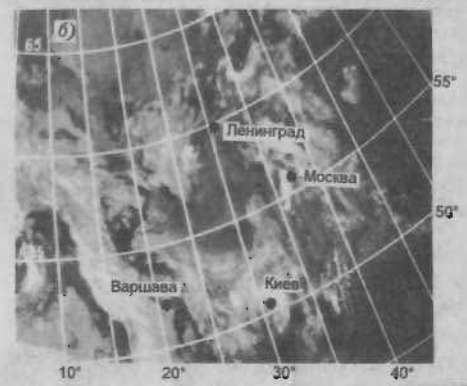
Пример — Анализ развития мощной конвекции в Московском регионе 25—27 августа 1988 года.

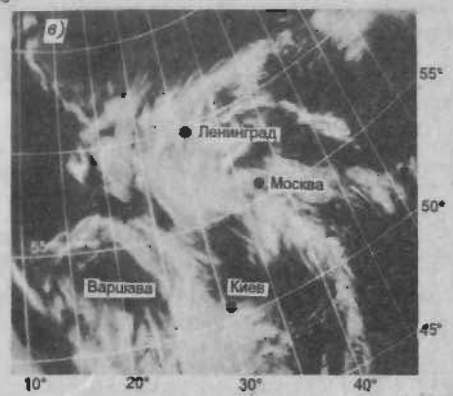
Погода в этот период определялась влиянием приближающегося к Москве 25 августа меридионально ориентированного фронта с волнами, создавшего благоприятные условия для развития конвективной облачности. В последующие дни этот фронт был малоподвижен, 26 августа он располагался вблизи Москвы, а 27 августа проходил через Москву.

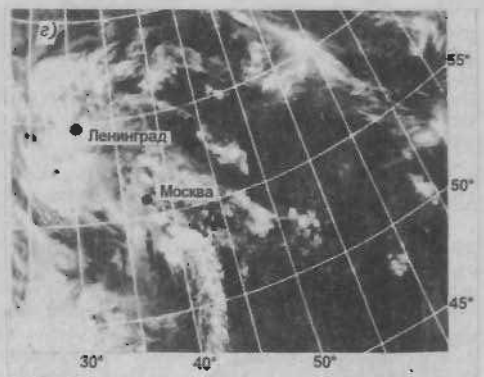
Градиент температуры воздуха на поверхности 850 гПа в дневное время на участках фронта вблизи Москвы 25 августа составлял 1—1,2 °С/100 км, 26 августа — 1,0—3,0 °С/100 км, а 27 августа — 1,2—1,5 °С/100 км. Эти данные указывают на достаточно высокую активность фронтальной системы. Следовательно, сложившаяся обстановка благоприятная для развития мощной облачности. Рассмотрим синхронные данные наблюдений ИСЗ и МРЛ за рассмотренный период.

На рисунке 8.14 приведен снимок облачности с ИСЗ в ИК-диапазоне в предутренние и дневные часы суток. В утренние часы в радиусе 250 км от Москвы Х.Ск.Cb не отмечены.









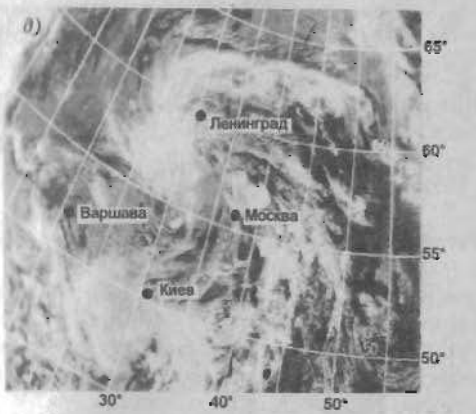


Рисунок 8.14 — Снимок облачности с ИСЗ в ИК-диапазоне в районе Московской области.
а — 25.06.88 г., 01 ч 24 мин СГВ;
б — 26.06.88 г., 02 ч 54 мин СГВ;
в—д— 27.06.88 г.: 02 ч 44 мин, 05 ч 15 мин и 12 ч 37 мин СГВ соответственно.

На рисунке 8.14 *а* к западу от Москвы видны отдельные МКК, размеры которых меньше критических для Х.Ск.Сb и не превышают 75 км. На рисунке 8.14 *б* к юго-западу от Москвы отмечен МКК удлиненной формы, малый диаметр которого также не превышает 75 км. На рисунке 8.14 *в* Х.Ск.Сb также не обнаружены. На рисунке 8.14 *б* в 150 км к северо-востоку от Москвы обнаружено Х.Ск.Сb округлой формы диаметром более 150 км, но с ним сильные шквалы не связаны, так как в утренние часы отмечено значение $H_{в\,макс} < 11$ км.

На рисунке 8.15 приведены данные МРЛ и фактические данные наблюдений о слабых шквалах с порывами ветра не более 15 м/с.

Данные измерения $H_в$ и $\lg Z_{макс}$ в радиусе обзора МРЛ Внуково в период с 0 ч 25 августа по 24 ч 27 августа 1988 г. (рисунок 8.15) синхронны снимкам облачности с ИСЗ. Здесь же приведены фактически наблюдавшиеся явления погоды, связанные с радиоэхом, и время их существования.

Во все указанные сроки в радиусе 250 км от Москвы развивались мощные конвективные облака с $H_в = 11...13$ км, которые идентифицированы как грозо-градовые. Причем в ночные и утренние часы 25 августа значение $H_в$ от Сb не превышало 8 км, а 26 и 27 августа в эти же часы радиоэхо отсутствовало.

Несмотря на то, что в дневное время для данных МКК с грозами и градом $H_в = 13$ км, они обусловливали развитие лишь слабых шквалов, с порывами ветра не более 15 м/с.

Эти примеры подтверждают вывод о том, что сильные шквалы возникают лишь в тех случаях, когда в ночные и предутренние часы суток отмечены Х.Ск.Сb с положительной эволюцией, которые являются индикатором условий, благоприятных для развития шквалов.

Развитие мощной конвективной облачности в дневное время недостаточно для формирования сильных и очень сильных шквалов.

Чем больше плотность конвекции и чем более она развита, тем интенсивнее развиваются вихревые возмущения [32]. Можно предполагать, что Х.Ск.Сb вызывают образование достаточно сильных вихревых возмущений, способствующих развитию в подоблачном слое вихрей с горизонтальной осью вращения, т. е. шквалов.

Полученные результаты позволяют выделить основные условия для развития сильных шквалов с использованием данных облачности с ИСЗ в ИК-диапазоне:

1) наличие механизма генерации энергии. Это определяют путем выявления Х.Ск.Сb на снимке облачности с ИСЗ в ночные и утренние часы и по данным МРЛ. Х.Ск.Сb способствуют подъему влаги с поверхности Земли в верхние слои тропосферы, что приводит к увеличению потенциальной неустойчивости атмосферы;

2) накопление необходимой энергии неустойчивости. Это определяют по наличию Х.Ск.Сb и по их положительной эволюции в предутренние часы суток, когда термическая неустойчивость естественно затухает;

3) развитие интенсивных вихревых возмущений за счет Х.Ск.Сb;

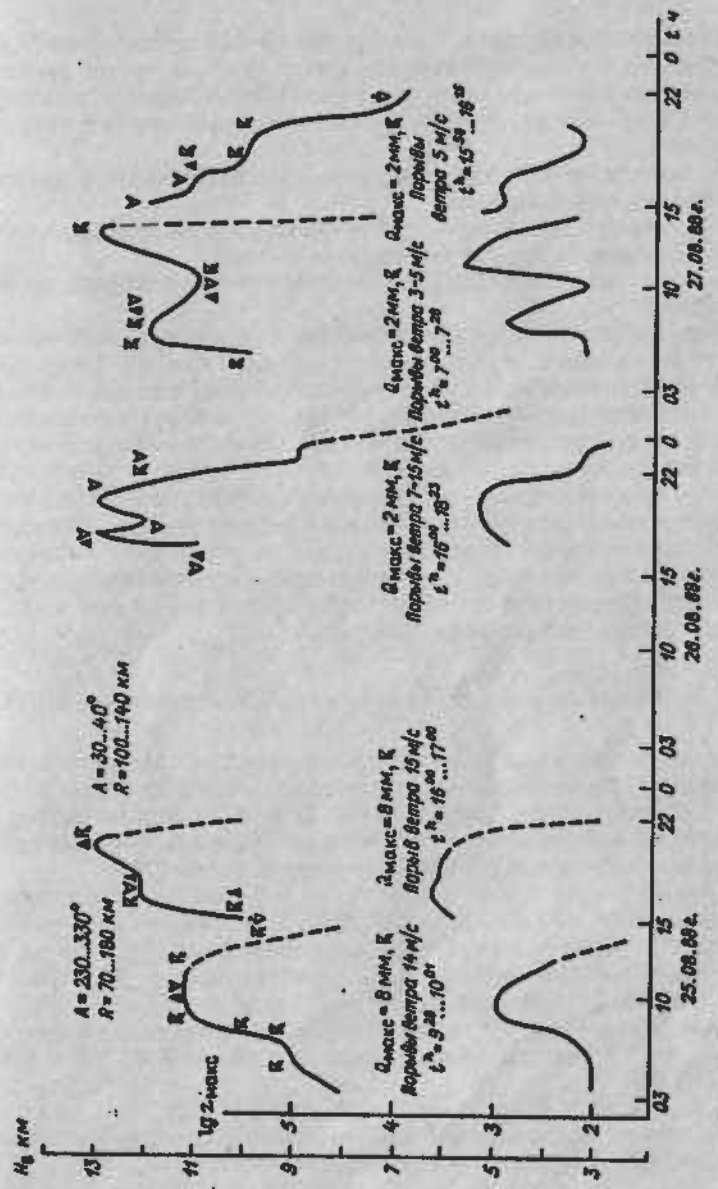


Рисунок 8.15 — Изменения высоты верхней границы и радиолокационной отражаемости радиоэха и сопутствующие им явления погоды.

4) наличие импульса, приводящего к выделению энергии неустойчивости и развитию сверхмощных МКК, а также развитию в подоблачном слое связанных с этими МКК вихрей с горизонтальной осью вращения. Роль подобного импульса играют следующие процессы:

— холодные фронты с волнами, ориентированные преимущественно меридионально;

— развитие циклонической циркуляции на волне фронта;

— сближение двух фронтальных систем;

— циркуляция воздушных частиц в теплом секторе на фронте окклюзии.

Чем интенсивнее процесс генерации энергии и динамики спускового механизма, тем интенсивнее сила ветра при шквалах.

Все это указывает на то, что развитие сильных шквалов связано с возникновением очень большой неустойчивости атмосферы на небольших участках пространства. Выявить эти районы в оперативном режиме по имеющимся картам с редкой сетью пунктов метеорологических и аэрологических наблюдений практически невозможно. Поэтому очень низкой вероятностью обнаружения опасных и стихийных конвективных явлений можно объяснить низкую оправдываемость автоматизированных методов прогнозов шквалов и ливней в градации стихийных на основе выходных данных гидродинамических моделей.

8.4.2 Прогноз сильных шквалов по комплексу данных МРЛ и ИСЗ

Эффективность метода прогноза сильных шквалов наиболее высока при наличии синхронных наблюдений от обоих источников информации об облачности (МРЛ и ИСЗ), при хорошем качестве снимков облачности с ИСЗ и при максимально полной информации во всей сети МРЛ с большой территории [28].

Прогноз составляют с помощью палеток по квадратам пространства 300× 300 км с детализацией 1/4 квадрата (150× 150 км). Палетки строят отдельно для снятия данных МРЛ в масштабе 1 : 5 000 000 (рисунок 8.16 *а*) и снятия данных ИСЗ в масштабе 1 : 25 000 000 (рисунок 8.16 *б*).

Для составления прогноза необходимы следующие материалы:

— карты барической топографии на уровнях 850, 700 и 500 гПа в 00 ч СГВ;

— карты данных сети МРЛ в 00 ч и 03 ч СГВ;

— снимки облачности с ИСЗ за сроки, близкие к срокам наблюдений МРЛ (это примерно около 00 ч и 03 ч СГВ).

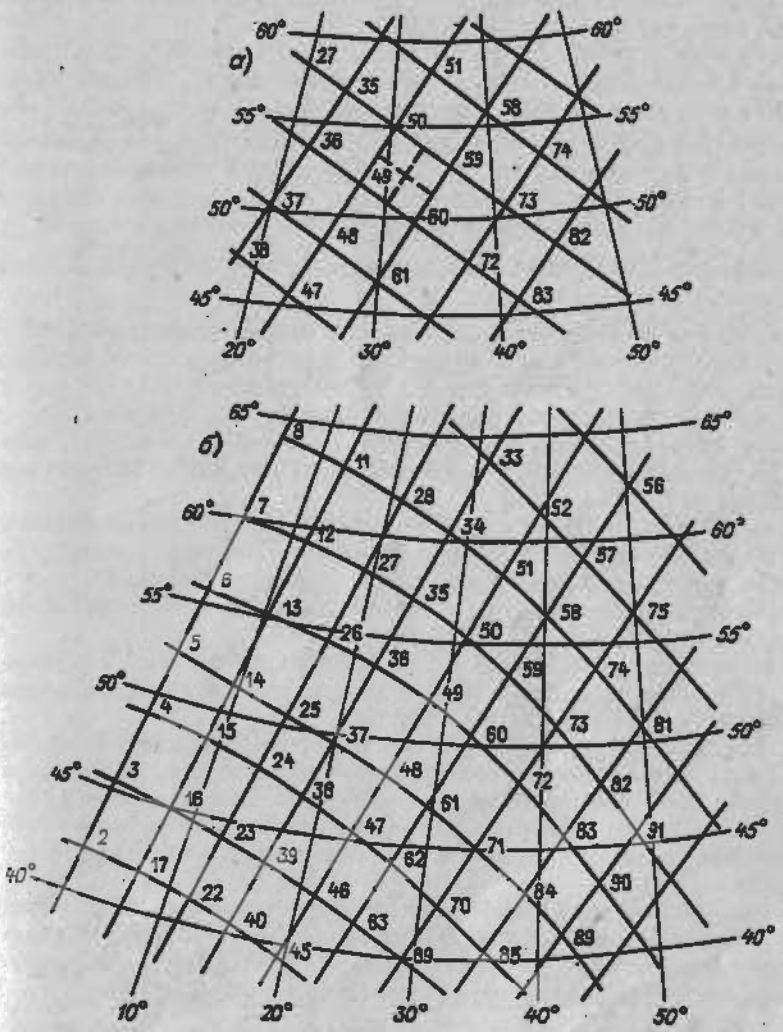


Рисунок 8.16 — Пример палетки для снятия данных с карт сети МРЛ (*а*) и со снимков облачности с ИСЗ (*б*) для прогноза сильных шквалов по территории.

При составлении прогноза выполняют следующие действия:

1) определяют наличие Х.Ск.Сb по данным МРЛ и ИСЗ за ночной срок наблюдений (00 ч СГВ).

На картах сети МРЛ в 00 и 3 ч СГВ параметры Х.Ск.Сb представляют собой радиоэхо от грозовых облаков с $H_в \geq 11$ км (или $H_в \geq 10$ км по данным МРЛ в пункте прогноза) и $\lg Z_{макс} \geq 2{,}7$ (что соответствует цифре „4" по коду RADOB). Для удобства радиолокационный критерий Х.Ск.Сb по данным МРЛ обозначен через H^*, что соответствует наличию грозовых и/или градовых облаков с максимальной высотой верхней границы $H_{в_{макс}} \geq 11$ км и $\lg Z_{макс} \geq 4$ в цифрах кода. При высоте нулевой изотермы[1] $H_{0\,°C} \leq 2{,}5$ км значение $H_{в_{макс}} \geq 9$ км.

На снимке облачности с ИСЗ в срок, ближайший к 00 и 03 ч СГВ, Х.Ск.Сb имеют вид очень ярких выделяющихся облачных образований с четкими границами, преимущественно округлой и овальной формы, а также пальцеобразных, грибообразных и др., диаметр которых вдоль направления перемещения воздушных масс на поверхности 500 гПа составляет 100(±20)...350(±50) км (см. рисунок 7.4 *а—г*).

Если по данным МРЛ и ИСЗ за ночной срок наблюдений (00 ч СГВ) на рассматриваемой территории отсутствуют Х.Ск.Сb, то для всей территории дают прогноз „без сильных шквалов".

Если по данным МРЛ и/или ИСЗ Х.Ск.Сb выявляются, то переходят к следующим действиям;

2) определяют эволюцию Х.Ск.Сb. Эволюцию Х.Ск.Сb определяют, сопоставляя данные МРЛ и ИСЗ за два последовательных срока наблюдений (00 и 03 ч СГВ).

Если в срок, следующий после ночного срока наблюдений, размеры Х.Ск.Сb сохраняются или несколько уменьшаются, но остаются в пределах 100—350 км, то эволюцию считают положительной (+).

Если Х.Ск.Сb рассеялись или их размеры стали меньше или больше критических, то эволюцию считают отрицательной (−) (таблица 8.5).

Когда один из видов информации отсутствует или по данным ИСЗ трудно определить Х.Ск.Сb и их эволюцию, то проводят дальнейшие расчеты — рассчитываются термодинамические параметры, характеризующие энергетическое состояние атмосферы;

---

[1] Значение $H_{0\,°C}$ легко определить по температуре воздуха на карте AT_{700}: при $t_{700} \geq 0$ °C значение $H_{0\,°C} \geq 3$ км, при $t_{700} < 0$ °C значение $H_{°C} \leq 2{,}5$ км.

Таблица 8.5 — Определение эволюции Х.Ск.Сb по данным ИСЗ и МРЛ

Срок наблюдений 00 ч СГВ	В последующий срок наблюдений (03 ч СГВ). Эволюция: положительная	отрицательная
Гроза, шквал, град при $\lg Z_{макс} \geq 4$ в цифрах кода и $H_{макс} \geq 11$ км, $D_{ИСЗ} = 100...350$ км	Параметры Х.Ск.Сb сохраняются или несколько уменьшаются, но остаются более определенных размеров: 1) по ИСЗ: $D = 100...350$ км; 2) по МРЛ: при $H_{0\,°C} \geq 3$ км $H_{в_{макс}} \geq 11$ км, $\lg Z_{макс} \geq 4$ в цифрах кода	Х.Ск.Сb исчезают или сохраняются, но остаются с параметрами 1) по ИСЗ: $D<100$ км или $D>350$ км; 2) по МРЛ: при $H_{0\,°C} \geq 3$ км $H_{в_{макс}} \geq 9$ км, $\lg Z_{макс} \leq 2$ в цифрах кода

Примечание — Если второй снимок облачности с ИСЗ имеется за более поздний срок, чем 4 ч СГВ, то для определения эволюции Х.Ск.Сb используются два снимка за более ранние сроки наблюдений: 21 ч СГВ — 00 ч СГВ.

3) рассчитывают термодинамические параметры атмосферы. Дополнительные термодинамические параметры рассчитывают только в следующих случаях:

— при отсутствии данных МРЛ или ИСЗ,

— при отрицательной эволюции Х.Ск.Сb по данным одного из источников информации (ИСЗ или МРЛ).

Рассчитывают следующие параметры:

— горизонтальный градиент температуры на поверхности 850 гПа между ближайшими пунктами радиозондирования в районе Х.Ск.Сb ($\Gamma_{t_{850}}$);

— горизонтальный градиент геопотенциала на поверхности 500 гПа перпендикулярно изогипсам высотной фронтальной зоны ($\Gamma_{p_{850}}$);

— максимальную скорость ветра на поверхности 500 гПа в выбранном квадрате и в соседнем с ним со стороны, откуда перемещается воздушная масса (v_{500});

— градиент скорости ветра в слое уровень 850 гПа — поверхность Земли (Γ_v).

Рассчитав эти параметры, переходят к составлению прогноза;

4) составляют прогноз сильных шквалов. Прогноз составляют в три приема:

— выявляют Х.Ск.Сb;

— определяют их эволюцию;

— при отсутствии данных МРЛ и ИСЗ или при нечетком снимке рассчитывают термодинамические параметры атмосферы, характеризующие энергетическое состояние атмосферы.

В таблице 8.6 приведен алгоритм прогноза сильных шквалов по данным МРЛ, ИСЗ и термодинамических параметров.

5) определяют район развития сильных шквалов.

Если в слое 850—500 гПа в район Х.Ск.Сb $v_{500} < 10$ м/с, то сильные шквалы прогнозируют в детализированном квадрате 150×150 км, в котором их отмечают в 00 и 03 ч СГВ.

Если $v_{500} \geq 10$ м/с, то сильные шквалы прогнозируют в соседнем детализированном квадрате, следующем по направлению перемещения воздушных масс.

Пример — Прогноз составлен в следующей последовательности:

1) по таблице 8.7 выявлено наличие характерных скоплений Сb(Х.Ск.Сb) по данным МРЛ в 00 и 03 ч СГВ. Чтобы установить критическое значение $H_в$ от Х.Ск.Сb в зависимости от высоты нулевой изотермы $H_{0°C}$, определено значение t_{700} по карте AT_{700} в 00 ч СГВ 12 июня. В данном примере $t_{700} > 0$ °С, следовательно, $H_{0°C} \geq 3$ км. Исходя из этого для Х.Ск.Сb критическим будет значение $H_в \geq 11$ км.

Таблица 8.6 — Алгоритм прогноза сильных шквалов

H^* км	Эволюция по данным МРЛ	Эволюция по снимку облачности с ИСЗ	Параметры атмосферы	Прогноз
		При наличии данных МРЛ и ИСЗ		
11	+	+	Не рассчитывают	Сильные шквалы
	–	–	"	Без сильных шквалов
	–	+	"	"
	+	–	"	"
13	+	+	"	Сильные шквалы
	–	–	"	Без сильных шквалов
	+	–	Хотя бы один из параметров достигает критического значения	Сильные шквалы
	–	+ (ярко выражен)	$\Gamma_{t_{850}}$ и v_{500} достигают и превышают критическое значение	"
		При отсутствии данных МРЛ[1]		
	–	+ (при ярко выраженном)	Хотя бы один из параметров достигает критического значения	"
	–	+ (при нечетко выраженном)	$\Gamma_{t_{850}}$, v_{500} и Γ_v достигают и превышают критические значения	"
	–	+	Значения параметров меньше критических	"
	–	–	Не рассчитывают	Без сильных шквалов

[1] На карте МРЛ проставлены знаки *NN, NE, XX*.

Примечание — Критические значения параметров атмосферы: $\Gamma_{t_{850}} \geq 1{,}5$ °С/100 км, $\Gamma_{p_{850}} \geq 1{,}5$ дам/100 км, $v_{500} \geq 12{,}5$ м/с, $\Gamma_v > 1$ м/100 км.

Таблица 8.7 — Эволюция Х.Ск.Сb по данным карт сети МРЛ и по снимкам облачности с ИСЗ

№ квадрата с Х.Ск.Сb	Срок наблюдений, ч СГВ		Эволюция Х.Ск.Сb	Срок наблюдений, ч СГВ		Эволюция Х.Ск.Сb	Прогноз
	0	3		1 ч 33 м	6 ч 19 м		
38_2	$11R_4$ – $N_{яч}=1$	—	—	Нет	Нет	—	Без сильных шквалов
48_0	$11V_6R_6$ $N_{яч}=2$	$11R_{8,6}$ $N_{яч}=3$	+	Есть в квадратах 48_{0-4} и 61	Есть, но нечеткие*	+	Сильные шквалы
73_4	$11R_4$ $N_{яч}=1$	$11R_4$ $N_{яч}=1$	+	Нет	Нет	—	Без сильных шквалов
50_{0-2}	$13—11R_4$ $N_{яч}=3$	—	—	Нет	Нет	—	Без сильных шквалов

* Срок наблюдений нерепрезентативный.

По карте данных сети МРЛ в 00 и 03 ч СГВ при помощи соответствующей палетки определены номера квадратов с Х.Ск.Сb: 38_2, 48_0, 73_4 и 50_{0-2} (таблица 8.7);

2) определена эволюция радиоэха в выделенных квадратах путем сравнения данных МРЛ за два последовательных срока наблюдений (00 и 03 ч СГВ) по таблице 8.5. Положительная эволюция, по данным МРЛ, отмечена только в квадратах 48_0 и 73_4 (см. таблицу 8.7 и рисунок 4.8);

3) выявлены Х.Ск.Сb на снимке облачности с ИСЗ за срок наблюдений 01 ч 33 мин СГВ (см. рисунок 4.8) при помощи палетки по их параметрам и определена их эволюция по таблице 8.5.

В данном примере имеются данные ИСЗ в 00 ч 33 мин СГВ и в 06 ч 19 мин СГВ. Срок 06 ч 19 мин непоказателен, так как разница во времени с данными МРЛ второго срока наблюдений (03 ч СГВ) превышает 2 ч. Более раннего, чем 00 ч СГВ срока наблюдений ИСЗ нет. Поэтому сделано сравнение данных МРЛ с данными ИСЗ в срок 00 ч 33 мин СГВ. По таблице 8.7 положительная эволюция по данным МРЛ и ИСЗ отмечается только в квадрате 48_{0-4};

4) для определения района развития сильных шквалов рассчитана скорость ветра на уровне 500 гПа в районе квадрата 48. В данном случае v_{500} = 8 м/с. Следовательно, явление должно наблюдаться в квадрате 48, в котором обнаружено Х.Ск.Сb с положительной эволюцией;

5) по данным таблицы 8.7 составлен прогноз сильных шквалов на текущие сутки — 12 июня по СССР: сильные шквалы ожидались в квадрате 48_{0-4}.

Фактическая погода: 12 июня 1988 г. днем и вечером отмечались сильные ливни (14—22 мм/12 ч) со шквалом с $v_{ш}$ = 25 м/с в Киевской, Черниговской, Житомирской и Кировоградской областях. Координаты этих районов (50° с. ш. и 28—31° в. д.) совпадают с координатами 48_0 (49,5—50,0° с. ш. и 28—30° в. д.). т. е. прогноз факта и места возникновения сильных шквалов совпал с фактическими данными.

8.4.3 Прогноз сильных шквалов по данным МРЛ

Метод прогноза сильных шквалов по комплексу данных синхронных наблюдений за облачностью и осадками с ИСЗ и МРЛ содержит субъективную информацию об облачности с ИСЗ. Метод можно сделать более объективным, используя только данные МРЛ. Как следует из работ [25, 27, 28], условия, определяющие энергетическое состояние атмосферы при развитии сильных шквалов, можно выразить отношение

$$K = H^*/D_{ИСЗ},$$

где H^* — комплексный параметр, определяемый высотой радиоэха с верхней границей $H_{в_{макс}} \geq 11$ км и радиолокационной отражаемостью $\lg Z_{макс} \geq 2,7$ (или 4 в цифрах кода), этот параметр соответствует мощности конвекции или энергии неустойчивости атмосферы;

$D_{ИСЗ}$ — площадь восходящих конвективных движений.

В отличие от комплексного метода в данном методе интенсивность конвекции определяют по значению H^* от грозовых облаков, а площадь восходящих движений $D_{ИСЗ}$ — по числу квадратов размером 60×60 км^2 на картах сети МРЛ, в которых отмечено радиоэхо от грозовых, градовых или шкваловых облаков с $H_в \geq 11$ км и $\lg Z_{макс} \geq 4$ в цифрах кода.[1]

В дневное время суток сильные шквалы отмечались в тех случаях, когда в определенной облачной системе в срок наблюдений, последующий после 00 ч СГВ, число ячеек не превышало 5. Эти данные согласуются с размерами Х.Ск.Сb при развитии сильных шквалов, определенными по данным ИСЗ.

Чтобы выявить зоны активной конвекции (ЗАК) со шквалами по степени интенсивности этих явлений, используют зависимости

[1] Признаки Х.Ск.Сb по данным МРЛ.

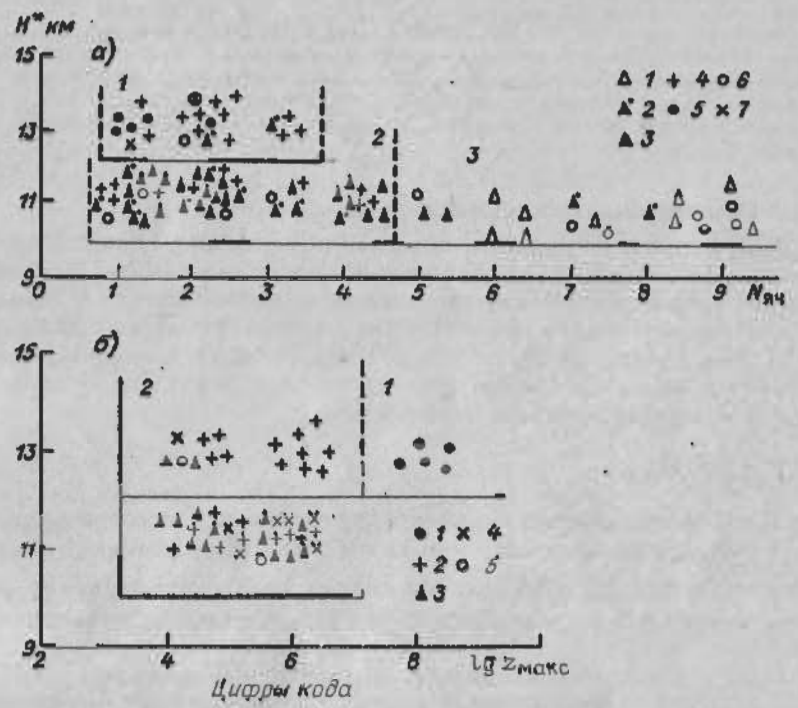


Рисунок 8.17— Зависимость H^* от $N_{яч}$ (а) и от $\lg Z_{макс}$ (б) при шквалах различной интенсивности с ОЯ и СГЯ, связанных с зонами активной конвекции (ЗАК).

H^* от $N_{яч}$ и $H_в$ от $\lg Z_{макс}$ для случаев ЗАК со шквалами разной интенсивности (рисунок 8.17).

На рисунке 8.17 *а* выделяются три области с наибольшей мощностью ЗАК со стихийными и опасными явлениями (СГЯ и ОЯ) погоды. В зону *1* ($H_в \geq 13$ км, $N_{яч} = 1...3$) попало 88 % СГЯ (из них 89 % случаев с сильными шквалами) и 12 % случаев со шквалами с $v_в < 20$ м/с. В зоне *2* ($H_в = 11$ км, $N_{яч} = 1...4$) отмечено всего 24 % случаев с сильными шквалами (СГЯ), 76 % случаев с ОЯ (из них 67 % со шквалами с $v_в = 20...24$ м/с и 12 % сильных ливней со шквалами с $v_в \leq 19$ м/с и без них). В зоне *3* ($H_в = 11$ км, $N_{яч} \geq 5$) отмечены ЗАК преимущественно с ОЯ — это грозовые ливни со

шквалами $v_в \leq 20$ м/с (60 %), 10 % случаев со слабым смерчем и 30 % случаев сильных осадков без шквалов.

СГЯ и ОЯ со шквалами с $v_в \geq 20$ м/с отмечались при $N_{яч} \leq 4$. С увеличением $N_{яч}$ (или площади ЗАК с Х.Ск.Cb) уменьшается интенсивность явлений, связанных с ЗАК. Эти данные показывают, что СГЯ образуются при ограниченной площади скоплений мощных Cb, а с увеличением их площади вероятность ОЯ и СГЯ уменьшается.

На рисунке 8.17 *б* в зону *1* ($H_в \geq 13$ км и $\lg Z_{макс} \geq 8$) попали все случаи со шквалами с $v_в \geq 30$ м/с. В зоне *2* ($H_в = 13$ км, $\lg Z_{макс} = 4...6$) отмечено 82 % случаев с СГЯ (из них 75 % с сильными шквалами) и 16 % случаев шквалов с ОЯ $v_в = 21...24$ м/с. В зоне 3 ($H_в = 11...13$ км и $\lg Z_{макс} = 4...6$) отмечено 60 % СГЯ (в их числе 26 % с сильными шквалами, остальные 34 % случаев со шквалами с $v_в = 21...24$ м/с) и 6 % — с очень сильными ливнями со шквалами с $v_в \leq 19$ м/с или без них.

Прогноз сильных шквалов дают при наличии следующих условий:

1) для тех районов, где по данным МРЛ в 0 ч СГВ отмечено радиоэхо от грозовых облаков с $H_в \geq 11$ км, $\lg Z_{макс} \geq 2,7$ (или 4 в цифрах кода);

2) когда есть положительная эволюция параметров по двум срокам наблюдений (00 и 03 ч СГВ);

3) когда число ячеек с Х.Ск.Cb в 03 ч СГВ в рассматриваемой облачной системе $N_{яч} \leq 5$.

Надежность прогноза сильных шквалов с $v_в \geq 25$ м/с определяют по рисунку. Если точка с соответствующими координатами попадает в зону *1* на рисунке 8.17 *а* и в зоны *1* и *2* на рисунке 8.17 *б*, то вероятность возникновения явления возрастает до 80 %.

Прогноз „без шквалов" дают в следующих случаях:

1) если на картах сети МРЛ в 00 ч СГВ отсутствуют Х.Ск.Cb;

2) если отмечена отрицательная эволюция Х.Ск.Cb ($H_в \leq 9$ км, $\lg Z_{макс} \leq 1,1$ или в цифрах кода не более 2, или количество ячеек с Х.Ск.Cb $N_{яч} \geq 6$).

Прогноз сильных шквалов по данным карт сети МРЛ можно составлять двумя способами:

1) по территории по квадратам 300×300 км,

2) для пункта в радиусе 150 км.

8.4.3.1 Прогноз сильных шквалов по территории

Для составления прогнозов сильных шквалов по указанному методу нужны карты сети МРЛ за 00 ч и 03 ч СГВ и карта AT_{500} гПа за 00 ч СГВ.

Прогноз составляют при помощи палетки, которую строят в масштабе карты сети МРЛ. Палетку разбивают на квадраты 300× 300 км с детализацией 1/4 его части, т. е. квадраты 150× 150 км и на нее наносят координатные оси (рисунок 8.18).

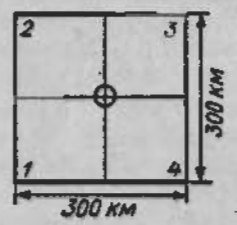


Рисунок 8.18 — Пример разбивки квадрата 300× 300 км на ячейки 150× 150 км.

Прогноз составляют в следующей последовательности:

1) по карте данных МРЛ в 00 ч СГВ при помощи палетки выявляют Х.Ск.Сb по их параметрам. Одна ячейка на карте соответствует одному значению совокупности параметров радиоэха с квадрата 60× 60 км. Например, 11 R_6 — это одна ячейка.

Если в этот срок наблюдений Х.Ск.Сb не выявляют, то для всей территории дают прогноз „без сильных шквалов".

Если Х.Ск.Сb выявляют, то при помощи палетки определяют номер квадрата, в котором отмечены Х.Ск.Сb;

2) определяют эволюцию Х.Ск.Сb по данным двух сроков наблюдений в 00 и 03 ч СГВ (таблица 8.8).

Таблица 8.8 — Определение параметров Х.Ск.Сb и их эволюции по данным карт сети МРЛ

Наблюдения в 00 ч СГВ				Наблюдения МРЛ в последующий срок (03 ч СГВ)	
				Эволюция	
Вид явления	$H_{в_{макс}}$ км	$\lg Z_{макс}$ цифры кода	$N_{яч}$	положительная	отрицательная
Гроза, шквал, град	≥ 11	≥ 4	1—5	Значения параметров сохраняются	Х.Ск.Сb исчезают, либо изменяются, но параметры радиоэха от Сb меньше: $H_{в_{макс}}$ ≤ 9 км, $\lg Z_{макс}$ ≤ 2 в цифрах кода, $N_{яч}$ > 5

Таблица 8.9 — Зависимость вероятности СГЯ и ОЯ от числа ячеек с определенной высотой верхней границы радиоэха, %

Параметр радиоэха, число ячеек	Вероятность	
	СГЯ	ОЯ
$H_{в_{макс}}$ ≥ 12 км $N_{яч}$ = 1...3	88 (из них 89 % с $v_в$ ≥ 25 м/с и ливни СГЯ)	14 (с $v_в$ ≤ 24 м/с и ливни)
$H_{в_{макс}}$ = 10...11 км $N_{яч}$ = 1...4	24 (с $v_в$ ≥ 25 м/с)	76 (из них 45 % с $v_в$ = = 21...24 м/с, 30 % — осадки при $v_в$ ≤ 20 м/с и без них)
$H_{в_{макс}}$ = 10...11 км $N_{яч}$ = 5...9		100 (из них 70 % — осадки при $v_в$ ≤ 20 м/с, 30 % — осадки без шквалов)

Таблица 8.10 — Зависимость вероятности СГЯ и ОЯ от параметров радиоэха, %

Параметры радиоэха	Вероятность	
	СГЯ	ОЯ
$H_в$ ≥ 13 км $\lg Z_{макс}$ ≥ 8	100 ($v_в$ ≥ 30 м/с)	
$H_в$ = 13 км $\lg Z_{макс}$ = 4...6	82 (из них 75 % с $v_в$ ≥ 25 м/с, 7 % — осадки СГЯ)	18 (из них 12 % с $v_в$ = 21...24 м/с, 6 % — осадки при $v_в$ ≤ 20 м/с)
$H_в$ = 11...13 км $\lg Z_{макс}$ = 4...6	62 (из них 86 % с $v_в$ ≥ 25 м/с, 86 % — осадки СГЯ)	48 (из них 34 % с $v_в$ = 21...24 м/с, 14 % — осадки без шквалов или при $v_в$ ≤ 20 м/с)

Таблица 8.11 — Определение скорости ветра при шквалах по параметрам радиоэха от Х.Ск.Сb в 03 ч СГВ

Скорость ветра при шквалах, м/с	$H_в$, км	$\lg Z_{макс}$ в цифрах кода	$N_{яч}$
≥ 30	≥ 13	≥ 8	≤ 3
25—29	13—11	4, 6, 8	≤ 4
21—24	11	4, 6	≤ 4
≤ 20	9—11	≤ 4	≥ 5

Если эволюция отрицательная, то для всей территории дают прогноз „без сильных шквалов";

3) определяют район возможного возникновения шквала. Для этого по карте AT_{500} над отмеченным квадратом с Х.Ск.Сb и в направлении перемещения этого Х.Ск.Сb определяют среднюю скорость ветра $\bar{v}_{500}$.

Если $\bar{v}_{500} < 10$ м/с, то прогноз „сильные шквалы" дают для тех квадратов, в которых обнаружено Х.Ск.Сb с положительной эволюцией.

Если $\bar{v}_в \geq 10$ м/с, то прогноз „сильные шквалы" дают для следующего по направлению перемещения Х.Ск.Сb квадрата. Вероятность возникновения шквалов с $\bar{v}_в \geq 10$ м/с определяют по таблицам 8.9 и 8.10.

Скорость ветра при шквале уточняют по таблице 8.11.

8.4.3.2 Способ прогноза сильных шквалов для пункта

Для конкретного пункта МРЛ в радиусе 150 км строят или рассчитывают на ЭВМ траекторию перемещения воздушных масс на текущие сутки и уточняют скорость и направление перемещения облачной системы с учетом правил, изложенных в Руководстве по использованию спутниковых данных в анализе и прогнозе погоды (см. п. 2). Вдоль траектории по карте сети МРЛ определяют наличие Х.Ск.Сb по данным МРЛ в 00 ч СГВ, используя таблицу 8.8.

Если Х.Ск.Сb нет, то для пункта дают прогноз „без сильных шквалов".

Если Х.Ск.Сb выявляют вдоль рассчитанной траектории их перемещения или в радиусе 150 км вокруг пункта на территории, то определяют эволюцию Х.Ск.Сb по данным наблюдений в 00 и 03 ч СГВ, используя таблицу 8.8.

Если эволюция положительная, то следует давать прогноз „сильные шквалы" в радиусе 150 км от пункта прогноза со стороны перемещения Х.Ск.Сb.

Вероятность прогноза сильных шквалов и скорость ветра при них определяют по таблицам 8.10 и 8.11.

Вероятность ЗАК с СГЯ и ОЯ определяют по параметрам Х.Ск.Сb в 03 ч СГВ, используя таблицу 8.9.

Пример — Прогноз сильных шквалов по данным карт сети МРЛ по территории составлен на день 12.06.83 г. для ЕТС (λ = 20...50° в. д., φ = 45...60° с. ш.) по квадратам пространства 300×300 км с детализацией 150×150 км (рисунок 8.19).

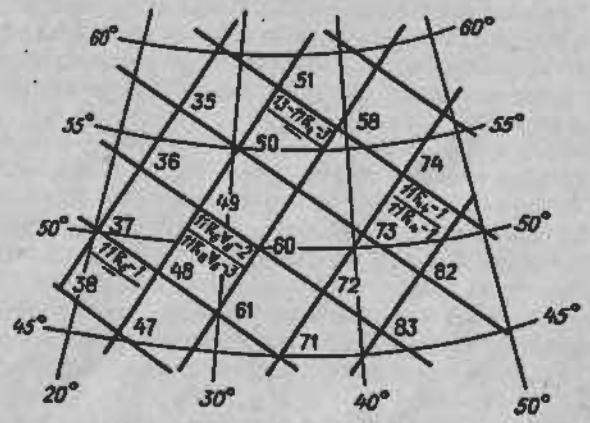


Рисунок 8.19 — К примеру прогноза сильных шквалов 12.06.88 г. по ЕТ СНГ.

По данным карт сети МРЛ за 00 и 03 ч СГВ выявлено наличие Х.Ск.Сb и определена их эволюция по таблице 8.8. На рисунке 8.19 приведены данные о выявленных Х.Ск.Сb в 00 ч СГВ (числитель) и в 03 ч СГВ (знаменатель). Слева от символа грозы обозначена верхняя граница радиоэха в км, справа внизу — радиолокационная отражаемость в цифрах кода, справа вверху — число ячеек.

Для данного случая Х.Ск.Сb с положительной эволюцией выявлены в квадратах 28_2 и 73_2. В квадратах 50_2 и 38_2 Х.Ск.Сb обнаружены в 00 ч СГВ, но эволюция их отрицательна. Поэтому прогноз составлен только для квадратов 48 и 73.

Определены средняя скорость и направление ветра на уровне 500 гПа в районе этих квадратов. Для квадрата 48 — ветер юго-западный и v_{500} = 10 м/с; для квадрата 73 — малоградиентное поле, v_{500} определить нельзя. Эти данные указывают на то, что сильные шквалы следует ожидать в районе квадрата 48_2 и вблизи него в квадрате 61_2, а также в районе квадрата 73_2. На рис. 8.19 обозначены районы, где отмечались шквалы, и скорость ветра при них.

Согласно Наставлению по оценке прогнозов (см. п. 2) и по условиям локализации места возникновения сильных шквалов прогноз сильных шквалов оправдался. Фактически в квадратах 48_2—61_2 отмечены шквалы с $v_в$ = 20...26 м/с, и в квадрате 74_1 вблизи квадрата 73_1 отмечены шквалы с $v_в$ = 20 м/с.

По данным $H_в$, $\lg Z_{макс}$ и $N_{ст}$ по таблице 8.10 определена вероятность ОЯ и СГЯ при сильных шквалах. Так, для квадратов 48_{3-4} и 61_2 вероятность СГЯ составила всего 21 %, а вероятность ОЯ — 79 %, из них 67 % случаев шквалов с $v_в$ = 20...24 м/с.

Скорость ветра при шквале определена по таблице 8.11: она может составлять 25—29 м/с.

8.4.4 Прогноз сильных шквалов по данным ИСЗ

В основе метода прогноза сильных шквалов по данным облачности на снимках с ИСЗ лежит тот же принцип, что и в методе, основанном на использовании комплекса информации с ИСЗ и МРЛ. Данный метод используют при отсутствии данных МРЛ. Дополнением являются данные о характере развития сильных шквалов в ночное время суток.

Анализ случаев сильных шквалов в ночное время показал, что если они отмечались после 18—19 ч СГВ, то в половине рассмотренных случаев (25 случаев со шквалами с $v_в \geq 23$ м/с) на снимке облачности с ИСЗ в ночные сроки наблюдений, предшествующих текущим суткам, Х.Ск.Cb не выявлялись. В этих случаях они появлялись лишь на снимках в послеполуденные часы — в 11—15 ч СГВ текущих суток, когда за счет развития и усиления термической конвекции на атмосферных фронтах в дневное время происходит активизация процессов осадкообразования, обусловливающих СГЯ.

Следует отметить, что при развитии локальных стихийных ливней в этот период суток картина облачности сходна с Х.Ск.Cb, определяющими условия, благоприятные для развития сильных шквалов.

Если Х.Ск.Cb впервые появлялись в 11—12 ч СГВ, то сильные шквалы отмечались ночью только в тех случаях, когда Х.Ск.Cb сохранялись в сроки 15—17 ч СГВ. Если к 15—17 ч СГВ Х.Ск.Cb изменяли форму, их размеры или границы становились нечеткими или Х.Ск.Cb рассеивались, то, как правило, шквалы, связанные с этой облачностью, ночью не отмечались.

По снимкам с ИСЗ в сроки, ближайшие к 00 — 03 ч СГВ, составляют прогноз сильных шквалов на день, а по снимкам облачности в 12 — 16 ч СГВ — на ночь. Прогнозы сравнивают с фактическими наблюдениями.

Прогноз „сильные шквалы" дают в том случае, если на снимках облачности в соответствующие сроки наблюдений выявляют Х.Ск.Cb с положительной эволюцией, определенной по двум последовательным срокам наблюдений.

Случаи, когда возникали сомнения в точности определения Х.Ск.Cb (неправильные формы, нечеткие границы и др.), относят к шквалам с $v_в$ < 25 м/с. Эти случаи выделяют потому, что часто в ночное время при сильных ливнях отмечаются шквалы с $v_в$ 15...20 м/с и порывами до 25 м/с. В этих случаях Х.Ск.Cb выражены неярко и, как правило, на фоне крупномасштабной, относительно размытой облачности атмосферных фронтов. Порывы ветра при шквалах $v_в \geq$ 26 м/с относят к случаям с сильными шквалами.

Прогнозы на ночь можно составить лишь с заблаговременностью 3—5 ч. Определить заблаговременность прогноза ночных шквалов по дневным и вечерним снимкам облачности с ИСЗ трудно, так как данные с ИСЗ весьма дискретны во времени и нерегулярны.

Прогнозы сильных шквалов, составленных на ночь, оценены по данным независимого ряда наблюдений в мае—августе 1988 г.

Сравнение прогнозов с фактическими данными наблюдений показало, что для шквалов с $v_в$ = 26 м/с оправдываемость прогнозов $U_{яв}$ = 84 %, а предупрежденность $П_{яв}$ = 87 %. Оправдываемость и предупрежденность прогнозов шквалов с $v_в$ = 20...25 м/с низки: $U_{яв}$ = 50 %, $П_{яв}$ = 17 %. Оправдываемость и предупрежденность прогнозов без шквалов и шквалов с $v_в \leq$ 19 м/с составили $U_{яв}$ = 78 %, $П_{яв}$ = 83 %.

Для шквалов с $v_в \geq$ 26 м/с U + П = 171 %, для случаев без шквалов U + П = 161 %, что указывает на методическую значимость предложенного метода.

Прогноз сильных шквалов по снимкам с ИСЗ можно составлять двумя способами:

1) по территории по квадратам 300×300 км с детализацией 1/4 квадрата,

2) для пункта в радиусе 150 км.

8.4.4.1 Прогноз сильных шквалов по территории

Прогноз составляют при помощи палетки по квадратам 300×300 км с детализацией 1/4 квадрата. Палетку строят в масштабе снимка с ИСЗ с координатными осями и квадратами 300×300 км (рисунок 8.16 *б*).

Для составления прогноза СШ на день (заблаговременность до 18 ч) необходимы снимки облачности с ИСЗ за ночной срок, близкий к 00 ч СГВ, и предутренний срок (желательно не позже 4 ч СГВ).

При нечетких Х.Ск.Cb дополнительно используют данные карт AT_{850} и AT_{500} и синоптическую карту за 00 ч СГВ.

Таблица 8.12 — Определение Х.Ск.Сb и их эволюция по снимкам облачности с ИСЗ

Параметры Х.Ск.Сb по снимкам облачности с ИСЗ в 00 ч СГВ	Параметры Х.Ск.Сb по данным ИСЗ в последующий срок наблюдений (03 ч СГВ)	
	Эволюция	
	положительная	отрицательная
Яркие, округлые, овальные и других форм, изолированные или выделяющиеся на фоне облачного вихря или фронтальной полосы, диаметр по направлению перемещения $D_{ИСЗ}$ = 100...350 км	Сохраняют свои параметры по сравнению с наблюдениями в 0 ч СГВ или изменяются, но $D_{ИСЗ}$ = 100...350 км	Исчезают, рассеиваются, либо сохраняются, но $D_{ИСЗ}$ < 100 км или $D_{ИСЗ}$ > 180 км

Прогноз составляют в следующей последовательности:

1) по снимку облачности с ИСЗ в срок, близкий к 00 ч СГВ, определяют наличие Х.Ск.Сb, используя таблицу 8.12. Если их нет, то для всей территории дают прогноз „без сильных осадков". При наличии Х.Ск.Сb определяют их эволюцию.

2) определяют эволюцию Х.Ск.Сb по данным двух последовательных сроков наблюдений (близкого к 00 ч и 03 ч СГВ), используя таблицу 8.12. По палетке (см. рисунок 8.16) определяют район с Х.Ск.Сb по номеру квадрата.

Если эволюция Х.Ск.Сb отрицательная, и нет сомнений в отсутствии Х.Ск.Сb, то для всей территории дают прогноз „без сильных шквалов".

3) если Х.Ск.Сb четкое, то определяют направление и среднюю скорость ветра на AT_{500} в районе с Х.Ск.Сb и вдоль направления его перемещения.

Если v_{500} < 10 м/с, то сильные шквалы следует ожидать в том квадрате, в котором обнаружено Х.Ск.Сb, и в 100 км от него по направлению перемещения Х.Ск.Сb.

Если Х.Ск.Сb нечеткое[1], то для района, где оно отмечено, определяют скорость ветра на уровне AT_{500}, градиент температуры воздуха на AT_{850} — $\Gamma_{t_{850}}$, тенденцию изменения давления Δp по карте-микрокольцовке.

Если хотя бы два из параметров достигают указанных значений $\bar{v}_{500} \geq 12$ м/с и/или $\Gamma_{t_{850}} \geq 1{,}5$ °С/100 км и/или $\Delta p < -1$ гПа/3 ч (см. таблицу 8.6), то дают прогноз „ сильные шквалы". Если значения параметров ниже указанных критериев, то дают прогноз „без сильных шквалов".

8.4.4.2 Прогноз сильных шквалов для пункта

Прогноз по этому способу составляют так же, как описано в п. 8.4.4.1, но в данном случае параметры Х.Ск.Сb определяются только по данным с ИСЗ.

Пример — Прогноз сильных шквалов по снимкам облачности с ИСЗ составлен на день 13 июня 1986 г.

На снимке облачности с ИСЗ в 01 ч 50 мин — 00 ч 10 мин СГВ видно Х.Ск.Сb в районе с координатами 23° в. д., 52,5° с. ш., диаметр которого по направлению перемещения (с юга на север) составляет примерно 120 км (рисунок 8.20). По направлению перемещения в районе 23—24° в. д. и 54° с. ш. видны „точечные" Сb, что указывает на неустойчивость атмосферы. Скорость перемещения Х.Ск.Сb по данным о ветре на AT_{500} составляет 7 м/с (меньше 10 м/с). Так как Х.Ск.Сb смещаются в сторону зоны неустойчивого состояния атмосферы, то в послеполуденные часы возможно его слияние с местными Сb и усиление этого Х.Ск.Сb. Следовательно, с учетом перемещения, сильные шквалы следует ожидать в районе с координатами 23—25° в. д. и 54—55° с. ш.

В этот день в 11 ч 35 мин — 11 ч 40 мин в районе с координатами 25,5° в. д. и 55° с. ш. отмечены шквалы с v_s = 30 м/с с порывами до 40 м/с, а с 20 ч 01 мин до 21 ч 12 мин — с v_s = 24 м/с.

На рисунке 8.20 приведен снимок облачности с ИСЗ в 11 ч 50 мин СГВ, примерно в период развития шквалов в указанном районе.

8.4.5 Сверхкраткосрочный прогноз места возникновения сильных шквалов с заблаговременностью 2—5 ч

Сверхкраткосрочные прогнозы сильных шквалов составляют по данным МРЛ в пункте прогноза либо по данным ежечасных карт погоды только в случаях, если для конкретного района (квадрата 150× 150 км или пункта прогноза) дают прогноз „сильные шквалы" по одному из описанных способов.

Если по одному из описанных методов прогноза сильные шквалы по территории не ожидаются, то они не должны возникнуть

[1] При почетком Х.Ск.Сb можно не проводить дополнительных расчетов и давать прогноз „без сильного шквала". В этом случае возможны шквалы с $v_s \leq 25$ м/с.

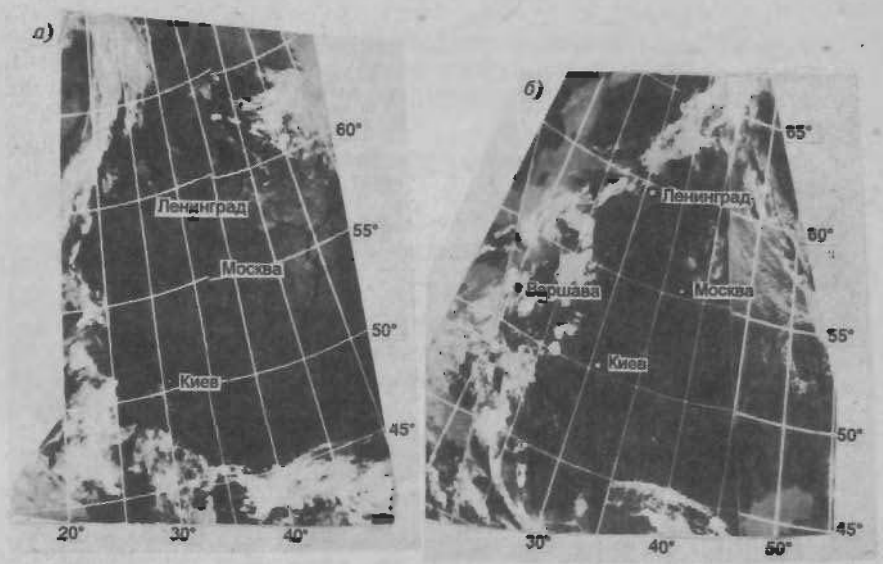


Рисунок 8.20 — Снимок облачности с ИСЗ 13.06.86 г. в 01 ч 50 мин — 00 ч 10 мин СГВ (*а*) и 11 ч 50 мин СГВ (*б*).

даже при развитии мощных скоплений Cb в радиусе обзора МРЛ (см. п. 2.3.1).

8.4.6 Прогноз места возникновения сильных шквалов по данным МРЛ в пункте прогноза

Если пункт прогноза находится в квадрате, для которого дают прогноз „ сильные шквалы", то с момента появления Х.Ск.Cb в радиусе обзора МРЛ по данным последовательных сроков наблюдений определяют скорость их перемещения ($v_{пер}$) и рассчитывают время их появления в пункте по формуле 5.3.

Если в радиусе обзора МРЛ Х.Ск.Cb перемещаются в район с малоподвижными мощными Cb, то сильные шквалы возникают в районе их слияния.

Может быть и обратная картина. Х.Ск.Cb малоподвижное, а к нему смещается облачная гряда с Cb.

Интенсивность сильных шквалов определяют по скорости ветра при шквале, используя максимальные значения $H_в$ и $\lg Z_{макс}$ (см. таблицу 8.11).

8.4.7 Прогноз места возникновения сильных шквалов по ежедневным картам погоды

Если для какого-то квадрата 150× 150 км или для пункта дают прогноз „сильные шквалы", а данные одного МРЛ в них отсутствуют, то для определения района возможного развития сильных шквалов используют данные ежечасных наблюдений, представленные на картах-микрокольцовках.

Сильные шквалы следует ожидать вблизи метеостанций, по данным которых отмечены следующие критические значения параметров атмосферы:

1) у поверхности Земли $t_{прогн_{макс}} \geq 24 \pm 2$ °С,

2) тенденция давления $\Delta p \geq 1$ дам/3 ч,

3) градиент температуры у поверхности Земли $\Gamma_{t_s} \geq 1$ °С/100 км,

4) градиент скорости ветра в слое уровень 850 гПа — поверхность Земли $\Gamma_v \geq 1$ м/100 м высоты,

5) градиент температуры на уровне 850 гПа $\Gamma_{t_{850}} \geq 1{,}5$ °С/ 100 км.

8.4.8 Оценка прогнозов сильных шквалов по данным МРЛ и ИСЗ[1]

Прогноз факта сильных шквалов ($v_в \geq 25$ м/с) и скорости ветра при нем составляют по новому дополнению к Наставлению по оценке прогнозов.

Прогноз по территории считают оправдавшимся, если в прогнозируемом квадрате или в соседнем с ним (на расстоянии не более 150 км от границ прогнозируемого квадрата) отмечены шквалы с $v_в \geq 20$ м/с. Детализированный прогноз сильных шквалов для пункта считают оправдавшимся, если в радиусе 150 км от пункта прогноза отмечены шквалы с $v_в \geq 20$ м/с.

8.5 Прогноз максимального количества осадков, в том числе сильных, в холодный период года с использованием данных МРЛ и ИСЗ

8.5.1 Общая характеристика методов

Все существующие методы прогноза осадков в зимний период года основаны на учете упорядоченных вертикальных движений

[1] См. РД 52.27.284—91.

и охлаждения воздуха, т. е. на учете конденсации водяного пара в слое воздуха, происходящей при этом охлаждении [1].

При прогнозе сильных осадков в этих методах дополнительно учтен характер синоптических процессов. Прогноз составляют при помощи графиков.

От этих методов отличается автоматизированный метод прогноза сильных осадков в холодный период года, разработанный А. И. Снитковским и основанный на статистических связях между осадками и рядом параметров атмосферы, полученных из результатов гидродинамических прогнозов [37].

Определить степень термодинамической неустойчивости атмосферы в холодный период года практически невозможно, так как в обширных облачных системах данные о стратификации воздушных масс, определяемые путем радиозондирования, нерепрезентативны.

Использование снимков облачности с ИСЗ и данных радиоэха от осадков позволяет определить следующее:

1) наличие условий для образования осадков,
2) увлажненность воздушных масс,
3) мощность слоя осадкообразования,
4) площадь распространения осадков,
5) характер атмосферной циркуляции в макро- и мезомасштабах.

Данный метод разработан на основе комплексного исследования условий формирования и выпадения осадков в холодный период года с использованием данных ИСЗ и МРЛ и на определении взаимосвязи между количеством выпавших осадков и количеством сконденсированной влаги в единичном слое вертикального столба радиоэха от осадков.

Физическая основа изложенного в данном РД метода состоит в том, что максимальное количество выпадающих осадков определяют в зависимости от количества сконденсированной влаги в единичном столбе радиоэха от осадков, от класса облачности и от ее эволюции без учета внутриоблачных процессов.

Найдена корреляционная связь между максимальным количеством выпавших осадков и количеством сконденсированной в облаке влаги Q' в единичном столбе радиоэха в слое уровень 850 гПа — высота H^*, где H^* — максимальная высота верхней границы радиоэха с учетом эволюции облачности. Значение Q' рассчитывают по формуле

$$Q' = \alpha\, \bar{\rho} \Delta q\, \Delta H\,, \qquad (8.10)$$

где $\alpha = 10$;

$\bar{\rho}$ — средняя плотность воздуха в слое уровень 850 гПа — высота H^*;

Δq — разность значений массовой доли влаги на нижнем (850 гПА) и верхнем (H^*) уровнях зоны осадков по данным МРЛ или ИСЗ;

ΔH — толщина слоя уровень 850 гПа — высота H^*.

Уравнение регрессии, связывающее Q', рассчитываемое в зоне облачности фронта, смещающегося к пункту прогноза, и $Q_{макс}$ в пункте прогноза с учетом эволюции облачности имеет вид:

$$Q_{макс} = 0{,}50 + 0{,}93Q'\,. \qquad (8.11)$$

Коэффициент корреляции этой связи $r = 0{,}70$, $\sigma_r = 0{,}17$, $2\sigma_r = 0{,}34$, что указывает на ее значимость.

Выявлены следующие параметры атмосферы и их критические значения [7], определяющие эволюцию обычных систем с осадками в ближайшие сутки:

1) линейные размеры радиоэха от осадков по данным МРЛ ($L_{МРЛ}$) и облачности на снимке с ИСЗ ($L_{ИСЗ}$) вдоль траектории перемещения;

2) горизонтальный градиент температуры воздуха на уровне 850 гПа в зоне облачности (Γ_t);

3) характер облачности на снимке с ИСЗ и характер барического поля на AT_{850} и AT_{700}.

Площадь распространения осадков по территории определяют по следующим параметрам:

1) классу облачности по данным с ИСЗ (к),

2) горизонтальной ($L_{МРЛ}$) и вертикальной протяженности (H^*) зоны радиоэха от осадков.

---

[1] Методические указания. Метод прогноза максимального количества осадков, в том числе сильных, в холодный период года с использованием данных наблюдений с ИСЗ и МРЛ (см. п. 2).

8.5.2 Прогноз сильных и очень сильных осадков по комплексу термодинамических, радиолокационных и спутниковых данных[1]

Для составления прогноза необходимы следующие материалы:

1) карты барической топографии поверхностей 850, 700, 500 и 300 гПа в 00 ч СГВ;

2) карта данных сети МРЛ и бланк-карта МРЛ пункта прогноза в 00 ч СГВ текущих суток;

3) фотомонтаж снимков облачности с ИСЗ в ИК-диапазоне в срок, ближайший к 0 ч СГВ (интервал времени 22 ч предыдущих суток — 02 ч текущих суток);

4) траектория перемещения воздушных масс, рассчитанная с помощью ЭВМ и уточненная путем синоптического анализа (координаты).

Чтобы провести синоптический анализ (оценку эволюции облачности и уточнение перемещения фронтов и циклонов) по общепринятому способу[2], желательно иметь дополнительно карты МРЛ и снимки облачности с ИСЗ в сроки, ближайшие ко времени составления прогноза. Результаты испытания данного метода изложены в работах [23, 46].

Прогноз составляют в следующей последовательности:

1) определяют возможность прохождения через пункт прогноза облачности с осадками. Выявляют наличие облачности по снимку с ИСЗ в радиусе около 1200 км от пункта прогноза (при заблаговременности до 30 ч и $v_в \leq 40$ км/ч) и определяют скорость и направление перемещения всех облаков в указанном радиусе. Для этого проводят совместный анализ следующих материалов:

— данных карт AT_{850} и AT_{700};

— карт сети МРЛ;

— снимков облачности с ИСЗ за 00 ч СГВ текущих суток:

— рассчитанной траектории перемещения воздушной частицы на день и ночь, которую наносят на карту сети МРЛ и на снимок облачности с ИСЗ.

На основе анализа выявляют наличие фронтальных разделов, облачных систем и зон осадков, смещающихся к пункту прогноза.

Если вдоль траектории перемещения на заданный срок заблаговременности отсутствуют радиоэхо и облачность на снимке с ИСЗ, то дают прогноз „без осадков" и прекращают расчеты.

---

[1] Руководство по краткосрочным прогнозам погоды. Ч. 1 (см. п. 2)

[2] Методические указания. Метод прогноза максимального количества осадков, в том числе сильных, в холодный период года с использованием данных с ИСЗ и МРЛ (см. п. 2).

Если вдоль траектории перемещения наблюдается зона облачности и осадков, а других самостоятельных облачных систем в указанном радиусе не отмечено, то рассчитывают перемещения облачной системы с осадками по направлению ближайшей к пункту прогноза изогипсы на AT_{700}. Скорость перемещения зоны осадков равна

$$v_{oc} = 0{,}7\,\bar{v}_{700}\,. \qquad (8.12)$$

Если в указанном радиусе обнаружены другие облачные системы, не связанные с первой, то нужно определить возможность прохождения их через пункт прогноза по правилам из Руководства по использованию спутниковых данных в анализе и прогнозе погоды (см. п. 2).

Если ожидается прохождение через пункт прогноза двух или более облачных систем, то параметры для расчета количества осадков определяют по более мощной облачной системе.

Если вдоль траектории зона радиоэха от осадков отмечена в районе волны на атмосферном фронте, то она будет перемещаться со скоростью движения самой волны.

Если вдоль траектории перемещения отмечается облачность только на снимке с ИСЗ, а радиоэхо от осадков на картах МРЛ отсутствует, то дают прогноз „слабые осадки". При необходимости рассчитывают время начала $t_н$ и продолжительность выпадения осадков Δt;

2) рассчитывают время начала $t_н$ и продолжительность Δt выпадения осадков в пункте. Продолжительность рассчитывают лишь в том случае, если есть необходимость в информации такого типа. Время начала выпадения осадков рассчитывают по формуле

$$t_н = t_0 + L_1/v_{oc}\,, \qquad (8.13)$$

где t_0 — срок наблюдений на карте МРЛ, с которой снимают параметры радиоэха;

L_1 — расстояние на карте МРЛ от пункта до передней границы зоны радиоэха;

v_{oc} — скорость перемещения зоны осадков.

Продолжительность выпадения осадков рассчитывают по формуле:

$$\Delta t = (L_2 - L_1)/v_{oc}\,, \qquad (8.14)$$

где L_2 — расстояние от пункта прогноза до тыловой границы радиоэха;

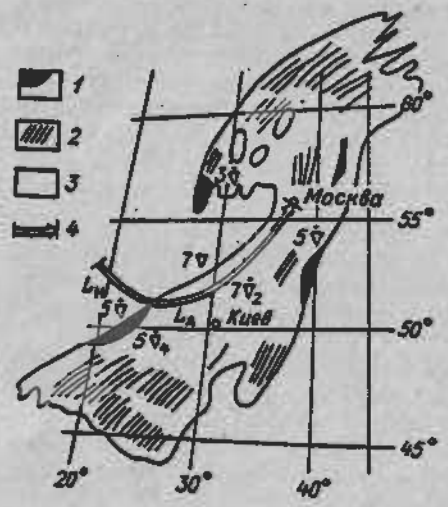


Рисунок 8.21 — Облачность на снимке ИСЗ 08.11.86 г. в 01 ч 32 мин СГВ.

1 — участки облачности с РКО, *2* — то же с РКСО, *3* — тонкая пелена перистых облаков без осадков, *4* — траектория движения облачности.

3) определяют параметры облачной системы с осадками, смещающейся к пункту прогноза. Параметры облачности, необходимые для расчета Q', определяют вдоль условной зоны шириной 300—400 км, средней линией которой является рассчитанная траектория перемещения воздушных масс (рисунок 8.21).

По снимку облачности с ИСЗ определяют класс облачности, ее характер и линейные размеры, используя таблицу 8.13.

По карте данных сети МРЛ определяют линейные размеры зоны осадков $L_{МРЛ}$ и максимальную высоту радиоэха $H_{в_{max}}$.

Погрешность определения линейных размеров на снимке облачности с ИСЗ (примерно 30 км) и на картах данных сети МРЛ (15—20 км) определяется погрешностью привязки информации на снимке и карте.

Если вдоль траектории перемещения воздушных масс зоны радиоэха отсутствуют, но в 00 ч СГВ по данным МРЛ в пункте прогноза отмечена зона осадков и над пунктом расположены малоподвижные циклон или ложбина, то для прогноза осадков используют параметры этой зоны и в 00 ч СГВ.

По картам AT_{850} и AT_{700} определяют характер барического поля и рассчитывают горизонтальный градиент температуры воздуха $Г_{t_{850}}$ на уровне 850 гПа в зоне облачности и фронта (таблица 8.14);

Таблица 8.13 — Класс облачности по данным снимка с ИСЗ

Класс облачности к	Характер облачности
1	Хорошо выраженный облачный вихрь или облачная полоса с $L_{ИСЗ}$ > 500 км со сплошным покровом без разрывов
2	То же, но просвечивающаяся, с разрывами
3	Облачный вихрь или облачная полоса с $L_{ИСЗ}$ = = 350...450 км, нерегулярные системы с $L_{ИСЗ}$ ≥ 500 км со сплошным покровом без разрывов
4	То же, но просвечивающие с разрывами и отдельными уплотнениями
5	Нерегулярные облачные полосы с $L_{ИСЗ}$ = 250...350 км
6	Облачные полосы, нерегулярные системы, изолированные скопления облаков с $L_{ИСЗ}$ < 200 км

Таблица 8.14 — Определение эволюции облачных систем с осадками и выбор высоты радиоэха для расчета

Эволюция	Параметры облачности и термобарического поля				Формула для расчета H^* км
	Класс облачности к по таблице 8.13	Градиент температуры у Земли, °С/100 км	Диаметр зоны радиоэха, км	Барическое поле	
Усиление	1 (вихрь)	1,0	300	Южный и юго-западный циклон	$H_в + 2$
Без изменения	1, 2, 3	0,5	300	Циклон, фронт, ложбина	$H_в$
Ослабление	1, 2, 3, 4	0,5	150—300	То же	$H_в - 1$
	5, 6	0,5	150	Без прохождения фронта, малоподвижные системы	

4) оценивают эволюцию облачных систем с осадками. Для оценки используют данные о к, $\Gamma_{t_{850}}$, $L_{МРЛ}$ и о характере барического поля (таблица 8.14). По таблице 8.14 в зависимости от эволюции облачности определяют высоту радиоэха H^* для расчета количества сконденсированной в облаке влаги;

5) рассчитывают разность массовой доли влаги q между нижним (H_{850}) и верхним (H^*) уровнем слоя осадкообразования. В расчете используют данные карт барической топографии в зоне облачности, смещающейся к пункту прогноза;

6) рассчитывают количество сконденсированной в облаке влаги. Значение Q' определяют по графику (рисунок 8.22) или по формуле (8.10).

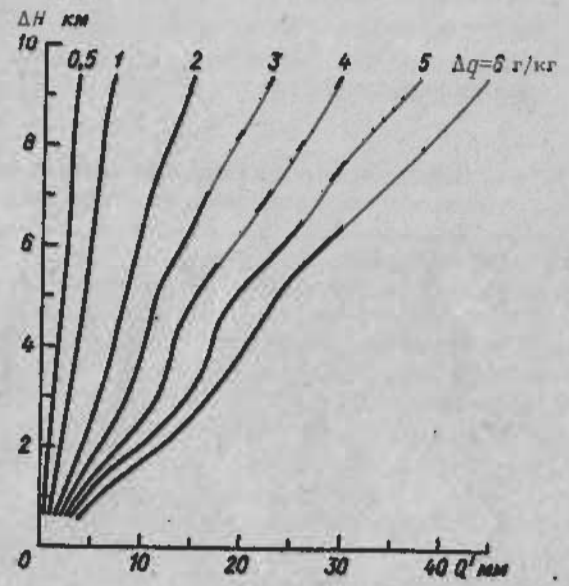


Рисунок 8.22 — Зависимость максимального количества осадков от мощности слоя $\Delta H = H^* - H_{850}$ и от разности значений массовой доли влаги на границах этого слоя.

Для упрощения расчетов по формуле (8.10) принимают $\bar{p} = 1$, если $H^* \leq 5$ км и $\bar{p} = 0{,}8$, если $H^* > 5$ км;

7) составляют прогноз максимальной и средней суммы осадков за 12 ч. Если вдоль траектории перемещения по данным МРЛ отмечено радиоэхо, то за максимальное количество осадков $Q_{макс}$ принимают рассчитанное значение Q'. Средние значения $\bar{Q}$ рассчитывают по формуле

$$\bar{Q} = 0{,}3Q_{макс};$$

8) определяют площадь распространения осадков по территории. Для этого используют график на рисунке 8.23.

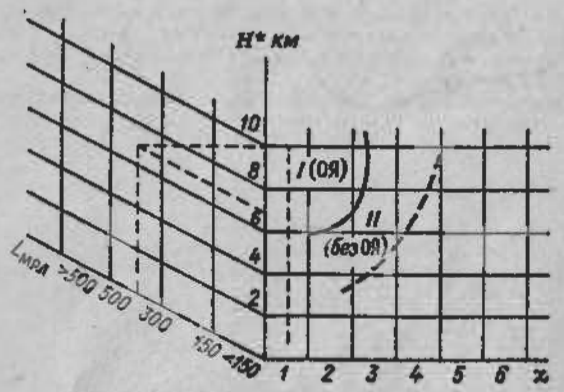


Рисунок 8.23 — Определение площади распространения осадков.

Если точка с координатами к, $L_{МРЛ}$, H^* на рисунке 8.23 попадает в зону I, то осадки выпадут на площади, занимающей более 30 % территории.

Если точка попадает в зону II, то осадки выпадут на площади менее 30 % территории.

Прогноз осадков по градациям составляют по значениям $Q_{макс}$ и по площади зон осадков в соответствии с Наставлением по службе прогнозов.

Пример — Прогноз количества осадков составлен на день 03.11.86 г. и на последующую ночь 04.11.86 г. для г. Москвы и Московской области.

При составлении прогноза использованы следующие материалы:

— карты данных сети МРЛ в 00 ч СГВ 3 ноября;

— карты AT_{850}, AT_{700}, AT_{500} и AT_{300} в 00 ч СГВ 3 ноября;

Порядок расчета:

1) определена траектория перемещения воздушных частиц. Для данного случая траектория перемещения на ЭВМ не рассчитывалась. Она рассчитана по карте AT_{700} на текущий день и последующую ночь. Для этого на карте AT_{700} проведена изогипса, проходящая через пункт прогноза, и вдоль нее рассчитана средняя скорость ветра (рисунок 8.24). В данном случае на день и ночь $v = 48$ км/ч.

Траектория перемещения воздушных масс следующая:

1) на конец дня

$L_д = 48 \times 18 = 864$ км (или 4,3 см на карте),

2) на конец ночи

$L_н = 48 \times 30 = 1440$ км (или 7,2 см на карте).

Траектория перемещения на день и ночь перенесена на карту МРЛ и на снимок облачности с ИСЗ. Так как траектория перемещения на последующую ночь выходит за край радиолокационной карты, прогноз составлен только на текущий день;

2) выявлено наличие облачных систем. Определены направление и скорость их перемещения. Для этого проведен анализ карт AT_{850} и AT_{700} в 00 ч СГВ 3 ноября 1986 г., а также снимка облачности с ИСЗ в 01 ч 32 мин СГВ и карт данных сети МРЛ в 00 ч СГВ 3 ноября.

На рисунке 8.24 нанесены изогипсы 700 гПа и траектория перемещения воздушных масс. Анализ этих данных показал, что вдоль траектории перемещения отмечена облачность с осадками.

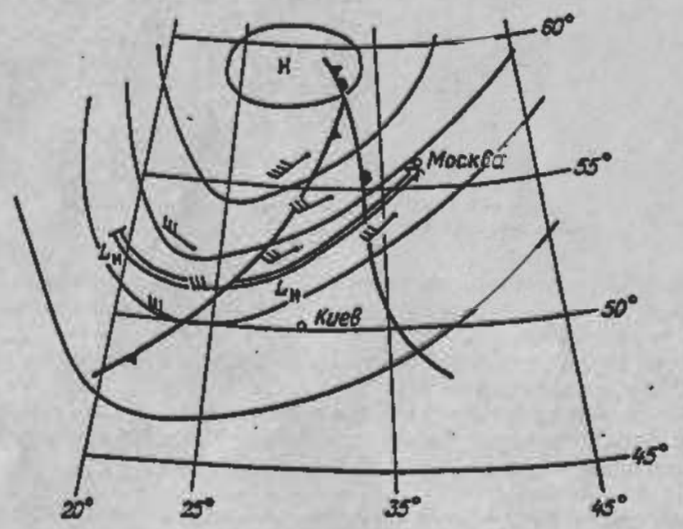


Рисунок 8.24 — Расположение фронтов на AT_{850} и изогипсы AT_{700} в 00 ч СГВ 03.11.86 г.

Рассчитана скорость перемещения облачности по формуле

$$v_{оп} = 0{,}7\,\bar{v}_{700} = 0{,}7 \times 48 = 34 \text{ км/ч}.$$

Как видно из анализа, другие облачные системы в радиусе траектории перемещения, не связанные с указанным циклоном, отсутствуют;

3) рассчитано время начала осадков в Москве $t_н$ и продолжительность их выпадения Δt. Для этого определено $L_1 = 450$ км.

По формуле (8.13)

$$t_н = 00 + 450/34 = 00 + 13{,}2 = 13 \text{ ч } 12 \text{ мин СГВ},$$

т. е. осадки в пункте прогноза должны начаться в 13 ч 12 мин СГВ 3 ноября.

Для расчета Δt определено расстояние от Москвы до тыловой границы зоны радиоэха от осадков $L_2 = 650$ км.

По формуле (8.14)

$$\Delta t = (650 - 450)/34 = 6 \text{ ч},$$

т. е. осадки будут выпадать примерно в течение 6 ч и закончатся около 19 ч:

$$t_н + \Delta t = 13 \text{ ч } 12 \text{ мин} + 6 \text{ ч} = 19 \text{ ч } 12 \text{ мин СГВ};$$

4) определены параметры облачности и зоны осадков вдоль траектории перемещения:

— по таблице 8.13 определен класс облачности $к = 4$ для данного примера;

— по данным сети МРЛ (рисунок 8.24) вдоль траектории перемещения отмечается зона осадков протяженностью $L_{МРЛ} = 200$ км с $H_{в_{макс}} = 7$ км, тип облачности — РКО, т. е. осадки ливневого характера;

— по картам AT_{850} и AT_{700} определен характер барического поля. В данном примере погоду в Москве и Московской области определяет перемещающаяся ложбина циклона, центр которого расположен в районе Прибалтики;

— по карте AT_{850} определен горизонтальный градиент температуры в районе наиболее яркой облачности или зоны осадков с максимальной высотой радиоэха. В данном примере $\Gamma_{t_{850}} = 1{,}2$ °С/100 км;

5) оценена эволюция облачности на ближайший день. Эволюция облачности определена по данным $L_{МРЛ}$, $\Gamma_{t_{850}}$, типу радиоэха и характеру барического поля (см. таблицу 8.14). В данном примере $к = 4$, $\Gamma_{t_{850}} = 1{,}2$ °С/100 км, $L_{МРЛ} = 200$ км, тип радиоэха — РКО, барическое поле — ложбина. По таблице 8.14 определено $H^* = H_{в_{макс}} - 1$. Следовательно, для расчета осадков $H^* = 7 - 1 = 6$ км;

6) рассчитано количество сконденсированной влаги в облаке Q' и максимальное количество осадков $Q_{макс}$. Для этого в слое $H_{850} - 6$ км по картам AT_{850}, AT_{700}, AT_{500} и AT_{300} за 00 ч СГВ вдоль траектории перемещения воздушных частиц (150—200 км по обе стороны от изогипсы), проходящей через пункт прогноза, в районе, где отмечается зона осадков с максимальной верхней границей радиоэха, определена температура точки росы T_d и температура воздуха. Это примерно район Гомеля и Минска. Данные t и T_d нанесены на эмаграмму, и по ним определены значения массовой доли влаги q_{850} на уровне 850 гПа и q_{H^*} на высоте $H^* = 6$ км.

В данном примере

$$q_{850} = 3{,}6 \text{ г/кг}, \quad q_{H^*} = 1{,}0 \text{ г/кг}, \quad \Delta q = 2{,}6 \text{ г/кг},$$

$\Delta H = H^* - H_{850} = 6 - 1{,}5 = 4{,}5$ км.

По данным $\Delta q = 2{,}6$ г/кг и $\Delta H = 4{,}5$ км, используя график на рисунке 8.22 определено $Q' = 10$ мм.

Таким образом, $Q_{макс} = Q'$, т. е. на день 03.11.86 г. дан прогноз „осадки ливневого характера" с $Q_{макс} = 10$ мм;

7) определена площадь распространения осадков по территории по данным к, H^* и $L_{МРЛ}$ (см. рисунок 8.23). Точка с координатами к = 4, $H^* = 6$ км и $L_{МРЛ} = 200$ км попала в область II. Это значит, что осадки с $Q_{макс} = 10$ мм выпадут на площади менее 30 % территории, т. е. местами.

Таким образом, на день 03.11.86 г. следует дать прогноз „осадки, местами сильные с $Q_{макс} = 10$ мм".

Фактическая погода: 03.11.86 г. в Москве и Московской области днем выпадали осадки, $Q_{макс} = 7{,}6$ мм. Осадки с $Q_{макс} > 7$ мм выпали на трех станциях, это меньше 30 % территории. Указанный метод внедрен в ряде УГМС СНГ решением ЦМКЛ Росгидромета [46].

8.5.3 Прогноз сильных и очень сильных осадков по комплексу термодинамических и спутниковых данных

В ряде регионов страны нет карт данных сети МРЛ, поэтому предложен способ прогноза максимального и среднего количества осадков в зимний период года с использованием только данных ИСЗ. Основное отличие этого способа от изложенного в п. 8.5.2 (по комплексу информации о МРЛ и ИСЗ) состоит в том, что высоту верхней границы облачности $H_{ИСЗ}$ и ее высоту с учетом эволюции облачности H^* определяют по таблице 8.15. В остальном для составления прогноза выполняют все действия, изложенные в п. 8.5.2.

Для составления прогноза необходимы следующие материалы:

1) снимки облачности с ИСЗ в ночные и предутренние сроки;

2) карты барической топографии поверхностей 850, 700 и 300 гПа в 00 ч СГВ.

Порядок расчета:

1) определяют возможность прохождения облачности через пункт прогноза, для чего определяют направление и скорость перемещения всех облачных систем в радиусе 1200 км от пункта прогноза;

2) рассчитывают время начала и продолжительности выпадения осадков в пункте по формулам (8.13) и (8.14). Для этого L_1 определяют по снимку облачности от пункта прогноза до наиболее плотного участка переднего края облачности с той стороны, откуда она перемещается. Значение L_2 определяют по формуле

$$L_2 = 0{,}4 L_{ИСЗ},$$

где $L_{ИСЗ}$ — ширина облачности по направлению перемещения на снимке с ИСЗ;

Таблица 8.15 — Определение максимальной высоты облачности по снимку с ИСЗ ($H_{в_{ИСЗ}}$) и высоты радиоэха с учетом эволюции (H^*)

Класс облачности к	Характер облачности по данным ИСЗ	$H_{в ИСЗ}$ км	Формула для расчета $H^*_{ИСЗ}$ км
1	Хорошо выраженный облачный вихрь или облачная полоса с $L_{ИСЗ} \geq 500$ км со сплошным покровом без разрывов, связанные с южными и юго-западными циклонами	9/7	$H_в + 2$
1, 2	Облачные вихри, облачные полосы с $L_{ИСЗ} = 350...500$ км, плотные, просвечивающие, с отдельными уплотнениями; нерегулярные системы с $L_{ИСЗ} \geq 500$ км со сплошным покровом без разрывов	7/5	$H_в$
3, 4	То же, $L_{ИСЗ} = 250...400$ км	6/5	$H_в - 1$
5, 6	Облачные полосы и нерегулярные системы, изолированные, плотные, просвечивающие, с отдельными уплотнениями; нерегулярные системы с $L_{ИСЗ} > 500$ км со сплошным покровом без разрывов	7/5	$H_в - 2$

Примечания — 1. Числитель — $H_{в ИСЗ}$ для более плотной облачности, знаменатель — для менее плотной. 2. В формулах для расчета определяют $H_в$ по данным МРЛ или ИСЗ.

3) определяют по снимку с ИСЗ параметры смещающейся к пункту прогноза облачной системы: $L_{ИСЗ}$, $H_{в_{ИСЗ}}$ и $H^*_{ИСЗ}$. Параметры $H_{в_{ИСЗ}}$ и $H^*_{ИСЗ}$ определяют по таблице 8.15;

4) рассчитывают разность массовой доли влаги Δq в слое $H_{850} - H^*_{ИСЗ}$ в зоне облачности, смещающейся к пункту;

5) определяют количество сконденсированной влаги в облаке по графику на рисунке 8.22 или по формуле (8.15);

6) составляют прогноз максимального и среднего количества осадков. Максимальное количество осадков $Q_{макс} = Q'$ определяют по графику (рисунок 8.22), а среднее рассчитывают по формуле

$$\overline{Q} = 0{,}3Q_{макс};$$

7) определяют (при необходимости) площадь распространения осадков по графику на рисунке 8.23. В данном случае вместо $L_{МРЛ}$ используют величину

$$L_2 = 0{,}4L_{ИСЗ}.$$

Окончательный прогноз составляют с учетом данных $Q_{макс}$ и максимальной площади осадков по Наставлению по службе прогнозов.

8.5.4 Прогноз сильных и очень сильных осадков по комплексу термодинамических и радиолокационных данных

Когда в прогностических подразделениях отсутствуют снимки облачности с ИСЗ или они не поступают в необходимые сроки наблюдений, то прогноз максимального количества осадков можно составить, используя только данные МРЛ.

Последовательность действий при составлении прогноза аналогичная изложенному в пп. 8.5.2 и 8.5.3. Различие состоит в том, что высоту радиоэха с учетом эволюции H^* определяют по данным таблицы 8.16.

Таблица 8.16 — Определение высоты радиоэха с учетом эволюции по данным МРЛ

Характер термобарического поля	Γ_{850} °С/100 км	Ширина радиоэха по направлению перемещения L км	Формула для расчета высоты радиоэха с учетом эволюции H^* км
Южные и юго-западные циклоны	> 1,0	> 300	$H_{в_{МРЛ}} + 2$
Циклоны, фронт, ложбина	> 0,5	> 300	$H_{в_{МРЛ}}$
То же	> 0,5	150—300	$H_{в_{МРЛ}} - 1$
Малоподвижная система без прохождения фронтов	> 0,5	< 150	$H_{в_{МРЛ}} - 2$

Максимальное количество осадков рассчитывают также по формуле (8.10) или по графику на рисунке 8.22, или по формуле

$$Q_{макс} = Q' = \Delta q\,\Delta H,$$

где ΔH — толщина слоя $H^* - H_{850}$.

Для составления прогноза необходимы следующие материалы:

1) карты данных сети МРЛ в 00 и 03 ч СГВ;

2) карты барической топографии поверхностей 850, 700, 500 и 300 гПа в 00 ч СГВ.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
(справочное)

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ РАДИОЛОКАЦИИ

Основным принципом радиолокации является обнаружение и определение местоположения различных объектов путем зондирования пространства с помощью радиоволн. При этом используют узконаправленные короткие радиоимпульсы, формируемые и направляемые в заданную точку пространства радиолокационной станцией (РЛС). Электромагнитные волны, излучаемые антенной, распространяются в атмосфере со скоростью, близкой к скорости света в вакууме ($3 \cdot 10^{10}$ см/с). При наличии препятствий или диэлектрических неоднородностей среды на пути распространения радиоволны частично отражаются от них обратно и могут быть приняты как эхо-сигнал (радиоэхо), часть радиоволн рассеивается по всем направлениям, а часть поглощается.

Радиолокационными целями называют диэлектрические неоднородности, создающие радиоэхо. Такими целями могут быть неровности рельефа, строения и прочие местные предметы, летательные аппараты, волны и корабли на водной поверхности. Неоднородности атмосферы метеорологического происхождения (облака, осадки, туманы, ионизированные каналы молний, инверсии температуры, влажности и др.) называют метеоцелями.

Преимущество радиолокационного способа обнаружения целей состоит в том, что его с одинаковым успехом можно использовать в любое время суток и при любой погоде.

Радиолокаторы имеют большой радиус действия и позволяют обозревать пространство за очень короткое время без каких-либо нарушений собственно структуры полей элементов.

В метеорологии используют радиолокаторы сантиметрового и миллиметрового диапазонов.

Подробнее тактико-технические свойства метеорологических радиолокаторов изложены в Руководстве по производству наблюдений и применению информации с радиолокаторов МРЛ-1 и МРЛ-2 (см. п. 2).

А.1 Дальность радиовидимости

Радиоволны сантиметрового диапазона распространяются в атмосфере в пределах прямой видимости по криволинейным, а не по прямолинейным траекториям. Причиной этого является атмосферная рефракция, обусловленная диэлектрической неоднородностью атмосферы.

Убывание с высотой температуры, давления и влажности воздуха определяет убывание с высотой показателей преломления. Поскольку в верхних слоях атмосферы показатели преломления меньше, чем в нижних, скорость распространения радиоволн увеличивается с увеличением высоты слоя над поверхностью Земли. По этой причине первоначально горизонтальная траектория любой радиоволны по мере удаления от источника радиоволн загибается вниз к поверхности Земли.

Радиогоризонт расположен дальше оптического горизонта. Это объясняется большим влиянием водяных паров на степень искривления радиолуча (радиорефракция). Так как водяной пар не влияет на степень оптической рефракции, дальность радиогоризонта оказывается в среднем на 15 % больше дальности оптического горизонта.

На вход приемника РЛС одновременно поступают сигналы, отраженные от совокупности частиц, заключенных в некотором объеме. Этот объем ограничен шириной диаграммы направленности антенны радиолокатора и половиной длины зондирующего импульса. Такой объем увеличивается с удалением от РЛС. Поэтому для характеристики эффективной площади рассеяния совокупности частиц используют понятие об эффективной площади рассеяния единицы объема η. Если расстояние между частицами в объеме таково, что нет взаимодействия между полями, излучаемыми отдельными частицами (интерференция), то такое рассеяние называют некогерентным. В этом случае определяют следующую величину:

$$\eta = \Sigma\, \sigma_i\,, \tag{A.1}$$

где η — эффективная площадь рассеяния единицы объема V,

σ_i — эффективная площадь рассеяния отдельных частиц.

Для сферических релеевских частиц используют формулы:

$$\eta = (64\pi^5/\lambda^4)\, \Sigma\, a_i^6\, N\, |(m^2 - 1)/(m^2 + 2)|^2, \tag{A.2}$$

$$\eta = (64\pi^5/\lambda^4)\, Z\,,$$

где Z — радиолокационная отражаемость, см^3:

$$Z = \Sigma\, a_i^6\, N\, |(m^2 - 1)/(m^2 + 2)|^2, \tag{A.3}$$

где a — радиус рассеивающей частицы.

А.2 Эффективная площадь рассеяния метеоцели

Интенсивность излучения от указанных частиц в направлении на радиолокатор, как и для всякой цели, можно оценить через эффективную площадь рассеяния σ. Для малых частиц ($\alpha \le 0{,}031$) сферической формы величину σ описывает формула Рэлея:

$$\sigma = (64\pi^5 a^6/\lambda^4) / \left| (m^2 - 1)/(m^2 + 2) \right|, \qquad (A.4)$$

где a — радиус частицы;

λ — длина волны РЛС;

$\left|(m^2 - 1)/(m^2 + 2)\right|$ — множитель, который для воды в сантиметровом диапазоне волн равен $0{,}93 \pm 0{,}04$, а для льда равен 0,197, (для водной сферической частицы этот множитель в 5 раз больше, чем для ледяной сферической частицы таких же размеров).

Когда $a > 0{,}03\lambda$, величину σ рассчитывают по точным формулам Ми. Рассеяние от сухих ледяных сфер, размеры которых равны длине волны или превышают ее, на порядок больше, чем рассеяние от водных капель такого же радиуса. Отражение от большой водяной сферы, как и от обводненной большой ледяной сферы, для которой $2a \ge 0{,}8\lambda$, приводит к уменьшению σ. Это объясняется различными показателями преломления и разным внутренним поглощением энергии, падающей на сухие и водяные сферические частицы.

Диапазон отражаемости Z в реальных облаках очень велик (от 10^{-5} до 10^5 мм^6/м^3), поэтому часто для удобства используют логарифм или децилогарифм ($\lg Z$ или $10 \lg Z$).

Пример — $Z = 10^{3,5}$ мм^6/м^3 записывают как $\lg Z = 3{,}5$, а $Z = 1$ мм^6/м^3 как $\lg Z = 0$.

Отражаемость Z является специфической метеорологической характеристикой интегральной микроструктуры облаков и осадков, такой же как водность облаков или интенсивность выпадающих осадков. В отличие от η, величина Z не зависит от длины волны λ или от каких-либо других параметров радиолокатора.

Из формул (А.3) и (А.4) следует зависимость Z и η от размера частиц (d^6). Если диаметр одной капли больше другой в 10 раз, то значения Z, η и отраженного от них сигнала будут различаться в 10^6 раз. Таким образом, Z резко возрастает при увеличении размеров частиц и их содержания в облаке и резко падает по мере их уменьшения. Поэтому РЛС наиболее эффективны при обнаружении и определении размеров облаков, состоящих из большого количества крупных частиц.

А.3 Ослабление сантиметровых радиоволн

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

Радиоволны поглощают газы тропосферы (кислород, водяной пар) и частицы воды и льда облаков и осадков.

Для расчета полного ослабления при распространении радиоволн вводят коэффициент ослабления $\varphi_{осл}$, который измеряют в децибелах на единицу пути:

$$\varphi_{осл} = \varphi_{а.г} + \varphi_{обл} + \varphi_{ос}, \qquad (A.5)$$

где $\varphi_{а.г}$, $\varphi_{обл}$ и $\varphi_{ос}$ — соответственно коэффициенты ослабления в атмосферных газах, в облаках и в осадках.

Ослабление определяется длиной волны. Так, при средней водности облаков $M = 1{,}0...2{,}5$ г/м^3 при изменении длины волны от 1 до 3 см ослабление меняется примерно на порядок.

При одном и том же содержании влаги ослабление в кристаллических облаках примерно на порядок меньше, чем в водяных. Для всех практических целей ослаблением микрорадиоволн в кристаллических облаках можно пренебречь.

Ослабление в осадках представляют обычно как функцию интенсивности осадков I. Интенсивность осадков зависит от содержания жидкой воды и от скорости падения капель, зависящей, в свою очередь, от размера капель. Ослабление в мокром снеге такое же, как и в дожде той же интенсивности.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б
(справочное)

Библиография

1. Бачурина А. А., Туркетти З. Л. Условия образования осадков холодного полугодия и возможности их прогноза. — Л.: Гидрометеоиздат, 1955.

2. Биркган А. Ю. Краткосрочный прогноз конвективных явлений // Тез. докл. IV Всесоюз. конф. по статистической интерпретации. — Одесса, 1991.

3. Богданова Л. М., Пономаренко И. И., Прохоренко В. М., Сотник П. Л. Об использовании спутниковой цифровой ИК-информации при анализе процессов в Карпатах в теплый период года// Тр. Украинского регионального научно-исследовательского гидрометеорологического института. — 1989. — № 233.

4. Болдырев Г. А. и др. Некоторые результаты определения высоты верхней границы облаков по спутниковым измерениям инфракрасной радиации // Тр. ГМЦ СССР. — 1971. — Вып. 73.

5. Васильев А. А., Песков В. Е., Снитковский А. И. Смерчи 9 июня 1984. — Л.: Гидрометеоиздат, 1986.

6. Глушкова Н. И. Физические условия формирования мощных кучево-дождевых облаков и явлений, связанных с ними гроз, града и ливня // Тр. ГМЦ СССР. — 1974. — Вып. 136.

7. Глушкова Н. И. Исследование взаимосвязи между различными параметрами облака и атмосферы при выпадении ливней и града // Тр. ГМЦ СССР. — 1978. — Вып. 201.

8. Глушкова Н. И. Некоторые результаты исследования по усовершенствованию диагноза и прогноза осадков по данным МРЛ // Тр. ГМЦ СССР. — 1980. — Вып. 220.

9. Глушкова Н. И. Условия выпадения сильных ливней и града // Тр. ГМЦ СССР. — 1981. — Вып. 233.

10. Глушкова Н. И. Исследование физико-статистических условий образования осадков // Тр. ГМЦ СССР. — 1985. — Вып. 266.

11. Глушкова Н. И. Прогноз осадков по данным спутниковых и радиолокационных наблюдений // Тр. ГМЦ СССР. — 1985. — Вып. 266.

12. Глушкова Н. И., Громова Г. Г., Лапчева В. Ф. Комплексное использование спутниковой, радиолокационной и аэросиноптической информации для прогноза значительных осадков на примере снегопада 14—16 октября 1971 г. в центральном районе ЕТ СССР // Тр. ГМЦ СССР. — 1973. — Вып. 116.

13. Дивинская Б. Ш., Брылев Г. Б., Сальман Е. М. Радиолокационные характеристики полей с мощными кучевыми облаками и их связь с термодинамическим состоянием атмосферы // Тр. ГГО. — 1969. — Вып. 243.

14. Домбковская Е. П. Связь между облачными массивами, видимыми со спутника, и зонами выпадающих из них осадков // Тр. ГМЦ СССР. — 1968. — Вып. 36.

15. Колобков Н. В. Грозы и шквалы. — Москва, 1951.

16. Лапчева В. Ф. Сопоставление результатов радиолокационных исследований конвективных облаков // Тр. ВГИ. — 1966. — Т. 3(5).

17. Лапчева В. Ф. Результаты радиолокационного исследования зон отражений от конвективных облаков // Физика облаков. — Тбилиси: Мецниереба, 1967.

18. Лапчева В. Ф. Определение влияния ослабления электромагнитного излучения МРЛ-2 с длиной волны 3,2 см на распознавание ливней и гроз // Тр. ГМЦ СССР. 1974. — Вып. 136.

19. Лапчева В. Ф. Уточнение интерпретации радиолокационных данных на картах сети МРЛ с целью распознавания кучево-дождевых, грозовых и градовых облаков // Тр. ГМЦ СССР. 1977. — Вып. 176.

20. Лапчева В. Ф. Характерные особенности радиоэха облачных полей с осадками различной интенсивности в районе Москвы и Московской области // Тр. ГМЦ СССР. — 1977. — Вып. 176.

21. Лапчева В. Ф. Вероятность обнаружения конвективных явлений погоды сетью метеорологических станций и постов // Тр. ГМЦ СССР. — 1978. — Вып. 201.

22. Лапчева В. Ф. Определение факта и вида осадков по данным МРЛ в летний период года // Тр. ГМЦ СССР. — 1978. — Вып. 201.

23. Лапчева В. Ф. Метод прогноза количества осадков, в том числе сильных и очень сильных в холодный период года по данным МРЛ // Тр. ГМЦ СССР. — 1988. — Вып. 292.

24. Лапчева В. Ф. Исследование условий формирования осадков в холодный период года с использованием данных наблюдений ИСЗ и МРЛ // Тр. ГМЦ СССР. — 1989. — Вып. 299.

25. Лапчева В. Ф. Условия развития зон активной конвекции со смерчами и сильными шквалами // Тр. ГМЦ СССР. — 1989. — Вып. 299.

26. Лапчева В. Ф. Характеристики сильных и очень сильных осадков в зимний период года в Москве и Московской области // Тр. ГМЦ СССР. — 1989. — Вып. 299.

27. Лапчева В. Ф. Условия формирования и прогноз сильных шквалов с использованием данных наблюдений МРЛ и ИСЗ // Метеорология и гидрология. — 1990. — № 8.

28. Лапчева В. Ф. Методы прогноза сильных шквалов по данным метеорологических радиолокаторов и снимкам облачности с ИСЗ // Тр. ГМЦ СССР. — 1993. — Вып. 326.

29. Лапчева В. Ф., Литвин Н. Н. Об использовании данных сети МРЛ для восполнения информации о максимальном количестве осадков за 12 ч. // Тр. ГМЦ СССР. — 1978. — Вып. 201.

30. Мезометеорология и краткосрочное прогнозирование / Под ред. Н. Ф. Вельтищева // Сб. лекций ВМО. — 1988. — № 1708.

31. Минакова Н. Е. Результаты анализа радиолокационных данных по распознаванию ливней и гроз // Тр. ГМЦ СССР. — 1974. — Вып. 136.

32. Пальмен Э., Ньютон Ч. Циркуляционные системы атмосферы. — Л.: Гидрометеоиздат, 1973.

33. Петерсен. Анализ и прогноз погоды. Л.: Гидрометеоиздат, 1961.

34. Пономаренко И. Н. Использование радиационных наблюдений метеорологических спутников для анализа облакообразования и зон выпадающих осадков // ДАН СССР. Серия Физика атмосферы и океана. — 1973. Т. IX, № 10.

35. Прокопьева И. П. Вероятностный синоптико-статистический прогноз значительных осадков по Новосибирской и Томской областям // Тр. ЗапСибНИГМИ. — 1965. — Вып. 39.

36. Снитковский А. И. Смерчи на территории СССР// Метеорология и гидрология. — 1987. № 9.
37. Снитковский А. И., Черная Р. Б. Вероятностный прогноз обложных осадков // Тр. ГМЦ СССР. — 1985. — Вып. 271.
38. Сулаквелидзе Г. К. Ливневые осадки и град. — Л.: Гидрометеоиздат, 1961.
39. Сулаквелидзе Г. К., Глушкова Н. И., Федченко Л. М. Прогноз града, гроз и ливневых осадков. — Л.: Гидрометеоиздат, 1970.
40. Фалькович А. И. Динамика и энергетика внутритропической зоны конвергенции. — Л.: Гидрометеоиздат, 1979.
41. Федоров Ю. К. Способ автоматической стыковки данных метеорологических радиолокаторов // Тр. ГМЦ СССР. — 1973. — Вып. 102.
42. Федченко Л. М., Гораль Г. Г. и др. Опасные конвективные явления и их прогноз в условиях сложного рельефа. — М.: Гидрометеоиздат, 1991.
43. Финдайзен В., Шульц Г. Экспериментальное исследование образования ледяных частиц // Физика образования осадков. — М., 1951.
44. Шишкин И. С. Облака, осадки и грозовое электричество. — Л.: Гидрометеоиздат, 1964.
45. Шметер С. М. Физика конвективных облаков. — Л.: Гидрометеоиздат, 1972.
46. Ярин Ю. А. Результаты испытания метода прогноза максимального количества зимних осадков, в том числе сильных, за 12 и 24 ч с использованием данных ИСЗ и МРЛ. — 1988. — Информационный сборник № 17.
47. Aschbacher I. Combination of meteosat and synoptic data to determine rainfall a case study // J. Meteorol. and Atmos. Phys. — 1987. — Vol. 37, N 4. — P. 212—218.
48. Bergeron T. On the physics of clouds and precipitation // Proc. 3th Assembly Uccel Lison 2. — 1935.
49. Braham R. R., Chicago I. R. What is the Role of Jet in Summer Rainshower // J. Atm. Scien. — Vol. U. 6 — 1964.
50. Browing K. A. Cellular structure of convective storms // The Meteorology Magazine. — 1962. — Vol. 91, N 1085. — P. 341—350.
51. Bunsh-Makarewich Z. Zwaizek Wygladu u Kladow chmurowych na Zdjecicach Satelitarych z Zodrajem Opadu // Wiad. Slurby Hud-z. Met ZZ. Warsawa. — 1978.
52. Chlohg A. A numerical study of horisontal roll vortices in neutral and unstable atmosphere // Beotr. Phys. Atmos. — 1987. — Vol. 60, N 2.
53. Dennis J., Heymsfield Andew J., Smith Paul S. Microphysical characteristics of a well developed weak echo region in a high plains supercell thunder storm // J. Clim. and Appl. Meteorol. — 1986. — Vol. 25, N 7. — P. 1037—1051.
54. List R. Zur Thermodinamik teilweise wassbriger Hagelkorner // Is fur angewandte Math und Phys. — 1960. — Bd. XI.
55. List R., Lozowski E. F. Some Effects of Precipitation on the dynamics of Cumulus clouds initiated over mountains a Numerical Experiment II Proc. // Proc. Intern. conf. Cloud. Phys. Aug. 26—30th, 1968, Toronto. —P. 504—509.
56. Ludlam F. H. Severe local storms: a review // Met. Mon. — 1963. — Vol. 5, N 27. P. 1—30.
57. Shlatter I. W. Caracteristics and use of a threedimensional statistical scheme for analysing global data. — CARP Programme of Numerical Experimentation. — 1976. — Rep. N 11.

58. Smith E. A., Reynolds D. W. Comparison of cloud top height determination from three independent sources: satellite in measurements, satellite viewed cloud shadows: radar // Proc. Symp. On meteorol. Observ. from Space: Their Contribution to the First GARP Global Experiment, June 1976. — Boulder, 1978. — P. 237—244.
59. Vasiloff S. V., Brancles E. A., Davies J. R., Relly P. S. An investigation of the transition from multicell to supercell storms // J. Clim. Appl. Meteorol. — 1986. — Vol. 25, N 7.
60. Weikman H. The language of hailstorms and hail Nubila. Anno2 — Verona, 1962.
61. Wilkins E. M., Pramond Ch. J. Effects of convection cell geometry on simulated tornado // J. Atmos. Scien. — 1987. — Vol. 44, N 1.
62. Woodkok A. H. Salt Particles and Raindrops in Hawaii // J. Atmos. Scien. — 1971. — Vol. 28, N 5.
63. Woodly W. L., Norwood J. S. B. Some precipitation aspect of Florida showers and thunderstorms // Weatherwise — 1971. — Vol. 24, N 3.

УДК 551.509.324+52

Ключевые слова: стихийные явления, ливни, град, шквалы, опасные конвективные явления, мезометеорологические конвективные явления, Х.Ск.Сb, прогноз, диагноз

Лист регистрации изменений РД 52.27.339—93

Номер изменения	Номер страницы				Номер документа	Подпись	Дата внесения изменения	Дата введения изменения
	измененного	замененного	нового	аннулированного				

НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ИЗДАНИЕ
РД 52.27.339—93

Руководство
по диагнозу и прогнозу опасных и особо опасных осадков,
града и шквалов по данным метеорологических радиолокаторов
и искусственных спутников Земли

Редактор А. Б. Иванова
Технический редактор Е. Я. Заводько
Корректор Г. Н. Римант

ЛР № 020228 от 08.10.91 г.

Подписано в печать 17.05.96. Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл.-печ. л. 10,46. Усл. кр.-от. 10,58. Уч.-изд. л. 10,74. Тираж 300 экз. Индекс МОЛ-47. Заказ 632. Заказное.

Гидрометеоиздат, 199397, Санкт-Петербург, В. О., ул. Беринга, д. 38.
ФОП, 249020, Обнинск, ул. Королева, д. 6.