МИНИСТЕРСТВО ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ
И ЭКОЛОГИИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ
И МОНИТОРИНГУ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ
(РОСГИДРОМЕТ)

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ВЫСОКОГОРНЫЙ ГЕОФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»

М.Т. Абшаев, А.М. Абшаев, М.В. Барекова, А.М. Малкарова

РУКОВОДСТВО ПО ОРГАНИЗАЦИИ И ПРОВЕДЕНИЮ ПРОТИВОГРАДОВЫХ РАБОТ

Нальчик, 2014

УДК 551.508.85:509.3:509.616:577.1:578.7

ББК 26.23

ISBN 978-5-905770-54-8

Руководство по организации и проведению противоградовых работ. – Нальчик: – Печатный двор, 2014. – 508 с.

Содержит сведения о климатологии града, научно-методических основах прогноза и радиолокационного обнаружения града, о классификации градовых процессов, об особенностях их строения и динамики развития, механизме образования града, о физических основах воздействия на градовые процессы, методах и технических средствах предотвращения града, а также практические рекомендации по организации и проведению противоградовых работ, оценке их эффективности и экологической чистоты, порядку документирования материалов воздействия и подготовке отчетов.

Руководство предназначено для применения в ВС Росгидромета и других учреждениях, применяющих российскую автоматизированную технологию противоградовой защиты. Может быть использовано в качестве учебного пособия в ВУЗах и техникумах гидрометеорологического профиля, а также аспирантами, научными работниками и специалистами, занимающимися активными воздействиями на облака.

Manual on hail prevention: Contains information about hail climatology, scientific-methodical bases of hail forecast and radar detection, about hailstorms classification and peculiarities of their structure and development, about hail formation mechanism and physical bases of hail prevention, about methods and technical means of hail suppression and practical recommendations on organization and carrying out of antihail operations, estimation of their efficiency and ecological cleanliness. Intended for use by Antihail Services and can be used as the textbook in educational institutions of hydrometeorology profile and science experts who are engaged in weather modification.

Руководство разработано: Федеральным Государственным Бюджетным Учреждением «Высокогорный геофизический институт» в соответствии с приказом Росгидромета от 03.12.2007 г. № 392 «Об упорядочении нормативных документов оперативно-производственного характера».

Разработчики: М.Т. Абшаев, А.М. Абшаев; М.В. Барекова, А.М. Малкарова

Согласовано: с Управлением специальных и научных проблем Росгидромета

Ведено в действие: Приказом Росгидромета взамен «Руководства по организации и проведению противоградовых работ» издания 1981 г.

Тираж 400 экз. Усл. п.л. 26.67. Формат 60x84 $^{1}/_{32}$. Заказ № 869.
Печать офсетная. Гарнитура Areal. Бумага офсетная. ISBN 978-5-905770-54-8
Отпечатано ООО «Печатный двор» с готового оригинал-макета.
36000, КБР, г. Нальчик, ул. Калюжного, 1

С О Д Е Р Ж А Н И Е

1 Область применения 1

2 Нормативные ссылки 1

3 Термины, определения и сокращения 2

4 Общие положения 5

5 ГРАД И КЛИМАТОЛОГИЯ ГРАДА 7

5.1 Введение. 7

5.2 Условия выпадения града 11

5.3 Климатология града 14

5.4 Градоопасность различных регионов 33

5.5 Тенденции изменения градоопасности территорий 44

6 ПРОГНОЗ ГРАДА 46

6.1 Синоптические условия развития градовых процессов 46

6.2 Условия развития конвекции и критерии неустойчивости атмосферы 51

6.3 Термодинамический анализ и прогноз состояния атмосферы 58

6.4 Прогноз конвективной облачности и ливневых осадков 59

6.5 Прогноз града 61

6.6 Прогноз интенсивности градового процесса 63

6.7 Прогноз мезорайона развития градового процесса 65

6.8 Прогноз типа градового процесса 67

6.9 Прогноз шквалов 69

6.10 Формат специализированных прогнозов града 71

7 РАДИОЛОКАЦИОННОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ ГРАДА 72

7.1 Основные принципы радиолокации 72

7.2 Понятия о параметрах метеорологических радиолокаторов 74

7.3 Уравнения радиолокации одиночных целей 79

7.4 Уравнения радиолокации метеорологических целей 80

7.5 Понятия о радиолокационной отражаемости метеообъектов . 82

7.6 Общие сведения об ослаблении радиоволн 83

7.7 Сведения о распространении радиоволн 86

7.8 Рассеяние радиоволн отдельными гидрометеорами 91

7.9 Рассеяние и ослабление радиоволн спектром гидрометеоров 101

7.10 Доплеровский сдвиг частоты рассеянного поля 111

7.11 Деполяризация рассеянного поля 117

7.12 Радиолокационные методы обнаружение града 121
7.12.1 Одноволновые методы 122
7.12.2 Двухволновый метод 135
7.12.3 Поляризационный метод 139
7.12.4 Критерии распознавания крупного града 141
7.13 Ограничения радиолокационных методов измерений 145

8 МАКРОФИЗИКА ГРАДОВЫХ ПРОЦЕССОВ 149
8.1 Классификация градовых процессов 149
8.2 Структура и динамика развития градовых процессов: 154
8.2.1 Одноячейковые процессы 154
8.2.2 Многоячейковые процессы 156
8.2.3 Процессы переходного типа 160
8.2.4 Суперячейковые процессы 163
8.3 Особенности перемещения градовых облаков 168
8.4 Стадии эволюции градовых процессов 174

9 МИКРОФИЗИКА ГРАДОВЫХ ПРОЦЕССОВ 177
9.1 Микрофизические характеристики градовых облаков 177
9.2 Стадии градообразования 181
9.3 Природа зародышей града 183
9.4 Механизм образования града 184
9.5 Распространение процесса градообразования 188

10 ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ГРАДА 190
10.1 Основные физические принципы предотвращения града . . 190
10.2 Полная кристаллизация переохлажденной части облака . . . 192
10.3 Стимулирование благоприятной конкуренции 193
10.4 Укрупнение капель с последующим замораживанием. 196
10.5 Понижение траектории градин 197
10.6 Динамическое подавление восходящих потоков 197
10.7 Стимулирование преждевременного осадкообразования . . . 199
10.8 Оптимальные схемы засева градовых облаков 206

11 ТЕХНОЛОГИИ ПРОТИВОГРАДОВОЙ ЗАЩИТЫ 212
11.1 Основные технологии противоградовой защиты 212
11.2 Наземно-генераторная технология 215
11.3 Авиационная технология 217
11.4 Артиллерийская технология 218
11.5 Ракетная технология 219

11.6 Этапы развития современной ракетной технологии 221
11.8 Основные положения российской ракетной технологии ПГЗ 222
11.9 Ограничения российской технологии ПГЗ 227

12 РАДИОЛОКАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПГЗ 231
12.1 Основные характеристики применяемых радиолокаторов: . . 231
12.1.1 Двухволновый радиолокатор «МРЛ-5» 232
12.1.2 Доплеровский радиолокатор «ДМРЛ-С» 234
12.1.3 Метеоканал радиолокатора «12А6» 236
12.2 Автоматизированные системы обработки информации МРЛ 239
12.3 Алгоритмы обработки радиолокационной информации 245
12.4 Порядок подготовки МРЛ и АСУ 253

13 ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЗАСЕВА ГРАДОВЫХ ОБЛАКОВ . . 266
13.1 Авиационные средства засева облаков 266
13.2 Наземные генераторы льдообразующего аэрозоля 272
13.3 Фейерверочные средства засева облаков 273
13.4 Артиллерийские противоградовые комплексы 275
13.5 Ракетные противоградовые комплексы 278
13.6 Российские ракетные противоградовые комплексы. 283
13.7 Сравнительный анализ средств засева градовых облаков 295
13.8 Автоматизированная система ПГЗ 304

14 РЕАГЕНТЫ ДЛЯ ЗАСЕВА ГРАДОВЫХ ОБЛАКОВ. 314
14.1 Хладореагенты 314
14.2 Кристаллизующие реагенты 315
14.3 Гигроскопические реагенты 328
14.4 Закономерности распространения реагентов в облаках 329

15 ПОРЯДОК ОРГАНИЗАЦИИ ПРОТИВОГРАДОВЫХ РАБОТ 337
15.1 Экономическое обоснование ПГЗ 337
15.2 Подготовка проекта системы ПГЗ 341
15.3 Создание системы ПГЗ 342
15.3.1 Выбор позиции командного пункта 344
15.3.2 Размещение и выбор позиций ракетных пунктов 346
15.3.3 Подготовка позиций КП и ПВ 350
15.3.4 Организация системы связи противоградовой службы 353
15.3.5 Порядок подготовка персонала КП и ПВ 355
15.3.6 Порядок приобретения и учета ПГИ и ПУ 356
15.3.7 Порядок хранения ПГИ 358

15.3.8 Порядок расчет переходящего запаса ПГИ 359
15.4 Подготовка договора на проведение ПГЗ 360
15.5 Режим работы противоградовых подразделений 363

16 ПОРЯДОК ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ГРАДОВЫЕ ПРОЦЕССЫ 366
16.1 Подготовка к проведению активного воздействия 366
16.2 Режимы работы персонала по воздействию 367
16.3 Порядок проведения радиолокационных наблюдений 370
16.4 Порядок распознавания объектов воздействия 372
16.5 Порядок выполнения противоградовых операций 373
16.6 Порядок засева объектов воздействия I категории 376
16.7 Порядок засева объектов воздействия II категории 377
16.8 Порядок засева объектов воздействия III и IV категории с правосторонним развитием 379
16.9 Порядок засева объектов воздействия III и IV категории с левосторонним развитием 381
16.10 Нормы расхода противоградовых ракет 382
16.10 Радиолокационный контроль результатов засева 385
16.12 Наземный контроль результатов воздействия 387
16.13 Порядок документирования противоградовых операций . . 387
16.14 Основные проблемы при проведении воздействия 388
16.15 Порядок обеспечения безопасности ПГЗ 390

17 ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОТИВОГРАДОВЫХ РАБОТ . . 391
17.1 Радиолокационная оценка эффективности засева ОВ 391
17.2 Метод экспресс оценка предотвращенного ущерба 401
17.3 Методы оценки физической эффективности ПГЗ 403
17.3.1 Показатели физической эффективности ПГЗ. 405
17.3.2 Порядок оценки физической эффективности ПГЗ 408
17.3.3 Методика оценки коэффициента градоопасности 411
17.3.4 Инструментальные методы оценки эффективности . . 414
17.4 Методы оценки экономической эффективности ПГЗ 421
17.4.1 Обзор методов оценки экономической эффективности 421
17.4.2 Показатели экономической эффективности ПГЗ 424
17.4.3 Порядок оценки экономической эффективности ПГЗ . 426
17.4.4 Методика сбора и обработки данных о градобитии . . . 427
17.4.5 Порядок обследования площади градобития 429
17.5 Метод оценки статистической значимости эффекта ПГЗ . . . 431
17.6 Результаты оценки многолетних проектов ПГЗ 437

18 ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ЧИСТОТЫ ТЕХНОЛОГИЙ ПГЗ . . . 451
18.1 Основные факторы ВФВ на окружающую среду 451
18.2 Состав и объем выбрасываемых вредных веществ 453
18.3 Методика теоретической оценки уровней ВФВ при ПГЗ 455
18.4 Экспериментальная оценка уровней ВФВ 459
18.5 Заключение об экологической чистоте технологии ПГЗ 461
19 ПОРЯДОК ОТЧЕТНОСТИ О ПРОВЕДЕНИИ ПГЗ 462
19.1 Формы отчетности 462
19.2 Оперативная отчетность в течение сезона ПГЗ 462
19.3 Годовые отчеты о проведении ПГЗ 464
Приложение А (рекомендуемое) Формы технических паспортов складов ПГИ 467
Приложение Б (рекомендуемое) Перечень этапов технологического процесса ПГЗ 471
Приложение В (рекомендуемое) Формы таблиц для оценки физической и экономической эффективности ПГЗ 472
Приложение Г (рекомендуемое) Пример статистического ряда данных для оценки эффективности ПГЗ 474
Приложение Д (обязательное) Форма таблиц о результатах ПГЗ 476
Библиография 477

РУКОВОДСТВО ПО ОРГАНИЗАЦИИ И ПРОВЕДЕНИЮ ПРОТИВОГРАДОВЫХ РАБОТ

1 Область применения

Настоящее руководство содержит сведения о климатологии града, научно-методических основах прогноза и радиолокационного обнаружения града, об основных типах градовых процессов, их строении и динамике развития, механизме образования града, физических основах воздействия на градовые процессы, методах и технических средствах предотвращения града, оценки эффективности противоградовых работ и их экологической чистоты. Руководство рекомендует порядок организации и проведения защиты сельскохозяйственных культур от градобитий, включая порядок радиолокационных наблюдений, распознавания объектов воздействия (ОВ), проведения операций по ракетному засеву градовых и градоопасных облаков, нормирования расхода противоградовых изделий (ПГИ), документирования материалов активного воздействия (АВ) на градовые процессы, оценки физической и экономической эффективности ПГЗ и подготовки оперативной и итоговой отчетности.

Руководство предназначено для применения в Военизированных службах (ВС) по активному воздействию (АВ) на метеорологические и другие геофизические процессы Росгидромета, а также других учреждениях, организациях и предприятиях, применяющих российскую автоматизированную ракетную технологию ПГЗ.

Руководство может быть использовано в качестве учебного пособия в ВУЗах и техникумах гидрометеорологического профиля, а также аспирантами, научными работниками и специалистами, занимающимися АВ на облака.

2 Нормативные ссылки

В настоящем руководстве использованы ссылки на следующие нормативные документы:

РД 3112199–0199-96 Руководство по организации перевозок опасных грузов автомобильным транспортом

РД 52.37.615–2000 Порядок обеспечения безопасности работ по активному воздействию на метеорологические и геофизические процессы

РД 52.11.639-2002. Методические указания. Методика оценки

эффективности льдообразующих реагентов и пиротехнических составов в лабораторных условиях

РД 52.37.672–2006 Методические указания. Экспресс оценка предотвращенного ущерба в период противоградовой защиты

РД 52.11.679-2006. Методические указания. Комплексная оценка возможных вредных уровней воздействия на окружающую среду при работах по активным воздействиям на гидрометеорологические и геофизические процессы

РД 52.37.726–2010 Общие технические требования к средствам воздействия на метеорологические и другие геофизические процессы

РД 52.37.746–2010 Порядок сбора и обработки данных о градобитии

РД 52.37.731–2010 Организация и проведение противоградовой защиты

РД 52.37.732–2010 Методы оценки эффективности активного воздействия на градовые процессы и порядок отчетности о проведении противоградовой защиты

РД 52.37.754-2011. Нормы времени и нормативы численности на выполнение работ по организации и проведению противоградовой защиты

РД 52.37.601–2012 Наставление по ракетно-артиллерийскому обеспечению активных воздействий на метеорологические и другие геофизические процессы

РД 52.37.710–2012 Порядок применения модернизированного противоградового комплекса «Алазань» для активных воздействий на метеорологические и другие геофизические процессы

3 Термины, определения и сокращения

3.1 В настоящем руководстве использованы следующие термины с соответствующими определениями:

3.1.1 **активное воздействие на градовый процесс**; АВ: Преднамеренное изменение естественного хода градового процесса (ГП) с целью предотвращения града путем химического, механического или иного искусственного воздействия.

3.1.2 **градобитие**: Нанесение градом повреждений сельскохозяйственным культурам, флоре, фауне, постройкам и коммуникациям.

3.1.3 **засев облака**: Введение в облако льдообразующих, гигроскопических или иных реагентов с целью изменения его фазового состояния, микроструктуры, динамики электрических свойств и др.

3.1.4 **запретный сектор**: Сектор азимута или угла возвышения, в котором запрещается пуск ПГИ в целях обеспечения безопасности

противоградовых стрельб.

3.1.5 **категория ОВ**: Степень градоопасности ОВ, от которой зависит порядок его засева.

3.1.6 **конвективная ячейка**; КЯ: Область радиоэха, ограниченная замкнутыми изолиниями радиолокационной отражаемости, имеющая одну конвективную вершину, и питающаяся одним восходящим потоком.

3.1.7 **КЯ с правосторонним развитием**: КЯ, имеющая область восходящего потока и область нового роста на правом наветренном фланге и движущаяся вправо от ведущего потока, характерная преимущественно для градовых процессов Северного полушария.

3.1.8 **КЯ с левосторонним развитием**: КЯ, имеющая область восходящего потока и область нового роста на левом наветренном фланге и движущаяся влево от ведущего потока, характерная для градовых процессов Южного полушария.

3.1.9 **объект воздействия**; ОВ: Облака, параметры которых соответствуют критериям АВ с целью предотвращения града.

3.1.10 **первое радиоэхо КЯ**: Радиоэхо вновь развивающейся КЯ, в которой размеры и концентрация частиц достигают значений, при которых их отраженный сигнал может быть обнаружен МРЛ.

3.1.11 **площадка засева**: Горизонтальная проекция на высоту засева облачного объема, в который вводится реагент с целью получения желаемого эффекта.

3.1.12 **противоградовая защита**; ПГЗ: Комплекс организационно-технических мероприятий, осуществляемых с целью защиты посевов, флоры, фауны, теплиц и других объектов от градобитий.

3.1.13 **противоградовая операция**: комплекс технологических действий, осуществляемых с целью предотвращения града.

3.1.14 **Росгидромет**: Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды.

3.1.15 **степени готовности командного пункта (КП) и ракетного пункта воздействия (ПВ)**: Готовность № 3 – повседневное состояние готовности КП и ПВ в течение всего сезона ПГЗ, при котором оборудование КП и ПВ размещено на позициях и подготовлено к работе по АВ. Готовность № 2 – состояние готовности КП и ПВ, при котором обнаружено развитие градоопасных облаков, ракетные установки заряжены. Готовность № 1 – состояние КП и ПВ, по которому осуществляется противоградовые операции по выработке, передаче и выполнение команд по АВ на градовые процессы (ГП).

3.1.16 **система ПГЗ**: комплекс технических средств, позволяющих осуществлять ПГЗ.

3.1.17 **тип ГП**: Семейство ГП, имеющие общие особенности в структуре и динамике развития КЯ и облачной системы в целом.

3.1.18 **одноячейковый ГП**: ГП с осесимметричными не взаимодействующими между собой малоподвижными и короткоживущими КЯ, зарождающимися в любой части облачной системы.

3.1.19 **неупорядоченный многоячейковый ГП**: ГП с осесимметричными и несимметричными слабо взаимодействующими между собой КЯ, зарождающимися в любой части облачной системы и движущимися в разных направлениях с разной скоростью.

3.1.20 **упорядоченный многоячейковый ГП**: ГП с несимметричными, периодически возникающими на наветренном фланге и взаимодействующими между собой КЯ, движущимися в Северном полушарии преимущественно вправо, а в Южном полушарии влево от направления ведущего потока.

3.1.21 **ГП переходного (гибридного) типа**: ГП, имеющий в структуре и динамике развития особенности многоячейковых и суперячейковых ГП.

3.1.22 **суперячейковый ГП**: ГП, состоящий из одной мощной несимметричной КЯ, длительное время существующей в стадии квазистационарного состояния и движущейся в Северном полушарии преимущественно вправо, а в Южном полушарии влево от направления ведущего потока.

3.1.23 **ускорение осадкообразования**: Ускорение укрупнения облачных частиц до размера частиц осадков – физический принцип АВ с целью прерывания и предотвращения града, положенный в основу изложенной ниже технологии ПГЗ.

3.1.24 **эффект воздействия**: Реакция ОВ на АВ в виде изменений его параметров, свидетельствующих о физической и экономической эффективности АВ.

3.2 В настоящем РД применены следующие сокращения:

АВ – активное воздействие;

АСУ – автоматизированная система управления противоградовыми операциями, состоящая из аппаратных и программных средств;

ВС – Военизированная служба по АВ на метеорологические и другие геофизические процессы;

ВО – военизированный отряд по АВ;

ВЧ – военизированная часть, состоящая из 2 и более отрядов по АВ;

ГП – градовый процесс;

ДМРЛ – доплеровский метеорологический радиолокатор;

ЗТ – защищаемая от градобитий территория;

КП – командный пункт, с которого осуществляется управление АВ;

КТ – контрольная территория (для оценки эффективности АВ);

КЯ – конвективная ячейка;

МРЛ – метеорологический радиолокатор;

ОВ – объект воздействия;

ПВ – пункт воздействия – ракетный пункт, с которого проводится АВ;

ПГЗ – противоградовая защита;

ПГИ – противоградовое изделие (противоградовая ракета);

ПТ – прилегающая к ЗТ территория;

ПУ – ракетная противоградовая пусковая установка;

РЦ УВД – региональный центр управления воздушным движением;

УСНП – управление специальных и научных программ, курирующее работы по АВ на метеорологические процессы и явления;

ФГБУ – федеральное государственное бюджетное учреждение.

4 Общие положения

4.1 Противоградовая защита (ПГЗ) осуществляется учреждениями, организациями и предприятиями, имеющими лицензию Росгидромета, оформленную в соответствии с положением [1].

4.2 ПГЗ осуществляется по договорам или контрактам с заказчиком, которым может быть любое физическое или юридическое лицо.

4.3 В договоре на проведение ПГЗ определяются площадь защиты, границы ЗТ, годы и календарные сроки защиты, вид защиты (опытная, производственная), стоимость защиты 1 га, общая стоимость договора, порядок и методика контроля потерь от града, методы оценки физической и экономической эффективности. К договору должны быть приложены:

а) карта-схема ЗТ и ПТ с их границами, границами населенных пунктов и других объектов, в направлении которых должны быть введены запретные секторы, которые согласовываются с Заказчиком ПГЗ, наносятся на карту и на цифровом планшете применяемой АСУ;

б) таблица экспликации земель ЗТ с указанием профилирующих культур и занятых ими площадей.

4.4 Исполнитель договора (контракта) на проведение ПГЗ обязан строго соблюдать инструкции, распоряжения и руководящие документы, регламентирующие порядок приобретения, учета, хранения, перевозки и эксплуатации ПГИ и оценки эффективности ПГЗ в соответствии со следующими документами:

а) приобретение, хранение и использование ПГИ осуществляется в соответствии с положениями [2] и [3];

б) учет, хранение и передача ПГИ от одной специализированной организации другой осуществляется в соответствии с инструкцией [4];

в) перевозка ПГИ – в соответствии с РД-3112199-0199;

г) контроль хранения и применения ПГИ осуществляется местными органами МВД в соответствии с Распоряжением Правительства РФ [5];

д) охрана складов ПГИ осуществляется в соответствии с распоряжением Правительства РФ [6]

е) организация противоградовых стрельб на территории Российской Федерации осуществляется в соответствии с инструкцией [7];

ж) эксплуатация ПГИ осуществляется в соответствии с РД 52.37.710;

и) безопасность ПГЗ обеспечивается в соответствии с РД 52.37.615;

к) приобретение МРЛ и радиостанций осуществляется на основе разрешения Государственной комиссии по радиочастотам на право их эксплуатации, оформляемое в соответствии с инструкцией [8];

л) оценка эффективности ПГЗ осуществляется в соответствии с РД 52.37.732;

м) прогноз града, типа ГП, его интенсивности и мезорайона развития осуществляется в соответствии с [9] и разделом 6 данного Руководства.

5 ГРАД И КЛИМАТОЛОГИЯ ГРАДА

5.1 Введение

5.1.1 Град – это атмосферные осадки в виде твердых ледяных частиц размером от 0,5 до 10 см, имеющих преимущественно шарообразную, грушевидную и эллипсоидальную формы. Крупные градины зачастую имеют вид бесформенных кусков льда или конгломерата смерзшихся градин, имеющих 2 и более зародышей. Градины имеют обычно слоистую структуру в виде чередующихся слоев прозрачного и непрозрачного льда.

Град выпадает из мощных кучево-дождевых облаков фронтального и внутримассового развития в теплое время года обычно во второй половине дня при температуре воздуха плюс 10 – 35 ^{o}C и относительной влажности воздуха 40 – 90%.

Град наносит механические повреждения растениям и зеленым насаждениям, приводя, зачастую, к сокращению или гибели урожая агропромышленных культур. Крупный град (размером 5 – 10 см) уничтожает флору и фауну, домашних птиц и животных, повреждает крыши и стекла строений, приводит в негодность кузова автомобилей.

Выпадение града обычно сопровождается мощной грозовой деятельностью, интенсивными ливневыми осадками, шквалистым иногда ураганным ветром. Эти явления значительно усиливают разрушительный потенциал градовых облаков, приводя к аварийному отключению линий электропередач, формированию ливневых паводков, смывающих пахотный слой на склонах, приводящих к эрозии почвы и формированию оврагов, выворачиванию деревьев с корнем. Интенсивные ливневые осадки с градом зачастую являются спусковым крючком разрушительных селей.

5.1.2 Во многих странах Европы, Азии, Африки, Северной и Южной Америки, Океании, расположенных между 30 – 55° северной широты и 20 – 45° южной широты, градобития ежегодно уничтожают от 3 до 18% сельскохозяйственной продукции (табл. 5.1). Они также наносят большой ущерб флоре, фауне, стеклам и крышам построек, выводят из строя ливневую канализацию, линии электроснабжения, телефонной связи и другие коммуникации. В случаях выпадения крупного града (размером 5 ÷ 15 см) погибают домашние и дикие птицы, животные, приходят в негодность кузова легковых автомобилей.

Известны случаи, когда одно градобитие наносило ущерб, исчисляемый сотнями млн долларов США. Например, в Германии в 1983 г. мощное градобитие нанесло ущерб на сумму более 200 млн, а в г. Калгари

(Канада) 7.09.1991 г. – на сумму 342 млн долларов только зданиям, сооружениям и автомобилям. Особенно велики потери в годы максимума градовой активности.

Мировые потери сельхозпродукции составляют более 11 миллиардов долларов США в год, в том числе в США – 2,5 миллиардов, в Российской Федерации (РФ) – около 740 млн долларов. Причем эти данные отображают только прямые потери агропромышленной продукции без учета стоимости этой продукции после переработки и реализации, а также затрат на восстановление поврежденных градом многолетних зеленых насаждений. Кроме того, эти данные не охватывают все градоопасные регионы мира, а по некоторым странам являются ориентировочными из-за отсутствия точного учета, и явно занижают суммарные потери от града, так как не учитывают ущерба, наносимого флоре, фауне, стеклам и крышам построек, автомобилям, линиям электроснабжения и телефонной связи и другим коммуникациям.

В РФ наибольшей градоопасностью отличаются Северный Кавказ (Краснодарский и Ставропольский края, Адыгея, Карачаево-Черкесия, Кабардино-Балкария, Северная Осетия, Ингушетия, предгорные районы Дагестана), Алтайский край и юг Приморского края (район озера Хасан).

5.1.3 Проблема борьбы с этой грозной стихией имеет серьезное экономическое значение для многих регионов мира. В ряде регионов для защиты от града применяются *укрытия из металлических или пропиленовых сеток*, которыми накрывают зеленые насаждения. Однако такая защита имеет очень высокую себестоимость, создает экологические проблемы, и поэтому применяется только для защиты элитных виноградников и садов на небольших площадях, измеряемых единицами и десятками га.

5.1.4 Научно обоснованные методы предотвращения града начали интенсивно развиваться с середины XX века, благодаря которым в настоящее время защита больших площадей осуществляется методами активного воздействия на градовые облака путем их засева льдообразующими реагентами (AgI, CO_2) с помощью специальных противоградовых ракет, артиллерийских снарядов, авиационных и наземных генераторов кристаллизующих частиц.

Согласно регистрам Всемирной метеорологической организации (ВМО) и другим источникам, защита от града осуществляется в 48 странах мира [1], в которых проводится более 65 проектов подавления града на площади около 87,6 млн га (табл. 5.4), в том числе, более 42 млн га в 28 провинциях Китая. Следует отметить, что при этом неучтены коммерческие проекты подавления града, осуществляемые частными

кампаниями в США, Испании, Италии и др.

В зависимости от применяемых технических средств засева применяемые методы можно классифицировать следующим образом: авиационный, артиллерийский, ракетный и наземно-генераторный метод. В ряде стран применяются комбинации этих методов.

Следует отметить, что в настоящее время рекламируются также коммерческие предложения по защите от градобитий с помощью *ацетиленовых пушек* типа «Корвалан» *и установок по ионизации приземного слоя атмосферы*. Однако эти методы не имеют научной основы, и ВМО не рекомендует их применять [1].

5.1.5 В большинстве проектов для засева облаков используются пиротехнические составы, содержащие от 2 до 20% йодистого серебра (AgI), которыми оснащены противоградовые снаряды, ракеты и пиропатроны. Выход кристаллизующих частиц и порог кристаллизующего действия генерируемого аэрозоля определяет эффективность ПГИ и в конечном итоге эффективность воздействия на градовые облака, поэтому совершенствование существующих и создание новых пиротехнических составов является одной из важнейших задач. В ряде стран (США, Канада и др.) помимо *AgI* используются хладореагенты (CO_2, жидкий пропан), испарение которых в переохлажденной части облака обеспечивает быстрое формирование ледяных частиц.

Суммарный годовой расход реагента AgI во всех мировых проектах составляет около 15 тонн, что в среднем составляет около 0,16 г/га. В Российской Федерации ежегодно на защиту 2,52 млн га расходуется около 806 кг AgI (0,32 г/га). Следует отметить, что в разных странах и противоградовых проектах расход реагента отличается до 10 раз [2].

5.1.6 Защита осуществляется в наиболее градоопасных регионах с интенсивным сельскохозяйственным производством. Профилирующими культурами на территории защиты в разных регионах мира являются хлопок, табак, виноград, цитрусовые и фруктовые сады, оливки, овощи, пшеница, кукуруза и другие культуры. Продолжительность сезона защиты варьирует от 2 до 7 месяцев, а число дней с засевом градовых облаков в зависимости от градоопасности регионов составляет от 10 до 50 дней за сезон.

5.1.7 Противоградовые работы, осуществляемые в разных странах, серьезно отличаются друг от друга:

- по научным концепциям и критериям засева;
- техническим средствам и технологии засева;
- расходу реагента и качеству реализации концепций засева;

– методам оценки эффективности;

– финансовым затратам на реализацию засева.

Поэтому эффективность противоградовой защиты (ПГЗ) в разных странах и регионах варьирует в широких пределах (от 20 до 90%) в зависимости от применяемой технологии и технических средств, а также уровня организации работ и используемых методов оценки. По оценкам авторов и исполнителей противоградовых работ сокращение потерь от града в зависимости от применяемых методов составляет:

– *авиационный метод* – на 41% в Штате Северная Дакота США, на 28% в штате Иллинойс [3], на 33% в Аргентине [4];

– *сеть из 650 наземных генераторов* кристаллизующего аэрозоля на юге Франции – на 40% в среднем за 50 лет [5];

– *артиллерийский метод* – в среднем за период 1967 – 1990 гг. на 70 – 80 на общей площади 6,5 млн га (на Северном Кавказе, в Азербайджане, Армении, Грузии, Таджикистане и Узбекистане);

– *ракетный метод* в Сербии, Хорватии, Словении, Македонии, Болгарии – на 50 – 70% [6];

– *российская автоматизированная ракетная технология* – в среднем за период 2001 – 2011 гг. [2] на 87% (т.е. в 7.7 раза);

Помимо разной эффективности, перечисленные технологии ПГЗ имеют и существенную разницу в себестоимости реализации. Поэтому правильный выбор технологии и технических средств должен осуществляться еще на этапе разработки проекта ПГЗ.

В СССР защита осуществлялась с применением артиллерийской, ракетной, и ракетно-артиллерийской технологий в РСФСР, Молдавии, Украине, Азербайджане, Армении, Грузии, Таджикистане и Узбекистане. Площадь ПГЗ с 1967 года во всех регионах постепенно увеличивалась и в 1989 году была доведена до 10,5 млн га.

Вследствие политических и экономических перемен в 1989 г. защита была приостановлена в Грузии, в 1990 – в Азербайджане и в 1991 – в Армении и Таджикистане, сокращены площади защиты в России, Молдавии, Украине.

В период с 2000 по 2012 гг. расширены площади ПГЗ в Российской Федерации до 2,52 млн га, в Молдавии до 1,4 млн га. Без перерывов продолжается защита в Узбекистане на площади около 660 тыс. га. Восстановлена защита в Таджикистане, принимаются меры по восстановлению ее в полном объеме и охвату новых районов. Осуществляется защита в Крыму, Херсонской и Одесской области Украины, но с переменной по годам площадью ЗТ.

5.2 Условия выпадения града

5.2.1 Необходимыми условиями развития градовых облаков являются повышенная конвективная неустойчивость, повышенное влагосодержание атмосферы и динамический фактор, обусловленный вторжением холодных фронтов с затоком холода на высотах.

5.2.2 По данным многолетних наблюдений [7] (в Краснодарском крае с 1978 по 2006 г., в Молдове с 1979 по 1990 г. и в Таджикистане с 1978 по 1991 г.), градовые процессы в большинстве случаев развиваются в областях пониженного давления у земли и ложбины холода на высотах (в Краснодарском крае в 83% случаев, в Молдавии в 64%, в Таджикистане в 63%), которые способствуют конвергенции и развитию конвекции за счет адвекции холода на высотах (табл. 5.1). Реже град отмечается в центре и в тылу циклонов, а в 11 – 18% случаев – в малоградиентных полях повышенного давления у земли.

5.2.3 Более 80% градовых процессов [8, 9, 10] имеют фронтальное происхождение (табл. 5.2). Чаще град отмечается при вторжении холодных фронтов (≈ 50%), фронтов окклюзии (≈ 13 – 14%), вторичных холодных фронтов (9% в Краснодарском крае и 17% в Молдавии). В Молдавии отмечается также выпадение града в дни с прохождением теплых фронтов (2% случаев). Малоподвижный фронт окклюзии с волнами обуславливает 12% градобитий в Закавказье. В 1% случаев градовые процессы имеют внутримассовое происхождение при влиянии ложбины холода с севера.

Таблица 5.1 – Синоптическая ситуация в дни с градом [7]

Район и годы наблюдений	Всего дней с градом	Синоптическая ситуация					
		Ложбина	Центр циклона	Тыл циклона	Периферия циклона	Область понижен. давления	Область повышен. давления
У поверхности земли							
Краснодарский край	*291 / 100	37 / 12,7	19 / 6,5	2 / 0,7	1 / 0,3	179 / 61,5	53 / 18,2
Молдова	425 / 100	169 / 39,8	64 / 15,1	32 / 7,5	5 / 1,2	109 / 25,6	46 / 10,8
Таджикистан	160 / 100	15 / 9,4	37 / 23,1	0 / 0,0	29 / 18,1	60 / 37,5	19 / 11,9
На высоте 500 мБар							
Краснодарский край	299 / 100	248 / 82,9	33 / 11,0	5 / 1,7	0 / 0,0	7 / 2,3	6 / 2,0
Молдова	285 / 100	183 / 64,2	55 / 19,3	12 / 4,2	11 / 3,9	14 / 4,9	10 / 3,5
Таджикистан	159 / 100	100 / 62,9	54 / 34,0	0 / 0,0	0 / 0,0	3 / 1,9	2 / 1,2

*В числителе указано число дней с градом, а в знаменателе их повторяемость в %.

Таблица 5.2 – Повторяемость дней с градом внутримассового и фронтального происхождения [7]

Район наблюдений	Происхождение				
	Внутри массовое развитие	Фронтальное			
		Холодный фронт	Фронт окклюзии	Вторичный холодный фронт	Теплый фронт
Краснодарский край	*46 15,1	189 62,2	42 13,8	27 8,9	0 0
Молдова	82 18,0	228 50	60 13,2	77 16,8	9 2,0
Интенсивные градовые процессы					
Краснодарский край	6 11,1	38 70,4	8 14,8	2 3,7	-
Молдова	8 14,3	33 58,9	9 16,1	6 10,7	-

Мощные градовые процессы в основном наблюдаются при вторжении холодных фронтов и фронтов окклюзии, а катастрофические градобития обычно наблюдаются при фронтах окклюзии по типу холодного, при которых формируется структура ветра, способствующая развитию трехмерно асимметричных суперячейковых облаков [7].

5.2.4 Наибольшее число градобитий в Краснодарском крае обусловлено вторжением морских (с запада) и полярных (с северо-запада) воздушных масс (табл. 5.3). Достаточно часто отмечается град в континентальной и арктической воздушных массах, реже в тропических. Интенсивные градобития в крае в основном отмечаются в воздушных массах морского и арктического происхождения. В Молдавии превалирует влияние воздушных масс полярного, арктического и тропического происхождения, а в Таджикистане воздуха континентальных умеренных широт, хотя интенсивные градобития отмечаются при вторжении арктических и полярных воздушных масс. На юге Молдовы на развитие градовых процессов значительное влияние оказывает бризовая циркуляция [7].

Таким образом, во всех трех регионах наибольшее число интенсивных градобитий наблюдается при вторжении холодных фронтов полярного, арктического и тропического происхождения, что согласуется с данными по другим регионах мира [9 – 15].

Таблица 5.3 – Повторяемость дней с градом в зависимости от типа воздушных масс [7]

Район наблюдений	Типы воздушных масс				
	Континен-тальная умеренная	Морская умеренная	Полярная	Аркти-ческая	Тропи-ческая
Краснодарский край	60 21,0	125 43,7	83 29,0	16 5,6	2 0,7
Молдова	24 8,4	4 1,4	102 35,5	97 33,8	60 20,9
Таджикистан	86 50,6	0 0	49 28,8	18 10,6	17 10,0
В дни с интенсивными градовыми процессами					
Краснодарский край	9 17,4	27 51,9	15 28,8	1 1,9	0 0
Молдова	11 21,2	0 0	15 28,9	8 15,4	18 34,6

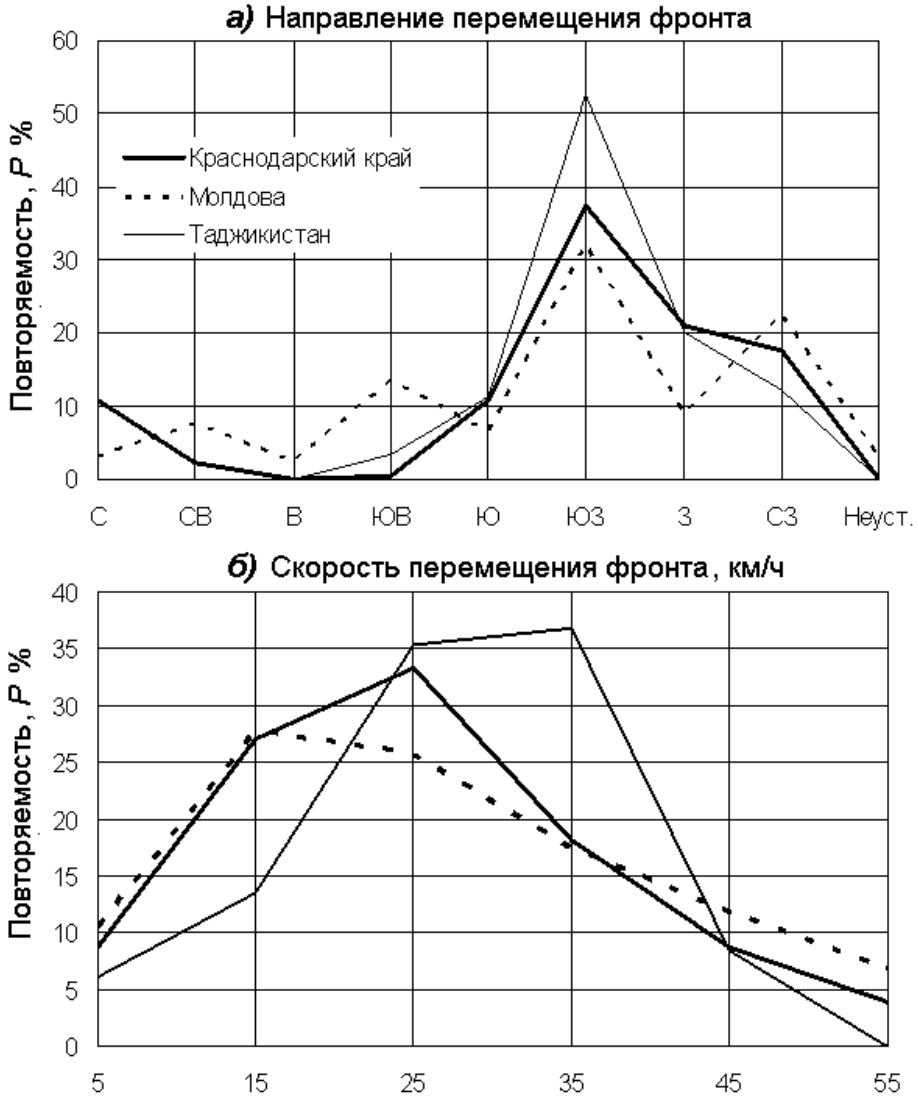


Рис. 5.1 – Повторяемость дней с градом (*P,* %) в зависимости:
а) от направления и **б)** от скорости вторжения холодного фронта [7]

5.2.5 Преобладающее направление ведущего потока в дни с градом в Краснодарском крае и Таджикистане юго-западное, западное и северо-западное, При этом градовые облака перемещаются преимущественно с запада на восток с южной или северной составляющей ± 45 градусов. В Молдавии помимо таких направлений отмечается выпадения града при северо-западном ведущем потоке (23% случаев), юго-восточном (13%) и северо-восточном (8% случаев) переносе (рис. 5.1*а*).

5.2.6 Наиболее часто град отмечается [7] при перемещении фронтальных разделов со скоростью 15 ÷ 40 км/час (рис. 5.1*б*). При этом максимальное число дней с градом в Таджикистане отмечается при более высоких скоростях перемещения холодных фронтов, чем в Краснодарском крае и Молдове.

5.3 Климатология града

5.3.1 Влияние орографии на частоту выпадения града

5.3.1.1 Серьезное влияние на развитие градовых процессов оказывает орография местности. Сложный рельеф с перепадами высоты от 50 до 5000 м и различный характер подстилающей поверхности создают благоприятные условия формирования градовых облаков. Частота выпадения града обычно повышается от равнины к предгорным и горным районам [7, 8], где конвективная неустойчивость атмосферы усиливается благодаря динамическому фактору, обусловленному обтеканием горных хребтов холодными фронтами. Повышение рельефа местности даже на 100 ÷ 500 м (например, Ставропольская возвышенность) значительно увеличивает градоопасность.

Влияния орографии на развитие градовых процессов зависит от особенностей глобальной циркуляции атмосферы (направления и скорости ведущего потока, наличия струйного течения на высотах), горно-долинной циркуляции и ориентации горных хребтов. Обтекание горных хребтов перпендикулярно их ориентации может приводить к фёновому эффекту на подветренной стороне, которое обусловливает подавление конвекции, уменьшение частоты выпадения града в горах и предгорьях и ее увеличение по мере удаления от гор. Это наблюдалось в северной части провинции Мендоса Аргентины [9], а последние 20 лет отмечается и на Северном Кавказе [2, 17].

Горно-долинная циркуляция зачастую приводит к повышению градовой активности днем над хребтами, а ночью над долиной. Это обусловлено тем, что днем солнечные склоны хребтов прогреваются раньше и над ними развиваются восходящие потоки, которые

компенсируются потоками воздуха из долины. При этом над долиной отмечаются нисходящие потоки, исключающие развитие конвекции. Ночью склоны хребтов охлаждаются быстрее и в большей степени, холодный воздух устремляется в долину, способствую развитию конвекции над ней. Благодаря этому ночью над долиной наблюдается взрывное развитие градовых облаков, которое отчетливо наблюдается, например, в Алазанской долине Грузии.

5.3.1.2 Частота выпадения на Северном Кавказе по данным 200 метеостанций и постов в период 1958 – 2008 гг. [7] увеличивается с повышением высоты местности по закону:

$$\boldsymbol{n} = 0{,}65 + 0{,}0019\boldsymbol{H}, \qquad (1)$$

где H – высота над уровнем моря в м.

Однако на высотах 1200 до 1500 м следует спад градовой активности (рис. 5.2). Это, по-видимому, обусловлено тем, что при юго-западных направлениях ведущего потока на подветренной стороне Главного Кавказского хребта отмечался фёновый эффект, подавляющий конвекцию, благодаря которому на высотах 1200 до 1500 м наблюдается максимальное число солнечных дней. Повышение частоты выпадения града на высокогорье (H = 2000 – 2500 м) связано с выпадением мелкого града, не успевающего растаять из-за ограниченности пути таяния.

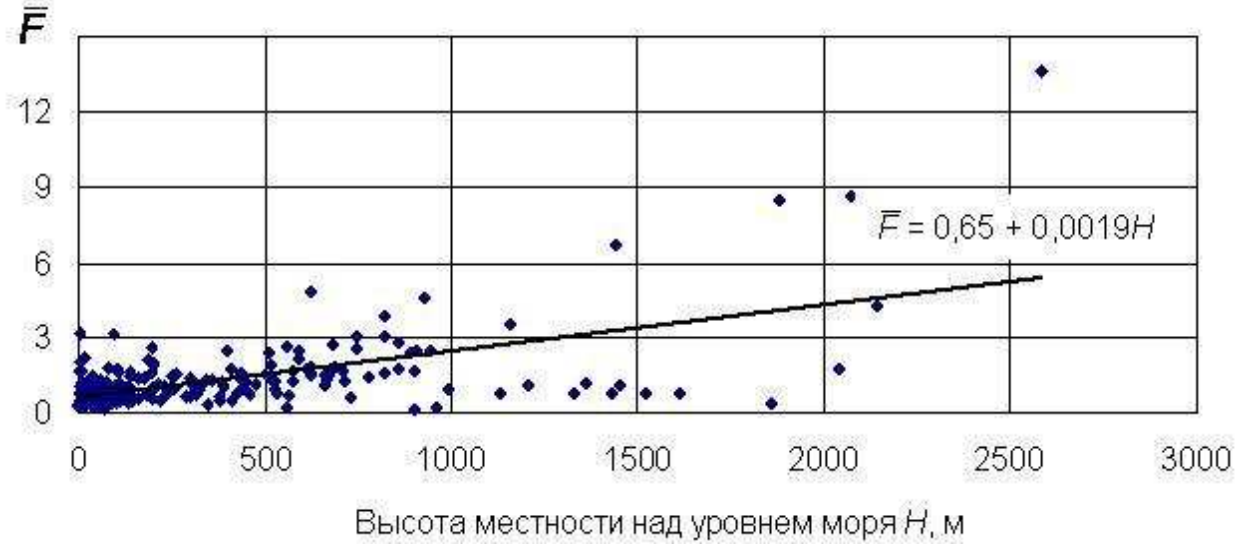


Рис. 5.2 - Зависимость частоты выпадения града от высоты [7]

5.3.1.3 В период 1958 – 2008 гг. по данным 54 метеостанций Северного Кавказа, из которых 9 расположены на побережье Черного моря, 17 – в горах, 16 – в предгорьях и 12 – на равнине, наиболее часто град выпадает (рис. 5.3*а*) в горных районах, реже в предгорных районах и еще реже в равнинных и прибрежных районах [17].

Однако доля мощных градовых процессов выше в предгорьях и примыкающей равнине, поскольку в них приземный слой атмосферы,

питающий конвективные облака, содержит больше влаги.

Средняя частота выпадения града в расчете на 1 метеостанцию (рис. 5.3*б*) составляет:

- 2,9 случаев в год в горных районах Северного Кавказа;
- 1,1 случаев в год в предгорных районах;
- 0,9 случаев в год в прибрежных районах;
- 0,8 случаев в год в равнинных районах Северного Кавказа.

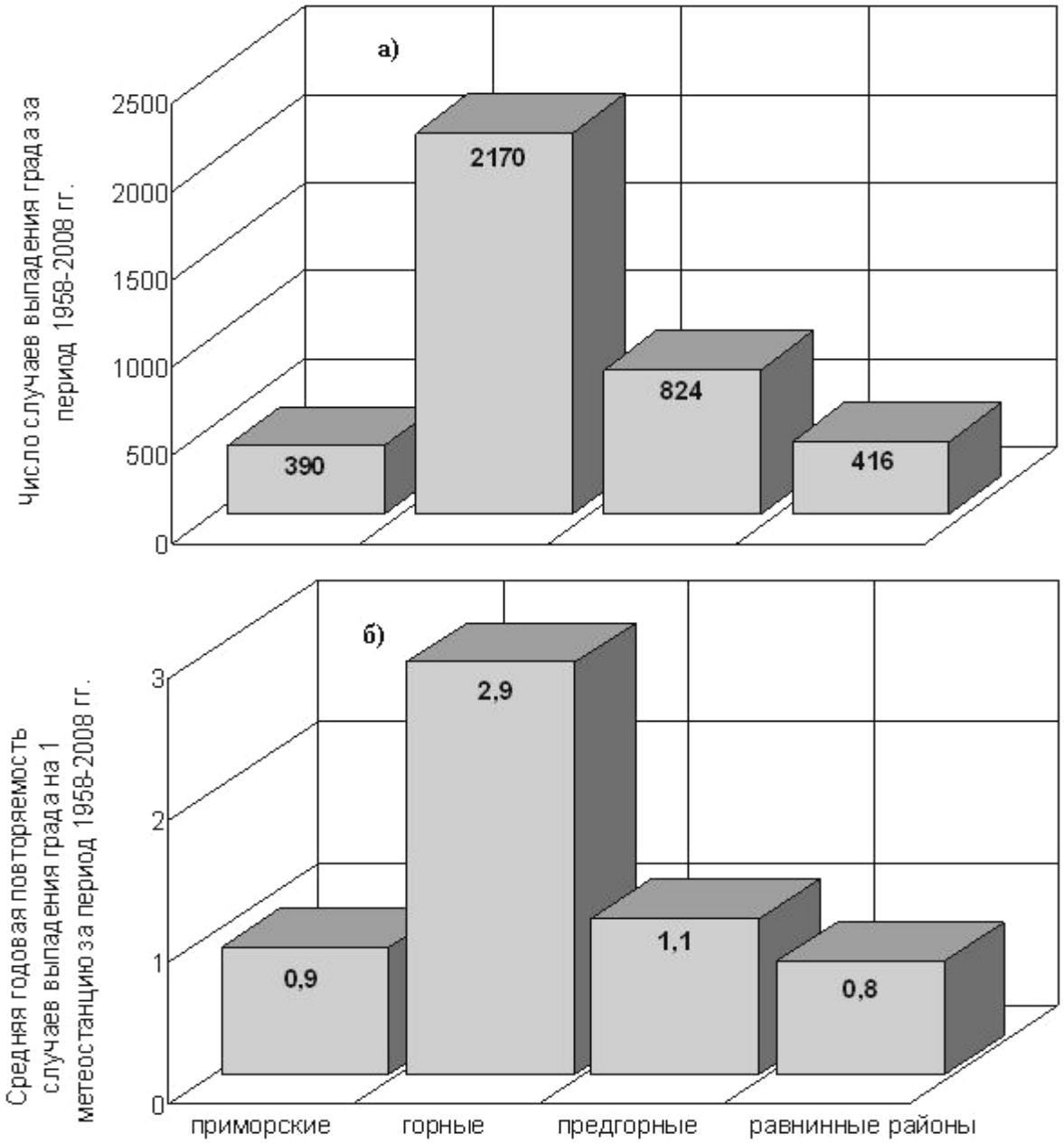


Рис. 5.3 – Число случаев выпадения града (*а*) и среднегодовая повторяемость выпадения града (*б*) в прибрежных, горных, предгорных и равнинных районах Северного Кавказа в расчете на 1 метеостанцию в период 1958–2008 гг. [7]

Минимум числа дней с градом на Черноморском побережье, где отмечается повышенное количество осадков, может быть обусловлен

обильным содержанием в прибрежной атмосфере крупных гигроскопических ядер морской соли, приводящих к быстрому осадкообразованию и разрушению конвективных облаков до достижения ими градовой стадии развития.

5.3.1.4 Дни с градовыми процессами в западной и центральной частях Северного Кавказа обычно не совпадают. Причиной этого, по-видимому, является различие в ориентации горных хребтов и долин в этих двух регионах. В западной части Северного Кавказа горные хребты и долины реки Кубань и ее притоков ориентированы преимущественно с юга на север, а в центральной части Северного Кавказа в бассейне реки Терек боковые хребты Главного Кавказа ориентированы с запада на восток. При этом западные и юго-западные вторжения холодных фронтов благоприятствуют развитию градовых процессов в западной, а фронты с северо-запада и севера – в центральной части Северного Кавказа. Поскольку большинство градовых процессов имеет фронтальное происхождение (только 15% внутримассовое, когда указанный феномен не может оказать влияние) дни с АВ Краснодарской ВС и восточных отрядов Северо-Кавказской ВС совпадают редко [7].

5.3.1.5 Одним из факторов определяющих климатологию града является влияние крупных водоемов. Град обычно не наблюдается над морями и океанами, а их близость приводит к сокращению частоты выпадения града [15]. Наличие конвективной неустойчивости и грозовой ситуации не всегда приводит к выпадению града в прибрежных районах.

5.3.1.6 Следует отметить также влияние урбанистических эффектов на атмосферные процессы, ведущих к увеличению дней с градом и градовой активности над крупными промышленными городами и на их подветренной стороне, являющихся результатом формирования над мегаполисами тепловых островов и интенсивного загрязнения атмосферы аэрозолями антропогенного происхождения. Изучение климатологии града вблизи шести крупных городов США обнаружило увеличение градовых дней от 2 до 4 раз, увеличение размера градин до 2,5 раз, увеличение ширины и длины градовых полос в несколько раз, а также увеличение кинетической энергии града [16].

5.3.2 Многолетний ход числа дней с градом

Анализ многолетнего хода среднегодового числа дней с градом показывает наличие трендов, обусловленных глобальным потеплением климата. Например, на территории Северного Кавказа среднегодовое число дней с градом (рис. 5.4) было повышенным в период 1960 – 1975 гг., затем отмечалась тенденция спада числа дней с градом до 2002 г. При

этом обнаружилась заметная зависимость этих изменений от орографии. Особенно заметное уменьшение среднегодового числа дней с градом отмечается в горных и предгорных районах [17], а в равнинных районах наблюдается тенденция увеличения частоты выпадения града.

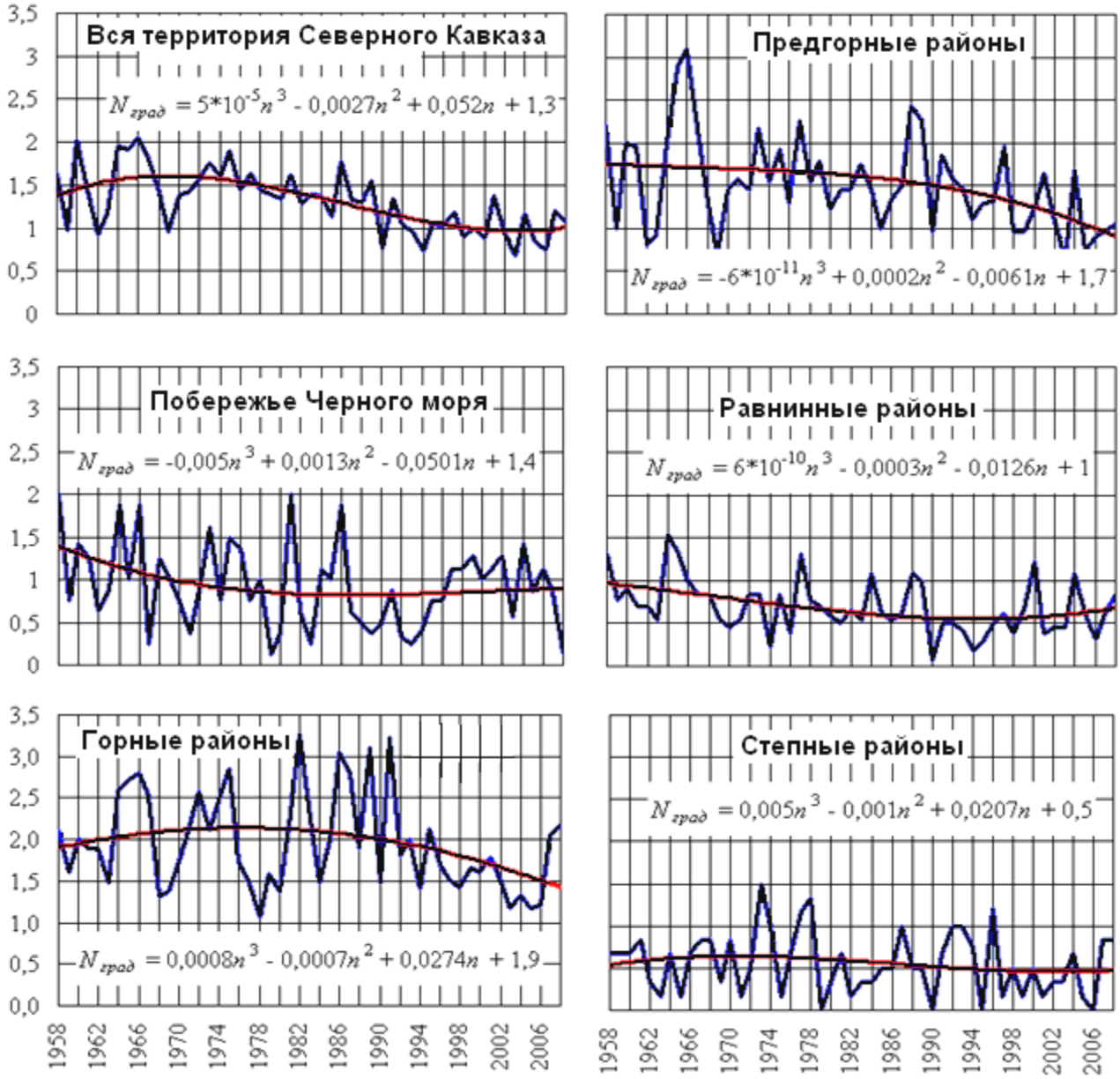


Рис. 5.4 – Временной ход среднегодового числа дней с градом в период 1958 – 2008 гг. на Северном Кавказе в целом, а также в прибрежных, горных, предгорных, равнинных и степных районах [17]

На рисунке 5.5*а* показан временной ход количества дней с градом $\overline{F}_S$, осредненный по группам метеостанций, расположенных на ЗТ Северо-Кавказской, Краснодарской и Ставропольской ВС. Из него следует, что значения $\overline{F}_S$ испытывают квазипериодические (с 2 – 4 летним циклом) колебания с синхронностью по годам максимумов и минимумов на всех ЗТ. Это, по-видимому, обусловлено тем, что большинство градовых процессов имеет фронтальное происхождение, охватывающее весь регион.

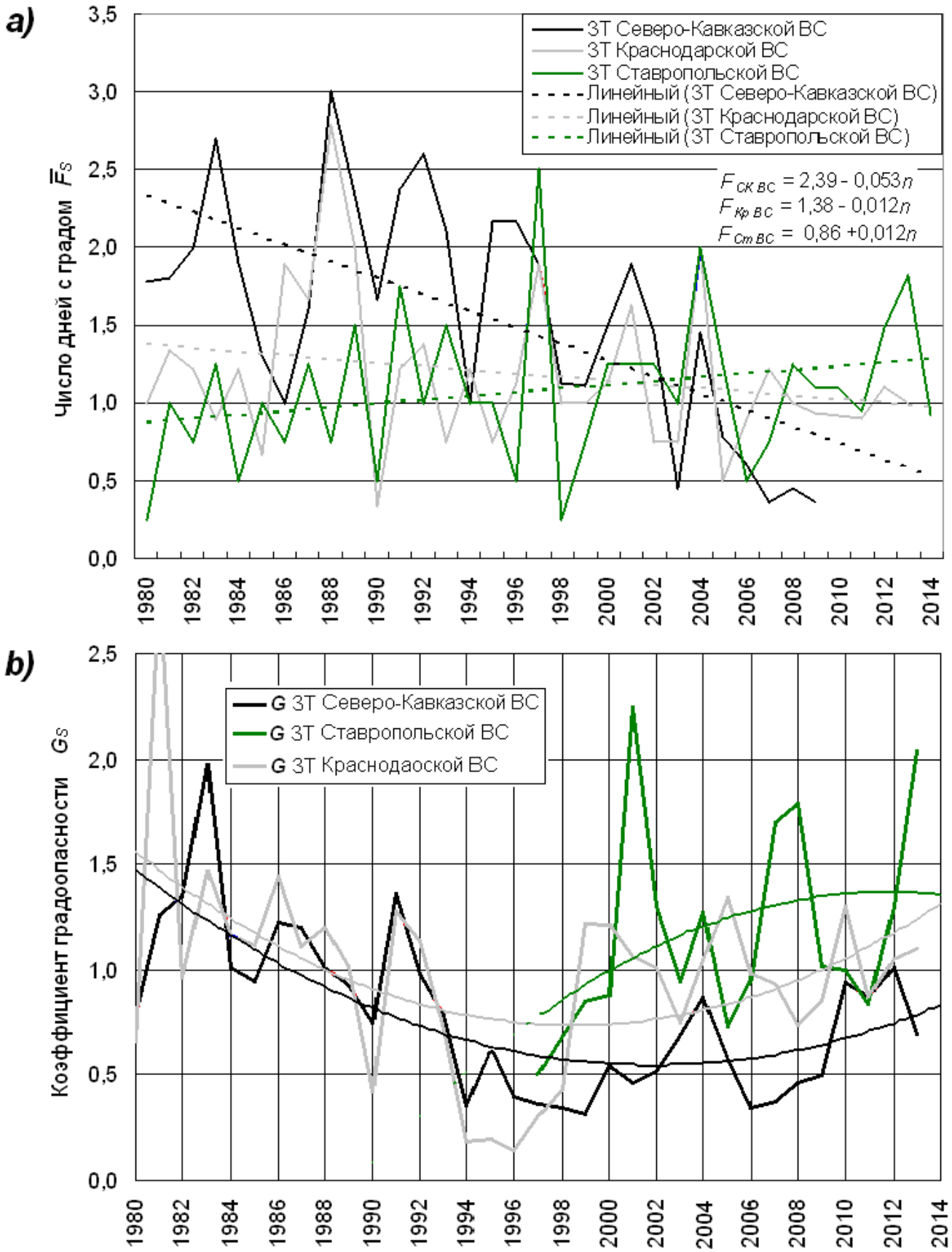


Рис. 5.5 Тренд числа дней с градом и градоопасности ЗТ ВС Росгидромета [56]:

а) – временной ход числа дней с градом $\overline{F}_S$ по данным сети метеонаблюдений;

б) – тренд коэффициента градоопасности G_S на ЗТ Северо-Кавказской, Краснодарской и Ставропольской ВС

В начале периода наблюдений $\overline{F}_S$ на ЗТ Северо-Кавказской ВС было в 2,5 раза выше, чем на ЗТ Ставропольской ВС. С годами $\overline{F}_S$ на ЗТ всех ВС выравнивается и варьирует в пределах от 0,9 до 1,1 дней на каждой метеостанции. Это свидетельствует о том, что градоопасность горных и предгорных районов в период 1980 – 2008 гг. имеет тенденцию понижения, а градоопасность равнинной части Северного Кавказа – тенденцию повышения. На ЗТ Северо-Кавказской ВС частота выпадения града за этот период уменьшилась в 1,9 раза, на ЗТ Краснодарской ВС уменьшилась примерно на 20% (в основном за счет горной и предгорной части ЗТ), а на ЗТ Ставропольской ВС повысилась на 20%.

Временной ход коэффициента градоопасности этих территорий G_S (рис. 5.5*b*) подтверждает серьезное понижение градоопасности в период 1984 – 2000 гг., но с 2001 г. отмечается некоторое повышение градоопасности ЗТ всех ВС Росгидромета.

Таким образом, глобальное потепление климата привело к изменению частоты и интенсивности выпадения града, смещению районов повышенной градоопасности и т.д. Игнорирование этих изменений при оценке эффективности ПГЗ и работ по искусственному увеличению осадков (ИУО) может приводить к существенным ошибкам.

5.3.3 Сезонный ход числа дней с градом

Сезонный ход числа дней с градом в разных регионах может сильно отличаться, причем в южных широтах пик градовой активности смещен на весенние месяцы (март – апрель), в средних широтах приходится на май – июнь, а северных широтах на июль. Пик градовой активности отмечается:

– в Молдавии – в июне (27% случаев из 983), в марте всего 0,5%, в апреле 15%, мае 23%, в июле 18%, в августе и сентябре 7 и 6% случаев, в октябре 3%, остальные месяцы 0,5% [12].

– в Закавказье (Грузия, Азербайджан и Армения [10, 11], Украине [12], а также в Таджикистане и Узбекистане [13] в мае (25% случаев);

– на юге Франции [14] в апреле – мае.

– на территории США от Нью Мексики до Альберты в июле, а в центральной зоне в апреле – мае [15, 20];

– в Польше [21] в июле и августе (по 32% и 22% случаев).

В южном полушарии град наблюдается в период с октября по апрель с наиболее частым выпадением града в ноябре – декабре.

На Северном Кавказе подавляющее число дней с градом отмечается с мая по август [7, 18, 19] с абсолютным максимумом в июне (рис. 5.6). В предгорных районах максимальная градовая активность приходится на май, а второй максимум проявляется в августе. На побережье Черного

моря также отмечается второй максимум в период октябрь – декабрь, связанный с зимними грозами.

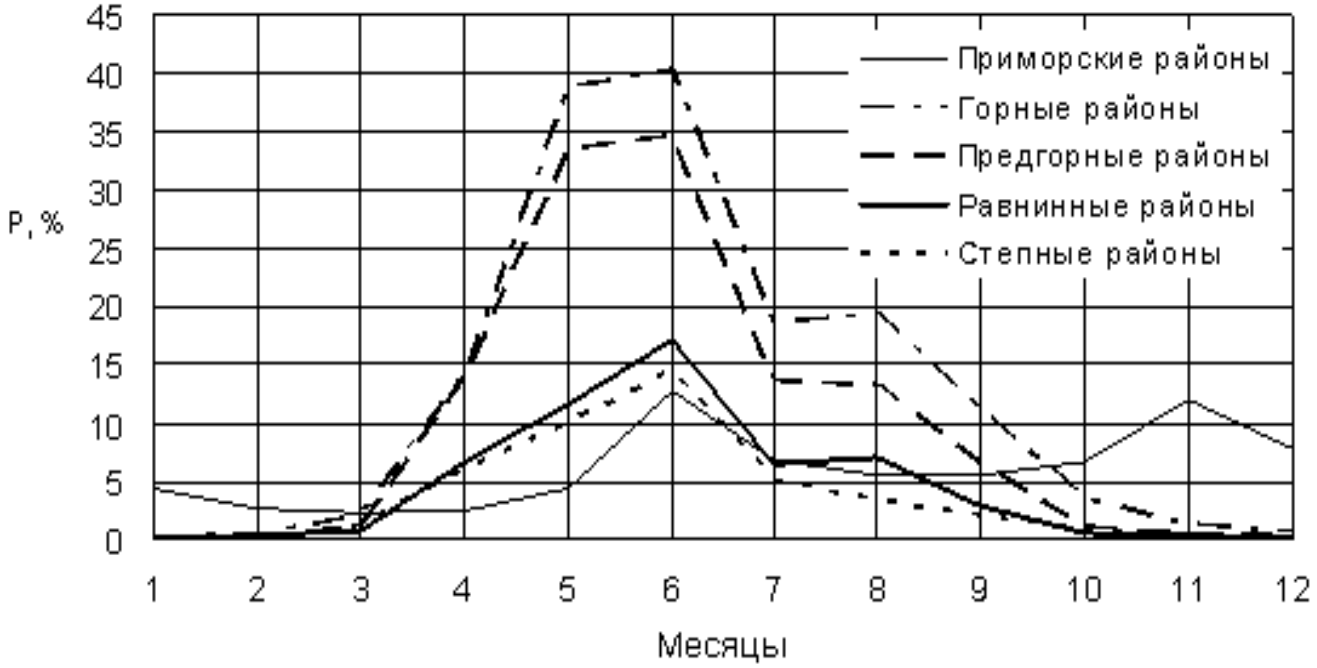


Рис. 5.6 – Сезонный ход повторяемости числа дней с градом в прибрежных, горных, предгорных и равнинных районах Северного Кавказа в период 1952 – 2008 гг. по данным 54 метеостанций [7]

5.3.4 Суточный ход повторяемости выпадения града

Град выпадает преимущественно во второй половине дня в период максимального развития термической конвекции. Частота выпадения града нарастает в течение дня, достигает абсолютного максимума в 17^{00} местного времени и постепенно спадает к 23^{00}. В Краснодарском крае, Молдове и Таджикистане более 70% случаев выпадения града наблюдается в период с 15^{00} до 23^{00} [7], а в период с 00^{00} до 12^{00} не превышает 12% (рис. 5.7*а*). Такой суточный ход частоты выпадения града подтверждают и радиолокационных данные о суточном ходе количества конвективных ячеек (КЯ) с сильным, умеренным и слабым градом (рис. 5.7*б*).

Аналогичная ситуация отмечается и в Польше [21], в Узбекистане [13], где в 80% случаев град выпадает с 12^{00} до 20^{00}. На Украине [12] в 42,5% случаев выпадение града отмечается с 15^{00} до 18^{00}.

Следует отметить, что на Северном Кавказе и многих других регионах выпадение града в горных и предгорных районах начинается несколько раньше, чем на прилегающих равнинах.

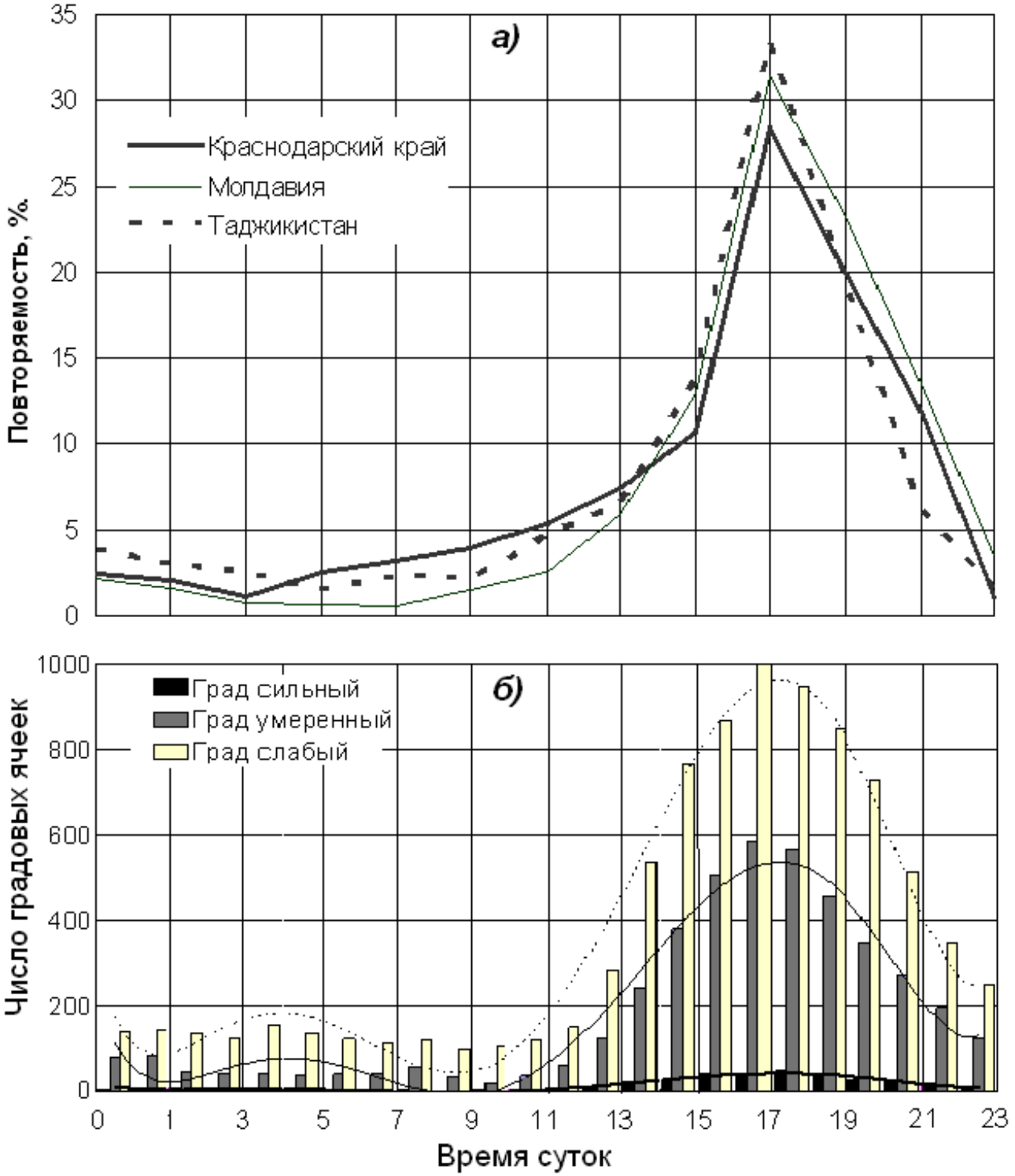


Рис. 5.7 – Суточный ход повторяемости выпадения града: ***а)*** по данным метеостанций [7]; ***б)*** по радиолокационным данным за 2002 – 2008 гг. [22]

5.3.5 Соотношение числа случаев града и ливневых осадков

Анализ соотношения числа КЯ с градовыми и ливневыми осадками разной интенсивности (рис. 5.8) показал, что из 701458 КЯ, наблюдавшихся в течение 7 лет в радиусе 200 км вокруг Ставропольской радиолокационной системы «АСУ-МРЛ» на площади около 126 тысяч км^2,

72% составляют КЯ со слабыми ливневыми дождями с интенсивностью осадков $J < 5$ мм/час), 23,5% КЯ с умеренными ливневыми осадками ($5 < J < 10$ мм/час), 2,5% с сильными ливневыми осадками (с $J > 10$ мм/час) и всего 1,8% градовых КЯ, в том числе 1,2% с крупой и слабым градом, 0,6% с умеренным градом и около 0,04% с сильным градом (рис. 5.8*а*).

Из 12948 обнаруженных градовых КЯ (рис. 5.8*б*) около 65% являются слабыми, из которых выпадает ливневой дождь с крупой и мелким градом, не наносящим ущерба сельскохозяйственным культурам, 32,6% градовых КЯ дают градовые осадки, наносящие слабые повреждения, а 2,4% градовых КЯ сопровождались интенсивными градобитиями со степенью повреждения сельхозкультур от 30 до 100% [22].

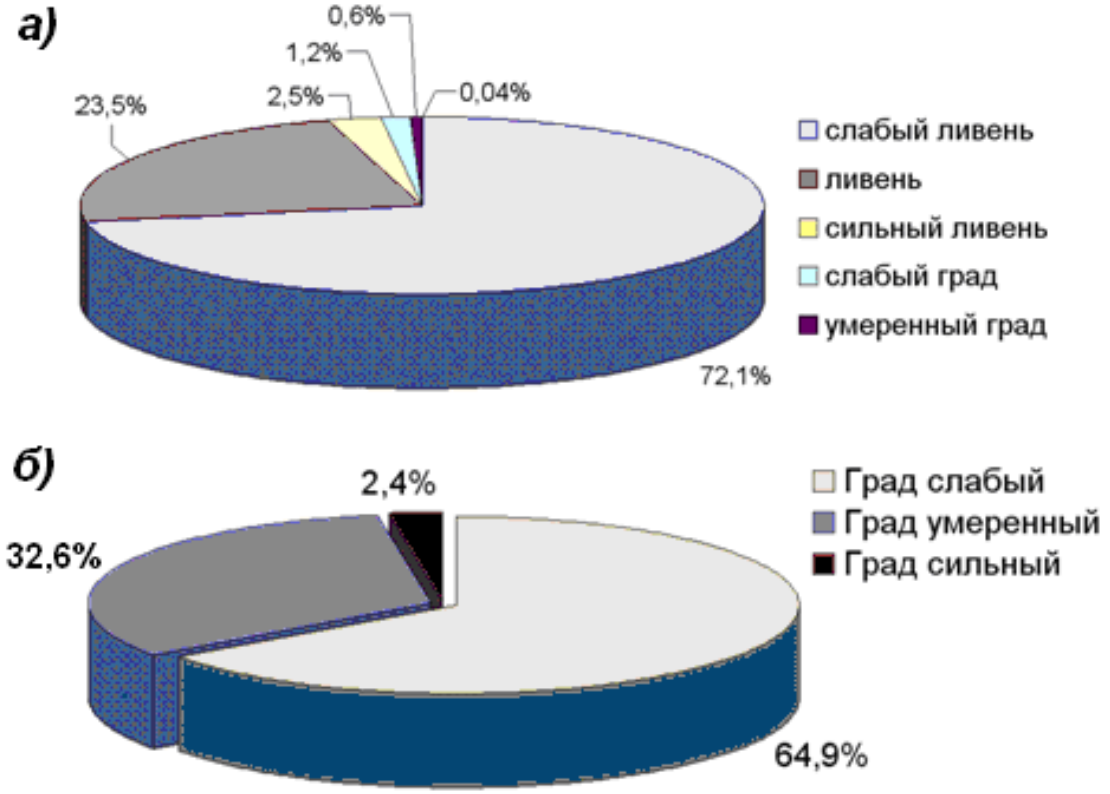


Рис. 5.8 – Повторяемость градовых и ливневых КЯ разной интенсивности в период 2002 – 2008 гг. [22]

5.3.6 Повторяемость размера града

5.3.6.1 Размер града варьирует в широких пределах от 0,5 до 10 см. Отмечены случаи выпадения градин до 13 и даже 20 см (рис. 5.9), но такие случаи крайне редки. Более характерны следующие размеры града:

– на территории Украины в 40% случаев ущерб отмечается от мелкого интенсивного града, и только в 20% случаев от града диаметром более 3 см, максимальный диаметр достигает 8 – 10 см [12];

– в Алазанской долине Грузии чаще выпадает град диаметром 1,4 – 1,8 см, в 10% случаев от 3 до 5 см, а в 4% случаев – более 5 см [10, 11];

– в Армении повторяемость града диаметром 3 – 5 см и более составляет всего 1%;

– в Хорватии размер града превышает 3,5 см в 2% случаев [23];

– во Франции 80% градин имеют диаметр от 0,2 до 2 см [14];

– в США в районе Денвера размер градин варьирует от 0,6 до 5 см, а свыше 6 см отмечается в 1% случаев [24];

– максимальный диаметр града не превышает 2 см в Краснодарском крае в 75% случаев, в Молдавии в 90%, в Таджикистане в 95%, в Узбекистане и Армении в 96% случаев [12, 11, 13].

На Северном Кавказе в 70% случаев диаметр града варьирует от 0,5 до 2 см, в 25% случаев – от 2 до 3 см, а в 5% случаев – от 3 до 10 см.

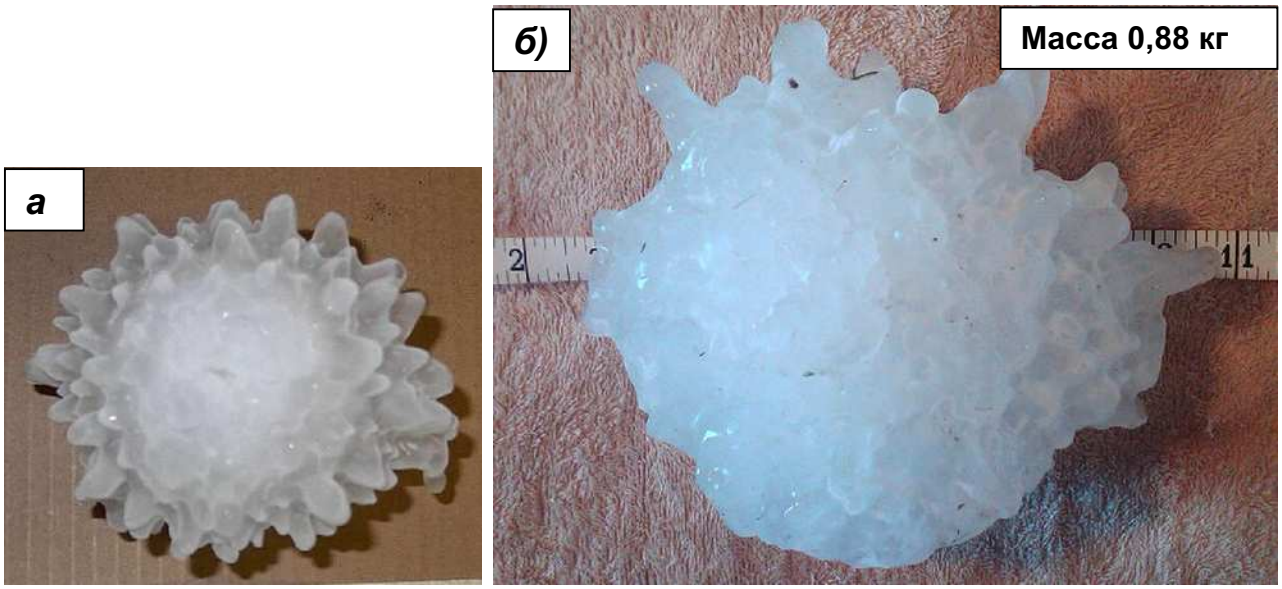


Рис. 5.9 – Гигантские градины [25] диаметром 13,3 см (***а***) и 20 см (***б***), отмеченные 14.05.2004 г. в штате Канзас и 23.07.2010 г. в Южной Дакоте

5.3.6.3 Во всех регионах с увеличением размера града его повторяемость убывает (рис. 5.10), но в разной степени. Например, в Краснодарском крае число случаев крупного града (от 2 до 10 см) в несколько раз больше, чем в Молдавии и Таджикистане, где диаметр града редко превышает 3 см, хотя в анализируемой выборке есть случаи выпадения града в Молдавии диаметром до 7 и даже 12 см.

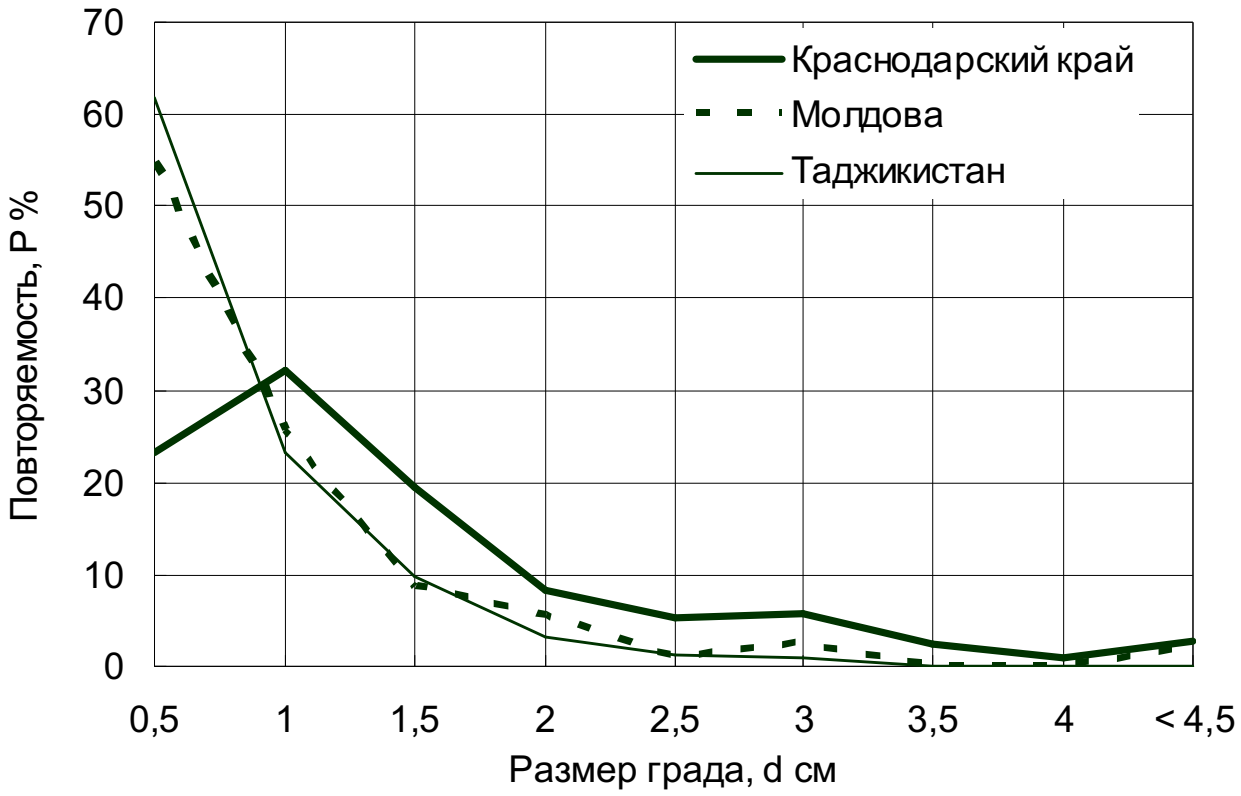


Рис. 5.10 – Повторяемость размера града в указанных регионах [7]

5.3.7 Форма градин

Большинство градин имеют сферическую и сфероидную форму. Например, во Франции такую форму имели 98% градин [14]. Подобная картина наблюдается и в Канаде [26]. Анализ 30 спектров града, выпадавшего в высокогорных районах США в двух сезонах [27], показал, что 93% из 2000 градин имели близкую к сфере форму, а 7 – конусообразную форму. На Северном Кавказе в подавляющем большинстве случаев выпадает град сферической и конусообразной формы и только в 3 – 5 случаев эллипсоидальной формы. Крупные градины чаще имеют форму, близкую к сфере, либо представляют собой бесформенные конгломераты нескольких смерзшихся градин.

По данным Вейкмана [28] форма градин зависит от времени года. Мелкие градины, имеющие конусообразные формы встречаются в зимне-весенний период с ноября (5%) по май (9%) и достигают своего максимума в апреле (25%). Сферические формы преобладают летом: в мае (30%), июле (25%) и в августе (25%).

5.3.8 Внутренняя структура градин

Градины обычно имеют слоистую структуру с характерным чередованием прозрачного и непрозрачного слоев льда (рис. 5.12).

Такая структура градин формируется за счет чередования режимов

«мокрого» и «сухого» роста града. Зона роста града имеет крайне неоднородное в трехмерном пространстве распределение микрофизических и термодинамических характеристик. Скорости восходящих потоков, температура и водность в облаке изменяются с высотой и в горизонтальном направлении. В процессе роста градина может попадать в области пониженной водности и низких температур, где все переохлажденные облачные капли, захваченные градиной, мгновенно замерзают при столкновении с ее поверхностью и благодаря воздушным включениям образуется слой непрозрачного поликристаллического льда. Такой режим роста принято называть режимом «сухого» роста.

Если градина попадает в области повышенной водности и относительно малых переохлаждений, то облачные капли, захваченные градиной, не успевают замерзать, так как температура поверхности градины повышается до 0 ^{o}C за счет выделения скрытого тепла замерзания. Не замерзшая часть захваченной воды растекается по поверхности градины, образуя пленку воды, и дальнейший рост градины происходит под равновесной пленкой воды по мере теплообмена с окружающей средой. При таком росте града образуется прозрачный слой монокристаллического льда, который зачастую содержит вкрапления пузырьков воздуха размером от 1 до 100 мкм и пузырьков незамерзшей воды размером до 1 мм (рис. 5.11), образуя спонгиальные градины.

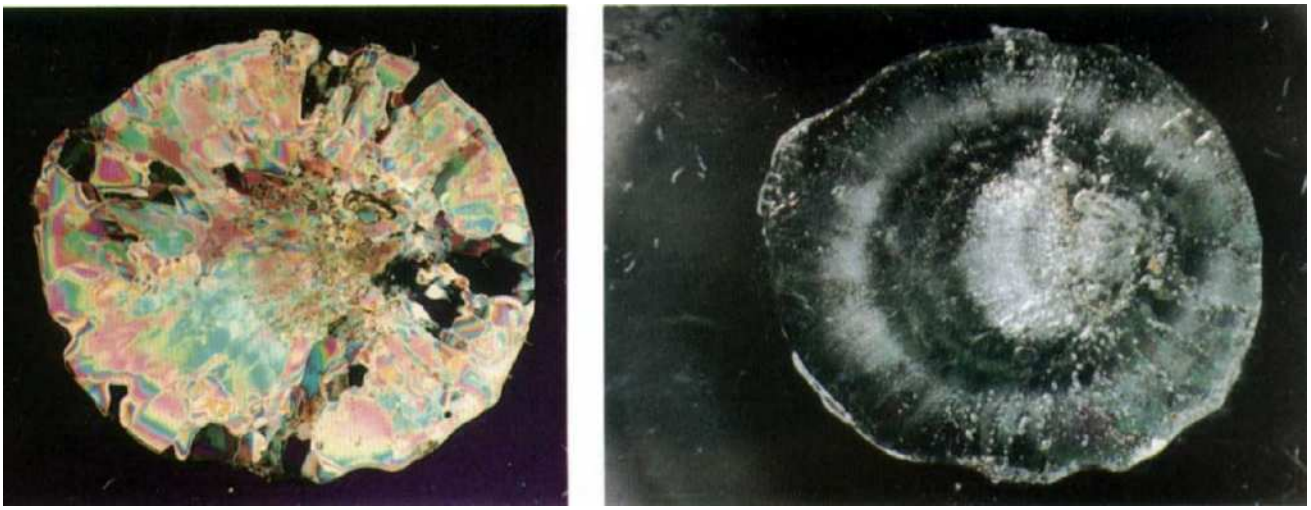


Рис. 5.11 – Структура градин в поляризованном и проходящем свете

Теория роста града с учетом теплового баланса, анализ условий «сухого» и «мокрого» роста и механизма формирования слоистой структуры градин детально рассмотрены в работах Шумана [29], Листа [30], Качурина [31], Жекамухова [32], Закинян [33] и др.

5.3.9 Кинетическая энергия града

5.3.9.1 В научной литературе и оперативной практике используются следующие термины кинетической энергия града:

– плотность потока кинетической энергии, приходящаяся на единицу площади в единицу времени, $\dot{E}$ в Дж/м^{2}с;

– кинетическая энергия, приходящаяся на единицу площади за весь период выпадения града E в Дж/м^2;

– суммарная кинетическая энергия E_Σ в Дж, просуммированная по всей площади выпадения града;

– глобальная кинетическая энергия E_G в Дж, просуммированная по всем площадям выпадения града за весь сезон.

5.3.9.2 Плотность потока кинетической энергии $\dot{E}$ определяет интенсивность выпадения града и определяется спектром размеров градин и скоростью их падения:

$$\dot{E} = \frac{\pi}{12}\rho_Г \int_0^\infty n(d) d^3 V(d) dd\,, \qquad (5.2)$$

где $\rho_Г$ – плотность градин; $n(d)$ – функция распределения градин по размерам; $V(d)$ – функция скорости падения градин от их диаметра d.

Плотность градин изменяется в широких пределах – от 0,20 до 0,93 г/см^3. Наиболее часто она составляет около 0,83 г/см^3. Продолжительность выпадения града на метеостанциях варьирует от нескольких секунд до 2 часов, не превышая в 90% случаев 10 мин. На поверхности земли при этом может наблюдаться выпадение в среднем около 1500 градин на 1 м^2, начиная от отдельных градин до 47 000 градин на м^2 [35, 36].

Спектры града в облаке аналитически удовлетворительно описываются экспоненциальным распределением [1], а спектр града, достигшего земли после таяния в теплой части атмосферы, – гамма-распределением, односторонне усеченным нормальным [37] и нормально-логарифмическим распределениями [38]. Наиболее часто ввиду удобства интегрирования используется гамма-распределение:

$$n(d) = N\frac{b^{\mu+1}}{\Gamma(\mu+1)}\frac{d^\mu}{d_3^{\mu+1}} e^{-b\frac{d}{d_3}}\,, \qquad (5.3)$$

где N – концентрация градин в м$^{-3}$; μ - параметр формы кривой распределения; $\Gamma(\mu+1)$ - гамма-функция, равная $\mu!$ при целочисленном μ; d_3 - среднекубический диаметр спектра града; $b = \sqrt[3]{(\mu+1)(\mu+2)(\mu+3)}$.

Скорость гравитационного падения градин зависит от размера града.

В безветренную погоду скорость падения самых крупных градин не превышает 35 ÷ 37 м/с. При сильном ветре, сопровождающем выпадение града, она может достигать 40 ÷ 45 м/с, значимо увеличивая кинетическую энергию градин. Данные о скорости гравитационного падения градин могут быть аппроксимированы выражением [39, 40]:

$$\mathrm{V}(\mathrm{d}) = A \cdot d^{0,5} \left(\frac{\rho_0}{\rho_\mathrm{H}} \right)^{0,5}, \qquad (5.4)$$

где A – размерный коэффициент, который по экспериментальным данным разных авторов варьирует в пределах от 13 до 16,2 $м^{0,5}/с$; ρ_0 и ρ_H – плотность воздуха в стандартной атмосфере на уровне моря и высоте H.

На высоте $H \approx 0,5 \div 1,0$ км и диаметре града $0,1 < d < 5$ см $A \approx 13,7$ $м^{0,5}с^{-1}$ (рис. 5.12).

С учетом (5.3) и (5.4), выражение (5.2) можно представить в виде:

$$\dot{E} = 1,29 \rho N \, d_3^{4,5}. \qquad (5.5)$$

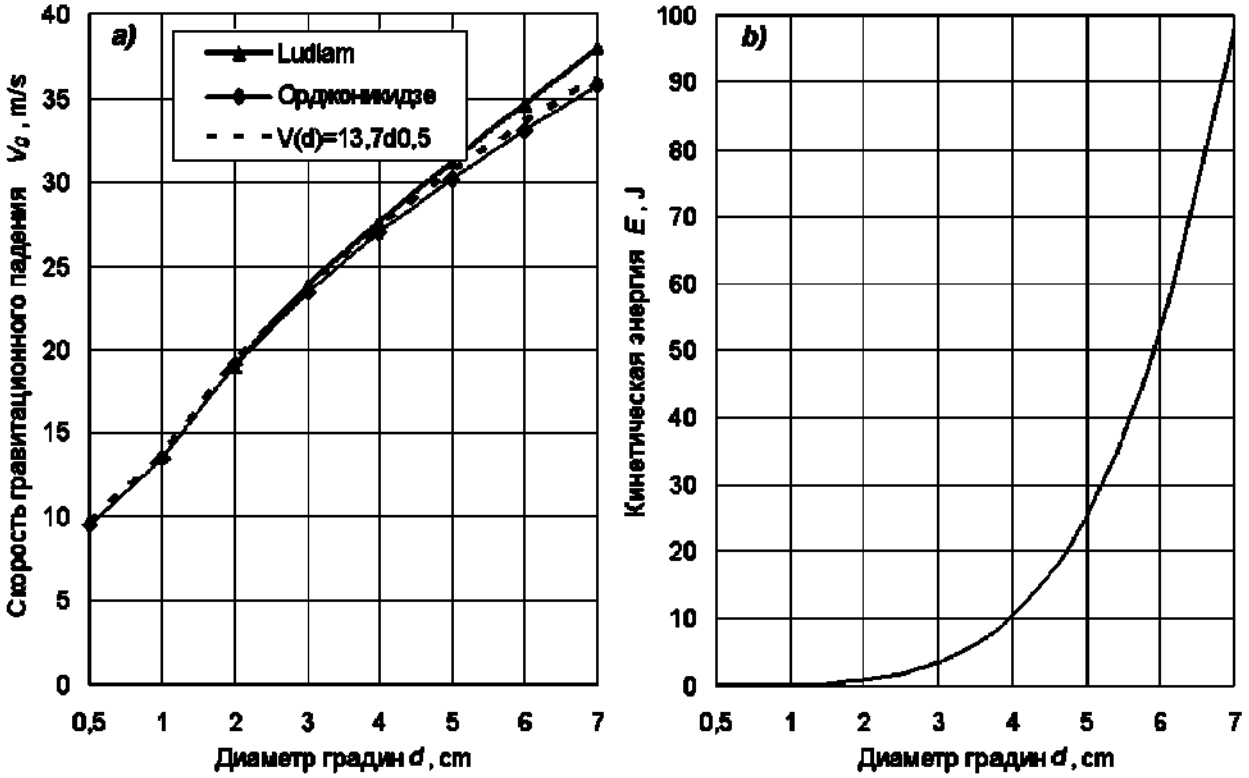


Рис. 5.12 – Зависимость от размера градин скорости их гравитационного падения (*a*) и кинетической энергии при безветренной ситуации (*b*)

Выражая значения N и d_3 через радиолокационную отражаемость (в соответствии с решением обратной задачи теории рассеяния) в работе [41] предложены одноволновый и двухволновый методы измерения $\dot{E}$:

$$\dot{E} = \mathrm{A}\, Z^b = 5,6 \cdot 10^{-6} \cdot 10^{0,086 Z_{10}}; \qquad (5.6)$$

$$\dot{E} = 1,35 \cdot 10^{-6} 10^{Z_{3,2}^{0,025} + Z_{10}^{0,075}}, \qquad (5.7)$$

На основе аппроксимации результатов экспериментальных радиолокационных измерений значений Z и и измерений $\dot{E}$ с помощью сети градовых подушек Federer и др. [42, 43] получил корреляционное соотношение $Z - \dot{E}$, аналогичное (5.6), в котором коэффициент A = $5 \cdot 10^{-6}$, а коэффициент b = 0,084. Ulbrich [44] получил такое же соотношение с коэффициентами равны A = $7 \cdot 10^{-6}$ и b = 0,086. Такое согласие формул для радиолокационного измерения $\dot{E}$, полученных разными методами и для разных физико-географических условий, свидетельствует о надежности таких измерений.

5.3.9.3 Кинетическая энергия града E, приходящаяся на единицу площади определяется длительностью выпадения града и плотностью потока кинетической энергии. Значение E тесно коррелирует со степенью повреждений растений и рассчитывается путем интегрирования плотности потока кинетической энергии града $\dot{E}$ за весь период выпадения града:

$$E = \int_{t_1}^{t_2} \dot{E}(t)dt \ , \tag{5.8}$$

где t_1 и t_2 – начало и конец выпадения града в заданной точке.

Кинетическая энергия града в среднем составляет около 10 Дж/м^2, достигая в случае катастрофических градобитий 900 Дж/м^2 [35, 45], когда зеленые насаждения полностью уничтожаются, но в большинстве случаев не превышает 400 Дж/м^2 со степенью повреждения посевов от 20 до 60%.

Многолетние данные радиолокационных измерений показывают [7], что повторяемость градовых дорожек в целом убывает по мере увеличения кинетической энергии града (рис. 5.13).

5.3.9.4 *Суммарная кинетическая энергия* градовых осадков E_Σ рассчитывается путем суммирования кинетической энергии по всей площади выпадения града S в течение всего дня с градом:

$$E_\Sigma = \int_0^t E(S)dS \ , \tag{5.9}$$

где S варьирует в пределах от 0 до 300 км^2, а в штате Алберте Канады может достигать 1500 км^2 [35, 47].

Суммарная кинетическая энергия характеризует разрушительный потенциал градового процесса в целом, позволяет сравнить между собой градовую опасность разных дней с градом.

5.3.9.5 *Глобальная кинетическая энергия* E_G рассчитывается путем суммирования E_Σ по всем случаям выпадения града за весь сезон:

$$E_{\mathrm{G}} = \int_i^n E_{\Sigma i}(S_i)dS \ . \tag{5.10}$$

Эта величина характеризует степень градоопасности года и позволяет сравнить между собой разные годы.

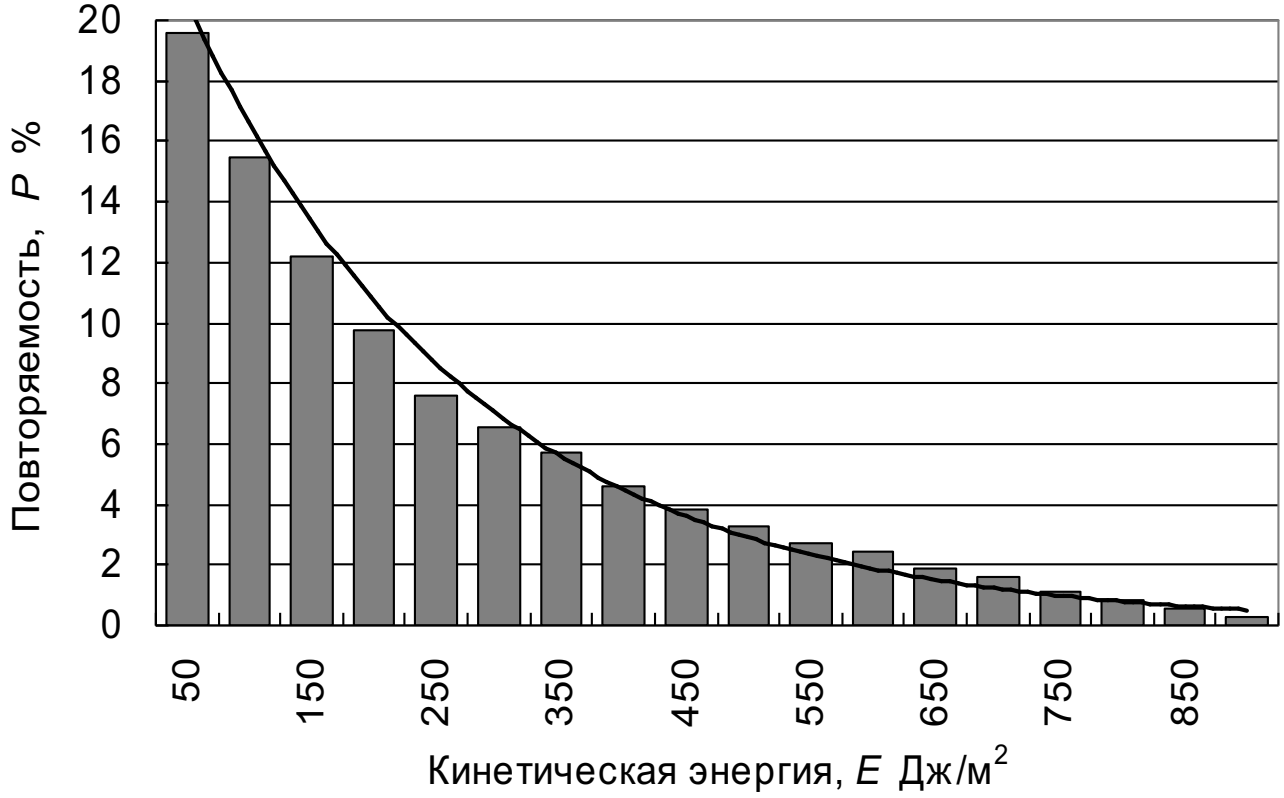


Рис. 5.13 – Повторяемость кинетической энергии града [7]

5.3.10 Продолжительность выпадения града

Продолжительность выпадения града в одной точке варьирует от нескольких секунд до 3 часов. Самые продолжительные градобития более 2 часов наблюдаются в высокогорных районах (например, Бермамыт, Хунзах, Алибек, Кедабек), где в 10,7% случаев отмечается продолжительность града 1,0 ÷ 1,5 часа, а с перерывами и более 2 часов (14,4% случаев). Продолжительные градобития (от 45 до 60 минут) отмечены также в Армавире, в Закавказье (в Армении и Азербайджане).

В разных регионах продолжительность градовых осадков разная:

– во Франции в среднем 5 ÷ 10 минут, максимум 1,5 часа [14];

– в Хорватии в основном до 5 минут [23];

– в штате Аризона США средняя продолжительность составляет 4,8 мин, в штате Иллинойс – 3,2 минут, в Южной Дакоте – 8 минут, а Северо-Восточном Колорадо – 10 ÷ 15 минут [47];

– в штате Альберта Канады до 10 мин, а в Денвере до 5 минут [48];

– на территории Средней Азии в 90% случаев не более 15 минут;

– в районах Сибири и Урала в 60% случаев не более 9 минут;

– на территории Украины и Молдавии обычно 6 ÷ 12 минут [12];

– в Ростовской области – в среднем 10 мин и максимум 20 минут;

– на Северном Кавказе в целом в 80% случаев менее 15 минут;

– в Китае в 66% случаев до 30 мин, в 27% от 30 до 60 мин, 4% – более 60 минут [49, 50].

Таким образом, средняя продолжительность выпадения града составляет 6 ÷ 15 минут, а максимальная может длиться более часа.

При слабых градобитиях выпадают отдельные градины, а при интенсивных может образоваться слой града, который не успевает растаять и через сутки. Толщина слоя выпавшего града обычно составляет около 5 см, а при катастрофических градобитиях в центральной части полосы может достигать 30 см. Число выпавших градин убывает с увеличением размера града.

Интенсивность градовых осадков может изменяться в весьма широких пределах, достигая при катастрофических градобитиях 300 мм/ч и более.

5.3.11 Размеры градовых дорожек

При суперячейковых и многоячейковых процессах град выпадает в виде полосы шириной от 2 до 20 км, длиной до 100 – 200 км, охватывая площади до 500 ÷ 3000 км^2. При внутримассовых процессах град выпадает в виде отдельных пятен площадью от 0,1 до 20 км^2.

На Северном Кавказе по данным многолетних радиолокационных и наземных наблюдений (310 случаев) длина градовых дорожек варьирует от сотен метров до 170 км при среднем значении около 20 км, а их ширина – от сотен метров до 30 км, а в среднем около 5 км (рис. 5.14).

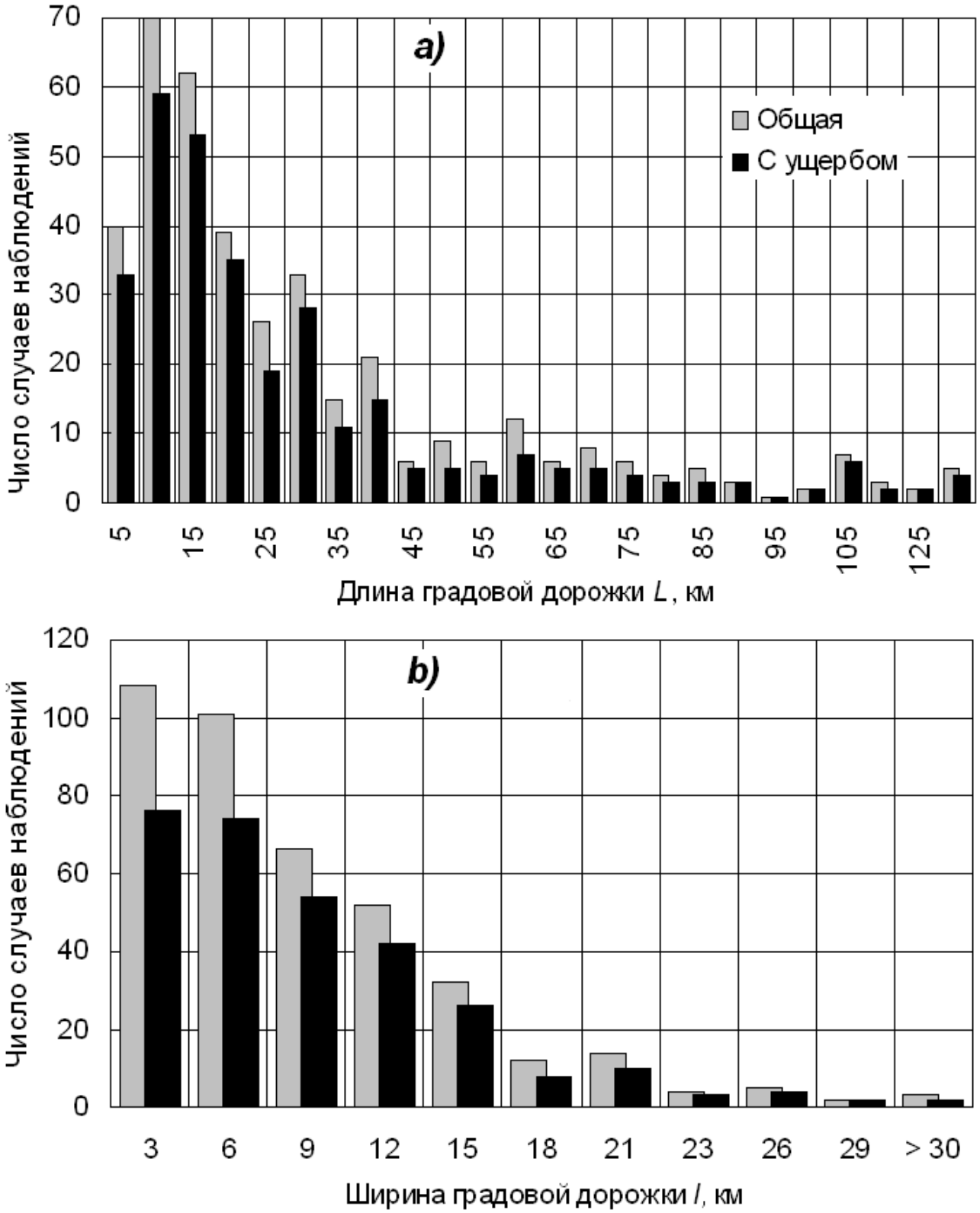


Рис. 5.14 – Длина *а)* и ширины *б)* градовых дорожек, отмечавшихся в радиусе 120 км от пункта радиолокационных наблюдений [7]

5.4 Градоопасность различных регионов

5.4.1 Градобития чаще отмечаются в средних широтах Южного и Северного полушария. По мере продвижения к высоким широтам и экватору частота выпадения града спадает. Территориальное распределение градоопасности средних широт крайне неоднородно из-за разнообразия орографических и климатических условий.

В таблице 5.4 представлены оценочные сведения об ущербе от градобитий на территории разных континентов по данным [1, 2, 47, 50 – 53 и др.]. В некоторых регионах и странах градоопасной является вся культивируемая территория (например, в странах балканского полуострова, Молдавии, Армении, Грузии, Китае), а в других районы горные долины и предгорья с благоприятным климатом для сельскохозяйственного производства.

Таблица 5.4 – Оценочные сведения об ущербе, наносимом градом в разных континентах и странах (в ценах 2003 г.)

Континент	Страны, в которых отмечаются интенсивные градобития	Суммарная площадь градоопасной территории млн га	Ориентировочные среднегодовые потери урожая	
			N, %	млрд. долларов
Европа	Англия, Испания, Франция, Италия, Германия, Швейцария, Сербия, Черногория, Хорватия, Словения, Македония, Австрия, Венгрия, Болгария, Греция, Румыния, Украина, Молдова, Российская Федерация	≈ 42,4	от 3 до 16	≈ 2,6
Азия	Азербайджан, Армения, Грузия, Турция, Казахстан, Узбекистан, Таджикистан, Кыргызстан, Иран, Китай, Индия, Бангладеш, Вьетнам, Пакистан, Бирма, Корея	≈ 60,3	от 3 до 14	≈ 3,8
Северная Америка	Канада, США, Мексика	22,6	от 3 до 15	≈ 3,6
Южная Америка	Аргентина, Бразилия, Боливия, Парагвай, Уругвай	≈ 4,2	от 3 до 18	≈ 0,9
Африка	Алжир, Марокко, Ливия, Кения, ЮАР и др.	≈ 5,5	от 3 до 10	≈ 0,6
Австралия		≈ 1,4	≈ 5,0	≈ 0,2
Новая Зеландия		≈ 1,2	≈ 6,0	≈ 0,1
	Всего:	**≈ 137,6**	**≈ 5 – 6**	**≈ 11,8**

5.4.2 В Европе наиболее градоопасными являются Испания, средняя и южная части Франции, Германии, Польши, север Италии, почти вся территория Сербии, Албании, Македонии, Словении, Австрии, Венгрии, Румынии, северо-западные районы Болгарии, север Греции, большая часть Украины и Молдовы, а также Северный Кавказ (рисунки 5.15 и 5.16).

Рис. 5.15 – Области повышенного риска ущерба от града в Европе [51]

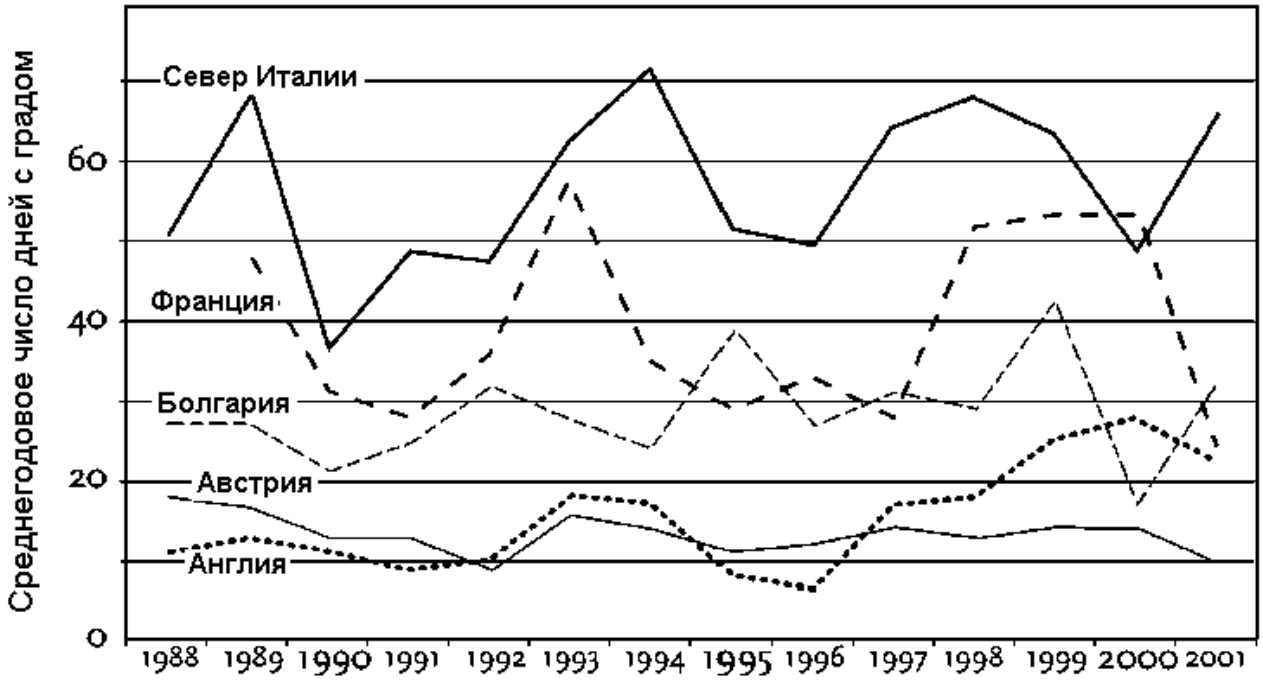


Рис. 5.16 – Среднегодовое число дней с градом в указанных странах [52]

Наибольшее число дней с градом в Европе отмечается в северной Италии, на территории которой в отдельные годы отмечается до 70 дней с градом. До 40 дней с градом отмечается и на юге Франции. Значительно ниже число дней с градом в Болгарии, Австрии и британских островах.

5.4.3 В Северной Америке большие потери от града отмечаются в южной части Канады (особенно в штате Альберта), северо-западной и центральной части США и северной части Мексики, где частота выпадения града на метеостанциях достигает 6 ÷ 9 случаев в год. Число дней с градом в этих областях достигает 50 дней в году.

Шеннон [15] по данным 1285 станций и страховых учреждений 17 штатов США, Канады и Мексики показал, что высокая частота выпадения града на Великих равнинах и Центральном западе Северной Америки обусловлено стеканием потока сухого холодного воздуха со склонов Скалистых гор и вытеснением у поверхности земли теплых и влажных воздушных масс. Область повышенной интенсивности градобитий простирается от восточных районов к Скалистым горам.

Большинство градобитий связано с прохождением холодных фронтов (например, 60% из 128 самых разрушительных градобитий, наблюдавшихся в штате Иллинойс за 50 лет). Годовой ущерб от града в США превышает 2,5 млрд долларов.

5.4.4 В Южной Америке наиболее градоопасными являются предгорные районы Аргентины и Бразилии, примыкающие к восточным склонам Кордильер, а также горные долины Боливии. Площади повреждений в Аргентине достигают около 2 млн га.

Особенно высокой градоопасностью отличается провинция Мендоса Аргентины, где потери от града в отдельные годы достигают 18%. Особенности орографии провинции Мендоса обуславливают серьезные различия в климатологии града в трех оазисах. При обтекании высокой северной части горного массива Анд преимущественно северо-западными и западными потоками восточные склоны гор подвергаются фёновому эффекту, переходящему временами в горячий сухой орографический ветер, известный под названием «Sonda». Этот эффект подавляет развитие градовых облаков на восточных склонах Анд и повторяемость выпадения града увеличивается по мере удаления от гор на 70 – 90 км в отличие от рассмотренных выше регионов, где она максимальна в горах и уменьшается по мере удаления от гор [9]. На восточных склонах Анд $\overline{F}$ = 1,0, на расстоянии 40 км от гор (г. Сан-Мартин) $\overline{F}$ = 2,8, а на расстоянии 70 – 80 км (Санта Роса, Ла-Пас) $\overline{F}$ = 4,3, а F_m = 8.

Другой особенностью климатологии града Северного оазиса является выпадение града преимущественно ночью. Причиной этого феномена

является то, что режим обтекания гор ночью изменяется и обуславливает заток холодного воздуха в слое атмосферы от 2 до 8 км, приводящий к понижению температуры слоя облакообразования на 8 – 12 ^{o}C, формированию сверхадиабатических градиентов и развитию мощных градовых облаков [9].

По мере уменьшения высоты горного массива к югу эти два феномена отмечаются все реже и в Центральном оазисе, как над горами, так и над самим оазисом, градовые облака развиваются чаще в вечерние часы. В Южном оазисе градовые облака отмечаются преимущественно во второй половине дня, чаще развиваются над горами и вторгаются в оазис в зрелом состоянии. Эти особенности климатологии града в трех оазисах приводят к большой пространственно-временной изменчивости потерь от града и обусловливают плохую корреляцию потерь в разных оазисах. Следует также отметить огромное влияние на градовую активность региона явления Эль-Ниньо, повторяющегося один раз в 2 – 4 года, и резко изменяющего циркуляцию атмосферы над Южной и Северной Америкой вплоть до Африки и Австралии.

5.4.5 В Китае град наносит ощутимый ущерб почти на всей культивируемой территории (в 28 провинциях из 31). От градобитий ежегодно погибают посевы на площади около 4 млн га. Поэтому руководство страны уделяет большое внимание проведению противоградовых работ, которыми охвачено более 43 млн га.

Большинство разрушительных градобитий (77%) обусловлены вторжением холодных фронтов с северо-запада [49]. В 71,4% случаев отмечаются многоячейковые градовые процессы, а в 29,6% крупномасштабные суперячейковые градовые облака.

5.4.6 В Российской Федерации (РФ) имеются обширные не градоопасные районы, районы низкой и средней градоопасности и локальные районы повышенной и высокой градоопасности, где частота выпадения града превышает 8 случаев в год.

Эта неоднородность обусловлено тем, что на этой территории имеют место почти все климатические зоны от жарких субтропиков до холодных арктических островов, от равнинных пустынных или болотистых просторов до высоких горных хребтов. В целом градоопасность повышается с севера на юг по мере приближения к горным массивам Карпат, Крыма, Главного Кавказского хребта, Памира, Тянь-Шаня и Алтая [2, 53]. Севернее 60° параллели град выпадает редко (1 ÷ 5 дней за десять лет). Южнее 60° северной широты градоопасность увеличивается и среднегодовое число дней с градом $\overline{F}$ составляет более 1 дня (рис. 5.17). В полосе от 60° до 48° северной широты $\overline{F}$ не превышает 2 дней в году. То же значение $\overline{F}$

наблюдается в районах Дальнего Востока, Амурской области, Западной Сибири, Южного Урала. Отдельные очаги повышенного $\overline{F}$, до 4 дней в году, наблюдаются в районе Абакана, Иркутска. Заметно увеличивается $\overline{F}$ в районах, расположенных южнее 48° северной широты.

Наиболее градоопасными в Российской Федерации являются районы Северного Кавказа, Алтайского края и юга Приморского края. Отдельные очаги повышенной повторяемости града, до 4 дней в году, наблюдаются в районе Усть-Каменогорска, Абакана, Иркутска (рис. 5.17).

5.4.6.1 ***Градоопасность Северного Кавказа*** отличается большим разнообразием. В Ростовской области $\overline{F}$ = 1,0 ÷ 1,5. В Калмыкии, северной части Дагестана, Чечни и Ингушетии меньше 0,2 ÷ 0,5 [2, 53]. В предгорьях Главного Кавказского хребта, где проводятся противоградовые работы, значение $\overline{F}$ увеличивается до 2 ÷ 4 дней в году.

Наиболее градоопасными являются южная часть Краснодарского и Ставропольского краев, Карачаево-Черкесия, Кабардино-Балкария, Северная Осетия (кроме Моздокского района), где значение $\overline{F}$ варьирует от 2 до 4 и более [2, 7], а площади градобитий достигают от 8 до 16% площадей сельскохозяйственных культур (рис. 5.18). Максимальная частота выпадения града F_m отмечается метеостанциями Бермамыт, Шаджатмаз, Зеленчук, Ачишхо, Зубровый парк, на которых $\overline{F}$ составляет от 6 до 12 случаев в год, а F_m достигает в некоторые годы 23 случаев.

В предгорьях в зоне интенсивного сельскохозяйственного производства имеется несколько районов повышенной градоопасности с $\overline{F}$ от 2 до 3 дней в году и максимальным значением F_m до 6 дней в году:

– первый обширный район охватывает территорию Адыгеи и центральную часть Краснодарского края;

– второй – южную и центральную части Ставропольского края;

– третий – территорию Карачаево-Черкесии, Кабардино-Балкарии (внутри этой зоны находятся Бермамыт и Шаджатмаз с $\overline{F}$ = 12 и 8 дней, соответственно) и Северной Осетии.

В остальных районах Северного Кавказа $\overline{F}$ составляет 1 – 1,5 дня, хотя в отдельные годы повышенной градовой активности оно может увеличиваться до 2 ÷ 4 дней.

В Ростовской и Волгоградской областях $\overline{F}$ составляет 1 – 1,5 дня. В Калмыкии, северной части Дагестана (Северо-Дагестанская низменность), Чечне и Ингушетии – не более 0,5 дней.

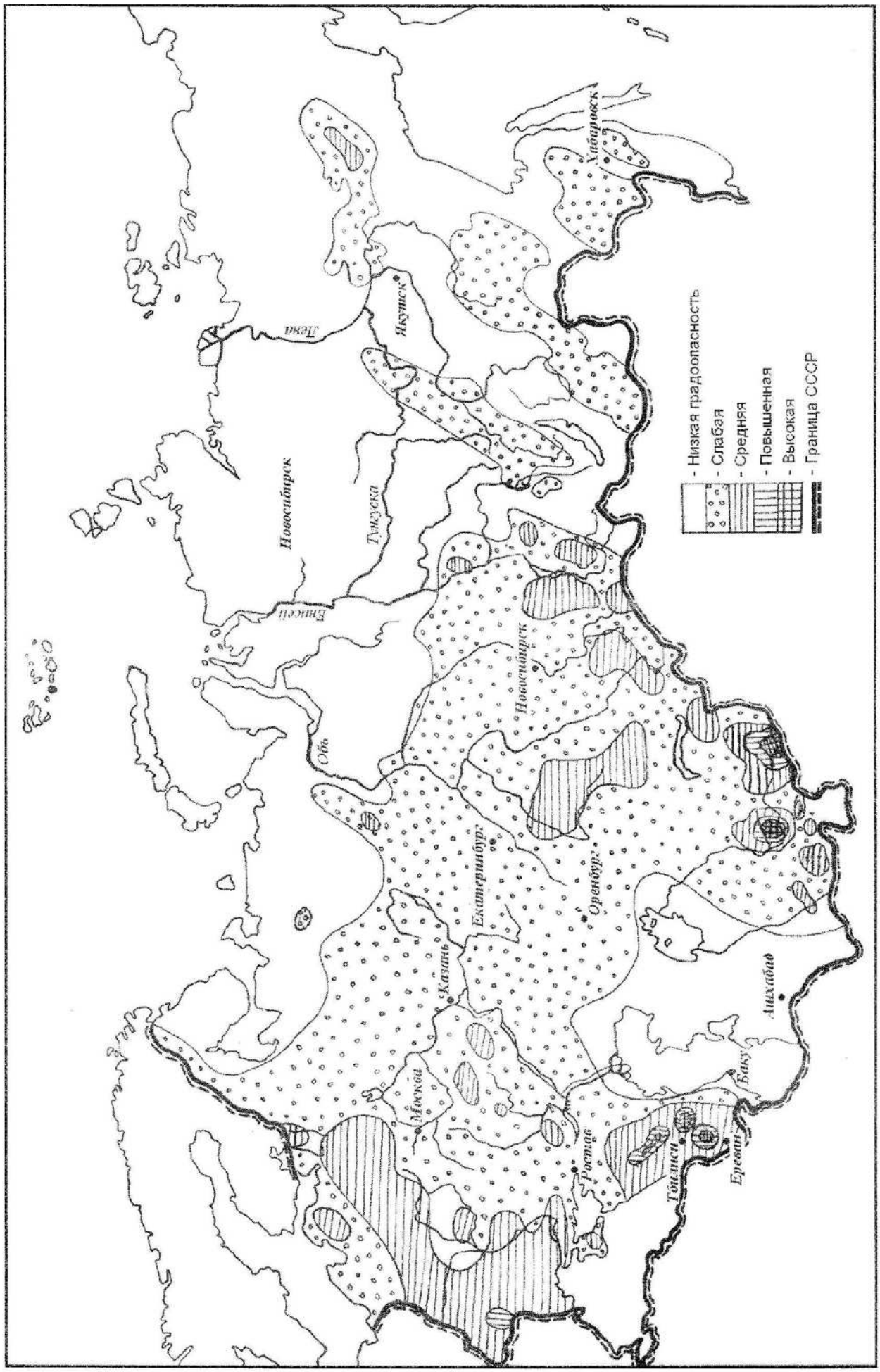


Рисунок 5.17 – Карта среднемноголетней частоты выпадения града на территории СССР [2]

Рис. 5.18 – Карта градоопасности территории Северного Кавказа по данным о потерях сельхозпродукции [2]

В Дагестане высокая повторяемость града ($\overline{F}$ = 2 ÷ 4) отмечается на юго-западе республики – в горной и предгорной зонах (в Сулак Высокогорном $\overline{F}$ = 6,7, Хунзаге $\overline{F}$ = 4,8). В районе Северо-Дагестанской низменности град наблюдается редко (от 2 до 5 случаев за десять лет), а в прибрежных районах Прикаспийской низменности периоды без выпадения града составляют от 10 до 30 лет.

Из рисунка 5.17 следует, что в наиболее градоопасных регионах Северного Кавказа, Закавказья, Узбекистана, Таджикистана, Алтайского края, Молдовы и Украины) значение $\overline{F}$ может превышать 2 ÷ 4 дня, а доля погибших посевов может достигать от 8 до 16%.

Такими районами являются горные и предгорные районы Краснодарского и Ставропольского краев, Адыгея, Карачаево-Черкесия, Кабардино-Балкария, Северная Осетия (рис. 5.19), Алазанская долина, ряд районов Армении и Азербайджана, Гиссарская и Вахшская области Таджикистана и большинство районов Молдовы, которые охвачены противоградовыми работами.

Организация ПГЗ целесообразна также:

– на обширных градоопасных территориях Украины, включая многие районы Винницкой, Ивано-Франковской, Львовской, Херсонской,

Житомирской, Черниговской и других областей [2];

– в Кавказском, Курганинском, Тбилисском и Красногвардейском районах Краснодарского края;

– Шпаковском, Минераловодском, Александровском, Петровском, Грачевском и Новоалександровском районах Ставропольского края;

– обширных градоопасных областях Казахстана (Алма-Атинская, Целиноградская, Восточно-Казахстанская, Кокчетавская и Джамбульская);

– в Алтайском и Дальневосточном краях.

Потребность в проведении ПГЗ на территории бывшего СССР составляла около 30 млн га, из которых защищалось около 35%.

Среднегодовая площадь гибели сельхозкультур в СССР до организации ПГЗ составляла около 800 тысяч га, из которых 308 тысяч га отмечались на территории, которая была взята под защиту. Среднегодовые потери составляли более 800 млн долларов.

5.4.7 ***Закавказье*** – район со сложным рельефом, большими перепадами высот, высокими температурами подстилающей поверхности, обуславливающими развитие интенсивных градовых процессов.

По данным метеорологической сети [2, 10, 11] наибольшее число дней с градом в Закавказье наблюдается на склонах Аджаро-Имеретинского и Триалетского хребтов – от 5 до 8 дней в году. В высокогорной зоне большого Кавказа значительную повторяемость отмечает станция Гудаури – 8 дней с градом. В восточном Закавказье повышенным числом дней с градом отмечается ст. Шуша. Наиболее градоопасными являются Алазанская долина и Болнисский район Грузии, где проводилась ПГЗ.

Наибольшая повторяемость града в Грузии наблюдается в районе Южно-Грузинского нагорья ($2 < \overline{F} < 4$). На горных вершинах с высотой 1600 ÷ 2100 м (Бакуриани, Родионовка) $\overline{F}$ достигает 9 ÷ 10 дней. Чуть меньше дней с градом в районе Гудаури – Казбеги и на Мамисонском перевале. Максимальная повторяемость града в этих пунктах достигает $16 < F_m < 20$, а в Бакуриани – 23.

На востоке Грузии высокая повторяемость града наблюдается на ЗТ в районе Цивгомборского хребта и Алазанской долины с $\overline{F} = 2 \div 4$ (Сагареджо, Телави, Кварели и Гурджаани, Цители-Цкаро).

В северо-восточной части Азербайджана, в отрогах Главного Кавказского хребта за год бывает 1 ÷ 2 дня с градом с $4 < F_m < 6$. В южной части Нагорно-Карабахской АО $\overline{F} = 2 \div 4$ (Степанакерт, Шуша, Гадрут), а в Лысогорске – 6,2. Большая повторяемость града на склонах Шахдагского хребта $\overline{F} = 6 \div 8$ дней (Гёкгёль – 9,2). На юге Азербайджана в Нахичеванской долине $\overline{F} = 2 \div 4$.

Очень редко град отмечается вдоль побережья Каспия ($\overline{F}$ = 0,5 ÷ 0,1), на Апшеронском полуострове – до 0,003. В Ленкоранской и Куро-Араксинской низменностях $\overline{F} \leq 0{,}5$.

На большей части горной Армении повторяемость града довольно высокая ($2 < \overline{F} < 4$, и $9 < F_m < 13$). На высотах 2000 – 3200 м (Калинин, Арагац, Джермук) град отмечается в среднем 8 ÷ 10 раз в году, а в отдельные годы $16 < F_m < 21$. В Араратской долине, где градобития наносят значительный ущерб садам и виноградникам $1{,}5 < \overline{F} < 1{,}8$ (Октемберян, Аштарак, Арташат), а $4 < F_m < 6$. На севере Армении, где местность понижена, в районе Шноха, Берда $1{,}1 < \overline{F} < 1{,}5$.

5.4.8 На юге ***Украины и в Молдавии*** на ЗТ $\overline{F}$ составляет 1,5 – 2,0, а в районе Центрально-Молдавской возвышенности – 2,4 дня. В Одесской, Николаевской, Херсонской и Запорожской области наибольшая повторяемость града ($\overline{F} \approx 2 \div 2{,}2$) наблюдается в районе Котовска Одесской области и Аскания Нова Херсонской области и в районе г. Николаева. Наименьшая повторяемость града ($0{,}3 < \overline{F} < 0{,}5$) отмечается на побережье Черного моря. На остальной территории этих областей $\overline{F}$ = 1 ÷ 1,5, а $2 < F_m < 5$, местами до 6 дней [2, 54].

В наиболее градоопасной части Крыма, где проводится ПГЗ, выделяется три района со значительной повторяемостью града. Это наиболее высокие точки Крымских гор: Ай-Петри, Чатыр-Даг и Караби-Яйла ($\overline{F}$ = 3,6 ÷ 3,75). Третий район значительной повторяемости града ($2{,}5 < \overline{F} < 3{,}4$) расположен в предгорной части Крыма, в районе Симферополь-Почтовое. На северо-западе Крыма в районе Раздельного и на Керченском полуострове $1 < \overline{F} < 1{,}5$, а на западных оконечностях полуострова (мыс Херсонес и Тарханкутский полуостров) частота выпадения града минимальна ($\overline{F}$ = 0,24). Наименьшая повторяемость выпадения града отмечается вдоль курортной зоны южного берега Крыма (0,32). Чаще всего град в Крыму выпадает в июне (27% случаев).

На территории Молдавии $\overline{F}$ варьирует от 0,6 до 2,4 дня за год. Наибольшая повторяемость наблюдается в районе Центрально-Молдавской возвышенности. Здесь, по данным метеостанции Корнешты $\overline{F}$ = 2,4, а $F_m \leq 8$. На севере республики в районе Дондюшан $\overline{F}$ = 1,9. Наименьшая частота дней с градом наблюдается в районе Бельцы - Рышканы ($\overline{F}$ = 0,6) и в низовьях реки Днестр $\overline{F}$ = 0,8. На остальной территории республики $1 < \overline{F} < 1{,}5$, а $4 < F_m < 8$.

5.4.9 ***Юг Средней Азии*** также отличается значительной повторяемостью градобитий. На территории юга Казахстана в районе Талды-Кургана, Джамбула, Чимкента среднегодовая повторяемость равна (в среднем) 3 ÷ 4 дням в году [2]. Максимальная повторяемость града на территории Казахстана наблюдается в районе Алма-Аты на метеостанции Ассы ($\overline{F}$ = 8 и F_m = 10).

На территории Ферганской и Сурхандарьинской долин Узбекистана, где также проводятся противоградовые работы, отмечается значительная повторяемость дней с градом с максимумом в северной и северо-восточной части Ферганской долины. Например, в Наманганской области $\overline{F}$ = 3,3, в устье реки Тосс $\overline{F}$ = 6, а на метеостанции Уртотокайское водохранилище – 4. В городах Коканд и Наманган град явление редкое (0,1< $\overline{F}$ < 0,4). На юго-западе Узбекистана на ЗТ в Сурхандарьинской долине 0,5 < $\overline{F}$ < 4 при 2 < F_m < 10. Наибольшее число дней с градом отмечается в апреле – мае. С высотой число дней с градом увеличивается. Наибольшее число дней с градом равно 2 – 3, а в районе Касансая – 7. Здесь среднегодовое число дней с градом в период вегетации сельхозкультур составляет от 0,1 – 0,8, с максимумом повторяемости в мае - июне. После второй половины июля градобитий практически не бывает. Незащищаемые юго-восточные пустынные районы Наманганской, Ферганской и Андижанской областей не градоопасны.

В Кашкадарьинской области 0,8 < $\overline{F}$ < 1,9. Максимум частоты выпадения града наблюдается в период с марта по май.

В восточной части Узбекистана (Ташкентская и Сырдарьинская области) град наиболее часто отмечается в мае и в июне. Наиболее высокая повторяемость града в районе метеостанций Ангрен (плато), Кызылча $\overline{F}$ = 7,8, особенно в мае (до 2,5).

В Джизакской и Самаркандской областях центрального Узбекистана град выпадает редко, а местами (Нурата, Наримановская, Каттакурган) выпадение града не отмечается. Число дней с градом в вегетационный период составляет 0,1 – 0,9 (несколько чаще в предгорной зоне и реже в степной). Максимальное число дней с градом (F_m = 7) отмечается в районе станции Аманкутан, а на остальной территории не превышает 3 – 5 дней.

Территория гористого ***Таджикистана*** также имеет повышенную градоопасность. В районе Нурекского водохранилища (Бустанобад) F_m достигает 11,3. В Гиссарской и Яванской долине, где проводится ПГЗ, $F_m \geq$ 4 и 3, соответственно, а на южных склонах Гиссарского хребта увеличивается до 5 – 8. Градоопасность Гиссарской долины увеличивается с запада на восток. Так, в западной части долины

(Пахтабад) $\overline{F}$ = 1,0, в средней части (Душанбе) – 3,6, а в восточной (Орджоникидзеабад) – 3,4. Интенсивные градовые процессы наблюдаются с марта по июнь (в Шахринау из 2,1 случая выпадения града в год на этот период приходится 1,8 случаев, а в Орджоникидзеабаде 2,9 из 3,4). В периоды январь – февраль и август – декабрь град наблюдается редко.

По данным метеонаблюдений с 1948 года в Гиссарской долине суммарное по всем метеостанциям число дней с градом составляет, в среднем, 24,5. Частота градобитий с ущербом от общего числа градовых явлений составляет 46%. На юге республики, на северо-востоке, востоке, а также на территории Горно-Бадахшанской АО повторяемость града незначительная: $\overline{F} = 0{,}1 \div 0{,}5$.

Киргизия расположена в западной части высокогорной системы Тянь-Шаня и Памиро-Алтая и разнообразие физико-географических условий (высокие горы, Глубокие долины, большие водоемы) приводит к значительной территориальной вариации числа дней с градом. На территории Чуйской, Таласской долин и восточной части Ферганской долины среднее число дней с градом до высоты 1200 м достигает $\overline{F} \leq 2$, $F_m = 7$, увеличиваясь с высотой. На склонах Киргизского хребта до высоты 1600 м $\overline{F} \leq 3$, а $F_m = 15$; до высоты 2400 м $\overline{F} \leq 5$, $F_m \leq 20$. На гребнях Киргизского и Ферганского хребтов (Тая-Ану и Чаар-Таш) $\overline{F} \leq 6$, а $F_m = 11 \div 13$. В Иссык-кульской котловине дней с градом меньше ($2 \div 3$), а в отдельные годы достигает $5 \div 10$ случаев. В высокогорных долинах Тянь-Шаня и Алатоо $1 < \overline{F} < 3$, в отдельные годы $F_m = 8 \div 10$ дней. Наименьшее число дней с градом за год наблюдается в предгорной части Ферганского хребта до высоты 900 м ($0{,}4 < \overline{F} < 0{,}8$). На большей части Киргизии град чаще выпадает в июне, а в высокогорной зоне максимальная повторяемость сдвигается на июль – август. Ранней весной и поздней осенью град наблюдается редко. Град выпадает, в основном, в послеполуденные часы с 13^{00} до 19^{00}. В 45% случаев град выпадает не более 10 мин, в 33% случаев – от 10 до 20 минут и в 22% случаев – более 20 минут.

5.4.10 На основании вышеизложенного видно, что наибольшая повторяемость града в РФ, странах СНГ, Китае, Северной и Южной Америки наблюдается в горных и предгорных районах. Горный рельеф способствует развитию конвективной неустойчивости атмосферы и обострению атмосферных фронтов. Неравномерное нагревание подстилающей поверхности в долинах и предгорной зоне, где снег сходит полностью, и зоне высоких гор, круглогодично покрытых снегом, обуславливает большой контраст температур и развитие мощных конвективных потоков, способствующих развитию градовых облаков.

5.5 Тенденции изменения градоопасности территорий

В последние десятилетия отмечается нарастающее влияние глобального потепления климата (рис. 5.20) на режим осадков, температуры и влажности приземного воздуха, трансформации территориального распределения частоты выпадения града, связанные с изменениями глобальной циркуляции атмосферы.

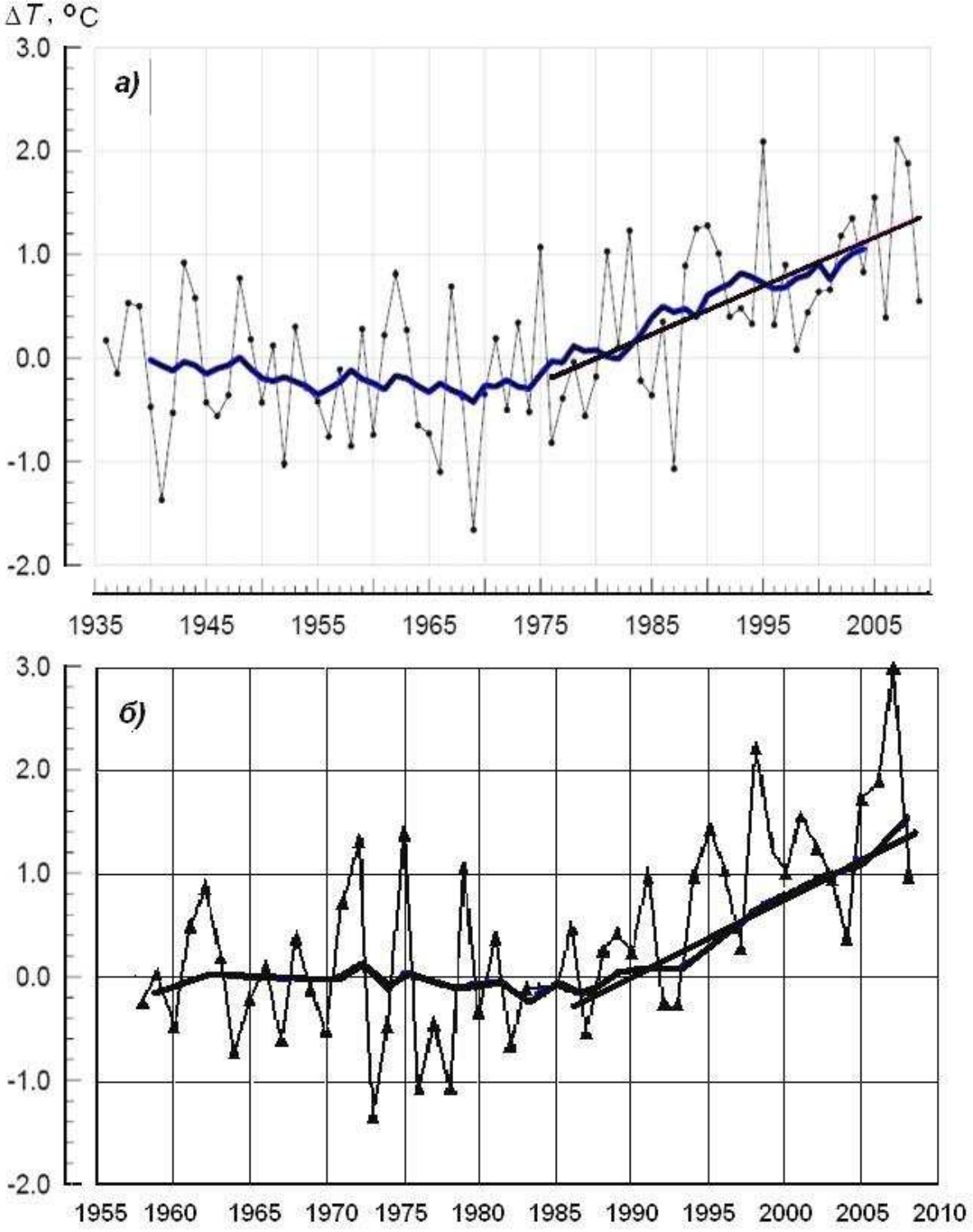


Рис. 5.20 – Повышение температуры воздуха (Δ*T*°C): *а)* – среднегодовой на территории РФ [55]; *б)* – в теплый период года на Северном Кавказе [2]

Эти изменения имеют региональный ход и сезонный ход. Тенденция увеличения количества осадков в регионах повышенного увлажнения (например, на большей части России, Европы, Китая, Индокитая и др.) привела к подъему уровня грунтовых вод и повышению частоты и интенсивности паводков и наводнений ливневого происхождения, а уменьшение количества осадков в засушливых регионах низких широт усугубило дефицит пресной воды.

На Северном Кавказе отмечается устойчивая тенденция увеличения количества осадков, температуры и влажности воздуха [2]. В последние 50 лет среднегодовая температура воздуха повысилась на 0,4°С, средняя абсолютная и относительная влажность атмосферы – на 6%, количество осадков увеличилось на 4 ÷ 16% (в зависимости от орографии).

Основной вклад в увеличение количества осадков дают осадки холодного периода года. Наибольшее увеличение количества осадков (до 16%) наблюдается в наиболее увлажненных районах (на побережье Черного моря и в горах), а наименьшее (до 1,3%) – в степных районах с засушливым климатом. Максимальное повышение температуры воздуха (на 0,4 ÷ 0,5 °С) отмечается на побережье Черного моря, а минимальная – в степных районах Северного Кавказа (в пределах 0,06 °С). В большей степени повышение влажности атмосферы отмечается в теплый период года в горных и предгорных районах (на 6 ÷ 8,5%) и меньшей степени – в холодный период года в степных районах (на 1,5 ÷ 2,7%).

Эти изменения климата повлекли за собой также изменение частоты выпадения града и смещению районов повышенной градоопасности.

Наибольшие изменения на Северном Кавказе отмечаются в период 1980 – 2014 гг. По данным групп метеостанций, расположенных на ЗТ Северо-Кавказской, Краснодарской и Ставропольской ВС (рис. 5.5*а*) следует, что среднегодовое число дней с градом $\overline{F}_S$ испытывают квазипериодические колебания (с 2 – 4 летним циклом). Синхронность во времени максимумов и минимумов на всех ЗТ, по-видимому, обусловлена тем, что большинство градовых процессов имеет фронтальное происхождение, охватывающее весь Северный Кавказ.

В начале указанного периода $\overline{F}_S$ на ЗТ Северо-Кавказской ВС, охватывающей горные и предгорные районы, было в 2,5 раза выше, чем на ЗТ Ставропольской ВС, охватывающей равнинные районы. С годами $\overline{F}_S$ на ЗТ всех ВС выравнивается и варьирует в пределах от 0,9 до 1,1 дней в расчете на одну метеостанцию. Тенденцию понижения градоопасности горных и предгорных районов в период с 1980 по 2008 г. и повышения градоопасности равнинной части Северного Кавказа [56] подтверждает и временной ход коэффициента градоопасности этих территорий G_S, рассчитанный по числу засеянных градовых и градоопасных облаков (рис. 5.5*b*). Это обстоятельство свидетельствует о том, что оценка эффективности противоградовых работ должна осуществляться с учетом тенденций в изменении градоопасности регионов.

6 ПРОГНОЗ ГРАДА

Специализированные прогнозы града служат для оперативного планирования противоградовых операций и включают:

– прогноз синоптического положения;

– анализ термодинамического состояния атмосферы на момент максимального развития конвекции;

– прогноз развития кучево-дождевой облачности, ливневых осадков, гроз, града, шквалистого усиления ветра (шквала);

– прогноз мезорайона развития градового процесса;

– прогноз интенсивности градового процесса;

– прогноз типа градового процесса.

6.1 Синоптические условия развития градовых процессов

В современных краткосрочных прогнозах опасных явлений погоды в качестве прогностических критериев используются локальные значения термодинамических параметров атмосферы в области репрезентативности радиозонда, которая составляет порядка 100 км. Синоптические факторы при этом используются качественно для оценки интенсивности ожидаемого конвективного процесса по характеру господствующей в регионе и вторгающихся воздушных масс.

В процессе перемещения воздушная масса претерпевает изменения в результате влияния подстилающей поверхности, взаимодействия с другими воздушными массами и суточных изменений солнечной радиации. При приближении воздушной массы к горным хребтам, высота которых сравнима с ее вертикальной протяженностью, это влияние сказывается не только в нижнем приземном слое, но и в средней тропосфере. В результате этого влияния могут происходить локальные изменения стратификации атмосферы, что выражается в изменении запаса потенциальной неустойчивости и влагосодержания воздушной массы.

6.1.1. Для ряда районов, где проводятся противоградовая защита, выявлены основные типы синоптических ситуаций, при которых наиболее вероятно развитие градовых процессов различной интенсивности [1 – 6], которые целесообразно использовать при прогнозировании погоды и градовых процессов.

6.1.2 Опыт многолетней оперативной работы и результаты научных исследований [3, 4, 7 – 10] свидетельствуют о том, что именно характер макромасштабной циркуляции в средней тропосфере определяет место локализации и интенсивность мезомасштабных явлений погоды к каковым

относятся и градовые процессы различной интенсивности. За основу типизации форм макромасштабной циркуляции (меридиональная, зональная (западная), с нарушением зональности и восточная) была принята [9] типизация, близкая к предложенной ранее типизации Вангенгейма-Гирса, определяемая положением планетарной высотной фронтальной зоны (ПВФЗ).

Поскольку характер макромасштабной циркуляции определяется, прежде всего, циклонической деятельностью, то характеристики среднетропосферных циклонов – их интенсивность (по числу замкнутых изогипс), термодинамическая индивидуальность (по температуре воздушной массы в циклоне), положение относительно региона прогноза и связь с Арктическим центром низкого давления в системе высотной макроложбины служат предикторами при прогнозе интенсивности градовых процессов. Детальный анализ траекторий перемещения циклонов, непосредственно формирующих «градоопасную» зону [4] над Кавказом, позволил выделить опасную область, находясь в которой зрелый циклон (не зависимо от того, из какого района он перемещался: средиземноморский, западный, северный, северо-западный) способствует развитию интенсивных и катастрофических градовых процессов в регионе Кавказа (рис. 6.1).

Находящийся в опасной области циклон, не достигший стадии зрелости или прошедший ее, вызывает развитие градовых процессов средней и слабой интенсивности, также как и циклон, находящийся вне опасной области.

«Градоопасные» зоны, возникновение которых связано с циклоном, находящимся вблизи региона прогноза, связаны с адвекцией холода в циклогенетической части высотных термобарических ложбин. Поэтому наиболее опасным является циклон, развивающийся в системе глубокой макроложбины, поскольку при этом изотермы и изогипсы имеют циклоническую кривизну, и проекции высотных «градоопасных» зон, образовавшихся в средней и верхней тропосфере, совмещены, что указывает на формирование «градоопасного слоя» над регионом прогноза, благоприятствующего развитию глубокой конвекции [9].

При удалении циклона более чем на 1500 км от региона, «градоопасные» зоны могут формироваться за счет локального затока холода в системе термической мезоложбины. При этом барическое поле не обязательно циклоническое, проекции «градоопасных» зон не согласованы, а градовые процессы – средней или слабой интенсивности. Однако, при нарушении зональной циркуляции, но наличии основного или частного циклона в опасной области, на Кавказе могут развиваться

локальные интенсивные градовые процессы, если воздушная масса имеет достаточный термодинамический потенциал.

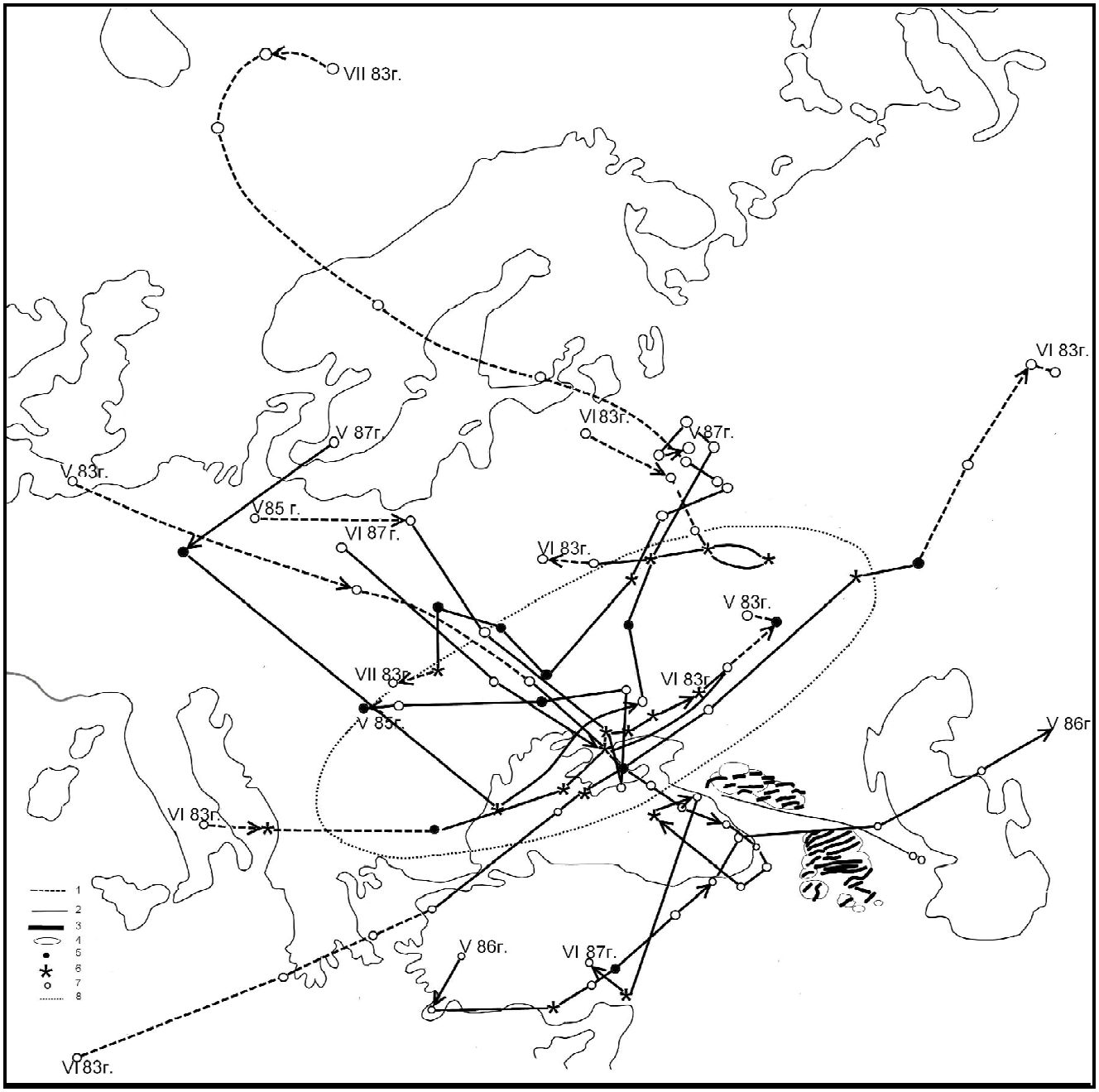


Рис. 6.1 – Траектории перемещения циклонов, обусловливающих развитие градовых процессов на Кавказа [9]: 1 – циклон в стадии роста и диссипации; 2 – циклон в стадии зрелости; 3 – градовые дорожки; 4 – границы ЗТ; 5, 6, 7 – положение центров циклонов, обусловливающих развитие мощных, сверхмощных и слабых градовых процессов; 8 – область наиболее опасного положения циклонов на карте AT_{500}

6.1.3 Интенсивность адвекции холодного воздуха в системе высотной «градоопасной» зоны количественно определяется абсолютными значениями функций *F* и *F'*, выраженными через характеристики термобарического поля средней тропосферы:

$$F = (\partial T / \partial t)_{адв.} = -(g / l) \cdot T_v \cdot H_n \cdot \sin\alpha, \qquad (6.1)$$

где g – ускорение свободного падения, l – параметр Кориолиса, $T_\nu = \partial T / \partial \nu$ – абсолютная величина горизонтального градиента температуры в данной точке (ν – направление нормали к изотерме, положительное в сторону теплого воздуха), $H_n = \partial H / \partial n$ – абсолютная величина градиента абсолютного геопотенциала изобарической поверхности, проходящей через данную точку, α – угол отклонения изотермы от изогипсы,

$$F' = \left(\partial T / \partial t\right)_{адв.} = -T_\nu \cdot V_g \cdot \sin\alpha\,, \qquad (6.2)$$

где V_g – величина скорости геострофического ветра, остальные обозначения те же, что и в предыдущей формуле.

Для катастрофических процессов значение функции превышает единицу (F) или больше или равно 10(F') [2].

6.1.4 Другим характерным фактором макромасштабной циркуляции, приводящим к развитию интенсивных и катастрофических градовых процессов в регионе Кавказа, является наличие холодного, глубокого Арктического центра низкого давления в средней тропосфере (AT_{500}) [2].

1.6.5 Если макромасштабные синоптические характеристики средней тропосферы отвечают за структуру и интенсивность градового процесса, то за мезорайон его развития отвечает такая мезомасштабная характеристика приземного слоя тропосферы, как градиент температуры смоченного термометра, взятый по направлению ведущего потока [2]. Результаты анализа микрокольцевых карт показали, что приземное распределение температуры смоченного термометра $t_{см}$ характеризуется минимальными значениями $t_{см}$ в горах (от 6 до 14 °С) и максимальными – на равнине (≥ 22 °С). При этом очаги градиентов $\Delta t_{см}/\Delta x$ обычно формируются в утренние сроки (06 и 09 часов), их положение практически не изменяется в течение дня, но в некоторых случаях, особенно при ночных процессах, происходит формирование новых линий приземной потенциальной неустойчивости атмосферы в более поздние сроки. При развитии градовых процессов градиент температуры смоченного термометра превышает 2°С/100 км.

Характеристики макро– и мезомасштабных факторов атмосферной циркуляции, приводящие к развитию градовых процессов различной интенсивности, показаны в таблице 6.1.

Следует отметить, что рассмотренные макро– и мезомасштабные характеристики тропосферы дают представление о синоптических ситуациях, способствующих развитию градовых процессов, но не решают всецело проблемы прогноза града, так как при некоторых типах ситуаций могут наблюдаться интенсивные, средние, слабые градобития и ливневые осадки, а также может их не быть. Поэтому для прогноза града в дополнение к синоптическому анализу необходимо провести анализ термодинамических характеристик воздушной массы в регионе прогноза.

Таблица 6.1 Макро- и мезомасштабные факторы атмосферной циркуляции, характеризующие интенсивность градовых процессов

Интенсивность процесса	Тип циркуляции	Макромасштабные характеристики на AT_{500}	Характеристики Zn, формирующих «градоопасные» зоны, AT_{500}	Характеристика «градоопасных» зон, $AT_{500,400,300}$	Приземные линии потенциальной неустойчивости, $\Delta t_{см}\ \Delta x$	Количество критериальных термодинамических параметров атмосферы, N
Катастрофический	Меридиональный или тип с нарушением зональности, ось СТ, ПВФЗ, циклон. часть СТ	Арктический минимум. Число замкнутых изогипс $n \geq 4$, t ниже -30°С	Основной или южный циклон в «опасной» области, $t_{осн.Zn}$ ниже -20°С, $t_{южн.Zn}$ ниже -16°С	«Градоопасные» зоны в передней части макроложбины, перекрытие 3-х «градоопасных» зон на $AT_{500,400,300}$, $F' > 10$	2 ÷ 6°С/100 км	5 ÷ 6
Интенсивный	Меридиональный тип циркуляции, ПВФЗ, циклон /антициклон. часть СТ; зональный тип циркуляции, ось СТ, циклон. часть СТ	Арктический минимум. Число замкнутых изогипс n =2, t ниже -25°С	Zn в «опасной» зоне	«Градоопасные» зоны в передней части макроложбины или термической мезоложбины, перекрытие 2 ÷ 3-х «градоопасных» зон на $AT_{500,400}$, $F' > 10$	2 ÷ 4 °С/100 км	4 : 6
Средний	Зональный тип, Меридиональный тип	Отсутствие Арктического минимума; Арктический минимум, n = 1-2, t ниже -20 ÷ 25°С	Zn в «опасной» зоне на любой стадии развития, слабеющий или вне «опасной» зоны	«Градоопасные» зоны в передней части термической мезоложбины, частный Zn. Перекрытие 1 ÷ 2-х «градоопасных» зон, F' = 10	> 2° С/100 км	≥ 4
Слабый	Зональный тип	Отсутствие Арктического минимума	Zn вне «опасной» области, отсутствие Zn в средней тропосфере (приземный Zn)	«Градоопасные» зоны в передней части термической мезоложбины, термический очаг холода на высотах, $F' < 10$	≥ 2°С/100 км	≥ 3

6.2 Условия развития конвекции и критерии устойчивости атмосферы

6.2.1 Конвективное облако возникает в атмосфере в результате упорядоченных восходящих движений воздуха. Упорядоченный подъем масс воздуха может носить узколокальный характер в однородной воздушной массе (внутримассовые процессы) или охватывать значительные территории при вторжении воздушных масс отличающихся по свойствам от данной (местной) воздушной массы (фронтальные процессы).

6.2.2 Существует три подхода к оценке возможности развития конвективных движений в атмосфере: *«метод частицы», «метод слоя»* – классические методы, и *«неадиабатический метод»* – метод рассмотрения конвективных явлений с учетом вовлечения.

Эти методы позволяют получить критерии устойчивости атмосферы, вертикальное распределение скорости восходящих потоков, а также критериальные условия развития конвективных явлений, включая град.

6.2.3 Большинство современных методов анализа и прогноза конвективных явлений базируется на адиабатической модели конвекции. В основу этой модели положено представление о том, что частица воздуха при своем вертикальном перемещении не вступает в тепло– и массообмен с окружающей воздушной средой, что она изолирована от среды (не имеет притока и оттока тепла). Вид адиабатической кривой состояния целиком определяется начальными значениями температуры, давления и влажности воздуха. Энергия неустойчивости оценивается площадью, заключенной в данном слое, между кривой состояния и кривой стратификации (рис. 6.2).

Неустойчивость слоя при таком способе расчета в целом совершенно не зависит от распределения влажности в слое выше уровня конденсации. При этом предполагается, что подъем воздуха в конвективном потоке не оказывает никакого влияния на распределение температуры в среде. Такой метод рассмотрения конвективных явлений и анализа устойчивости атмосферы получил название ***«метода частицы».***

Скорость восходящих потоков этим методом определяется в соответствии с законом Архимеда по формуле [11]:

$$W\frac{dw}{dz}=\frac{dW}{dt}=\frac{g(T_0-T)}{T}=\frac{gz(\gamma-\gamma_в)}{\gamma}. \qquad (6.3)$$

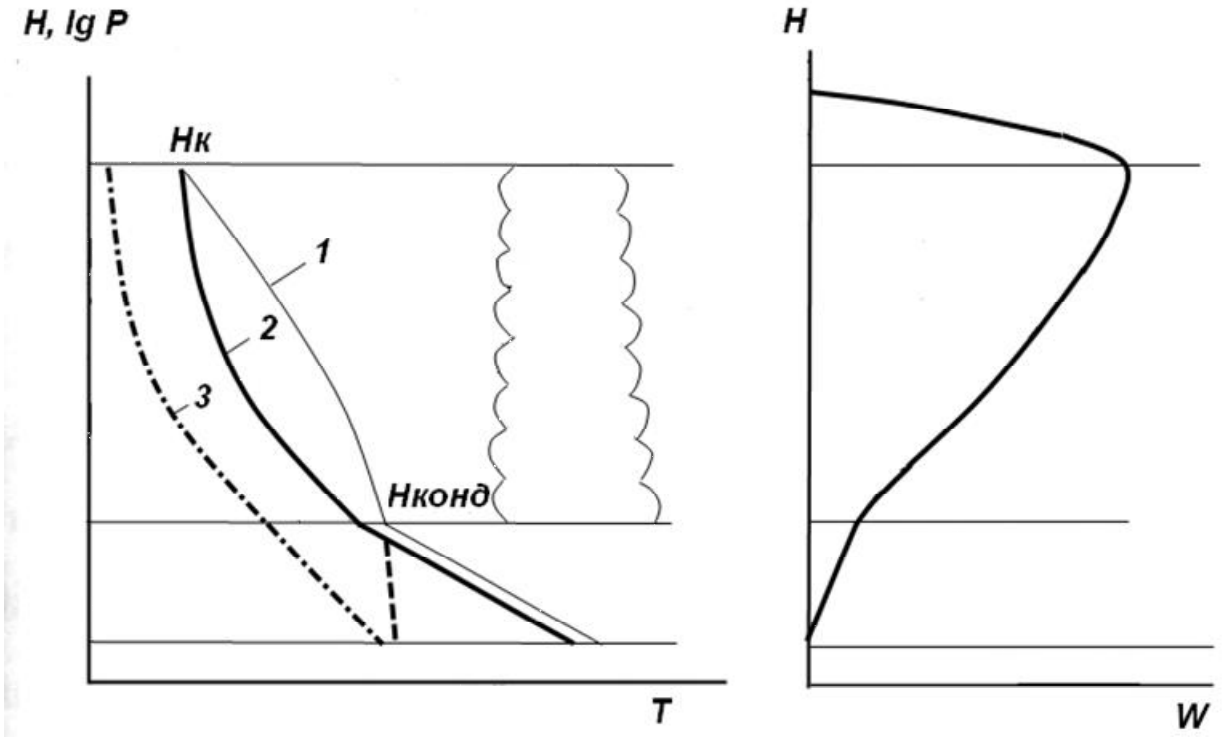


Рис. 6.2 – Определение параметров конвекции «методом частицы»: 1 – кривая состояния; 2 – кривая стратификации; 3 – кривая влажности

Температура с высотой убывает. Условием неустойчивости для подъема влажного воздуха является $\gamma > \gamma_{ва}$, а для сухого воздуха $\gamma > \gamma_{с}$.

Влажноадиабатический градиент равен $\gamma_{ва}$ = 0,65 °С/100 м, а сухоадиабатический градиент равен $\gamma_{а}$ = 0,98 °С/100 м. Влажноадиабатический градиент связан с сухоадиабатическим выражением: $\gamma_{ва} = \gamma_{а} \cdot \beta$, где β – множитель, зависящий от давления воздуха *P*. Изменение влажноадиабатического градиента в зависимости от температуры и давления показано в таблице 6.2:

Таблица 6.2 – Зависимость влажноадиабатического градиента от температуры и давления воздуха

t °С	20	10	0	-10	-20
1000 мб	0,44	0,54	0,66	0,78	
500 мб			0,52	0,66	0,78

Метод частицы не учитывает компенсирующих нисходящих движений. В действительности при движении частицы в каком-либо направлении возникают компенсирующие движения в обратном направлении.

6.2.4 В полной адиабатической модели учитывается тот факт, что восходящие движения воздуха в конвективных потоках сопровождаются

нисходящими движениями воздушной среды, разделяющей эти потоки. Нисходящие движения вызывают адиабатическое нагревание среды, в результате чего происходит сдвиг кривой стратификации в область более высоких температур (рис. 6.3).

При этом предполагается, что состояние поднимающегося воздуха изменяется по адиабатическому закону так, что кривая состояния его совпадает с кривой состояния в методе частицы. Однако разности температур между кривой состояния и кривой стратификации оказываются теперь намного меньше. Уменьшается и скорость восходящих движений, понижается уровень выравнивания температур восходящего потока и окружающей среды, и, соответственно, ожидаемая верхняя граница конвективной облачности.

Этот способ, учитывающий нисходящие движения вне облачной среды, получил название ***«метода слоя».*** Условие неустойчивости или развития конвективных движений по методу слоя определяется соотношением $\gamma > \gamma^*$, где γ^* – равновесный градиент.

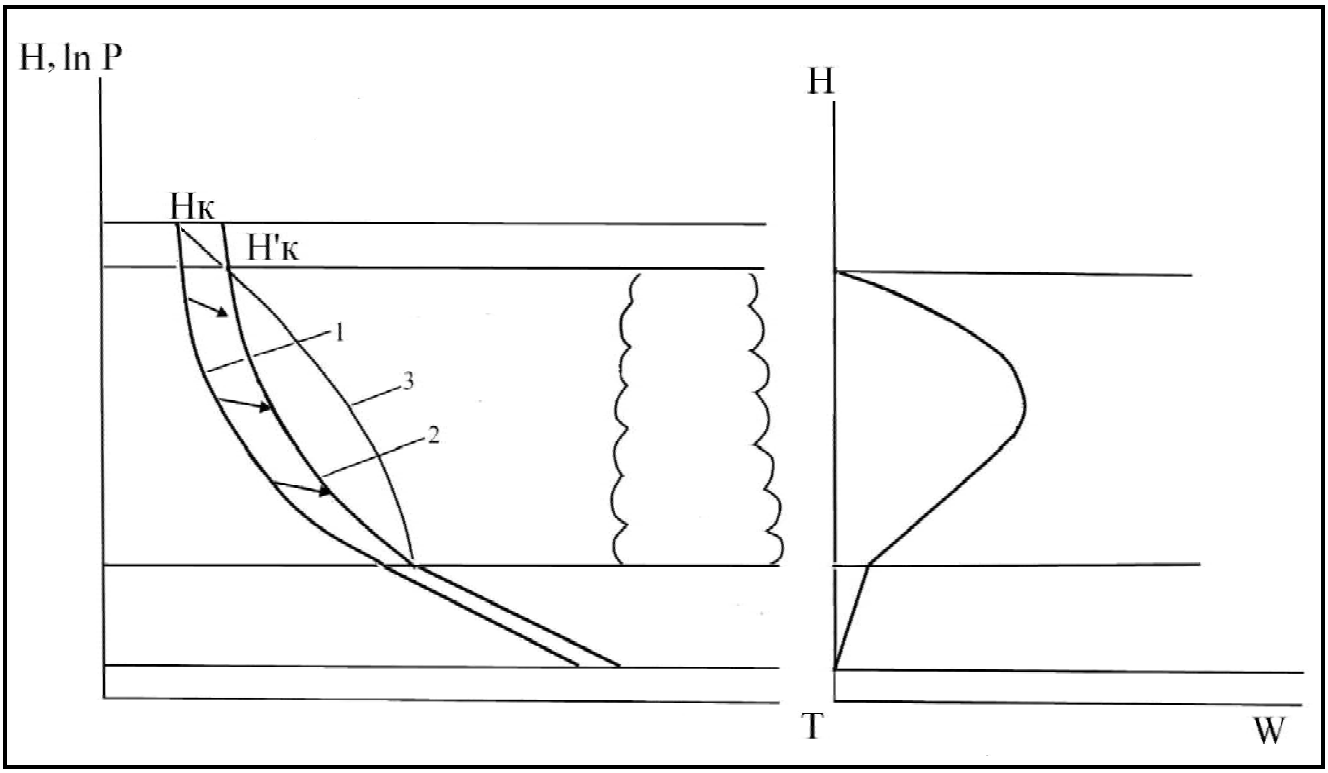


Рис. 6.3 – Определение параметров конвекции «методом слоя»: 1 – начальная кривая стратификации; 2 – кривая стратификации после развития конвекции; 3 – кривая состояния

Метод слоя строится на следующих основных предположениях:

– если в некотором слое $z_1 - z_2$ наблюдаются восходящие движения со скоростью W *и* площадью горизонтального сечения S, то возникают компенсирующие нисходящие потоки со скоростью W' на площади S';

– масса всего выделенного воздушного слоя остается неизменной, т.е. сохраняется уравнение неразрывности: $\rho SW = \rho' S' W'$;

– все изменения параметров внутри слоя происходят адиабатически;

– адвективные изменения величин отсутствуют.

Для вывода критерия неустойчивости по методу слоя необходимо оценить разность температур восходящего и нисходящего потоков ΔT. Опуская промежуточные математические расчеты, в конечном виде получим:

$$\Delta T = \left[(\gamma - \gamma_{ва}) + \frac{S}{S'} (\gamma - \gamma_а) \right] W \Delta t . \qquad (6.4)$$

Наибольший практический интерес представляет случай, когда восходящий поток насыщен, а нисходящий – не насыщен. Тогда из представленного выше уравнения можно получить условия устойчивости и неустойчивости атмосферы. Шишкин [11] получил, что при $\Delta T = 0$ значение критического градиента температуры равно $\gamma^* = \frac{\gamma_в + \gamma_с}{2}$ и при $\gamma > \gamma^*$ – атмосфера неустойчива, при $\gamma < \gamma^*$ – устойчива. Однако Сулаквелидзе и Федченко показали [1], что значение γ^* зависит от соотношения толщины активного слоя облакообразования и всего слоя конвекции:

$$\gamma^* = \gamma_в + (\gamma_с - \gamma_в) \frac{P_m - P_в}{P_к - P_в} . \qquad (6.5)$$

Чем выше граница активного слоя облакообразования, тем меньше γ^* и легче развитие конвекции, и наоборот, чем ниже располагается уровень верхней границы активного слоя облакообразования, тем больше γ^*, и тем труднее развиться конвективным движениям. В частном случае, когда активный слой облакообразования составляет половину слоя конвекции, выражение для γ^* становится таким же, как у Шишкина [11].

Анализ результатов радиозондирования атмосферы показал, что при внутримассовых процессах не наблюдается такого существенного изменения кривой стратификации, которое следовало бы наблюдать по методу слоя. Уровень конвекции оказался также значительно ниже расчетного. Температура в облаке убывает в таких облаках значительно быстрее, чем по адиабатическому закону. На аэрологической эмаграмме площадь, заключенная между неадиабатической кривой состояния и кривой стратификации, соответствует меньшей плавучести и меньшей величине скорости восходящих потоков.

Метод, рассматривающий конвективные процессы с учетом вовлечения, получил название ***неадиабатического метода.*** В этом методе существуют различные способы оценки интенсивности

вовлечения, которое может осуществляться различными путями. Одним из них является боковое турбулентное перемешивание, а также вовлечение на вершине развивающегося облака, моделируемого в виде облачного пузыря или термика. Принято считать, что вовлечение в облако имеет место, если диаметр облака $D \leq 10$ км, если же $D \geq 10$ км, то в его центре имеется струя, подъем воздуха, в которой происходит по влажноадиабатическому закону. Коэффициент вовлечения примерно равен $1/D$.

Сердцевина восходящего потока, в начале стадии зрелости облака лучше моделируется по методу частицы, периферийная часть облака – по методу вовлечения, а при переходе облака от стадии зрелости к стадии диссипации происходит компенсационное опускание окружающего воздуха, модель кучево-дождевого облака близка к методу слоя.

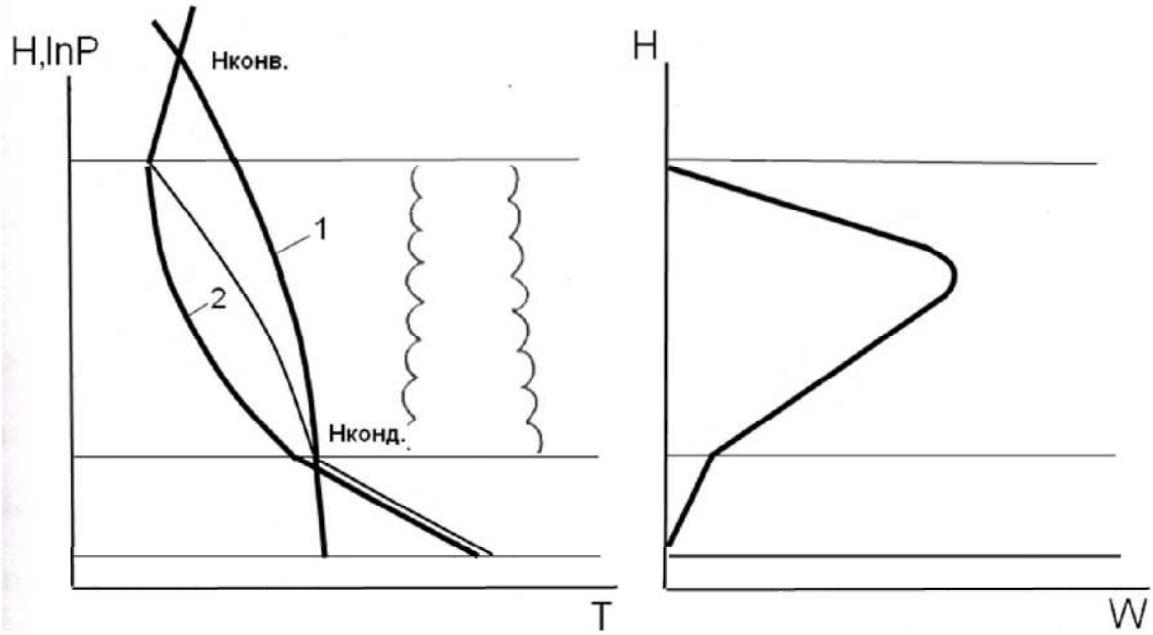


Рис. 6.4 – Определение параметров конвекции для внутримассовых процессов

Распределение скорости восходящих потоков в центральной части облака с учетом веса воды выражается формулой:

$$\frac{dW}{dt} = W\frac{dW}{dz} = \frac{T_0 - T}{T}g - \frac{g}{\rho}(Q + q), \qquad (6.6)$$

Следует отметить, что ни метод частицы, ни метод слоя не принимает во внимание влажность воздуха окружающей среды, кроме как для определения уровня конденсации. Поскольку модель сверхмощного облака представляет собой наибольший интерес, остановимся на оценке неустойчивости атмосферы и определении скоростей вертикальных движений в этих облаках. Для этого необходимо познакомиться с понятием потенциальной неустойчивости атмосферы, способах ее определения и ее роли в развитии конвекции.

Потенциальная неустойчивость атмосферы определяется вертикальным распределением температуры смоченного термометра. Температура смоченного термометра $T_{см}$ определяется по данным температуры T и точки росы T_d следующим образом: для каждого уровня из точек кривой стратификации температуры производится подъем по сухой адиабате до пересечения с изограммой, проходящей через значение соответствующей точки росы, затем по влажной адиабате необходимо опуститься до исходного уровня.

С температурой смоченного термометра однозначно связаны псевдопотенциальная температура θ_p и псевдопотенциальная температура смоченного термометра θ_p'. Опускание от точек $T_{см}$ по влажной адиабате до уровня $P_{ст} = 1000$ *Гпа* и дает значение θ_p'.

Для определения θ_p необходимо от точки $T_{см}$ подняться по влажной адиабате до уровня полного удаления влаги, а затем опуститься по сухой адиабате до уровня $P_{ст} = 1000$ *Гпа*. Обе эти температуры являются наиболее консервативными из всех температур при сухо– и влажноадиабатических процессах и в отношении испарения капель дождя, то есть тем процессам, которые осуществляются при развитии конвекции.

Слой, в котором θ_p и θ_p' с высотой убывают, называется потенциально неустойчивым и наоборот, слой, где имеет место $d\theta_p / dz \geq 0$, наблюдают потенциальную устойчивость атмосферы.

Кривая температуры смоченного термометра чаще всего (в 75% случаев) повторяет ход кривой стратификации температуры с ее перегибами, но, до 25% случаев приходится на несовпадение слоев H_p и $H_{ва}$, когда можно считать, что активный слой облакообразования определяется мощностью потенциально-неустойчивого слоя.

Основными параметрами активного слоя облакообразования являются:

– мощность слоя потенциальной неустойчивости ΔH_p, в котором псевдопотенциальная температура смоченного термометра убывает с высотой;

– мощность слоя латентной (скрытой) неустойчивости $\Delta H_{лн}$, представляющего собой часть слоя ΔH_p, где кривая температуры смоченного термометра проходит правее влажной адиабаты, касательной к кривой стратификации. Этот слой обеспечивает устойчивую подпитку восходящего потока в облаке;

– мощность слоя зарождения нисходящего потока $\Delta H^* = H^* - H_p$, расположенного выше уровня H_p, где кривая температуры смоченного термометра проходит левее влажной адиабаты, по касательной к кривой стратификации;

– энергосодержание активного слоя облакообразования, которое рассчитывается по формуле

$$A = \Delta H_p \left(\theta'_{p_{обл}} - \theta'_{p_2} \right), \tag{6.6}$$

где $\theta'_{p_{обл}}$ и θ'_{p_2} соответствуют влажным адиабатам восходящего и нисходящего потоков;

– параметр конвекции K, определяемый отношением изменения псевдопотенциальной температуры смоченного термометра в слоях $\Delta H_{лн}$, и ΔH_p,

– градиент температуры воздуха в верхней части потенциально неустойчивого слоя.

Подготовленность атмосферы к развитию градового процесса определяется следующими критериями: $K > 0{,}5$; $A > 10$ км·град; $\Delta H_p \geq 4$ км; $\Delta H_{лн} \geq 2$ км; $\Delta H^* \leq 2$ км; $\gamma \geq \gamma_c$ (рис. 6.5).

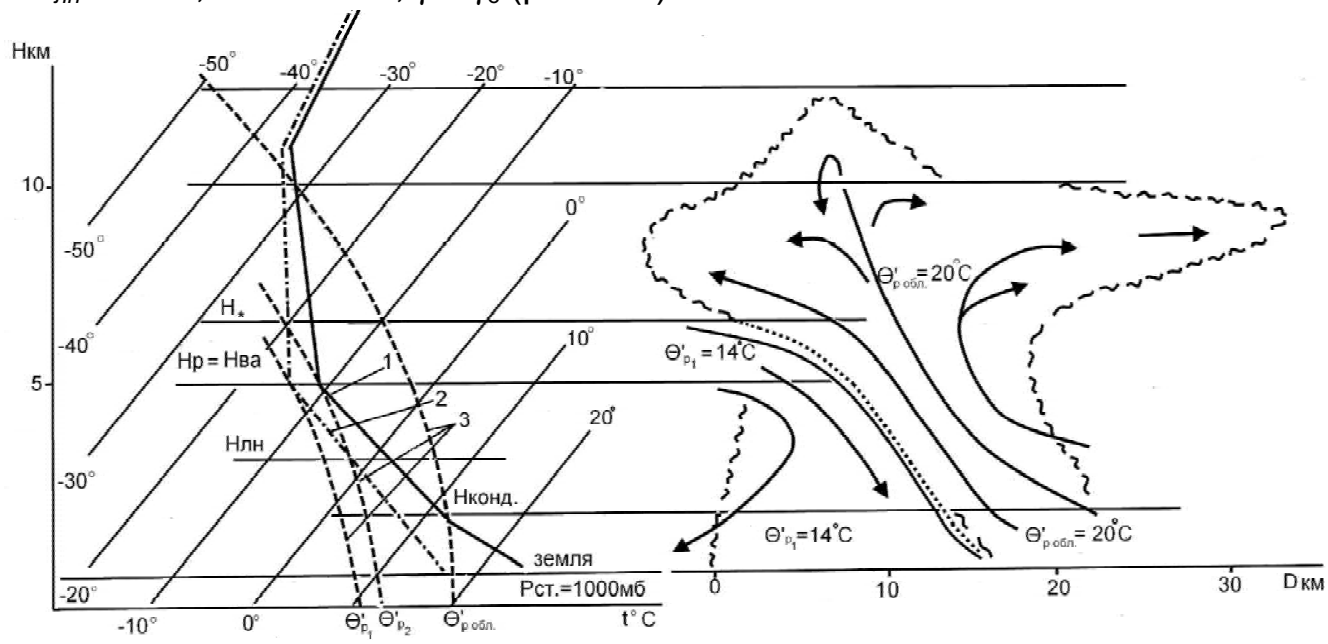


Рис. 6.5 – Определение неустойчивых слоев тропосферы с помощью эмаграммы в сопоставлении с моделью развитого градового облака: 1 – кривая стратификации, 2 – кривая температуры смоченного термометра, 3 – влажные адиабаты. Стрелками показаны восходящий и нисходящий потоки в облаке

6.3 Термодинамический анализ и прогноз состояния атмосферы

6.3.1 Анализ термодинамического состояния атмосферы проводится по данным радиозондирования атмосферы на бланке аэрологической диаграммы. При наличии адвекции строятся прогностические кривые стратификации температуры T и точки росы T_d по методу частицы с учетом адвекции и вертикальных токов на момент максимального развития конвекции. Расчет производится от поверхности земли до 200 гПа. При отсутствии адвекции для расчета используются фактические данные радиозонда кроме приземных значений температуры T и точки росы T_d, которые прогнозируются.

Анализ данных радиозондирования сводится к определению уровней конденсации, конвекции, верхней границы слоя активного облакообразования, расчету максимальной скорости восходящего потока W_m, определению запасов условной и потенциальной неустойчивости, вносящих различный энергетический вклад в развитие конвекции, и других параметров атмосферы.

6.3.2 Для более наглядного отражения распределения влажности в нижней и средней тропосфере следует также строить кривую температуры смоченного термометра. Температура смоченного термометра для каждого уровня определяется следующим образом: из точек на кривой стратификации температуры осуществляется подъем по сухой адиабате до пересечения с изограммой, проходящей через значение соответствующих точек росы, а сточки пересечения осуществляется опускание по влажной адиабате до исходного уровня. Опускание по влажной адиабате до поверхности 1000 гПа дает значение псевдопотенциальной температуры смоченного термометра θ'_p.

6.3.3 Максимальная скорость восходящего потока, рассчитывается по формуле:

$$W_m = \sqrt{2\Delta T_m \frac{T_{конд} - T_{ст}}{T_{конд}} \cdot 10^3 \cdot lg \frac{P_{конд}}{P_m} \cdot c_p}\,, \qquad (6.7)$$

где c_p – удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении; ΔT_m – максимальное отклонение кривой состояния от кривой стратификации; $T_{конд}$ – абсолютная температура на уровне конденсации; $T_{ст}$ – абсолютная температура сухого воздуха на уровне ΔT_m; $P_{конд}$ – давление на уровне конденсации, P_m – давление на уровне W_m.

Для расчета скорости W_m можно использовать рис. 6.6.

6.3.4 Уровень W_m располагается на верхней границе влажно неустойчивого слоя, где градиент температуры γ больше

влажноадиабатического градиента $\gamma_в$. Если слои с $\gamma \geq \gamma_в$ и $\gamma < \gamma_в$ чередуются, то в случае отсутствия адвекции за уровень максимальной скорости принимается верхняя граница первого слоя с $\gamma > \gamma_в$, а при наличии адвекции – самый верхний уровень, где $\gamma > \gamma_в$.

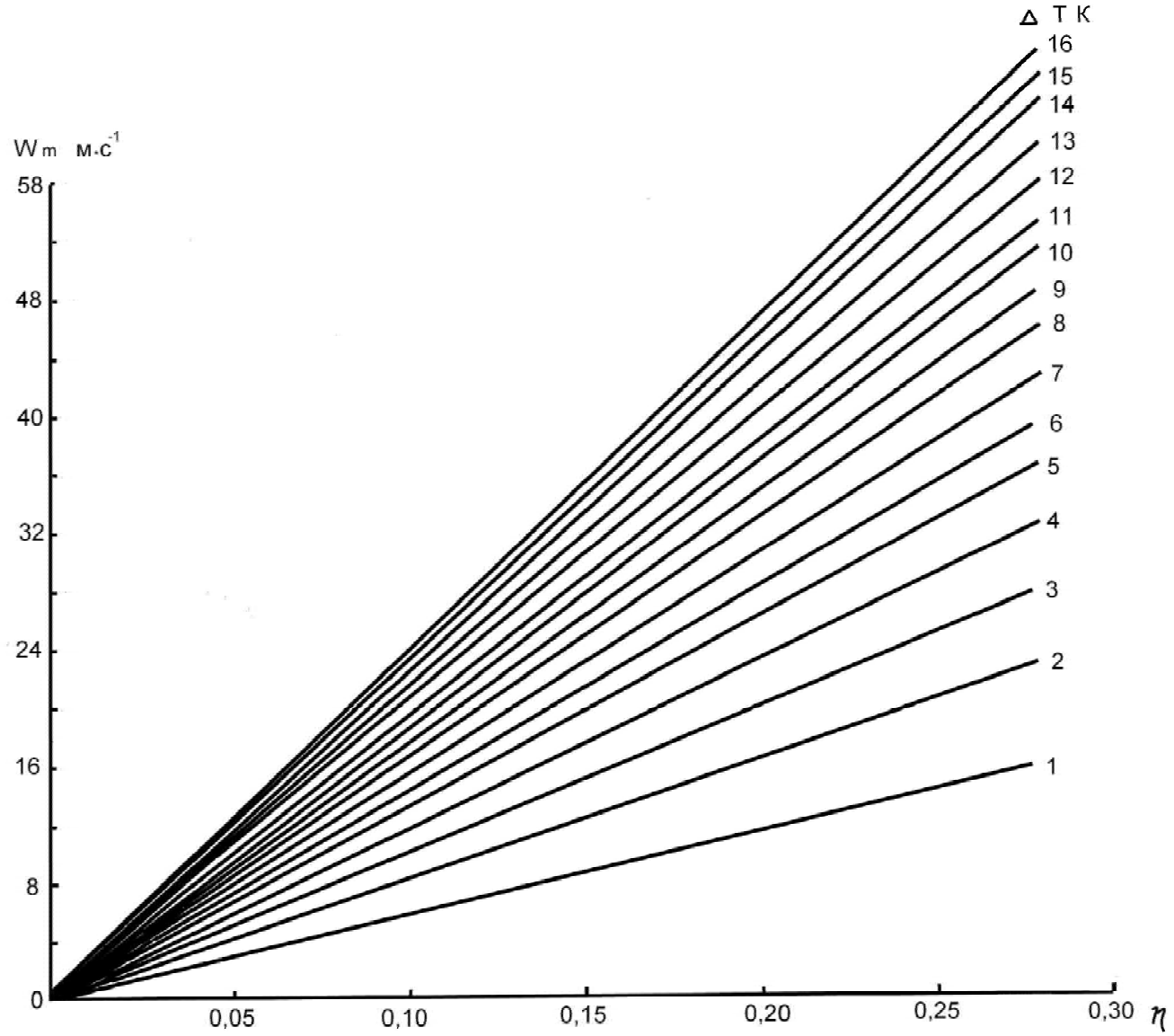


Рис. 6.6 – Зависимость W_m от $\eta = \dfrac{T_{конд} - T_m}{T_{конд}}$ при разных значениях ΔT

6.4 Прогноз конвективной облачности и ливневых осадков

6.4.1 Прогноз конвективной облачности составляется с учетом результатов анализа синоптической ситуации о происхождении конвекции. При прогнозировании внутримассовой облачности оцениваются возможность возникновения термической конвекции и запас влаги в атмосфере. Прогноз возникновения и развития фронтальной конвективной облачности сводится к прогнозу эволюции и перемещения фронтальных разделов.

6.4.2 По кривым стратификации температуры T и точки росы T_d развитие конвективных облаков можно прогнозировать с помощью комплексного параметра конвекции K, учитывающего энергию условной и потенциальной неустойчивости. Параметр конвекции определяется в виде

$$\mathrm{K} = \frac{\theta'_{робл} - \theta'_{p_2}}{\theta'_{робл} - \theta'_{p_1}}, \qquad (6.8)$$

где $\theta'_{робл}$ – псевдопотенциальная температура смоченного термометра приземного воздуха перед развитием конвекции, θ'_{p_1} – минимальная псевдопотенциальная температура смоченного термометра на уровне H_p, θ'_{p_2} – псевдопотенциальная температура насыщения смоченного термометра на уровне H_p.

Параметры θ'_{p_1} и θ'_{p_2} определяются по данным фактического радиозонда за 03 и 06 часов. Температура $\theta'_{робл}$ прогнозируется на момент максимального развития конвекции путем проведения влажной адиабаты с прогнозируемого уровня $H_{конд}$ до уровня стандартного давления 1000 гПа.

При значении параметра $K > 0{,}5$ прогнозируется развитие конвективной облачности и ливневых осадков.

6.4.3 Для расчета максимального количества ливневых осадков используется уравнение [9]

$$Q_m = \frac{\tau_2}{t_1} \cdot \frac{W_m^2}{2g} \cdot \rho_m, , \qquad (6.9)$$

где τ_2 – продолжительность разрешения неустойчивости в атмосфере в часах; t_1 – время единичного цикла конвекции, равное в среднем 1 часу; ρ_m – плотность воздуха на уровне W_m, определяемая с помощью номограммы (рис. 6.7).

6.4.4 Для расчета продолжительности разрешения неустойчивости получено уравнение вида

$$\tau = \left[1 + \frac{9(P_0 - P_m)(P_m - Pв)}{4g\rho_m S_m W_m (P_0 - Pв)3600}\right], \qquad (6.10)$$

где P_0, P_m, $P_в$ – давление воздуха у поверхности земли, на уровне W_m и верхней границе конвекции соответственно; S_m – относительная площадь, охватываемая восходящими потоками на уровне W_m, в долях единицы.

Получены эмпирические коэффициенты связи k между расчетными значениями S_m и фактическими: при $W_m \leq 20$ м/с, то $k = S_{факт.} / S_{расч.} = 1$; при $W_m > 20$ м/с $k \approx 0{,}65$. Значение S_m рассчитывается по формулам:

$$S_m = 1 - \sqrt{\frac{T_m - T_{cm}}{T_{вт} - T_{cm}}} \text{ при } W_m \le 20 \text{ м/с}, \quad (6.11)$$

$$S_m = 0{,}65\left(1 - \sqrt{\frac{T_m - T_{cm}}{T_{вт} - T_{cm}}}\right) \text{ при } W_m > 20 \text{ м/с}, \quad (6.12)$$

где T_m – фактическая температура воздуха на уровне максимальной скорости восходящего потока; $T_{вт}$ – температура воздуха на уровне W_m, определяемая по кривой состояния, проведенной от уровня конденсации; T_{cm} – температура воздуха на уровне W_m, определяемая по сухой адиабате, проведенной от уровня конденсации.

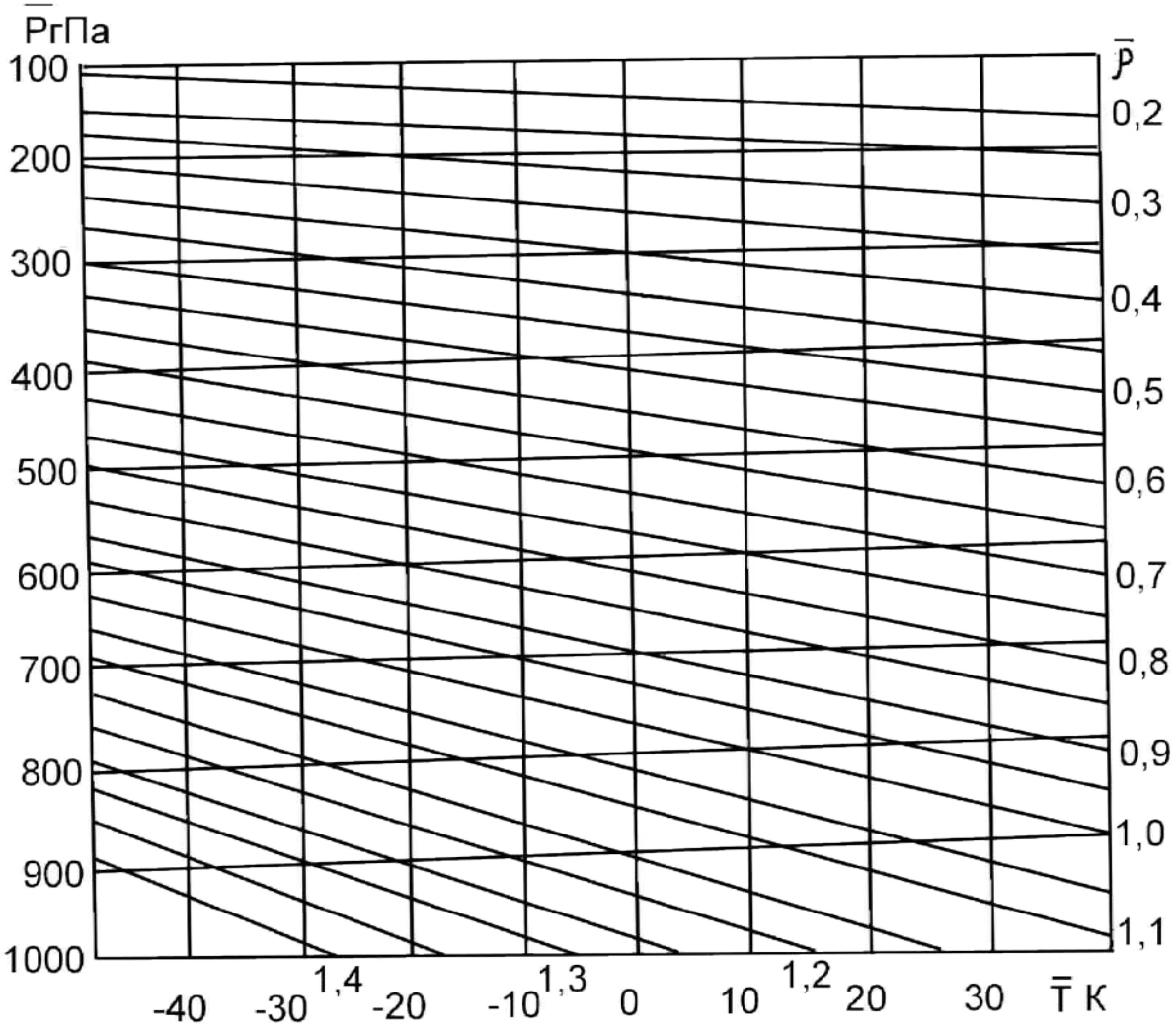


Рис. 6.7 – Номограмма для определения $\overline{\rho}$ в зависимости от $\overline{T}$ и $\overline{P}$

6.5 Прогноз града

Полагая, что для образования града необходимо, чтобы максимум скорости восходящих потоков был расположен в области отрицательных температур, а значение W_m превышало 10 м/с (скорость гравитационного падения наиболее крупных дождевых капель, Глушкова и Сулаквелидзе [1]

предложили метод прогноза града ВГИ, основанный на расчете значений W_m и температуры на уровне W_m (t_{Wm}, °C) по прогностическому радиозонду на момент максимального развития конвекции.

Несколько позже Максвелл [12] на основе адиабатической модели конвекции предложил похожий метод прогноза, который отличается от метода ВГИ тем, что прогнозируется не только явление, но и размер града. Прогноз размера града основан на статистических данных о выпадении града в 210 дней с градом с 1969 по 1974 г. Оба метода иллюстрируются на рисунке 6.8, где область града (**II**) по методу ВГИ выделена штриховкой, а по Максвеллу – полосой с кривыми, разделяющими области выпадения града разного размера. Оба метода предусматривают прогноз града по значениям одних и тех же параметров (W_m и t_{Wm}), но области выпадения града перекрываются лишь частично.

По данным Максвелла оправдываемость прогноза града составляет 80%, а размера града – 63%.

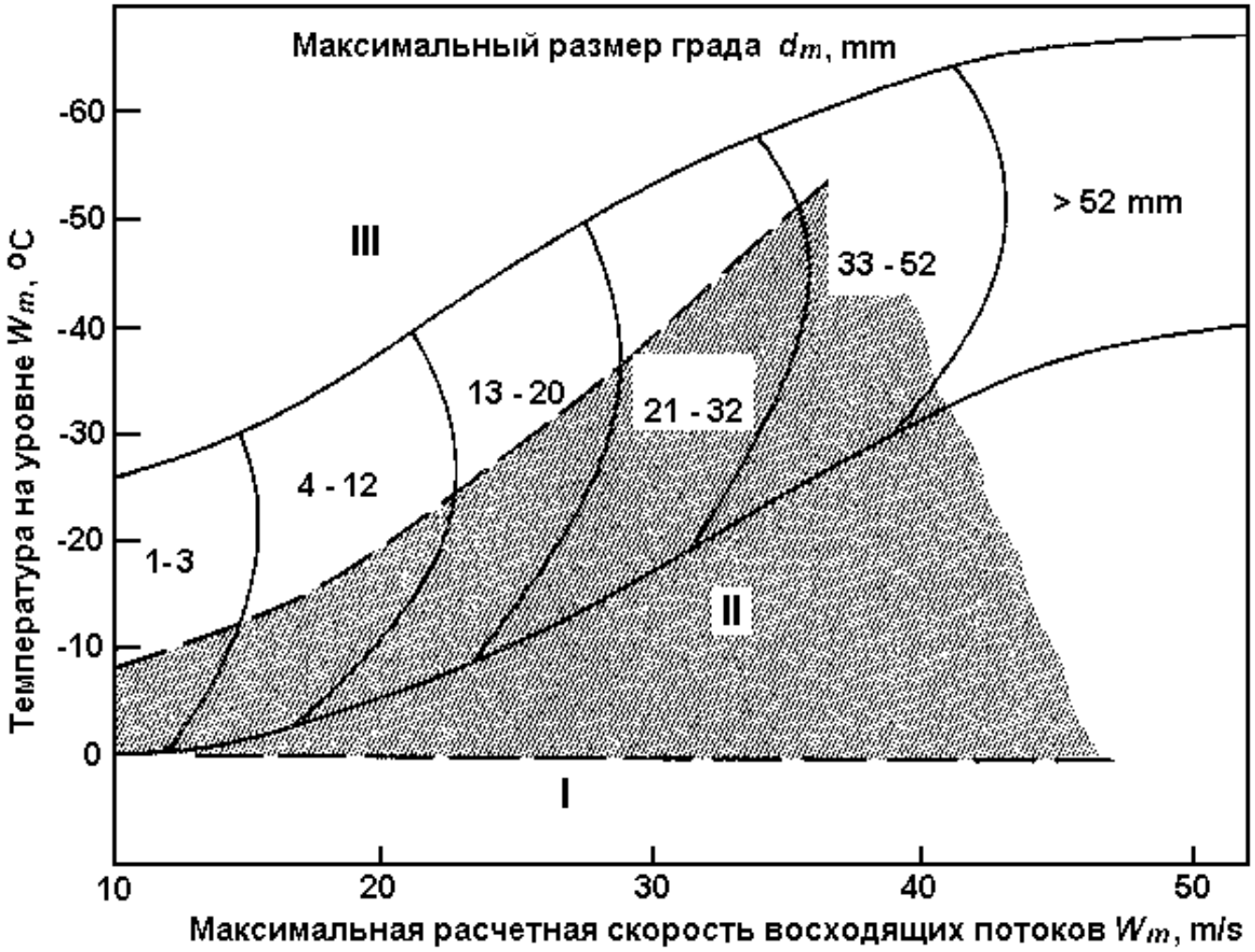


Рис. 6.8 – График прогноза града по значениям W_m и t_{Wm} по методам ВГИ [1] и Максвелла [12]

6.6 Прогноз интенсивности градового процесса

6.6.1 Интенсивность градовых процессов определяется следующими основными факторами:

– наличие макромасштабной циркуляции, способствующие усилению конвективной неустойчивости атмосферы (заток холода на высотах);

– динамическое воздействие на развитие конвекции (например вторжение холодных фронтов, влияние рельефа местности);

– наличие конвективной неустойчивости и повышенного влагосодержания приземного слоя, обусловливающих интенсивность восходящих потоков и повышенную водность облаков;

– оптимальный диапазон температур в зоне роста града, определяющий возможность формирования зародышей града и их рост града во «влажном» режиме.

6.6.2 Статистические исследования [2, 10, 13,14] позволили учесть все перечисленные факторы с помощью следующего комплекса параметров, определяющего возможность возникновения и развития градового процесса той или иной интенсивности:

– максимальная скорость восходящего потока W_{max};

– температура облачного воздуха на уровне максимального отклонения кривой состояния от кривой температурной стратификации;

– массовая доля влаги у поверхности земли q_o;

– энергетический запас в нижней тропосфере ΔS;

– параметр, учитывающий скорость перемещения фронтальной поверхности и контраст температур в зоне фронта V;

– параметр, учитывающий сдвиг ветра в слое конвекции m;

– параметр, учитывающий вероятность выпадения града при различных направлениях переноса в средней тропосфере и разных направлениях перемещения фронтальной поверхности n;

– градиент струйного течения $Г$.

Первые два термодинамических параметра используются в альтернативном способе прогноза града, имеющем высокую оправдываемость. Последние три параметра являются безразмерными, они характеризуют вероятность возникновения градовых процессов различной интенсивности при определенных циркуляционных условиях в данном регионе и косвенно учитывают влияние взаимодействия мезомасштабной циркуляции с рельефом региона.

6.6.3 Прогноз интенсивности градовых процессов осуществляется с помощью двух многомерных графиков (рисунки 6.9 и 6.10):

– интенсивный процесс прогнозируется в том случае, если значения всех рассчитываемых параметров попадают в зоны 1, 2 и 3;

– градовый процесс умеренной интенсивности в случае попадания точек в две из зон 1, 2 и 3;

– слабый градовый процесс, если точка попадает в одну из зон 1 и 2.

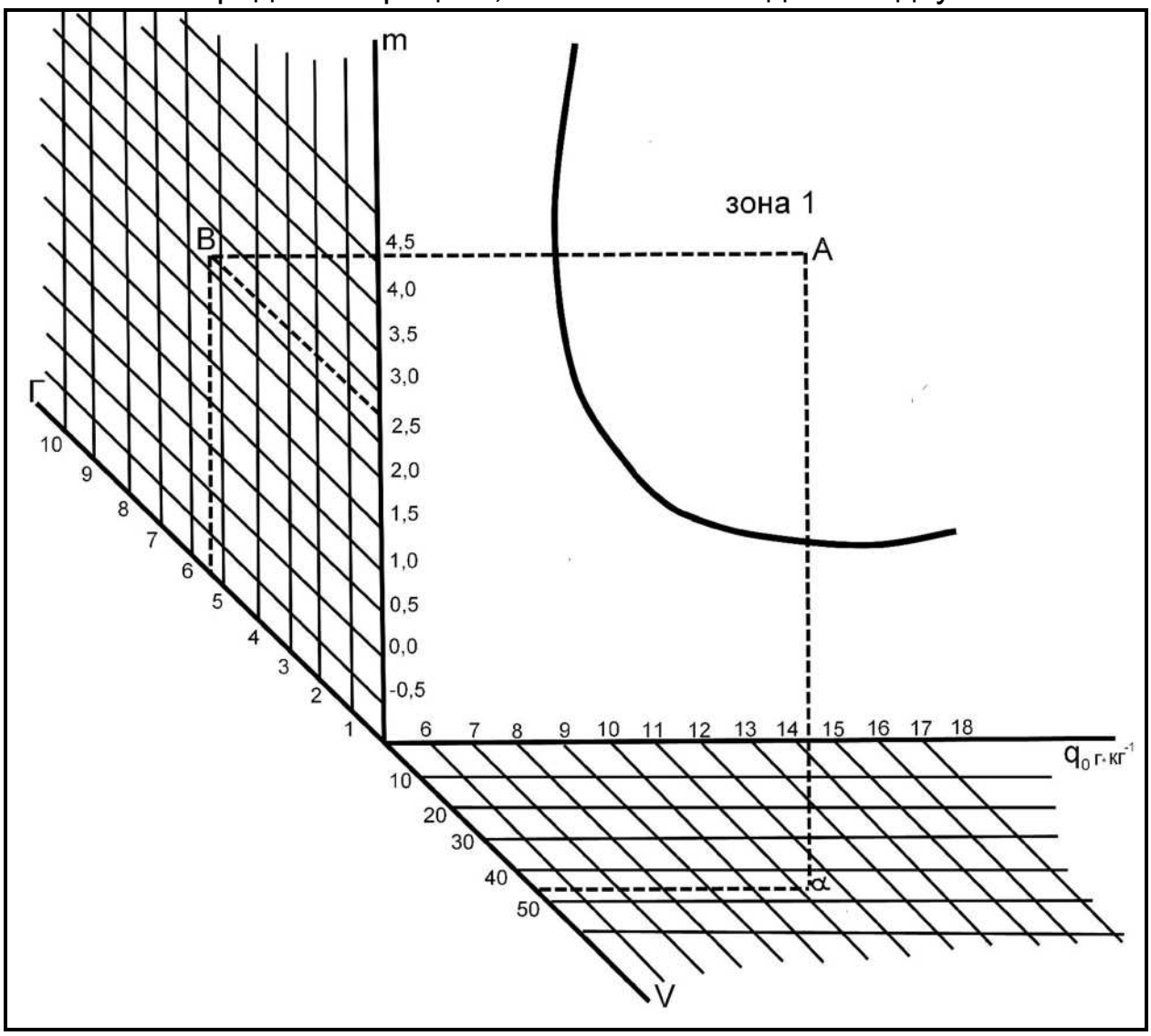


Рис. 6.9 – Зависимость интенсивности градовых процессов от термодинамических и синоптических параметров атмосферы [2]: q_0 – массовая доля влаги у земли; ***V*** – скорость перемещения фронтальной поверхности; ***Г*** – градиент струйного течения; ***m*** – параметр, характеризующий вероятность ГП в зависимости от сдвига ветра в слое конвекции и направления переноса в средней тропосфере; зона 1 – область интенсивных градобитий

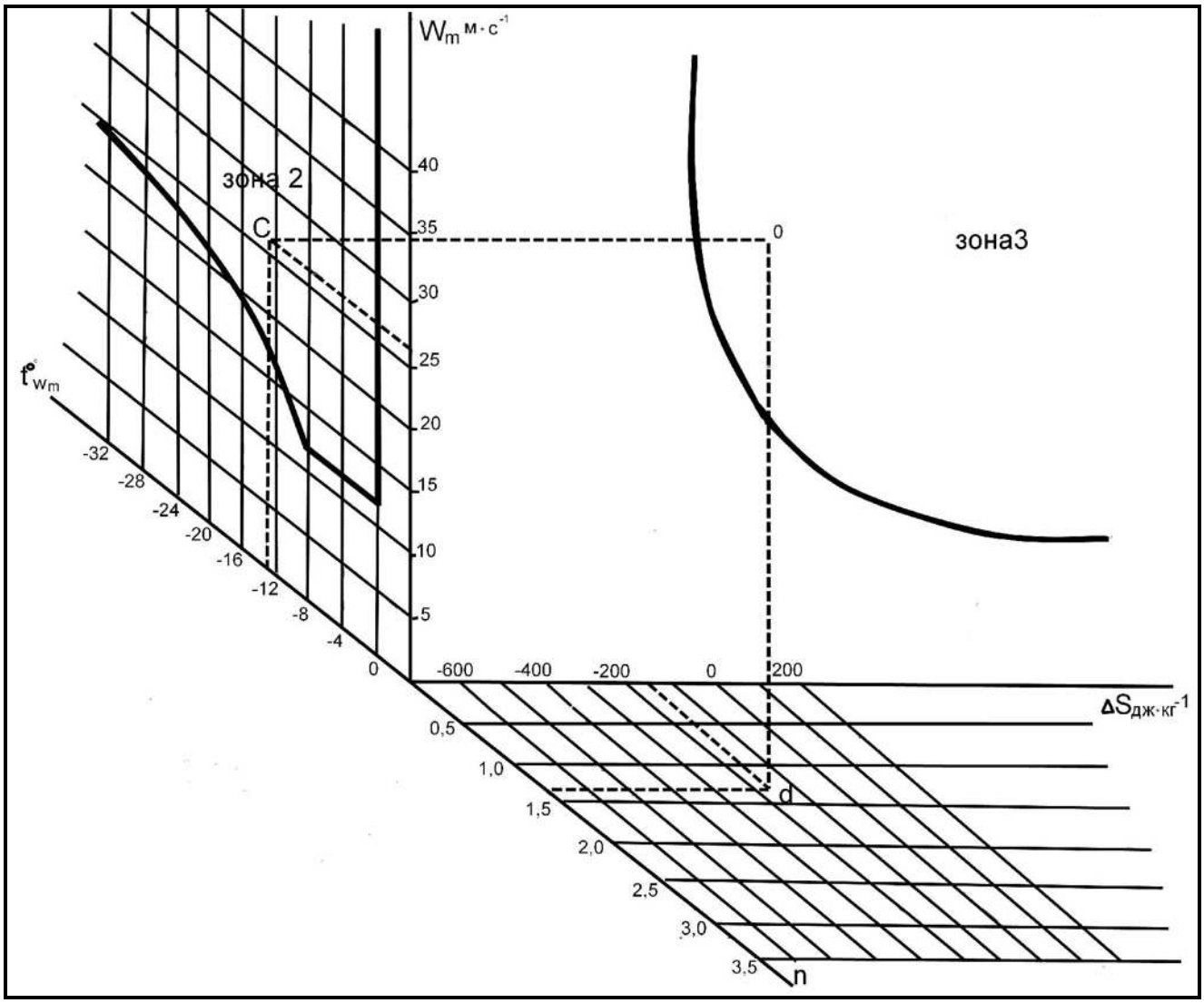


Рис. 6.10 – Зависимость интенсивности градовых процессов от термодинамических и циркуляционных характеристик атмосферы [2]: $\boldsymbol{W_m}$ – максимальная скорость восходящих потоков в облаке; t_{W_m} – температура на уровне максимальной скорости восходящих потоков в облаке; $\Delta\boldsymbol{S}$ – характеристика энергетического состояния подоблачного слоя; n – параметр, характеризующий (в долях от 10) вероятность градовых процессов в зависимости от циркуляционных характеристик атмосферы; зона 3 – область интенсивных градобитий

6.7 Прогноз мезорайона развития градовых процессов

6.7.1 Метод прогноза мезорайона развития градовых процессов [2, 9] основан на использовании комплекса консервативных параметров, характеризующих потенциальную неустойчивость атмосферы, определяемых вертикальным и горизонтальным распределением псевдопотенциальной температуры смоченного термометра θ'_p, а также на учете структуры термобарических полей верхней и средней тропосферы.

6.7.2 Составление прогноза мезорайона развития градового процесса включает в себя три этапа:

– определение по данным радиозондирования параметров потенциальной неустойчивости, в качестве которых используются параметры активного слоя облакообразования (рис. 6.3);

– определение высотных «градоопасных» зон (рис. 6.11);

– определение приземных «линий потенциальной неустойчивости» (рис. 6.12).

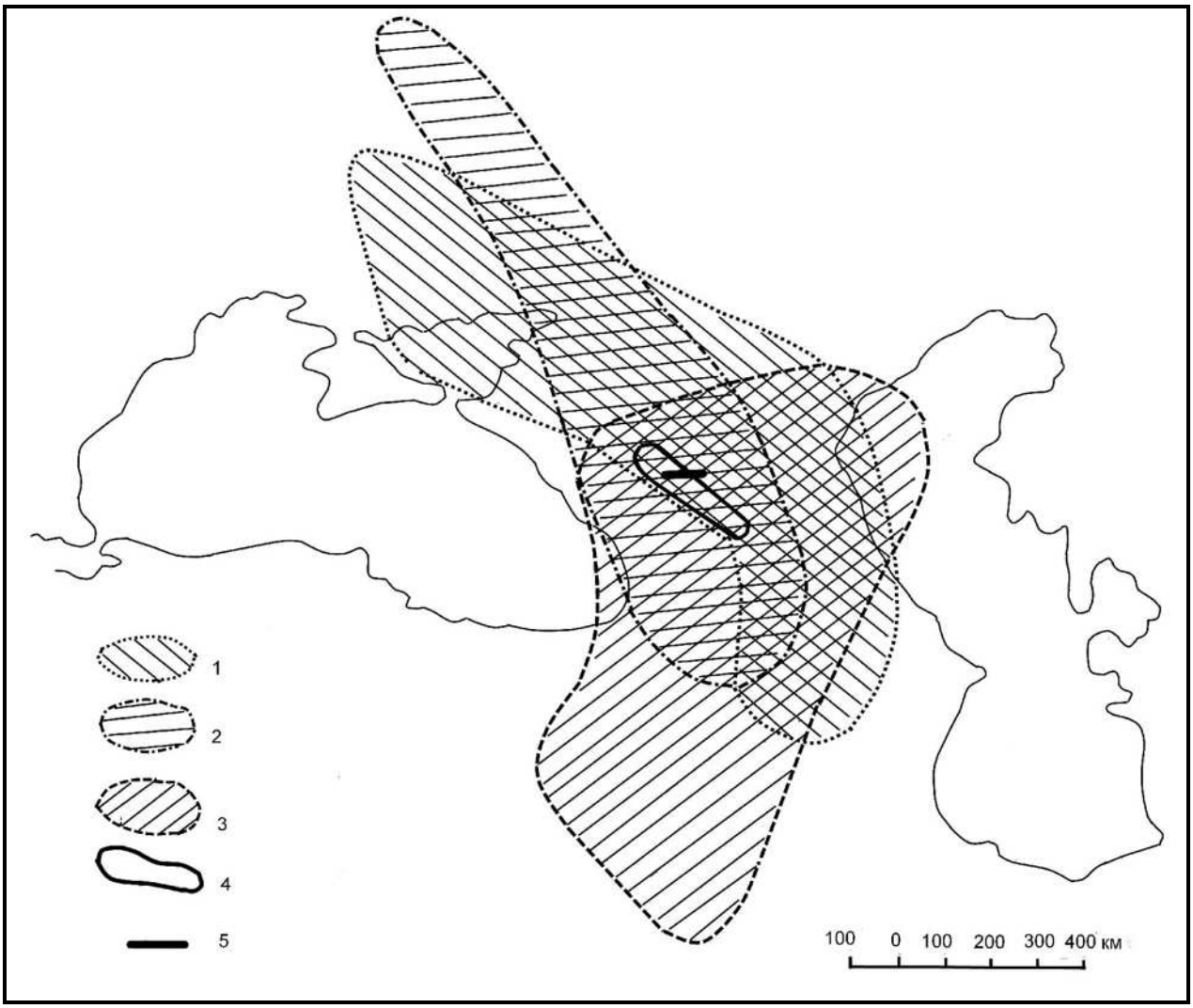


Рис. 6.11 – Определение мезорайона развития градового процесса [2]:
1, 2, 3 – градоопасные зоны соответственно на AT_{500}, AT_{400}, AT_{300};
4 – прогнозируемый мезорайон развития интенсивного градового процесса;
5 – траектории суперячеек

Предложенный метод позволяет прогнозировать мезорайон развития градового процесса в предгорных и равнинных условиях. При прогнозе града в долинах шириной менее 50 км приземной зоной локализации града является сама долина.

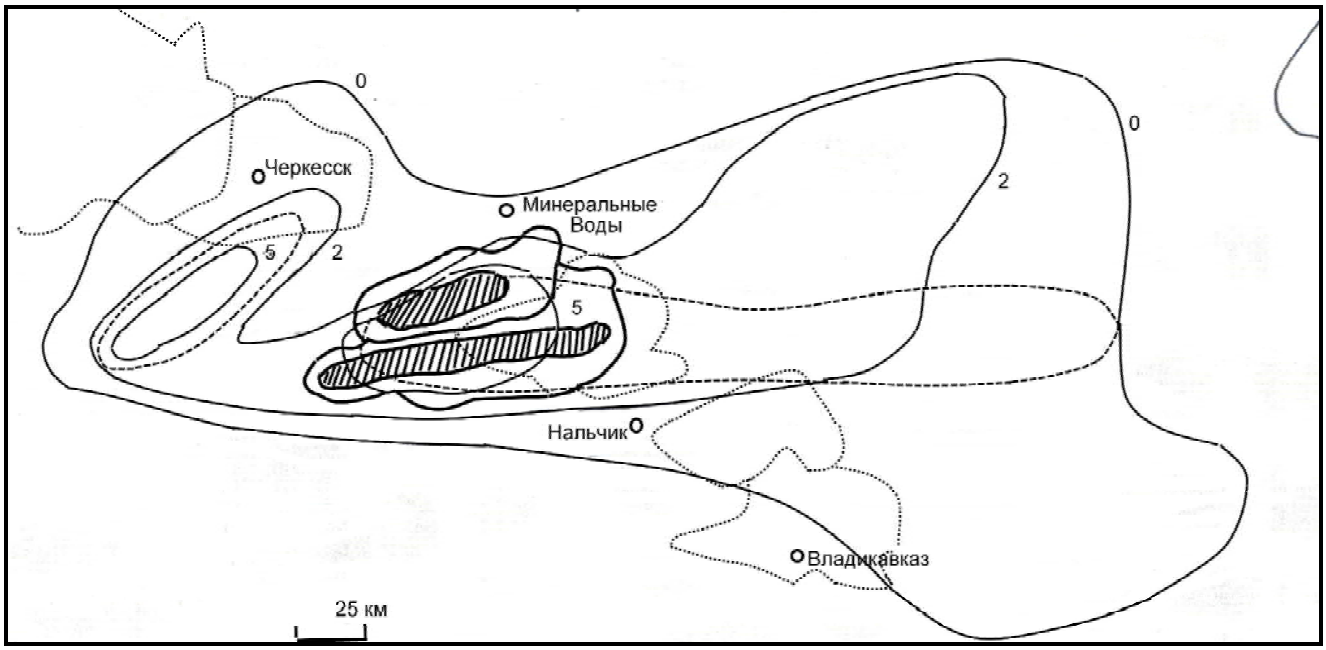


Рис. 6.12 – Определение мезорайона развития градового процесса: показаны области градиентов $\Delta t_{см}/\Delta x$ = 0,2 и 5 ºС/100 км, штриховкой выделены полосы выпадения града [2]

6.8 Прогноз типа градового процесса

6.8.1 Типизация градовых процессов осуществляется по пространственному строению, ячейковой структуре и динамике развития. Согласно существующей классификации [15] выделяются пять типов градовых процессов: I – одноячейковые, II – многоячейковые неупорядоченные, III – многоячейковые упорядоченные, IV – переходного типа, V – суперячейковые. При этом интенсивность градового процесса возрастает от I типа к V.

6.8.2 В основу прогноза положен комплекс параметров, характеризующих энергетическое состояние и водность атмосферы, а также вертикальную структуру ветра [16, 17]. Основными прогностическими критериями типа градового процесса являются [2]:

6.8.2.1 «Индекс интенсивности» – комплексный энергетический параметр, который зависит от запасов полной энергии влажного воздуха в активном и пассивном слоях облакообразования и может служить мерой реализации полной энергии конвективного процесса. «Индекс интенсивности» определяется следующим соотношением:

$$\alpha = (\Delta Q_a - \Delta Q_п)/ \Delta Q_a, \qquad (6.13)$$

где ΔQ_a и $\Delta Q_п$ – запасы полной энергии в активном и пассивном слоях облакообразования, соответственно.

В оперативной практике вместо предложенного выражения удобнее использовать более простое выражение:

$$\alpha = T_{смз} - T_{смНк} / T_{смз} + T_{смНр}, \qquad (6.14)$$

где $T_{смз}$ – температура смоченного термометра у поверхности Земли (в градусах Кельвина), $T_{смНк}$ – температура смоченного термометра на уровне верхней границы конвекции, $T_{смНр}$ – температура смоченного термометра на уровне верхней границы потенциально неустойчивого слоя.

6.8.2.2 Адиабатическая водность $q_{ад}$ в облаке на уровне верхней границы потенциально неустойчивого слоя $H_р$, определяемая с помощью номограммы или по формуле

$$q_{ад.} = (q_{конд.} - q_i)\rho_l 10^{-3}, \qquad (6.15)$$

где $q_{конд}$ – массовая доля влаги на уровне конденсации, q_i – массовая доля влаги на уровне $H_р$, ρ_l – плотность воздуха на уровне $H_р$.

6.8.2.3 Вертикальный сдвиг ветра в слое конвекции

$$\vec{\beta}_1 = \frac{V_{max} - V_{850}}{\Delta H_1}, \qquad (6.16)$$

где ΔH_1 – мощность слоя между уровнем максимального значения горизонтального ветра V_{max} в верхней тропосфере (чаще всего это уровень 200 гПа) и изобарической поверхностью 850 гПа.

6.7.2.4 Векторный сдвиг ветра в слое 700—850 гПа

$$\vec{\beta}_2 = \frac{\Delta \vec{V}_{700-850}}{\Delta H_2}, \qquad (6.17)$$

где $\Delta \vec{V}_{700-850}$ – величина векторной разности скоростей ветра на уровнях 850 и 700 гПа, ΔH_2 – мощность слоя, заключенного между изобарическими поверхностями 700 и 850 гПа.

6.8.3 Прогноз типа градового процесса осуществляется с помощью многомерного графика (рис. 6.13).

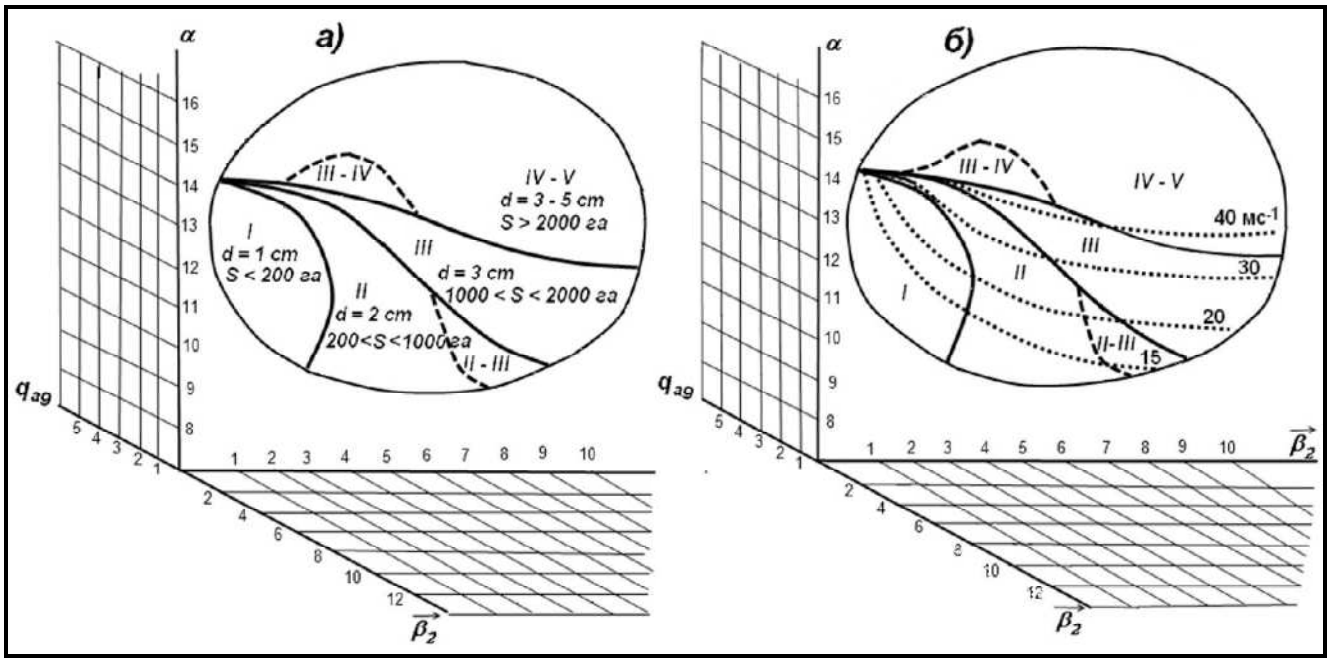


Рис. 6.13 – График прогноза типа градового процесса с указанием возможного максимального размера града *d,* см, площадей побитых сельхозкультур S, га и скоростей ветра при шквале *V, мс*$^{-1}$ в зависимости от индекса интенсивности конвекции *α*, адиабатической водности на уровне H_p (q_{ag}), значений векторов сдвига ветра в слое конвекции $\vec{\beta}_1$ и нижнем слое тропосферы $\vec{\beta}_2$ [2]: I – область одноячейковых градовых процессов (*d* ≈ 1см, S < 200 га); II – область неупорядоченных многоячейковых процессов (*d* ≈ 2 см, 200 < S < 1000 га); III – область упорядоченных многоячейковых процессов (*d* ≈3 см, 1000<S< 2000 га); IV и V – область процессов переходного типа и суперячейковых процессов (*d* > 3 см, S > 2000 га)

6.9 Прогноз шквала

6.9.1 Метод прогноза шквала основан на допущении того, что интенсивные градовые и ливневые осадки из мощных конвективных облаков вовлекают облачный воздух и приводят к формированию нисходящего потока, который растекаясь у повехности земли приводит к шквалистому усилению ветра в приземном слое атмосферы. Особо длительные и интенсивные шквалы связаны с суперячейковыми и мощными конвективными ячейками процессов переходного типа и многоячейковых градовых процессов, в квазистационарном состоянии которых растекание нисходящего потока приводит к динамическому усилению восходящего потока [18].

6.9.2 Прогноз шквала предусматривает [19, 20] две последовательные задачи: прогноз явления и прогноз скорости ветра.

6.9.3 Условия развития шквалов конвективного происхождения определяются [20] комплексом основных термодинамических параметров активного слоя облакообразования, структурой термобарического поля

средней и верхней тропосферы, способствующей развитию глубокой конвекции, и приземным распределением потенциальной неустойчивости (табл. 6.3):

6.9.4 Максимальная скорость ветра при шквале рассчитывается по формуле [9, 18]:

$$V_ш = \sqrt{c\Delta H_p \Delta\theta'_{p_2}}\,, \qquad (6.18)$$

где с = 0,25 м·град$^{-1}$·с$^{-2}$.

В оперативной практике вместо формулы (6.18) можно использовать график зависимости скорости шквала от мощности слоя потенциальной неустойчивости и значения $\Delta\theta'_{p_2}$ (рис. 6.14):

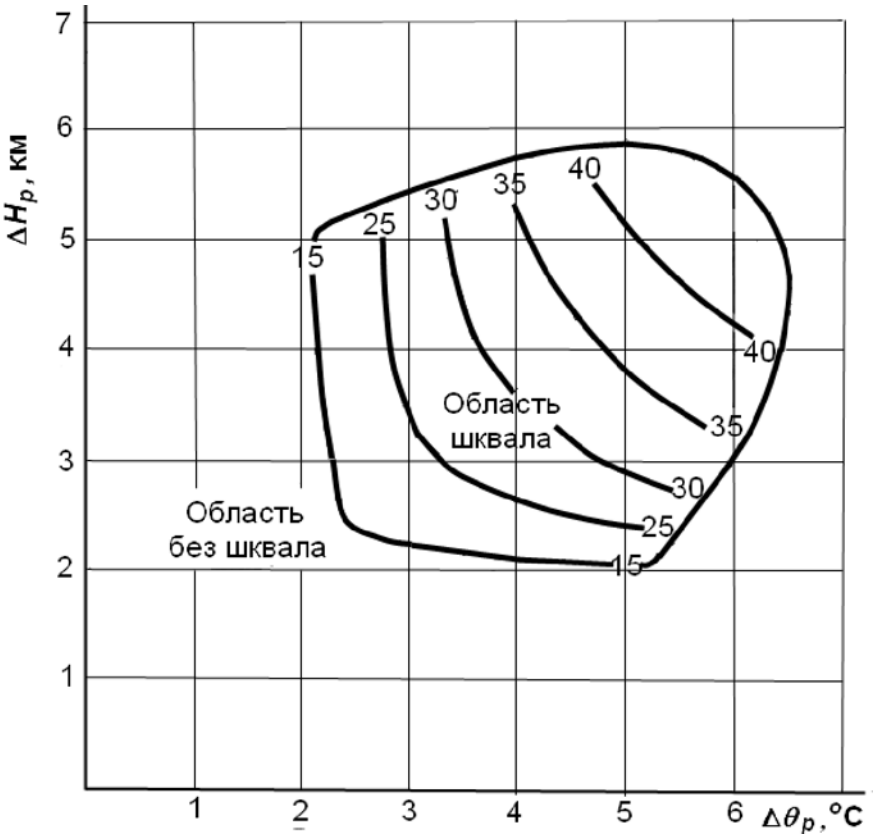


Рис. 6.14 – Зависимость скорости шквала от мощности слоя потенциальной неустойчивости ΔH_p и значения параметра $\Delta\theta'_{p_2}$

Таблица 6.3 – Термодинамические условия формирования шквалов

Внутримассовый процесс	Фронтальный процесс, частный циклон
$K > 0{,}5$ $A > 10$°С·км $H_p \geq 4$ км $H_{лн} \geq 2$ км $H_* - H_p \leq 2$ км $\gamma \approx \gamma_c$ в верхней части потенциально-неустойчивого слоя ΔH_p	Выполнение не менее четырех условий из левой колонки таблицы, из них обязательные: $K > 0{,}5$ $A > 10$°С·км

6.10 Формат специализированных прогнозов погоды

6.10.1 Специализированные прогнозы для противоградовых служб должны состять из из трех частей.

6.10.1.1 В первой части прогноза приводится:

– краткая характеристика синоптической ситуации, обусловливающей погоду района работ;

– положение основных барических образований и фронтов, оказывающих влияние на погоду региона в период действия прогноза;

– направление и скорость ведущего потока на AT_{700} и AT_{500}.

6.10.1.2 Во второй части приводятся результаты расчетов термодинамических параметров атмосферы:

– максимальная скорость восходящих потоков W_m и ее высота;

– температура на уровне W_m;

– высота уровня конденсации;

– высота уровня конвекции;

– высоты изотерм 0 ^{o}C и -6 ^{o}C над уровнем моря;

– значение относительной влажности в активном слое.

6.10.1.3 В третьей части прогноза указываются:

– ожидаемые конвективные явления в терминах: «ожидается», «не ожидается», «в первой (второй) половине срока», «в середине срока», «конвективная облачность, ливни, гроз, град», «слабой. умеренной и высокой интенсивности»;

– тип ожидаемого градового процесса;

– ожидаемый мезорайон развития.

6.10.2 Оценка прогноза производится на основании:

– данных о фактической погоде метеостанций, постов и очевидцев;

– данных объезда района работ;

– данные квалифицированных радиолокационных наблюдений.

6.10.3 Оправдываемость прогноза определяется по наиболее опасному из них (шквал, град, гроза, ливень, кучево-дождевая облачность). Допускается оценка в двух формулировках: «прогноз оправдался»/«прогноз не оправдался».

Прогноз «град ожидается» считается оправдавшимся, если в районе действия прогноза где-либо выпадали твердые осадки. Прогноз град «не ожидается» считается оправдавшимся, если по району действия прогноза твердые осадки не выпадали.

7 РАДИОЛОКАЦИОННОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ ГРАДА

7.1 Основные принципы радиолокации

7.1.1 Основным принципом радиолокации является обнаружение, определение местоположения и характеристик метеорологических и других целей путем зондирования пространства с помощью узконаправленных коротких радиоимпульсов, формируемых радиолокационной станцией.

Электромагнитные волны распространяются в атмосфере со скоростью, близкой к скорости света в вакууме, равной $3 \cdot 10^{10}$ см/с. При наличии препятствий или диэлектрических неоднородностей среды на пути распространения радиоволн электромагнитная энергия частично отражается обратно и может быть принята как эхо-сигнал (радиоэхо), частично рассеивается по всем направлениям, а частично поглощается.

Диэлектрические неоднородности, создающие обнаружимое радиоэхо, называют радиолокационными целями. Такими целями могут быть неровности рельефа, строения и прочие местные предметы, летательные аппараты, волны и корабли на водной поверхности, которые на границе со средой создают разрыв, либо резкое изменение диэлектрической постоянной и магнитной проницаемости.

7.1.2 Обнаружимое радиоэхо создают также диэлектрические неоднородности метеорологического происхождения, связанные с наличием облаков, осадков, туманов, ионизированных каналов молний, инверсии температуры и влажности. Радиоэхо содержит обширную информацию о метеорологических целях и их характеристиках, содержащуюся в мощности радиоэха, доплеровском сдвиге частоты и деполяризации зондирующего излучения. Эти открытия привели к бурному развитию и крупномасштабному применению радиолокационных методов метеорологических наблюдений и исследований, обладающих следующими достоинствами: возможность наблюдений метеоцелей в любое время суток и при любой погоде; большой радиус действия; высокая оперативность обзора обширных пространств без нарушения естественной структуры полей метеоэлементов; возможность получения пространственной картины строения облаков, трехмерных полей микроструктуры и воздушных потоков в них, возможность измерения интенсивности и количество осадков, размера и кинетической энергии града на обширных территориях; распознавания различных явлений погоды (град, гроза, ливень, дождь, снег, шквал, смерч и др.).

7.1.3 Формирование узконаправленного радиолуча позволяет увеличить энергию облучения цели и измерить направление на цель. Направление на цель (азимут и угол места), т.е. угловые координаты цели, определяется измерением углового положение антенны с помощью высокоточных цифровых датчиков (энкодеров).

Расстояние до целей R определяется путем измерения времени запаздывания t_3 отраженного сигнала по отношению к излученному по формуле

$$R = ct_3 / 2 \ . \qquad (7.1)$$

Для измерения времени запаздывания применяются различные методы радиолокации: импульсный, частотный, фазовый и частотно-фазовый. В РЛС метеорологического назначения обычно применяется импульсный метод.

7.1.4 Основными узлами импульсного метеорологического радиолокатора (МРЛ) являются: передатчик, приемник, индикатор, синхронизатор, волноводный тракт, антенна и антенный переключатель:

7.1.4.1 Передатчик РЛС генерирует мощные электромагнитные колебания сверхвысокой частоты (СВЧ) в виде кратковременных, периодически повторяющихся зондирующих импульсов, которые с помощью антенно-волноводной системы излучаются в пространство в виде узконаправленного луча.

7.1.4.2 Волноводный тракт служит для канализации СВЧ импульсов электромагнитной энергии от передающего устройства к антенне и от антенны к приемному устройству.

7.1.4.3 Антенный переключатель обеспечивает попеременное подключение антенны к передатчику и приемнику, благодаря чему позволяет использовать для приема и передачи одну и ту же антенну. В период работы передатчика он через волноводный тракт замыкает его на антенну и закрывает вход приемника, защищая его от мощного импульса передатчика, а в период между двумя зондирующими импульсами антенный переключатель закрывает вход передатчика, чтобы всю энергию отраженного сигнала направить в приемник.

7.1.4.4 Антенна МРЛ состоит из облучателя рупорного и отражателя (обычно параболического типа) и служит для излучения мощных СВЧ импульсов в виде узконаправленного луча, а также приема отраженных СВЧ сигналов и их передачи по волноводному тракту на вход приемника.

7.1.4.5 Приемник обеспечивает усиление, поступающих в период между двумя зондирующими импульсами от антенно-волноводного тракта отраженных сигналов. Поскольку амплитуда отраженных сигналов очень

мала в приемнике осуществляется усиление в малошумящем СВЧ усилителе, преобразование сигнала (в смесителе) и усиление по промежуточной частоте и видеочастоте. Только после такого трехступенчатого усиления отраженные сигналы подаются на индикаторы и в аппаратуру цифровой обработки информации.

7.1.4.5 Индикаторы МРЛ служат для наглядного представления метеорологической обстановки. Для этого ранее применялись индикаторы кругового обзора (ИКО), индикатор дальность-высота (ИДВ), и амплитудный индикатор (ИА). В современных автоматизированных радиолокаторах отображение информации осуществляется на мониторе компьютера, служащего для обработки радиолокационной информации, и индикаторы ИКО, ИДВ, ИА практически не используются.

7.1.4.6 Синхронизатор МРЛ служит для выработки запускающих и других тактовых импульсов, обеспечивающих синхронизацию работы передатчика, приемника и индикаторов МРЛ, а также формирование меток дальности разного масштаба, подаваемых на индикаторы МРЛ.

7.2 Понятия о параметрах метеорологических радиолокаторов

7.2.1 Передающее устройство импульсных МРЛ характеризуется рабочей длиной волны λ (или несущей частотой), длительностью зондирующих импульсов τ, частотой повторения импульсов F и импульсной мощностью $P\tau$.

7.2.1.1 *Длина волны*, на которой работает МРЛ, связана с несущей частотой f генерируемых передатчиком СВЧ колебаний выражением

$$\lambda = c/f, \qquad (7.2)$$

где λ выражается в см, f – в герцах, $c = 3 \cdot 10^{10}$ см/с.

Выбор рабочей частоты МРЛ осуществляется исходя из его назначения, условий применения и условия наилучшего обнаружения метеообъектов и измерения комплекса их характеристик, обеспечивающих эффективное применение. В метеорологии наиболее часто используются рабочие длины волн 0,8; 2,0; 3,2; 5,3 и 10 см.

7.2.1.2 *Длительность зондирующего импульса* τ – это промежуток времени, в течение которого передатчик МРЛ генерирует мощные СВЧ колебания, определяемый на уровне половинной мощности. Длительность τ определяет пространственную протяженность зондирующего импульса и, следовательно, определяет разрешающую способность МРЛ по дальности и точность измерения дальности. Чем короче импульс, тем точнее можно измерить расстояние до цели и тем выше способность РЛС различать по дальности близкорасположенные цели. Минимальное расстояние между

двумя точечными целями, при котором они будут раздельно выделяться в первом приближении равно половине пространственной протяженности зондирующего импульса $h = c\tau/2$.

Следует отметить, что в настоящее время отмечается тенденция создания МРЛ (например, отечественный доплеровский радиолокатор нового поколения «ДМРЛ-С») с длинными (80, 50 и 30 мкс) зондирующими импульсами. Это позволяет понизить излучаемую импульсную мощность с сотен до десятков киловатт и повысить потенциал РЛС за счет увеличения длительности импульсов, а разрешающую способность обеспечить за счет внутриимпульсной обработки сигналов.

7.2.1.3 *Частота повторения F* – число зондирующих СВЧ импульсов, генерируемых передатчиком и излучаемых антенной МРЛ в секунду, измеряется в герцах.

7.2.1.4 *Период повторения T = 1/F* – интервал времени между двумя последовательными зондирующими импульсами в секундах, который определяет максимальное время запаздывания отраженного сигнала (относительно зондирующего импульса), при котором возможен его прием, и, следовательно, определяет максимальный радиус действия РЛС (R_{max}). За промежуток времени T электромагнитная энергия распространяется до цели и обратно, поэтому

$$R_{max} = \frac{cT}{2} = \frac{c}{2F}. \qquad (7.3)$$

7.2.1.5 *Импульсная мощность* P_τ – это мощность передатчика, усредненная за период длительности импульса τ, измеряется в ваттах, киловаттах (1 кВт = 10^3 Вт) и мегаваттах (1 мВт = 10^6 Вт).

7.2.1.6 *Средняя мощность передатчика* $\overline{P}$ намного меньше импульсной и связана с ней соотношением

$$\overline{P} = P_\tau F \tau. \qquad (7.4)$$

7.2.2 *Приемное устройство МРЛ* характеризуется чувствительностью, полосой пропускания, коэффициентом шума и динамическим диапазоном.

7.2.2.1 *Чувствительность приемника МРЛ* P_0 – минимальная мощность радиоэха, уверенно обнаруживаемая на фоне собственных шумов приемника. Чувствительность приемных устройств МРЛ измеряется в Ваттах или в децибелах на 1 Ватт (dB/Вт). Величина P_0 обычно составляет $3\cdot10^{-13} \div 3\cdot10^{-14}$ Вт или соответственно -135 ÷ -145 dB/Вт. Реальная чувствительность приемника МРЛ определяется шириной его полосы пропускания Δf, температурой T и коэффициентом шума N:

$$P_0 = kNT\Delta f, \qquad (7.5)$$

где k – постоянная Больцмана, равная $1{,}38 \cdot 10^{-23}$ Вт·с/К; T – абсолютная температура, равная приблизительно 300 К.

7.2.2.2 *Ширина полосы пропускания приемника* влияет на уровень шумов на выходе приемника. Оптимальная полоса пропускания приемника без искажения сигналов должна быть порядка:

$$\Delta f \approx 1/\tau \approx 10^6 \text{ Гц.} \tag{7.6}$$

7.2.2.3 *Коэффициент шума приемника МРЛ* определяется входным устройством (ЛБВ, квантово-параметрический усилитель, транзисторный малошумящий усилитель и т. п.) и меняется от 1,5 до 5. С уменьшением N чувствительность приемника повышается. В идеальном не шумящем приемнике N = 1, в котором при $\Delta f = 10^6$ Гц и T = 300 К, достигается предельное значение $P_0 \approx$ -144 dB/Вт.

7.2.2.4 *Динамический диапазон приемника МРЛ* определяет диапазон сигналов, пропускаемых приемником без ограничения (насыщения). Диапазон мощности радиоэха метеообъектов, обнаруживаемых высокопотенциальными МРЛ, может варьировать от 0 до 90 dB, поэтому динамический диапазон приемника МРЛ должен быть не менее этого.

7.2.3. *Антенная система РЛС* характеризуется шириной диаграммы направленности излучения, уровнем боковых лепестков, коэффициентом усиления по мощности.

Диаграмма направленности излучения антенны определяет направленные свойства антенны, от которых зависит разрешающая способность РЛС по угловым координатам и точности измерения угловых координат цели. Обычно она характеризуется шириной диаграммы направленности в вертикальной θ и горизонтальной ψ плоскостях, определяемой как угол между направлениями, в которых излучаемая мощность равна половине максимальной мощности, излучаемой в направлении оси диаграммы.

7.2.3.1 Форма и ширина диаграммы направленности излучения определяются формой, размерами антенны и рабочей длиной волны. В МРЛ обычно применяются антенны в виде параболоида вращения, которые имеют осесимметричную конусовидную (игольчатую) диаграмму направленности излучения. Для таких антенн

$$\theta = \psi \approx 0{,}688\lambda/D, \tag{7.7}$$

где D – диаметр параболоида в метрах, а λ – в см.

7.2.3.2 В зависимости от ширины диаграммы направленности излучения разрешающая способность РЛС по угловым координатам L в первом приближении может быть определена из выражения

$$L = R\,\theta_p\,, \tag{7.8}$$

где L – минимальное расстояние в метрах между двумя точечными целями в тангенциальном направлении, на котором возможно их раздельное обнаружение; R – расстояние до целей в метрах; θ_p – ширина диаграммы направленности излучения в радианах.

7.2.3.3 Коэффициент усиления антенны по мощности G характеризует во сколько раз мощность изотропного излучателя должна быть больше мощности направленного излучателя, чтобы в заданной точке пространства создать такой же поток энергии. Значение G связано с шириной диаграммы направленности излучения приближенным соотношением

$$G \approx \gamma 4\pi / \theta^2, \tag{7.9}$$

где γ – КПД антенны, равный для параболических антенн ≈ 0,6.

С другой стороны, значение G может быть вычислено через эффективную A_e, апертурную A_p площади и диаметр антенны по формуле

$$G = 4\pi A_e / \lambda^2 \approx 2{,}2\pi A_p / \lambda^2 \approx 5200\ (\pi D/\lambda)^2. \tag{7.10}$$

7.2.3.4 Формирование диаграммы направленности излучения происходит вблизи антенны, где значение G является функцией расстояния, параметров антенны, степени неравномерности облучения рефлектора. Поэтому выражения (7.9) и (7.10) справедливы для расстояния

$$R_{фр} \geq 2D^2/\lambda, \tag{7.11}$$

где $R_{фр}$ – радиус зоны Френеля.

Помимо излучения, в основном (полезном) лепестке диаграммы направленности имеется излучение в боковых лепестках, расположенных под различными углами и образующих в случае осесимметричных антенн тороиды вращения вокруг основного лепестка. Излучение в боковых лепестках составляет около 50 ÷ 60% от общей мощности, излучаемой антенной. Наличие боковых лепестков «засоряет» экраны индикаторов отражениями от местных предметов, даже когда они не облучаются основным лепестком, ухудшает условия обнаружения метеорадиоэха из-за мешающих отражений от местных предметов, приводит к погрешности при измерении радиолокационной отражаемости метеообъектов, а во многих случаях к завышению высоты верхней границы радиоэха мощных градовых облаков и гор.

7.2.4. *Волноводный тракт* в сантиметровом диапазоне волн исполняется в виде волноводов прямоугольного сечения, либо в виде коаксиальной линии с серебряной или лакированной внутренней поверхностью. Характеристикой тракта является его коэффициент стоячей волны (КСВ) и затухание электромагнитной энергии. Затухание в тракте обычно увеличивается с уменьшением длины волны и в режиме приема

несколько больше, чем в режиме передачи. Чем больше потерь в тракте, тем хуже обнаруживающая способность РЛС.

7.2.5. Одной из важных характеристик РЛС является пространственная ориентация плоскости поляризации излучаемых антенной РЛС электромагнитных волн.

7.2.5.1 ***Плоскость поляризации*** электромагнитных волн определяется плоскостью колебаний электрического вектора, всегда перпендикулярного плоскости колебаний вектора магнитного поля. Направления распространения электромагнитных волн и потока мощности излучения перпендикулярны направлениям векторов электрического и магнитного полей и определяются в правовинтовой системе.

В большинстве МРЛ применяется горизонтальная, либо вертикальная поляризация. В ряде специальных случаев применяется круговая или эллиптическая поляризация, при которой проекция вектора электрического поля на плоскость, перпендикулярную к направлению распространения, описывает, соответственно, круг или эллипс. Плоскость и тип поляризации (плоская, круговая, эллиптическая) определяются конструкцией волноводного тракта, облучателя и применяемых специальных устройств.

7.2.5.2 Процесс излучения и распространения электромагнитных волн можно представить следующим образом. На излучателе (в простейшем случае полуволновый диполь) наводятся быстропеременные заряды, меняющиеся по значению и знаку с частотой вырабатываемых передатчиком колебаний. В момент максимума зарядов на противоположных концах диполя достигает максимума напряженность электрического поля, направление вектора которого совпадает с пространственной ориентацией диполя. Когда эти заряды равны нулю, максимума достигает электрический ток в диполе, следовательно, напряженность электрического поля равна нулю, а напряженность магнитного достигает максимума. Быстропеременное синусоидальное изменение зарядов на противоположных концах и тока в произвольной точке диполя сопровождается излучением электрического и магнитного полей. Переменное магнитное поле в каждой точке пространства индуцирует градиент потенциала. Этот градиент представляет собой электрическое поле, которое также меняется в пространстве и создает эквивалент электрического тока, называемого током смещения. Он, в свою очередь, создает магнитное поле по аналогии с током проводимости.

Таким образом, переменное магнитное поле порождает переменное электрическое поле и наоборот. Электрическое и магнитное поля не могут распространяться в пространстве каждое в отдельности и объединяются под общим понятием электромагнитного поля.

7.3 Уравнение радиолокации одиночных целей

Уравнение радиолокации связывает мощность радиоэха с техническими параметрами РЛС, отражающими свойствами и удалением целей, а также условиями распространения радиоволн на пути до цели. Для одиночных точечных целей (имеющих поперечные размеры много меньше объема зондирующего импульса) это уравнение может быть записано в виде

$$P_r = \frac{P_\tau G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4} K_1 K_2 K_R, \qquad (7.12)$$

где σ – поперечное сечение обратного рассеяния цели, являющееся функцией длины волны РЛС, размера, формы, ориентации цели и диэлектрических свойств вещества, из которого состоит цель; $K_1 = 10^{-0,1\xi}$, где ξ – суммарное затухание в децибелах, вносимое волноводным трактом в режиме приема и передачи; $K_2 = 10^{-0,2\int_0^R (k_г + k_o + k_{oc})dR}$ – коэффициент, учитывающий ослабление радиоволн на пути до цели и обратно, где $k_г$, k_o и k_{oc} – коэффициенты ослабления в газах атмосферы, облаках и осадках в dB; K_R – ослабление в ветрозащитном укрытии (Radom).

Поперечное сечение обратного рассеяния одиночной цели есть площадь такого изотропного излучателя, который, будучи помещен в точку цели, рассеивает всю падающую на нее энергию равномерно по всем направлениям и создает в точке приема ту же плотность потока энергии, что и реальная цель. Поперечное сечение обратного рассеяния имеет размерность площади и измеряется в см^2 или м^2. Поперечное сечение обратного рассеяния является параметром цели, характеризующим его отражающие свойства. Величина σ не зависит от мощности передатчика, чувствительности приемника, параметров антенны, расстояния до цели и связана лишь с единственным параметром РЛС – рабочей длиной волны. В технической литературе поперечное сечение обратного рассеяния называют эффективной площадью рассеяния.

Мощность радиоэха P_r измеряется в децибелах относительно мощности минимально обнаружимого сигнала P_0 в ваттах согласно выражению:

$$N = 10 \lg \frac{P_r}{P_o} \qquad (7.13)$$

откуда имеем

$$P_r = P_o 10^{0,1N} \qquad (7.14)$$

7.4 Уравнение радиолокации метеорологических целей

Облака и осадки представляют собой систему из множества взвешенных или выпадающих пространственно распределенных гидрометеоров (капли, кристаллы, градины, снежинки, крупа). Вся совокупность гидрометеоров, участвующих в формировании отраженного сигнала, воспринимается как единая цель. Отраженный сигнал формируется в объеме $V\tau$, ограниченном шириной диаграммы направленности излучения и половиной пространственной протяженности зондирующего импульса:

$$V_\tau = R^2 \int_0^\infty P^2(R) dR \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} P^4(\theta,\psi) \sin\theta d\theta d\psi , \qquad (7.15)$$

где *P(R)* – функция распределение мощности излучения антенны вдоль направления распространения зондирующего импульса; $P(\theta,\psi)$ – функция распределение мощности излучения по углам θ и ψ, т.е. поперек направления распространения зондирующего импульса.

В случае близкой к прямоугольной форме функции *P(R),* гауссовой форме функции $P(\theta,\psi)$ и конической диаграмме излучения антенны ($\theta = \psi$) этот объем можно найти из выражения:

$$V_\tau = \frac{c\tau}{2} \frac{\pi R^2 \theta^2}{8 \ln 2} . \qquad (7.16)$$

В случае наблюдения осадков, когда размеры гидрометеоров и расстояние между их центрами много больше длины волны, имеет место однократное и некогерентное рассеяние, при котором каждая частица рассеивает, как независимый центр, и общая интенсивность отраженного сигнала равняется сумме интенсивностей сигналов, отраженных отдельными частицами.

Перемещение гидрометеоров разных размеров относительно друг друга за время между двумя последовательными зондирующими импульсами приводит к изменению (флуктуации) мощности радиоэха от одного импульса к другому. В связи с этим приходится проводить осреднение мощности радиоэха метеообъектов по нескольким десяткам последовательных импульсов зондирования.

Уравнение радиолокации метеоцелей связывает среднюю мощность радиоэха с параметрами МРЛ и отражающими свойствами метеообъектов.

При условии однократного и некогерентного рассеяния оно записывается в виде

$$\overline{P}_r = \frac{P_r G^2 \lambda^2 c\tau\theta^2}{4^5 \pi^2 \ln 2} \frac{\eta}{R^2} K_1 K_2 K_R K_3 , \qquad (7.17)$$

где η – радиолокационная отражаемость метеоцелей в см$^{-1}$, равная сумме поперечных сечений обратного рассеяния всех частиц в единице облачного объема; K_3 – коэффициент заполнения отражающего объема рассеивающими частицами. Измерение мощности радиоэха метеоцелей, так же как и в случае одиночных целей, производится относительно уровня собственных шумов приемного устройства P_0. Положив коэффициент заполнения и коэффициент, учитывающий ослабление радиоволн на двойном пути распространения, равными 1, пренебрегая ослаблением в Radom и разделив обе части уравнения (7.17) на P_0, получим уравнение радиолокации метеоцелей с учетом способа измерения мощности радиоэха:

$$\frac{\overline{P}_r}{P_0} = \frac{P_\tau G^2 \lambda^2 c \tau \theta^2}{P_0 4^5 \pi^2 ln 2} \cdot \frac{\eta}{R^2} \cdot 10^{-0,1\zeta}. \qquad (7.18)$$

Объединив параметры МРЛ в одну постоянную, имеем:

$$\frac{P_r}{P_0} = C_\lambda \frac{\eta}{R^2}, \qquad (7.19)$$

$$C_\lambda = \frac{P_\tau G^2 \lambda^2 c \tau \theta^2}{P_0 \cdot 10^{0,1\zeta} \cdot 7 \cdot 10^3}, \qquad (7.20)$$

где C_λ – постоянная МРЛ в см^3, часто называемый метеорологическим потенциалом; P_τ – импульсная мощность передатчика в ваттах; G – коэффициент усиления антенны; λ – длина волна в см c – скорость света в см/с; τ – длительность импульса в с; θ_P – ширина диаграммы направленности излучения в радианах; P_0 – чувствительность приемного устройства в ваттах; ξ – суммарное затухание, вносимое волноводным трактом на прием и передачу в dB.

С помощью постоянной РЛС C_λ можно сравнить различные радиолокаторы с точки зрения их обнаруживающей способности.

Из уравнения (7.19) с учетом (7.14) можно получить выражение для измерения радиолокационной отражаемости метеообъектов

$$\eta = \frac{10^{0,1N} R^2}{C_\lambda} \qquad (7.21)$$

или

$$10 lg \eta = N + 20 lgR - 10 lgC_\lambda, \qquad (7.22)$$

где $N = 10\, lg \frac{P_r}{P_0}$ – мощность радиоэха в dB относительно P_0; C_λ – в см^3.

7.5 Понятия о радиолокационной отражаемости метеообъектов

7.5.1 Радиолокационная отражаемость является специфической характеристикой метеоцели, определяющей ее отражающие свойства. Радиолокационная отражаемость равна сумме поперечных сечений обратного рассеяния всех частиц в единице облачного объема:

$$\eta = \sum_{i=1}^{n} n_i \sigma_i \tag{7.23}$$

где n_i – концентрация рассеивающих частиц, имеющих поперечное сечение обратного рассеяния σ_i; n – число всех частиц в единице облачного объема. Величина η измеряется в см$^{-1}$ (см^2/см^3).

Радиолокационная отражаемость η несет в себе количественную информацию о числе рассеивающих частиц, их размере, крупнокапельной водности облаков и интенсивности осадков. Она прямо пропорциональна концентрации облачных частиц и является сложной функцией их размера, формы, диэлектрических свойств и длины волны.

7.5.2 В простейшем случае при рассеянии на сферических частицах, размер которых много меньше длины волны, выражение для η достаточно простое:

$$\eta = \frac{\pi^5}{\lambda^4} \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2 \sum_{i=1}^{n} N_i d_i^6, \tag{7.24}$$

где d_i – диаметр рассеивающих частиц; m – комплексный показатель преломления вещества частицы; величина $\left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2$ в случае капель дождя в диапазоне $2 < \lambda < 10$ см равна 0,93, а в случае ледяных частиц не зависит от λ и равна 0,19.

7.5.3 Пользуясь выражением (7.24) некоторые авторы радиолокационной отражаемостью называют множитель отражаемости Z_r или Z_d, равные

$$Z_r = \sum_{i=1}^{n} n_i r_i^6, \tag{7.25}$$

$$Z_d = \sum_{i=1}^{n} n_i d_i^6. \tag{7.26}$$

Взаимосвязь значений η, Z_r и Z_d можно представить выражениями:

$$\eta = \frac{10^{-12} \pi^5}{\lambda^4} \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2 Z_d = 2{,}84 \cdot 10^{-10} \frac{Z_d}{\lambda^4}, \tag{7.27}$$

$$Z_d = 3{,}52 \cdot 10^9 \lambda^4 \eta, \qquad (7.28)$$

$$Z_r = 64 Z_d \qquad (7.29)$$

где $\left|\frac{m^2-1}{m^2+2}\right|^2$ принято равным 0,93. Величины Z_r и Z_d измеряются в мм^6/м^3 или см^3, при этом Z_d мм^6/м^3 = 10^{-12} Z_d см^3.

Множитель отражаемости Z_r и Z_d характеризует пропорциональность отражающей способности гидрометеоров шестой степени их размера, хотя это справедливо только для малых частиц ($d << \lambda$): облачных капель, мороси, мелкокапельных обложных дождей.

Отражаемость крупнодисперсных осадков (ливневые дожди, град, крупа, хлопья снега) в сантиметровом диапазоне волн не пропорциональна d^6 и является сложной функцией безразмерной величины $\pi d/\lambda$. В этом случае расчет величины Z_d теряет смысл, так как величина отражаемости и ее вариации не пропорциональны Z_d. Кроме того, в значении Z_d теряется частотная зависимость отражаемости гидрометеоров.

Для перевода значений Z_d, *получаемы* на радиолокаторах «МРЛ-5» и «ДМРЛ-С» с λ = 3,13, 10,16 и 5,3 см в значения η см$^{-1}$ можно пользоваться соотношениями:

$$\eta_{3,2} = 2{,}96 \cdot 10^{-12} Z_d, \qquad Z_d = 3{,}38 \cdot 10^{11} \eta_{3,2};$$

$$\eta_{5,3} = 3{,}52 \cdot 10^{-13} Z_d, \qquad Z_d = 2{,}84 \cdot 10^{12} \eta_{5,3};$$

$$\eta_{10} = 2{,}67 \cdot 10^{-14} Z_d, \qquad Z_d = 3{,}74 \cdot 10^{13} \eta_{10} \qquad (7.30)$$

7.5.4 В практике радиолокационных измерений для удобства часто оперируют множителем отражаемости Z – условной единицей, измеряемой в dBZ, и рассчитываемой по формуле:

$$Z = 10 \lg \frac{Z_d}{Z_0}. \qquad (7.31)$$

Взаимосвязь между значениями $\eta_{3,2}$ и η_{10} (см$^{-1}$) со значениями $Z_{3,2}$ и Z_{10} (dBZ) может быть представлена с учетом (7.30) и (7.31) выражениями:

$$Z_{3,2} = 115{,}3 + 10 lg \eta_{3,2}; \; Z_{5,3} = 124{,}5 + 10 lg \eta_{5,3}; \; Z_{10} = 135{,}7 + 10 lg \eta_{10}; \qquad (7.32)$$

или $\eta_{3,2} = 10^{0,1Z_{3,2} - 11,53}$; $\eta_{5,3} = 10^{0,1Z_{5,3} - 12,45}$; $\eta_{10} = 10^{0,1Z_{10} - 13,57}$. (7.33)

7.6 Общие сведения об ослаблении радиоволн

7.6.1 Из уравнения радиолокации следует, что мощность радиоэха от множественных целей уменьшается пропорционально квадрату расстояния (R^2), а от точечных целей (самолетов, кораблей и т. п.) – пропорционально четвертой степени расстояния (R^4). Такое различие

объясняется тем, что отражающий объем метеоцелей увеличивается пропорционально квадрату расстоянию (R^2).

Помимо ослабления плотности потока электромагнитной энергии с увеличением расстояния за счет уширения луча, она уменьшается и за счет ослабления радиоволн на пути распространения, связанного с поглощением и рассеянием электромагнитной волны атмосферными газами, облаками, осадками, частицами пыли, дыма, песчаных бурь. Ослабление радиоволн обусловлено:

– поглощением электромагнитной энергии и превращением ее в тепловую энергию, расходующуюся на нагревание среды или вещества рассеивающих частиц;

– общим рассеянием во всех направлениях, при котором рассеянная энергия также вычитается из потока падающей энергии (за исключением доли, рассеянной в направлении падающего излучения).

Потери мощности принятого сигнала за счет ослабления радиоволн на пути распространения можно записать в виде

$$d\overline{P}_{\text{г}} = -2k_L\overline{P}_r dR, \qquad (7.34)$$

где $\overline{P}_r$ – средняя мощность принятого сигнала; k_L – коэффициент ослабления на единицу пути, измеряемый в см$^{-1}$; множитель 2 учитывает ослабление на двойном пути (до цели и обратно).

Проинтегрировав выражение (7.34) по расстоянию до цели, получим

$$\overline{P}_r = \overline{P}_{r0}\ell^{-2\int_0^R k_L dR}, \qquad (7.35)$$

где $\overline{P}_{r0}$ – мощность принятого сигнала в не ослабляющей атмосфере.

В практических расчетах более удобно коэффициент ослабления k_L измерять в dB на единицу пути. При этом выражение (7.35) примет вид

$$\overline{P}_r = \overline{P}_{r0}e^{-0,2\int_0^R kdR}, \qquad (7.36)$$

где $\overline{P}_r$ и $\overline{P}_{r0}$ – выражаются в ваттах, а $\boldsymbol{k}$ – в dB/км.

Ослабление радиоволн сантиметрового диапазона в атмосфере складывается из ослабления в газах атмосферы, облаках и осадках. Тогда выражение (7.36) можно представить в виде

$$\overline{P}_r = \overline{P}_{r_0} \cdot 10^{-0,2\int_0^R (k_r + k_o + k_{oc})dR}, \qquad (7.37)$$

где $k_г$, k_o, k_{oc} – коэффициенты ослабления в dB/км в атмосферных газах, облаках и осадках, соответственно.

7.6.2 ***Ослабление в газах атмосферы*** происходит преимущественно за счет поглощения. Основными поглощающими газами являются кислород и водяной пар. Молекулы кислорода обладают постоянным

магнитным дипольным моментом, а молекулы водяного пара – постоянным электрическим дипольным моментом.

Распространяющаяся в атмосфере электромагнитная волна взаимодействует с дипольными моментами указанных газов, вынуждая их совершать колебательные и вращательные движения в разных направлениях. Колебательное состояние молекул газов характеризуется определенным энергетическим уровнем и для перемещения молекулы с одного энергетического уровня на другой необходимо сообщить определенное количество энергии $\hbar f$, где $\hbar$ – постоянная Планка, а f – частота электромагнитного излучения.

Таким образом, проходящая волна передает молекулам газа, имеющим магнитные или электрические дипольные моменты, дискретные порции энергии, которая расходуется на перевод молекул с более низкого энергетического уровня на более высокий. При обратном переходе молекула излучает полученную энергию. Однако, это излучение беспорядочно по направлению и, следовательно, не может вновь суммироваться с возбуждающим излучением. В результате этого наблюдается ослабление амплитуды распространяющегося излучения. Величина ослабления зависит от длины волны, парциального давления кислорода и водяного пара.

Спектры поглощения кислорода и водяного пара в сантиметровой области характеризуются резонансными линиями поглощения. Водяной пар имеет резонансные линии поглощения на длинах волн 1,35 см (полуширина линии 0,18 см) и 0,16 см, у кислорода область резонансных частот поглощения наблюдается в области 0,5 и 0,25 см. Поглощение газами атмосферы увеличивается с увеличением давления и понижением температуры.

С увеличением высоты плотность воздуха понижается, и ослабление в газах атмосферы уменьшается. Суммарные потери на всем пути распространения радиоволн зависят от высоты расположения антенны МРЛ и угла зондирования атмосферы. Максимальные потери наблюдаются при нулевых углах обзора и в диапазоне $3{,}2 < \lambda < 10$ см они могут достигать 5 dB. В практике радиолокационных метеонаблюдений приходится иметь дело лишь с частичным пересечением атмосферы, когда суммарные потери несколько меньше, но их необходимо учитывать.

При распространении радиоволн в облаках и осадках к ослаблению в газах атмосферы добавляется ослабление за счет рассеяния и поглощения частицами облаков и осадков.

7.6.3 ***Ослабление в облаках и осадках*** характеризуется поперечными сечениями общего ослабления. Поперечное сечение общего

ослабления σ_{OC} складывается из поперечного сечения поглощения σ_n и поперечного сечения полного рассеяния σ_p;

$$\sigma_{OC} = \sigma_n + \sigma_p . \qquad (7.38)$$

Поперечные сечения общего ослабления, поглощения и полного рассеяния представляют собой площади, произведение которых на падающую интенсивность дает, соответственно, полные потери мощности падающей волны, потери за счет поглощения и потери за счет общего рассеяния. Величины σ_{OC}, σ_n и σ_p имеют размерность (см^2).

Коэффициент ослабления радиоволн в случае некогерентного рассеяния равен сумме всех *n* частиц, находящихся в объеме с единичной длиной (км) и единичным поперечным сечением (м^2);

$$k = \sum_{i=1}^{N} N_i \sigma_{OC} = \sum_{i=1}^{N} N_i (\sigma_n + \sigma_p)_i . \qquad (7.39)$$

Если σ_{OC} выражается в см^2, а суммирование производится в объеме 1 м^3, то коэффициент ослабления k в dB/км рассчитывается по формуле

$$k = 0{,}4343 \sum_{i=1}^{N} N_i \sigma_{OC} . \qquad (7.40)$$

Коэффициент ослабления радиоволн является функцией длины волны, размера, диэлектрических свойств и концентрации рассеивающих частиц. Суммарные потери в облаках и осадках определяются их протяженностью, пространственным распределением водности, интенсивности осадков и дисперсностью частиц облаков и осадков. Эти зависимости достаточно сложны и рассматриваются в разделах 7.8 – 7.9.

Более детально основы радиолокации и радиолокационной метеорологии излагаются в [1 – 10].

7.7. Сведения о распространении радиоволн

7.7.1 Виды рефракции

Принцип радиолокации базируется на прямолинейном распространении радиоволн с известной и постоянной скоростью. Однако, в реальной атмосфере в зависимости от ее температуры, содержания водяного пара, давления и угла зондирования отмечается искривление траектории распространения радиоволн в различной степени. Явление искривления траектории распространения радиоволн называется *атмосферной рефракцией* и обусловлено неоднородностью атмосферы.

Диэлектрическая проницаемость и показатель преломления воздуха n в сантиметровом диапазоне волн определяется давлением *P*, температурой *T* (K) и влажностью воздуха:

$$(n-1)10^6 = \frac{78}{T}\left(P + \frac{4800e}{T} - \frac{e}{7}\right), \qquad (7.41)$$

где T – температура воздуха в градусах Кельвина; P – давление в мБар; e – упругость водяного пара в мБар.

Эти параметры атмосферы с высотой обычно убывают, соответственно уменьшается и показатель преломления. Вследствие этого скорость распространения радиоволн с высотой растет, что приводит к отклонению траектории радиолуча в сторону среды с большей диэлектрической проницаемостью, т. е. к поверхности Земли. Искривление радиолуча тем больше, чем больше вертикальный градиент показателя преломления dn/dh или значение вертикального градиента приведенного коэффициента преломления dM/dh, где М равно [4, 8]*:*

$$M = (n - 1)\cdot 10^6 = [(n - 1) + h/r_з]\cdot 10^6, \qquad (7.42)$$

где r_3 – эквивалентный радиус сфероида земли равный 6371 км.

В реальной атмосфере вертикальный градиент показателя преломления dn/dh может варьировать в широких пределах. В зависимости от значения dn/dh, как показано в таблице 1, возможны:

а) отрицательная рефракция (при $dn/dh > 0$), когда луч отклоняется от земли;

б) отсутствие рефракции (при $dn/dh = 0$);

в) нормальная рефракция (при $dn/dh = -4{,}8\cdot 10^{-8}$ м$^{-1}$);

г) повышенная рефракция (при $-4{,}8\cdot 10^{-8} < dn/dh < -15{,}7$ м$^{-1}$);

д) критическая рефракция (при $dn/dh = -15{,}7\cdot 10^{-8}$ м$^{-1}$), когда луч распространяется вдоль поверхности земли, приводя к сверхдальнему обнаружению целей;

е) суперрефракция (при $dn/dh < -15{,}7\cdot 10^{-8}$ м$^{-1}$), когда луч распространяется по атмосферному волноводу, испытывая полное отражение от верхней границы слоя инверсии, потом отражается от поверхности земли и т.д.

Пониженная рефракция, наблюдающаяся при малых значениях dn/dh, приводит к занижению высоты целей и ограничению дальности их обнаружения. *Повышенная рефракция* приводит к завышению высоты и повышению дальности радиовидимости.

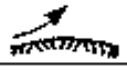
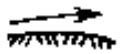
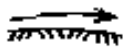
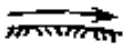
Известны случаи аномального сверхдальнего обнаружения целей, когда вертикальный градиент показателя преломления равен или больше $-14{,}7\cdot 10^{-8}$ м$^{-1}$. В первом случае понятие радиогоризонта отсутствует, так как кривизна траектории радиолуча равна кривизне Земли. Радиолуч, выпущенный горизонтально, обегает вокруг Земли. Такая рефракция называется *критической*.

Во втором случае имеет место *аномальная положительная рефракция* (суперрефракция), при которой кривизна радиолуча меньше кривизны Земли. Луч распространяется вдоль поверхности Земли, испытывая полное внутреннее отражение в некотором приземном слое атмосферы, затем отражается от поверхности земли и т.д., не выходя, таким образом, за пределы этого слоя (табл. 7.1, строка *е)*. Такие слои воздуха называются атмосферными волноводами по аналогии с металлическими и диэлектрическими волноводами.

Атмосферные волноводы образуются в слоях инверсии температуры и влажности воздуха. Эти инверсии обычно связаны с адвективными и радиационными туманами, оседанием воздуха в областях повышенного давления (антициклона) и выпадением интенсивных осадков. В зависимости от высоты инверсии различаются приземные и приподнятые атмосферные волноводы.

В условиях критической и положительной суперрефракции при нулевых углах возвышения антенны имеет место сверхдальнее обнаружение (гораздо дальше оптического горизонта) даже низко расположенных целей (гор, строений, леса, кораблей, побережья морей).

Таблица 7.1 – Виды рефракции в зависимости от вертикального градиента показателя преломления в атмосфере

Вид атмосферной рефракции	*dn/dh, м-1*	*dM/dh, м-1*	Траектория радиолуча
а) Отрицательная	> 0	> 0,157	
б) Отсутствие рефракции	0	0,157	
Положительная рефракция:			
в) нормальная;	$-4\cdot10^{-8}$	0,117	
г) повышенная;	$-4\cdot10^{-8} \div -15{,}7\cdot10^{-8}$	$0{,}117 \div 0$	
д) критическая;	$-15{,}7\cdot10^{-8}$	0	
е) суперрефракция	$< -15{,}7\cdot10^{-8}$	< 0	

7.7.2 Нормальная рефракция радиоволн

Нормальная рефракция наблюдается в стандартной радиоатмосфере, которая характеризуется следующими параметрами:

– температура на уровне моря равна 288К и линейно падает с высотой с градиентом 6,5 К/км;

– давление воздуха P_0 = 101,32 кПа и падает с высотой по барометрическому закону;

– давление водяного пара e_0 = 1 кПа и убывает с высотой по экспоненциальному закону;

– градиент показателя преломления равен dn / dh =·10^{-8} м$^{-1}$.

Радиус кривизны радиолуча в стандартной атмосфере больше эффективного радиуса Земли и равен $r_{ЭЗ} \approx 4/3 r_З \approx 8500$ км [9]. Поэтому радиолуч, выпущенный на некоторой высоте горизонтально, будет постепенно отдаляться от земной поверхности таким образом, что цели, расположенные на малых высотах, и облака, имеющие небольшую высоту, будут ниже линии радиогоризонта и не могут быть обнаружены. В условиях нормальной рефракции дальность радиовидимости R_p в километрах равна

$$R_p = 4{,}1(\sqrt{H_{МРЛ}} + \sqrt{H}), \qquad (7.43)$$

где $H_{МРЛ}$ и H – соответственно высота антенны МРЛ и цели над поверхностью Земли в метрах.

Измеренная на МРЛ высота удаленных метеоцелей в условиях нормальной рефракции будет занижена за счет того, что часть цели будет находиться ниже линии радиогоризонта. Эта ошибка ΔH растет с увеличением расстояния и уменьшается с увеличением высоты РЛС над уровнем Земли (см. таблицу 7.2).

Таблица 7.2 – Занижение высоты целей ΔH (м) за счет кривизны поверхности Земли в зависимости от расстояния до цели R и высоты расположения антенны МРЛ h в условиях нормальной рефракции [10]

$H_{МРЛ}$, м	R, км					
	50	100	150	200	300	400
0	150	595	1340	2380	5 350	9 520
10	81	450	1116	2035	4 900	8 911
100	5	207	707	1465	3 990	7 668
500	-	4	202	675	2 582	5 657
1000	-	-	25	276	1 726	4 350
1500	-	-	-	92	1 188	3 466
2000	-	-	-	-	805	2 891

Высота целей в метрах без указанного занижения в условиях нормальной рефракции приближенно определяется [10] по формуле

$$H = R \sin\alpha + \beta R^2, \qquad (7.44)$$

где R – расстояние до цели; α – угол возвышения антенны; $\beta = 6 \cdot 10^{-5}$ км.

Второе слагаемое учитывает различие в радиусе кривизны поверхности Земли и радиолуча в условиях нормальной рефракции.

Искривление радиолуча в стандартной атмосфере называется *нормальной рефракцией.*

При нормальной рефракции высота радиолуча над поверхностью земли H с учетом его кривизны, рассчитывается [9] по формуле:

$$H = [R^2 + 7{,}225 \cdot 10^7 + 2R \cdot 8500 \cdot \sin\alpha]^{0,5} - 8500 + H_{МРЛ}. \qquad (7.45)$$

7.7.3 Аномальная рефракция радиоволн

В условиях отрицательной, нулевой, повышенной, критической и суперрефракции радиоволн формулы (7.43) – (7.45) неточны.

Отрицательная и нулевая рефракция наблюдается редко.

Основные проблемы при радиолокационных наблюдениях возникают в случаях *повышенной, критической и суперрефракции*, когда при нулевых и малых углах возвышения антенны (до 3°) имеет место обнаружение местных предметов, расположенных ниже радиогоризонта.

Условия повышенной рефракции и суперрефракции могут формироваться при адвективных и радиационных туманах, оседании воздуха в областях повышенного давления и даже в районах испарении осадков и таянии града [4, 8].

Наиболее часто условия повышенной положительной рефракции радиоволн формируются за счет радиационного выхолаживания земной поверхности в ясные безоблачные ночи, когда формируется приземный слой инверсии температуры и влажности воздуха. При этом МРЛ обнаруживают радиоэхо местных предметов (неоднородности рельефа, возвышенности, здания и сооружения), расположенные ниже уровня радиогоризонта в стандартной атмосфере. В некоторых ситуациях во второй половине ночи и утром формируются условия для положительной суперрефракции радиоволн, когда аномальное радиоэхо имеет большую мощность и может расцениваться как радиоэхо интенсивных ливневых осадков, гроз и града. Эти ложные очаги являются серьезной помехой при автоматизированных наблюдениях. При суммировании осадков во времени могут создавать большой слой ложных осадков. Аномальная рефракция приводит также к искажению высот радиоэха.

Тесная связь условий распространения радиоволн с метеорологической обстановкой и синоптической ситуацией позволяет прогнозировать явление рефракции радиоволн вообще и суперрефракции в частности. Однако прогноз величины рефракции и его применение на практике сетевых радиолокационных наблюдений затруднителен. Более эффективно применение методов фильтрации аномального радиоэха.

7.8 Рассеяние радиоволн отдельными гидрометеорами

Теоретической основой радиолокационного обнаружения града, измерения параметров облаков и осадков, а также решения многих других задач радиолокационной метеорологии являются закономерности рассеяния, ослабления, поглощения, собственного радиотеплового излучения и доплеровского сдвига частоты радиолокационного излучения различными гидрометеорами.

В градовых облаках наблюдается весь спектр типов гидрометеоров (жидкие капли, ледяные частицы различной формы, снежинки, ледяная и снежная крупа, многослойные градины с сухой и обводненной поверхностью). Они могут встречаться на различных высотах и, следовательно, иметь разную температуру. Различие в фазовой структуре и температуре гидрометеоров, обусловливающее различие в их диэлектрических свойствах, существенно влияет на их отражательные, поглощающие и излучающие свойства.

7.8.1 Теория рассеяния радиоволн

При взаимодействии электромагнитной волны с гидрометеорами на них индуцируются осциллирующие электрические и магнитные дипольные, квадрупольные, октупольные и т. д. моменты. Энергия осцилляции берется из падающего поля. Часть этой энергии превращается в тепло, часть вновь излучается в пространство в виде рассеянного электромагнитного поля, имеющего ту же длину волны, что и падающее. Рассеяние происходит во все стороны по индикатрисе, характеризующей угловое распределение рассеянной энергии. Часть энергии рассеивается в направлении, обратном направлению падающего поля, и может быть принята приемным устройством МРЛ как радиоэхо. Способность облачных частиц и других диэлектрических неоднородностей возвращать часть энергии к источнику количественно характеризуется поперечным сечением обратного рассеяния σ.

Доля энергии, превращающаяся в тепло и идущая на нагревание вещества частиц, характеризует ослабление радиоволн за счет поглощения и количественно определяется через поперечное сечение поглощения $\sigma_{п.}$ Рассеянная во все стороны энергия характеризует ослабление радиоволн за счет общего рассеяния и определяется поперечным сечением общего рассеяния $\sigma_р$. Общее ослабление радиоволн в облаках и осадках складывается за счет поглощения и общего рассеяния радиоволн и характеризуется поперечным сечением общего ослабления $\sigma_{ос}$.

Аналитические выражения для расчета σ, σ_n, σ_p и σ_{oc} получены из классической теории рассеяния электромагнитных волн на сферических частицах, развитой в работах Ми [11], К. С. Шифрина [12], Адена и Керкера, Ван де Хюлста, В. И. Розенберга [13] и др. Они получены из решения системы уравнений Максвелла:

$$\left.\begin{aligned} &\varepsilon\frac{\partial E}{\partial t}+\beta E=rot\,H;\\ &-\mu\frac{\partial H}{\partial t}=rotE;\\ &divE=\frac{\rho}{\varepsilon};\\ &divH=0, \end{aligned}\right\} \qquad (7.46)$$

где E и H – векторы напряженности электрического и магнитного полей; β – удельная электрическая проводимость; ρ – плотность свободного электрического заряда; ε и μ – электрическая и магнитная проницаемости среды.

В случае однородных сферических частиц выражения для σ, σ_n, σ_p и σ_{oc} имеют следующий вид:

$$\sigma=\frac{\lambda^2}{4\pi}\left|\sum_{n=1}^{\infty}(-1)^n(2n+1)(a_n-b_n)\right|^2; \qquad (7.47)$$

$$\sigma_p=\frac{\lambda^2}{2\pi}\sum_{n=1}^{\infty}(2n+1)\left[|a_n|^2+|b_n|^2\right]; \qquad (7.48)$$

$$\sigma_{oc}=\frac{\lambda^2}{2\pi}(-Re)\sum_{n=1}^{\infty}(2n+1)(a_n+b_n); \qquad (7.49)$$

$$\sigma_n=\sigma_{oc}-\sigma_\rho, \qquad (7.50)$$

где (–Re) – вещественная часть суммы, взятая с обратным знаком; α_n и b_n – амплитуды парциальных волн, излученных индуцированными магнитными и электрическим диполями, квадруполями, октуполями и другими многополюсниками n-го порядка, определяемые из выражений:

$$\left.\begin{aligned} a_n&=\frac{\psi_n(\rho)\psi'_n(m\rho)-m\psi'_n(\rho)\psi_n(m\rho)}{h_n(\rho)\psi'_n(m\rho)-mh'_n(\rho)\psi_n(m\rho)};\\ b_n&=\frac{\psi'_n(\rho)\psi_n(m\rho)-m\psi_n(\rho)\psi'_n(m\rho)}{h'_n(\rho)\psi_n(m\rho)-mh_n(\rho)\psi'_n(m\rho)}, \end{aligned}\right\} \qquad (7.51)$$

где $\rho=\dfrac{\pi d}{\lambda}$; d – диаметр рассеивающих частиц; $m = n - i\kappa$ – комплексный показатель преломления вещества частицы; n – показатель преломления;

κ – показатель поглощения; Ψ_n – цилиндрические функции Бесселя первого рода; h_n – цилиндрические функции Ханкеля второго рода порядка $n+\frac{1}{2}$. Штрихами обозначено дифференцирование по аргументу.

В формулах (7.47) – (7.50) величины σ, σ_n, σ_p, σ_{oc} имеют размерность см^2. Часто в литературе оперируют отношениями этих величин к площади геометрического сечения рассеивающих частиц, называемыми безразмерными (или нормированными) поперечными сечениями обратного рассеяния $\sigma_o = \sigma/\pi r^2$ общего рассеяния $\sigma_1 = \sigma_p/\pi r^2$ и ослабления $\sigma_2 = \sigma_o/\pi r^2$.

Формулы (7.47 – 7.51) вследствие дифракционного характера рассеяния называют дифракционными. Они применимы для расчетов характеристик рассеяния гидрометеоров любых размеров и диэлектрических свойств.

7.8.2 *Рассеяние и ослабление малыми частицами*

В области малых частиц (так называемой релеевской области рассеяния) общие дифракционные формулы (7.47 – 7.51) допускают упрощение. Для оптических мягких частиц, какими являются гидрометеоры, при условиях $\rho = \pi d/\lambda \le 0{,}13$ и $(\rho m - 1) \le 1$, все парциальные компоненты полей, кроме поля электрического диполя, равны нулю и для значений поперечных сечений обратного рассеяния справедливо выражение

$$\sigma = \frac{\pi^5}{\lambda^4}\left|\frac{m^2-1}{m^2+2}\right|^2 d^6, \qquad (7.52)$$

где $\left|\frac{m^2-1}{m^2+2}\right|^2$ для капель воды слабо зависит от температуры и при $\lambda \ge 3$ см приблизительно равно 0,93, а для ледяных частиц практически не зависит от длины волны и температуры и равно 0,19.

Вследствие этого капли воды отражают примерно в 5 раз больше энергии, чем равновеликие ледяные частицы. Увеличение размера частиц вдвое увеличивает значение σ в 64 раза, а увеличение λ вдвое уменьшает значение σ в 16 раз.

В области малых частиц поглощение значительно превышает рассеяние, так как рассеяние пропорционально ρ^6, т.е. квадрату объема частицы, а поглощение – ρ^3, т.е. пропорционально объему частицы. Поскольку при $\rho << 1$ значение $\rho^3 >> \rho^6$, общее поперечное сечение

ослабления в области релеевского рассеяния практически равно поперечному сечению поглощения, т.е.:

$$\sigma_{oc} = \sigma_n = \frac{\pi^2}{\lambda} Im\left(-\frac{m^2-1}{m^2+2}\right) d^3. \qquad (7.53)$$

Значение $Im\left(-\frac{m^2-1}{m^2+2}\right)$ увеличивается с уменьшением длины волны и температуры капель воды. При температуре 0 °С оно равно $6{,}88 \cdot 10^{-3}$ для λ = 10 см и $2{,}47 \cdot 10^{-3}$ для λ = 3,2 см. В интервале температуры от 0 до 20 °С значения этой величины варьируют в пределах 30%. Для ледяных частиц эта величина от λ не зависит, а с уменьшением температуры убывает от $9{,}6 \cdot 10^{-4}$ при температуре 0 °С до $2{,}2 \cdot 10^{-4}$ при температуре -20 °С.

Релеевское рассеяние на длинах волн 0,86, 3,2, 5,3 и 10 см, наиболее часто применяемых в метеорологии, справедливо для частиц диаметром до 0,036, 0,13, 0,23, 0,41 см соответственно. Таким образом, формулы (7.52) и (7.53) применимы для расчетов в мелкодисперсных системах (облака без осадков, мелкокапельный дождь, снег).

7.8.3 Дифракционное рассеяние

В области размеров частиц, сравнимых с длиной волны ($d \approx \lambda$), рассеянное поле является результатом дифракции и интерференции парциальных компонент, излученных магнитными и электрическими диполями, квадруполями и другими многополюсниками n-ого порядка.

В градовых облаках, где $d \approx \lambda$, расчеты характеристик рассеяния необходимо проводить по точным дифракционным формулам (7.47) – (7.51), что требует зачастую вычисления до нескольких тысяч членов ряда функций Бесселя и Ханкеля.

Такие расчеты были проведены различными авторами [13 – 19]. Применительно к разработке радиолокационных методов обнаружения града обширные расчеты σ, σ_{oc} и σ_n по формулам (7.47) – (7.51) выполнили Абшаев М.Т. и В. И. Розенберг в 1966 – 1975 гг. [14 – 16, 18 и др.]. Эти расчеты выполнены для широкого диапазона длин волн, размеров сфер льда, снега и воды, различной плотности и внутренней структуры градин (однородных, многослойных с концентрическими и неконцентрическими слоями). Расчеты проведены с учетом зависимости диэлектрической проницаемости капель воды, градин и снежинок от их температуры и плотности, а также длины волны, полученных на основе обобщения имеющихся в литературе экспериментальных данных о комплексном показателе преломления m. Например, при температуре t = 0 °С для воды при λ = 0,86; 3,2; 5,6; 11 и 17 см значения m = 4,09 - 2,46i; 7,10 - 2,90i; 8,44 -

2,16*i*; 9,09 - 1,27*i*; 9,26 - 0,85*i* соответственно, а для льда *m* = 1,78 - 0,0024*i* при всех указанных λ.

В результате этих расчетов установлено, что значения σ, σ_{oc} и σ_n увеличиваются с увеличением размера гидрометеоров, но кривые их зависимости от диаметра гидрометеоров *d* ввиду дифракционной природы явления имеют осциллирующий характер (рисунки 7.1 и 7.2).

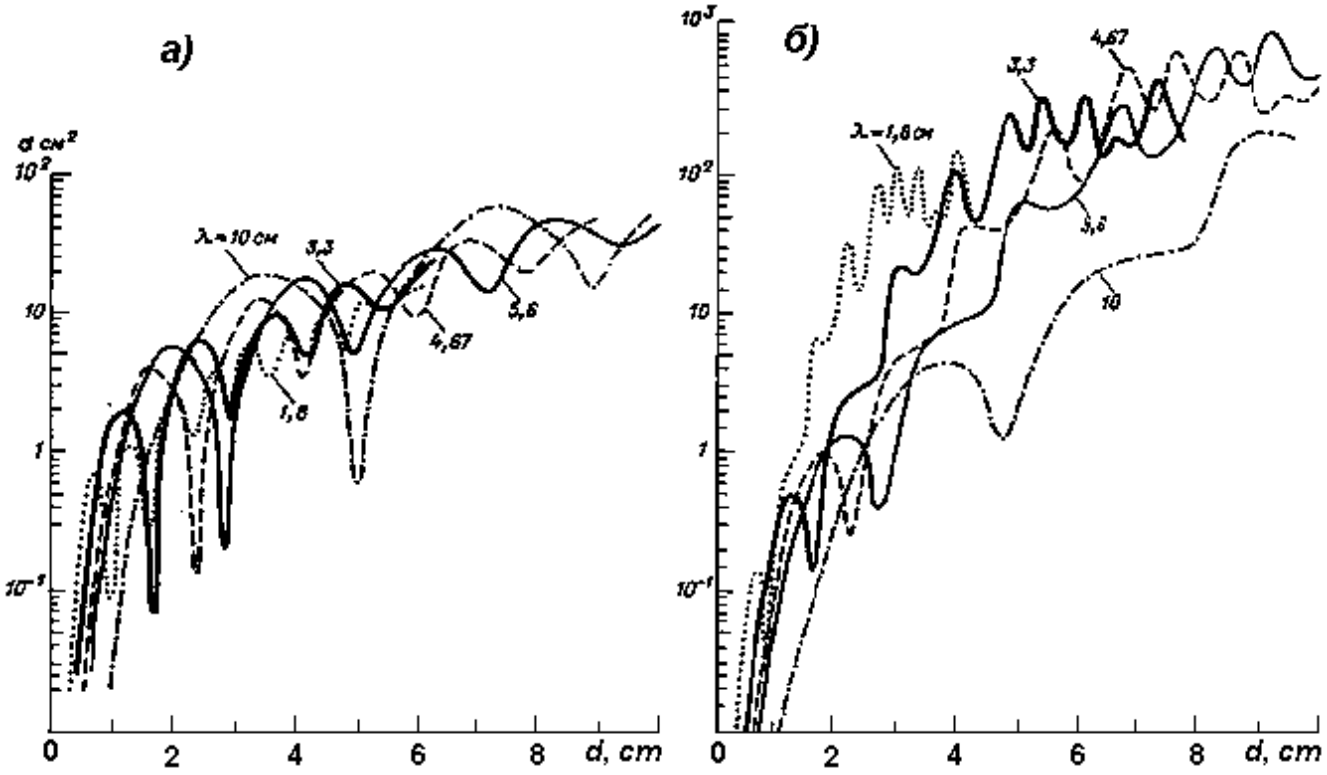


Рис. 7.1 – Поперечные сечения обратного рассеяния σ (см^2) сфер воды (*а*) и сухого льда (*б*)σ_{oc} на указанных длинах волн [17]

Ледяные частицы, отражающие в релеевской области примерно в 5 раз меньше, чем капли воды такого же размера, при размерах частиц, сравнимых с длиной волны ($\frac{d}{\lambda} \approx 0,8$), имеют σ, намного (в 10 – 500 раз) превышающие σ равновеликих сфер воды. Это объясняется тем, что на больших ледяных сферах с *m* = 1,78 - 0,0024*i* падающая электромагнитная энергия фокусируется на заднюю стенку как в линзе, и от нее отражается обратно к источнику.

На сферах воды с более высоким значением комплексного показателя преломления m (например, на λ = 3,2 см *m* = 7,10 - 2,90*i*) электромагнитная энергия, проникающая внутрь сферы, быстро поглощается и фокусируется не на задней стенке, а ближе к центру капли. Поэтому отражение от задней стенки ничтожно мало, и рассеяние на крупных сферах воды происходит на передней полусфере в виде расходящихся лучей.

Кривые зависимости σ_o от ρ для сфер воды имеют вид затухающей синусоиды, которая при ρ = 10 устанавливается (рис. 7.2), принимая асимптотическое значение (равное 1), у ледяных же сфер сильно осциллирует без затухания, имеет максимум при ρ = 60 и затем с ростом ρ медленно спадает к асимптотическому значению.

Значения σ и σ_{oc} ледяных частиц в значительной степени зависят от плотности льда. Уменьшение плотности градин разных размеров от 0,916 до 0,380 г/см^3 приводит к уменьшению значений σ и σ_{oc} градин разных размеров от 2 до 10 раз [13, 14].

Поскольку градины имеют слоистую структуру (перемежающиеся слои плотного и рыхлого льда), значения σ и σ_{oc} реальных градин несколько отличаются от значений σ и σ_{oc} однородной ледяной сферы такого же размера. В зависимости от соотношения толщины слоев плотного и рыхлого льда при реально возможных размерах града эта разница может достигать иногда ± 4 dB [13, 14]. Влияние не концентричности слоев на значения σ и σ_{oc} несущественно (не превышает 1,5 *dB*).

В области малых частиц ($\rho << 1$), где поглощение превалирует над рассеянием (так как $\rho^3 >> \rho^6$), σ_{oc} сфер воды значительно превышают значения σ_{oc} равновеликих ледяных сфер. Значения σ_{oc} и σ_n сфер воды в области малых частиц практически одинаковы, а с увеличением размера частиц разность (σ_{oc} - σ_n) увеличивается. Это обусловлено нарастанием влияния общего рассеяния на значение σ_{oc}. В области крупных частиц ($d \approx \lambda$) ослабление на ледяных сферах более интенсивное, чем на равновеликих сферах воды [2, 14].

Зависимость значений σ, σ_{oc} и σ_n от температуры незначительна по сравнению с их зависимостью от размеров капель воды (особенно для малых λ) и при решении многих задач ею можно пренебречь.

Для сферических градин, состоящих из однородного льда, в связи с тем, что *m* льда почти не зависит от λ, зависимость нормированных поперечных сечений σ_0, σ_1 и σ_2 от ρ для всех длин волн представляется одной и той же кривой, т.е. имеет место свойство инвариантности. Для сфер воды или обводненного льда этого не наблюдается вследствие того, что для таких частиц *m* является функцией λ.

Значения σ и σ_{oc} снежинок на длинах волн, применяемых в метеорологии, в 10^2 – 10^3 раз меньше, чем у капель воды и градин такого же размера.

7.8.4 Рассеяние и ослабление обводненным градом

По данным экспериментальных и теоретических исследований Р. Листа и Л.Г. Качурина и Л.И. Гашина, Тлисова М.И. на реальных градинах в режиме их таяния может удерживаться поверхностная пленка воды толщиной до 0,01 см, а в режиме мокрого роста града до 0,1 – 0,2 см.

Появление пленки воды на поверхности градины, растущей в «мокром режиме», или ее таянии приводит к серьезным изменениям ее отражательной и ослабляющей способности [13, 15], нарастающим с увеличением толщины пленки воды h от 0,01 до 0,1 см.

Детальные исследования [15] показали, что для обводненных градин с концентрическим ледяным ядром радиуса r, общим радиусом b и толщиной поверхностного слоя воды $h = (b - r)$ значение σ, σ_p, σ_{oc} и $\sigma_п$ даются, как и для однородных сфер, выражениями (7.47 – 7.51) с той лишь разницей, что аргументами функций Бесселя и Ханкеля являются $m_1\rho_1$, $m_2\rho_1$, $m_1\rho_2$ и $m_2\rho_2$, где m_1 и m_2 – комплексные показатели преломления льда и воды соответственно, $\rho_1 = \dfrac{2\pi r}{\lambda}$, $\rho_2 = \dfrac{2\pi b}{\lambda}$. В случае неконцентрических сфер добавляется множитель, учитывающий взаимное положение центров внутренней и внешней сферы и ориентацию линии, соединяющей их центры относительно падающего поля.

В области $\rho \leq 0{,}13$ обводненная ледяная сфера даже при очень малом h отражает значительно лучше, чем сухая, а при $h \geq 0{,}1r$ рассеяние практически эквивалентно рассеянию на сплошной капле воды [15].

Большие ледяные сферы при обводнении начинают рассеивать хуже и, когда толщина водяной оболочки приближается к $h = 0{,}01\lambda$ (и тем более $0{,}1\lambda$), значения σ уменьшаются до значений, характерных для равновеликих сфер воды, а иногда и ниже (рис. 7.2).

В процессе таяния градин в теплой части атмосферы значения σ_o могут уменьшаться в 10 – 100 раз.

Этот результат теории был подтвержден экспериментами в безэховой камере, проведенными Атласом [2], а также независимыми экспериментами по измерению отражаемости охлажденных крупных градин, подвешенных на шаре-пилоте, в процессе их таяния, проведенными Абшаевым [15].

Такое уменьшение значений σ крупной градины при появлении столь малой пленки воды ($h \approx 0{,}01$ см) объясняется изменением условий рассеяния. Суммарная интенсивность обратного рассеяния формируется в результате интерференции полей, рассеянных на передней и задней полусферах. Однако энергия, проникающая внутрь градины, значительно ослабляется в поверхностной пленке воды и при $h > 0{,}1 \div 0{,}2$ см она практически не дает вклада в суммарное поле обратного рассеяния.

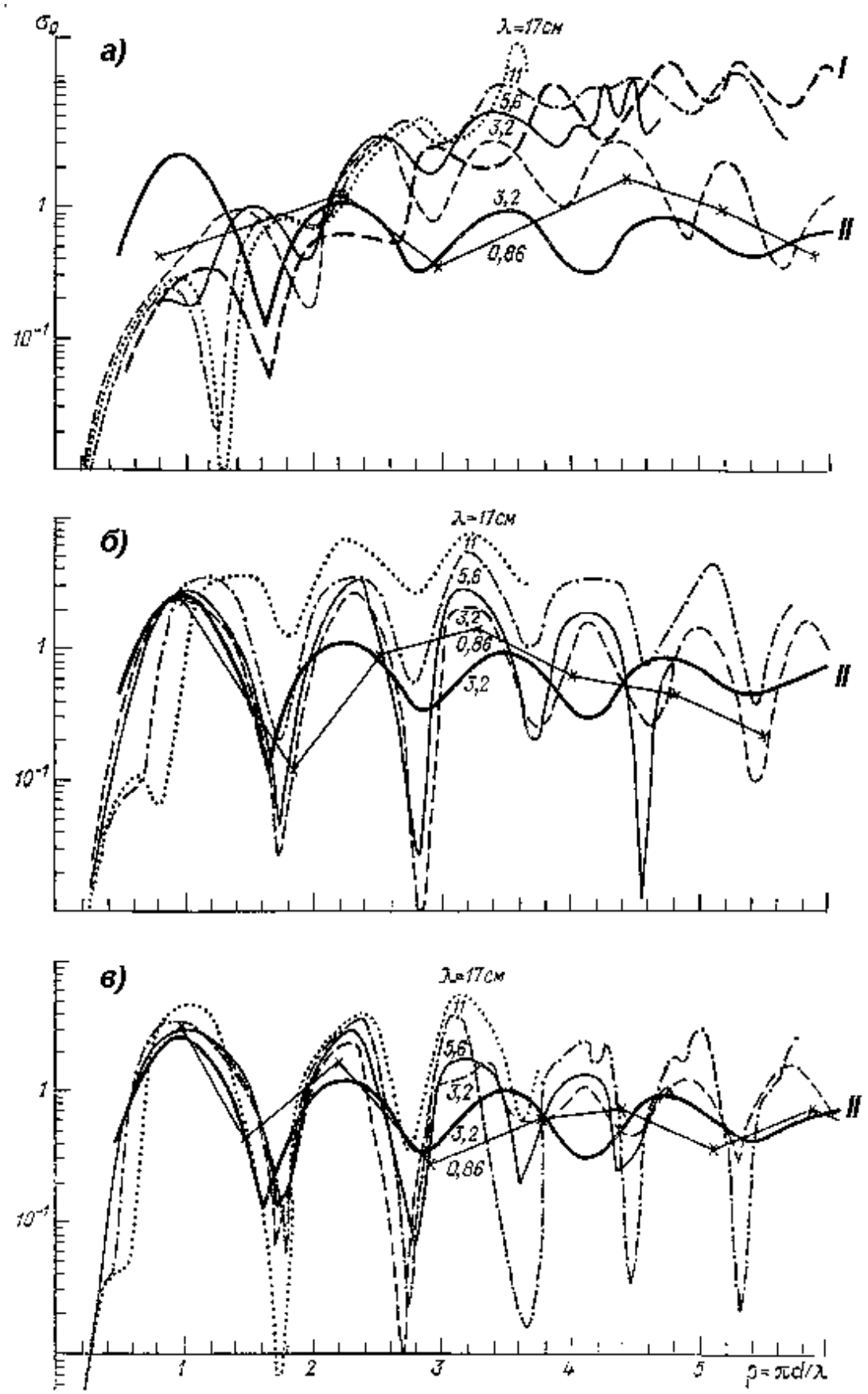


Рис. 7.2 – Зависимость безразмерных поперечных сечений обратного рассеяния σ_o от ρ на указанных длинах волн при t = 0 °С [15]: ***а)*** – обводненный град с h = 0,01 см, сферы сухого льда (I) и воды (II); б) – обводненный град с h = 0,05 см; в) – обводненный града с h = 0,1 см

Ослабление радиоволн обводненными градинами также в значительной степени зависит от толщины пленки *h*. В области малых частиц ($b < 0{,}7$ см) даже при $h = 0{,}01$ см значения σ_2 заметно увеличиваются, приближаясь к σ_2 сфер воды, а когда $h = 0{,}05$ см, значения σ_2 обводненной градины превышают σ_2 сфер сплошной воды (рис. 7.2б). В области крупных частиц ($d \sim \lambda$) σ_2 от *h* почти не зависят и даже при $h = 0{,}01$ см приблизительно равны σ_2 сфер воды и для всех *h* и λ приближаются к асимптотическому значению $\sigma = 2$. Ослабление обводненным градом при $h = 0{,}1$ см в области малых частиц примерно в 100 раз больше, а в области крупных – в 4 ÷ 6 раз меньше ослабления сферами сплошного льда. Эффект обводнения также зависит от соотношения h/λ.

Температурной зависимости значений σ, σ_{oc} и σ_n обводненного града можно пренебречь, так как температура тающей и растущей в мокром режиме градины, равна или близка к 0 ^{o}C.

Исследования характеристик рассеяния и ослабления градинами, покрытыми смесью воды и льда, а также мокрым снегом показали результаты, аналогичные рассеянию и ослаблению мокрой градиной, так как диэлектрические свойства таких смесей близки к диэлектрическим свойствам воды. Если же содержание воды в поверхностном слое мокрого снега мало (порядка 1%), то значения σ и σ_{oc} отличаются от значений характерных для сухого снега не более чем на 2 *dB*. Лабораторные исследования σ обводненных градин и градин, покрытых мокрым снегом в безэховой камере, проведенные Атласом и Харпером, Джоссом [2, 3], подтверждают расчетные данные. В реальных условиях несимметричное распределение воды на поверхности градин и вкрапления воды внутри ледяного ядра (спонгиальный град) несколько осложняют характер рассеяния.

7.8.5 Рассеяние несферическими частицами

7.8.5.1 Облачные капли и капли дождя диаметром до 1 мм имеют сферическую форму. Капли более 1 мм начинают терять сферическую форму и по мере укрупнения капли приобретают форму усеченного сплюснутого сфероида с соотношением осей не менее 0,5. Капли критического размера ($d \geq 0{,}6$ см) перед разбрызгиванием принимают форму гантели и даже пузыря диаметром до 1 ÷ 2 см.

Градины могут иметь разные формы: сферическую, коническую, эллипсоидальную и произвольную форму конгломератов смерзшихся между собой нескольких градин. Соотношение осей несферических градин изменяется, как и для крупных капель, в пределах от 0,5 до 2,0.

7.8.5.2 Значения σ и σ_{oc} несферических гидрометеоров могут варьировать в зависимости от фактора формы (соотношения полуосей), пространственной ориентации, плоскости поляризации, диэлектрических свойств и длины волны в пределах 10 ÷ 20 dB [2 – 4, 20]. Однако в естественных условиях эти эффекты значительно сглаживаются при рассеянии на совокупности несферических частиц с хаотической ориентацией (колеблющихся капель и вращающихся градин). Например, в области релеевского рассеяния беспорядочно ориентированные несферические капли рассеивают назад значительно эффективнее, чем равновеликие сферы, и тем эффективнее, чем больше соотношение осей.

Для ледяных частиц (ввиду малости комплексного показателя преломления) этот эффект незначителен. Несферические снежинки любых размеров и формы ввиду того, что имеют (вследствие малой плотности) диэлектрическую постоянную, близкую к единице, рассеивают эквивалентно сферам равного объема. Лишь при обтаивании снежинок резко возрастают их отражательная способность и влияние формы.

7.8.5.3 Ослабление системой хаотически ориентированных несферических частиц также возрастает по мере увеличения соотношения осей. Однако для встречающихся в естественных условиях соотношений осей (менее 0,5) увеличение ослабления не превышает для капель воды 30% по сравнению со сферическими частицами равного объема и пренебрежимо мало для ледяных частиц [2, 20].

7.8.6 Геометрическое рассеяние

Рассеяние и ослабление крупными частицами ($d >> \lambda$) сводится к геометрическому отражению радиоволн. Поперечные сечения обратного рассеяния равны геометрическим сечениям, а сечения ослабления – удвоенному значению геометрического сечения:

$$\sigma = \pi r^2, \tag{7.54}$$

$$\sigma_{OC} = 2\pi r^2. \tag{7.55}$$

Выражения (7.54) и (7.55) в диапазоне волн λ = 0,8 ÷ 30 см неприемлемы для каких-либо гидрометеоров, но они применяются при калибровке МРЛ по стандартной мишени, представляющей собой обычно полую металлическую (или металлизированную) сферу, диаметр которой $d >> \lambda$.

Для калибровок МРЛ и в качестве реперных целей применяются также уголковые, дипольные и другие отражатели, которые имеют следующие значения σ:

– трехгранный уголок с квадратными гранями со стороной a, ориентированного трехгранным углом в направлении МРЛ:

$$\sigma = 4\pi \frac{a^4}{\lambda^2}; \qquad (7.56)$$

– трехгранный уголок с равнобедренными треугольными гранями со стороной a:

$$\sigma = 4\pi \frac{a^4}{3\lambda^2}; \qquad (7.56)$$

– плоская прямоугольная пластина со сторонами a_1 и a_2, перпендикулярная направлению падающей волны:

$$\sigma = 4\pi \frac{a_1^2 a_2^2}{\lambda^2}; \qquad (7.57)$$

– круглый цилиндр радиусом a_1 и высотой a_2, образующая которого ориентирована перпендикулярно направлению падающей волны:

$$\sigma = 2\pi \frac{a_1 a_2^2}{\lambda}; \qquad (7.58)$$

– σ дипольный отражатель (полуволновый вибратор), ориентированный перпендикулярно направлению падающей волны:

$$\sigma = 0{,}86\lambda^2. \qquad (7.59)$$

7.9 Рассеяние радиоволн спектром гидрометеоров

7.9.1 Градовые облака и осадки содержат спектры всевозможных видов гидрометеоров, имеющих различные диэлектрические свойства: в зоне осадков – град, крупа, ливневый дождь; в верхней и средней части облака – мелкокапельная и крупнокапельная фракции, ледяная и снежная крупа и град; на вершине и наковальне – кристаллы, агрегаты кристаллов, снежинки и снежные зерна. Для изучения их радиофизических свойств, включая отражательную и ослабляющую способность, необходимо знать спектральное распределение всех перечисленных классов гидрометеоров.

7.9.2 На основе обширных экспериментальных исследований спектров града, выпадавшего в высокогорных условиях, капель дождя и снежинок в осадках различной интенсивности были получены многочисленные пробы спектров гидрометеоров. Для аналитического описания спектра частиц осадков различных типов получен ряд функций распределения частиц по размерам: гамма-распределение, экспоненциальное, обратно степенное, нормальное и нормально-логарифмическое [2, 4, 10, 21 и многие др.].

Универсальной функцией, описывающей практически любые одновершинные кривые, является обобщенное гамма-распределение.

Большинство спектров частиц осадков в виде града, дождя и снега описывается его частным случаем – гамма-распределением [10, 21]:

$$n(d) = N \frac{b^{\mu+1}}{\Gamma(\mu+1)} \frac{d^{\mu}}{d_3^{\mu+1}} e^{-b\frac{d}{d_3}} \cdot \Delta d, \qquad (7.60)$$

где $\Gamma(\mu+1)$ – гамма-функция индекса μ; d_3 – среднекубический диаметр спектра частиц; μ – параметр формы кривой распределения; $b = \sqrt[3]{(\mu+1)(\mu+2)(\mu+3)}$.

На основе анализа спектров града, собранных на высокогорных Муштинском и Самсарском полигонах ВГИ (высота 1800 – 2300 м) в весенний период при низкой высоте изотермы 0°С, установлено [21], что параметр μ в градовых осадках изменяется в пределах $0 < \mu < 10$ с наиболее часто повторяющимся значением $\mu = 2$ (рис. 7.3*а*).

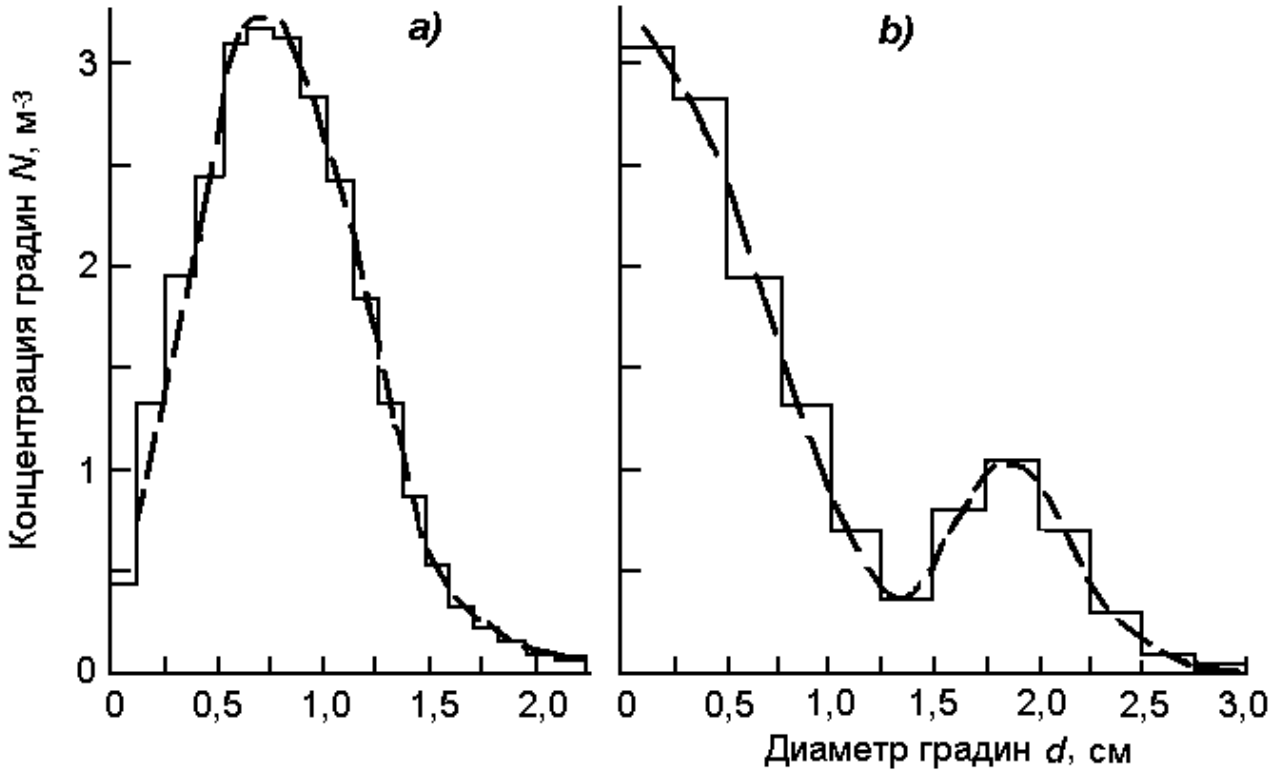


Рис. 7.3 – Одновершинное (*а*) и двухвершинное (*б*) распределения градин по размерам на поверхности земли [21]

Таяние града в теплой части атмосферы даже при малой высоте изотермы 0 °С над уровнем земли приводит к серьезному сокращению числа или полному таянию мелких градин, а также уменьшению размеров не успевших растаять градин. Спектры града в облаке в отличие от спектров града, выпавшего на землю, содержат значительно большее число мелких градин (рис. 7.4) и лучше аппроксимируются функцией распределения (4.60) при $0 \le \mu \le 2$.

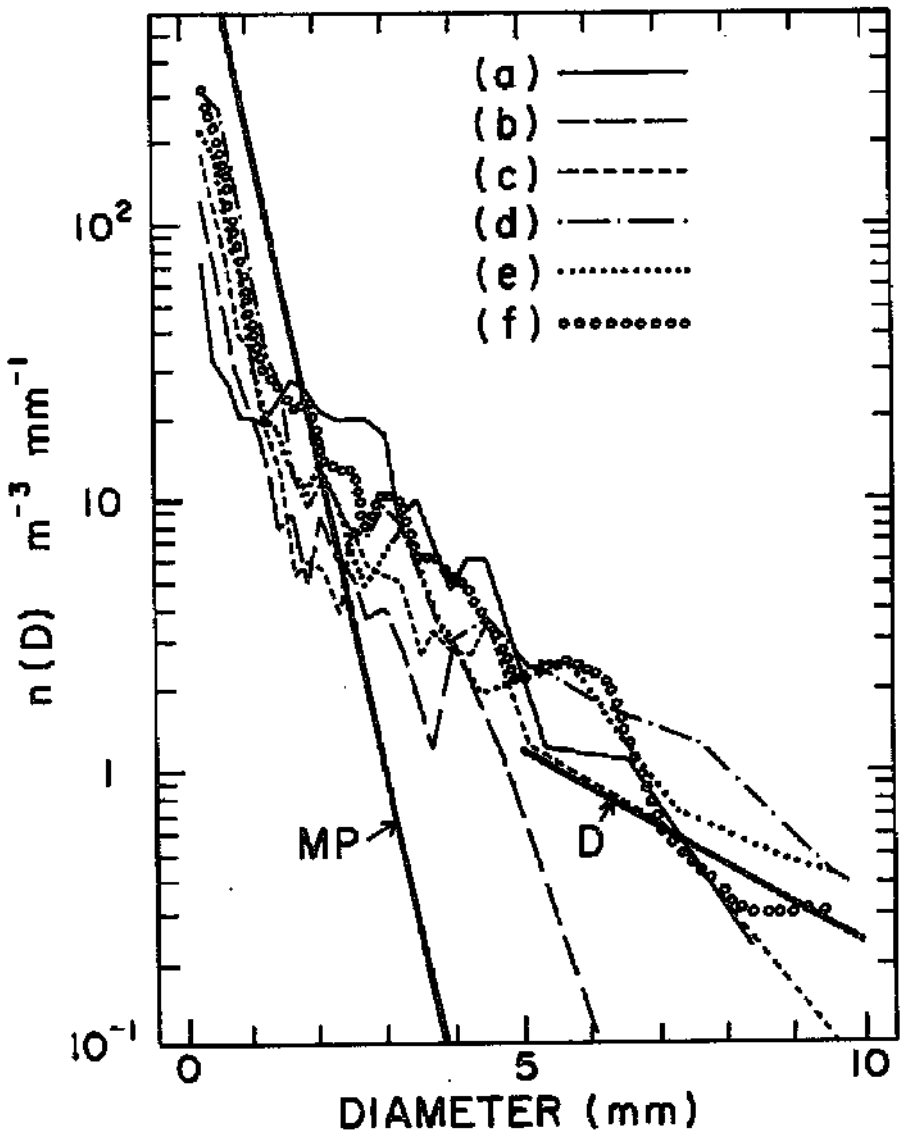


Рис. 7.4 – Спектр града в облаке по данным авиационных измерений в многоячейковом ГП в эксперименте NHRE в США [22] на переднем краю главного восходящего потока (a), внутри его (b) и (c), в тыловой его части (d), и на краю главного нисходящего потока (e) и (f)

Концентрация градин в облаках убывает, как показано на рис. 7.5, с увеличением размера пропорционально $d^{-3,5}$ и варьирует в пределах 0,1 < $N_Г$ < 100 м$^{-3}$, а среднекубический диаметр в пределах 0,1 см < d_3 < 4,0 см.

7.9.3 Спектры капель дождя также хорошо описываются гамма-распределением, где μ варьирует в пределах 0 < μ < 40, среднекубический диаметр капель – в пределах от 0,01 до 0,24 см, а концентрация капель – в пределах от 1 до $4 \cdot 10^3$ м$^{-3}$.

Для описания спектров града и капель дождя часто используется [2, 3] распределение Маршалла-Пальмера $n(d) = N_0 \varepsilon^{-\Lambda d}$, где N_0 и Λ зависят от интенсивности осадков. Например, для спектра капель дождя (рис. 7.6) принято: $N_0 = 8 \cdot 10^3$ м$^{-3}$мм$^{-1}$, $\Lambda = 4{,}1 I^{0,21}$, где I интенсивность дождя в мм/час.

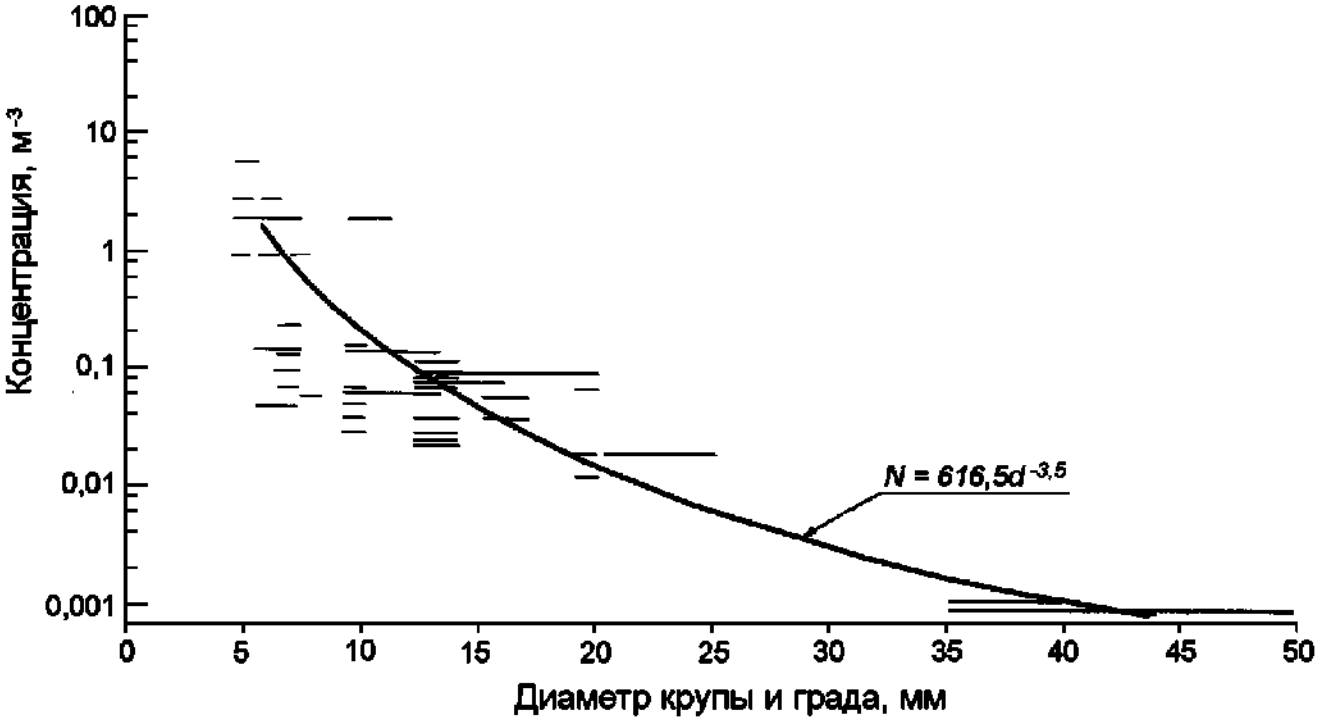


Рис. 7.5 – Зависимость концентрация градин от диаметра, построенная по данным 40 самолетных измерений в восходящих потоках в 15 градовых облаках Высоких Равнин США [23]

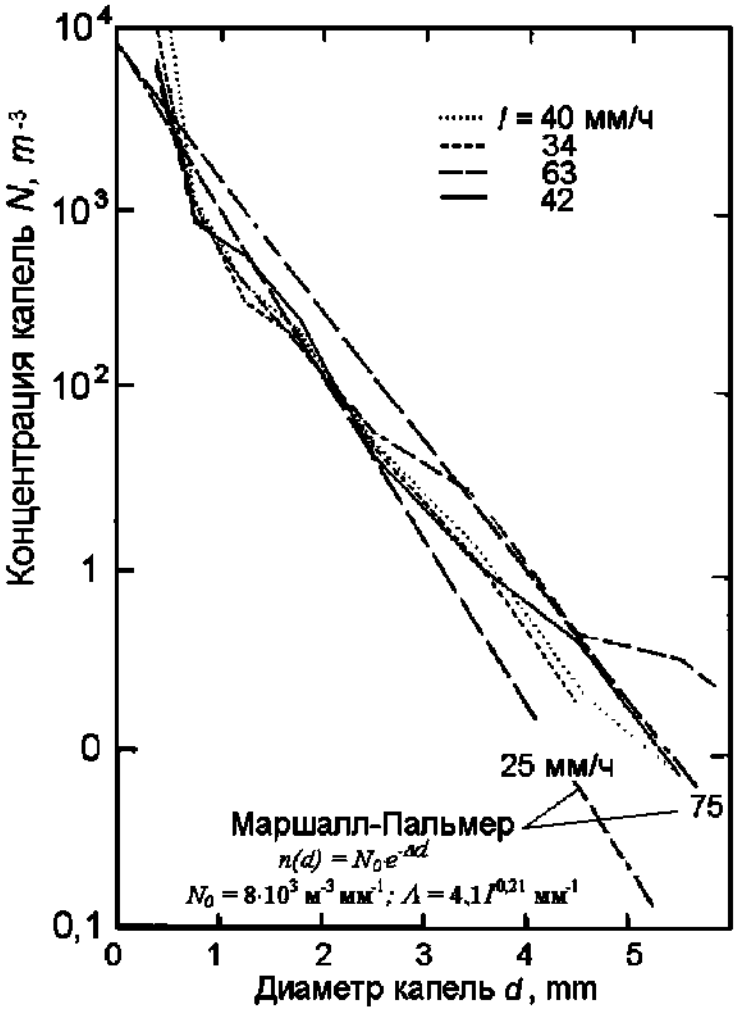


Рис. 7.6 – Спектр капель в ливневых дождях [20]

7.9.3 Расчет радиолокационной отражаемости (η, см$^{-1}$), коэффициентов ослабления (k, *дБ/км*) и поглощения (γ, *дБ/км*) радиоволн, интенсивности собственного радиотеплового излучения и доплеровских характеристик градовых облаков осуществлялся [10, 13 – 16, 18] с учетом вклада мелкокапельной фракции, дождя и града, так как значения водности всех этих компонент могут быть сопоставимы.

Суммарная радиолокационная отражаемость единицы объема, содержащего град, дождь и облачные капли, может быть рассчитана по формуле

$$\eta_{\Sigma} = \eta_{Г} + \eta_{Д} + \eta_{МФ}\ , \qquad (7.61)$$

где $\eta_{Г}$, $\eta_{Д}$ и $\eta_{МФ}$ – вклад в суммарную отражаемость градовой, дождевой и мелкокапельной фракции, зависящие от их содержания.

В градовых облаках водность всех трех компонент имеет один порядок величин, и в зависимости от стадии развития облака соотношение между ними может варьировать в пределах от 0,1 до 10. На ранней стадии образования осадков водность мелкокапельной фракции значительно (в 10 – 100 раз) превосходит водность крупных капель, но появление дождевых капель и града за 3 – 4 мин ее уменьшает за счет их коагуляционного роста и вымывания (вплоть до образования просветов в облаках). Ледность градовых осадков значительно больше водности дождя на уровне изотермы 0 ^{o}C и выше, но уменьшается по мере таяния в теплой части атмосферы, увеличивая водность дождя. Следовательно, значения $\eta_{\Sigma,}$ k_{Σ} и γ_{Σ} в градовых облаках зависит от стадии градообразования, высоты прохождения радиолокационного излучения относительно уровня изотермы 0 ^{o}C.

Полагая, что *n(d)* во всех трех компонентах, подчиняется гамма-распределению, суммарная отражаемость и ослабление в граде с дождем и облачными каплями значения $\eta_{\Sigma,}$ k_{Σ} и γ_{Σ} рассчитывалась [10, 24] по формулам:

$$\eta_{\Sigma} = \frac{6\cdot 10^{6}}{\pi}\left[\frac{q_r \int\limits_{d_{min}}^{d_{max}} d^{\mu} e^{-b\frac{d}{d_3}} \sigma(d)dd}{\rho_r \int\limits_{d_{min}}^{d_{max}} d^{\mu+3} e^{-b\frac{d}{d_3}} dd} + \frac{q_q \int\limits_{d_{min}}^{d_{max}} d^{\mu} e^{-b\frac{d}{d_3}} \sigma(d)dd}{\int\limits_{d_{min}}^{d_{max}} d^{\mu+3} e^{-b\frac{d}{d_3}} dd}\right] + 3\cdot 10^{-3} d_3^3 \frac{q_{МФ}}{\lambda^4}; \qquad (7.62)$$

$$k_{\Sigma} = 0{,}4343\,\frac{6q_r \int\limits_{d_{min}}^{d_{max}} d^{\mu} \ell^{-b\frac{d}{d_3}} \sigma_{oc}(d)dd}{\pi\rho_r \int\limits_{d_{min}}^{d_{max}} d^{\mu+1} \ell^{-b\frac{d}{d_3}} dd} + \left(\frac{4{,}1q_q}{\lambda^{2,85}} \pm \delta_k\right) + \frac{0{,}438q_{МФ}}{\lambda^2}; \qquad (7.63)$$

$$\gamma_{\Sigma} = 0{,}4343\frac{6q_r\int\limits_{d_{min}}^{d_{max}} d^{\mu}\ell^{-b\frac{d}{d_3}}\sigma_{п}(d)dd}{\pi\rho_r\int\limits_{d_{min}}^{d_{max}} d^{\mu+1}\ell^{-b\frac{d}{d_3}}dd}+\left(\frac{3{,}4q_q}{\lambda^{2,75}}\pm\delta_k\right)+\frac{0{,}438q_{МФ}}{\lambda^2}, \qquad (7.64)$$

где q_r, q_q и $q_{МФ}$ – ледность града, водность дождя и мелкокапельной фракции соответственно; ρ_r – плотность градин; d_{min} и d_{max} – минимальный и максимальный размер частиц в спектрах частиц.

Расчет значений η и k проводился [10, 16, 24] с ограничением пределов интегрирования выражений (7.62) – (7.63) значениями минимального d_{min} и максимального диаметра d_{max} в спектрах гидрометеоров, так как вклад конечного участка теоретического спектра ($d_{max} \div \infty$) сравним со значением η, k и γ реальных спектров града и дождя, а зачастую и превышает их. Влияние d_{min} менее значительно и обычно не превышает нескольких процентов.

Расчеты были проведены:

– для длин волн λ = 0,86; 2,0; 3,2; 5,6; 10, 17 и 36 см:

– *для градовых осадков* при $0 \le \mu \le 10$; $0{,}01 \le h \le 0{,}1$ см; $0{,}1 \le d_3 \le 2{,}8$ см; $-40 \le t \le 0$ ^{o}C; для единичной концентрации градин N = 1 м$^{-3}$ и единичной ледности q = 1 г/м^3;

– *для дождя* при $0 \le \mu \le 40$; $0{,}01 \le d_3 \le 0{,}25$ см; d_{max} = 0,6 см; $0 \le t \le 18$ ^{0}C; для концентрации капель N = 1 м$^{-3}$; единичной водности q = 1 г/м^3 и единичной интенсивности осадков I = 1 мм/час;

– *для снегопадов* при постоянной (10^{-3} – 10^{-2} г/см^3) и переменной плотности снежинок ρ_c; t = -6 ^{0}C; $0{,}1 \le d_3 \le 2{,}5$ см; μ = 0 и 2; N = 1 м$^{-3}$.

7.9.4 На основе анализа результатов обширных расчетов получено:

– вклад третьих слагаемых в выражениях (7.62) – (7.64), учитывающих вклад в значения η_{Σ}, k_{Σ} и γ_{Σ} мелкокапельной фракции (независимо от ее водности) пренебрежимо малы по сравнению с вкладом отражаемости градовой и дождевой фракций;

– при сравнимых значениях водности дождя и града вклад дождевой фракции в значение η_{Σ} на $\lambda \ge 3{,}2$ см несущественен, а на $\lambda < 3{,}2$ сравним с вкладом градовой фракции;

– отражательная, ослабляющая и излучающая способность градовых, дождевых и снежных осадков увеличиваются с увеличением среднекубического диаметра спектра гидрометеоров и их концентрации. Их значения также варьируют в зависимости от длины волны и агрегатного состояния рассеивающихся частиц и слабо зависят от формы кривой распределения μ и температуры [10, 13 – 16, 24].

Причем зависимости значений η, k и γ от среднекубического диаметра рассеивающих частиц для всех длин волн, как показано на рисунке 7.7 представляют собой ***монотонные кривые***, что значительно упрощает решение обратных задач теории рассеяния, на основе которой разработаны различные методы определения параметров микроструктуры градовых и дождевых осадков.

7.9.5 Аппроксимируя методом наименьших квадратов семейства кривых для наиболее часто встречающихся значений параметров функций распределения гидрометеоров по размерам и их диэлектрических свойств, получены следующие зависимости [10, 14]:

– для градовых осадков в интервале размеров с 0,1 < d_3 < 2,5 см:

$$\left.\begin{aligned} \eta_{3,2} &= 6{,}7\cdot 10^{-7} N\, d_3^{2,1}; \\ \eta_{10} &= 3{,}8\cdot 10^{-8} N d_3^{5,4}; \\ k_{3,2} &= 0{,}65 N d_3^{2,5}; \\ k_{2,0} &= 0{,}75 N d_3^{2,1}. \end{aligned}\right\}; \qquad (7.65)$$

– для ливневых осадков в интервале размеров с 0,01 < d_3 < 0,24 см:

$$\left.\begin{aligned} \eta_{3,2} &= 7{,}7\cdot 10^{-5} N d_{3к}^{0,7}; \\ \eta_{10} &= 1{,}4\cdot 10^{-7} N d_{3к}^{6}; \\ k_{3,2} &= 3{,}6 N\, d_{3к}^{4,3}; \\ k_{2,0} &= 6{,}4 N d_{3к}^{4,2}, \end{aligned}\right\}. \qquad (7.66)$$

– в смешанных осадках (град с ливневым дождем) вследствие аддитивности функций $\eta_{\lambda i} = f(N, d_3)$ и $k_{\lambda i} = \varphi(N, d_3)$ принимают вид:

$$\left.\begin{aligned} \eta_{3,2} &= 7{,}7\cdot 10^{-5} N_K d_{3к}^{0,7} + 6{,}7\cdot 10^{-7} N_{‹} d_{3‹}^{2,1}; \\ \eta_{10} &= 1{,}4\cdot 10^{-7} N_K d_{3к}^{6} + 3{,}8\cdot 10^{-8} N_{‹} d_{3‹}^{5,4}; \\ k_{3,2} &= 3{,}6 N_K d_{3к}^{4,3} + 0{,}65 N_{‹} d_{3‹}^{2,5}; \\ k_{2,0} &= 6{,}4 N_K d_{3к}^{4,2} + 0{,}75 N_{‹} d_{3‹}^{2,1}. \end{aligned}\right\} \qquad (7.67)$$

7.9.6 Наличие таких простых зависимостей позволяет решить задачу определения размера гидрометеоров. В однокомпонентных осадках (град, дождь, снег) задача определения размера частиц сводится к решению системы уравнений типа:

$$\left.\begin{aligned} \eta_{\lambda i} &= A_i N d_3^{\alpha_i} \\ k_{\lambda i} &= B_i N d_3^{\beta_i} \end{aligned}\right\}. \qquad (7.68)$$

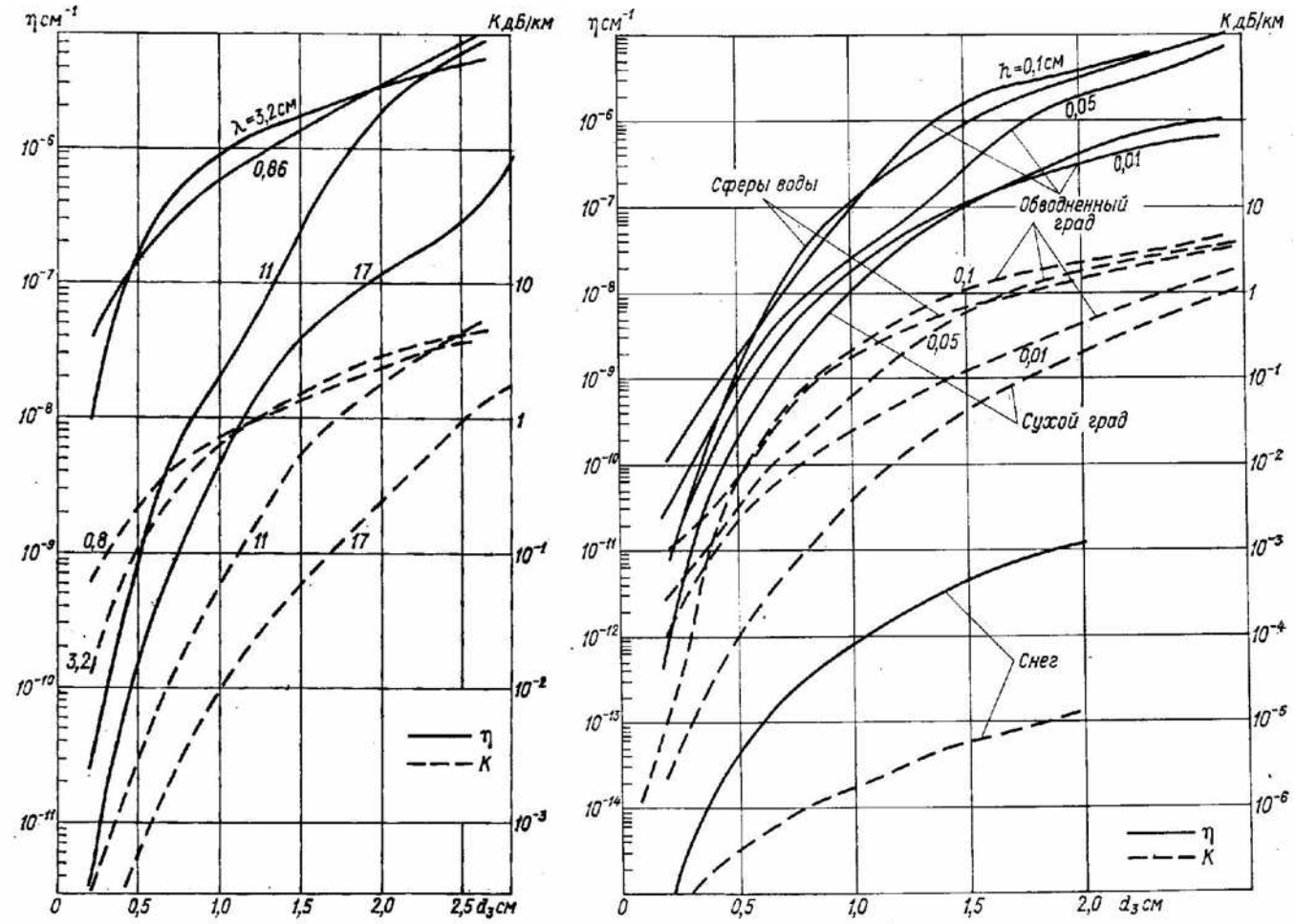


Рис. 7.7 – Зависимость радиолокационной отражаемости η и коэффициента ослабления k от среднекубического диаметра спектра гидрометеоров d_3 при μ = 2, h = 0,05 см, N = 1 м$^{-3}$ и t = 0 °С: ***а***) спектр обводненного града; ***б***) обводненный град с разной толщиной пленки воды h и снежные хлопья [15]

В системе уравнений (7.68), исключая концентрацию частиц, и, учитывая слабую зависимость $\eta_{\lambda i}$ и $k_{\lambda i}$ от температуры и μ, можно получить [25 – 27] три метода измерения среднекубического диаметра спектра рассеивающих частиц:

$$\eta_{\lambda i} / \eta_{\lambda_j} = A d_3^{\alpha}; \tag{7.69}$$

$$k_{\lambda i} / \eta_{\lambda j} = B d_3^{\beta}; \tag{7.70}$$

$$k_{\lambda i} / k_{\lambda j} = C d_3^{c}, \tag{7.71}$$

где A, α, B, β, C и c – коэффициенты, зависящие от длин волн λ_i и λ_j, диэлектрических свойств частиц и параметра μ.

С помощью выражений (7.69) – (7.70) можно определить среднекубический d_3 диаметр рассеивающих частиц [10, 24, 25], а также максимальный диаметр d_m, если воспользоваться корреляционными отношениями между ними (например, для града d_m = 2,11d_3), найденными на основе анализа экспериментального материала [26].

Реализация первого метода требует применения двухволнового МРЛ с λ_i и λ_j, на которых зависимость η от d_3 существенно отличается [24]. Например, на одной длине волны выполняются условия рассеяния, близкие к релеевским, а на другой существенно отличаются от релеевских (рис. 7.8). Для реализации второго метода λ_i и λ_j подбираются таким образом, чтобы ослабление на λ_j в облаках и осадках было пренебрежимо мало, а ослабление на λ_i было существенно (рис. 7.9).

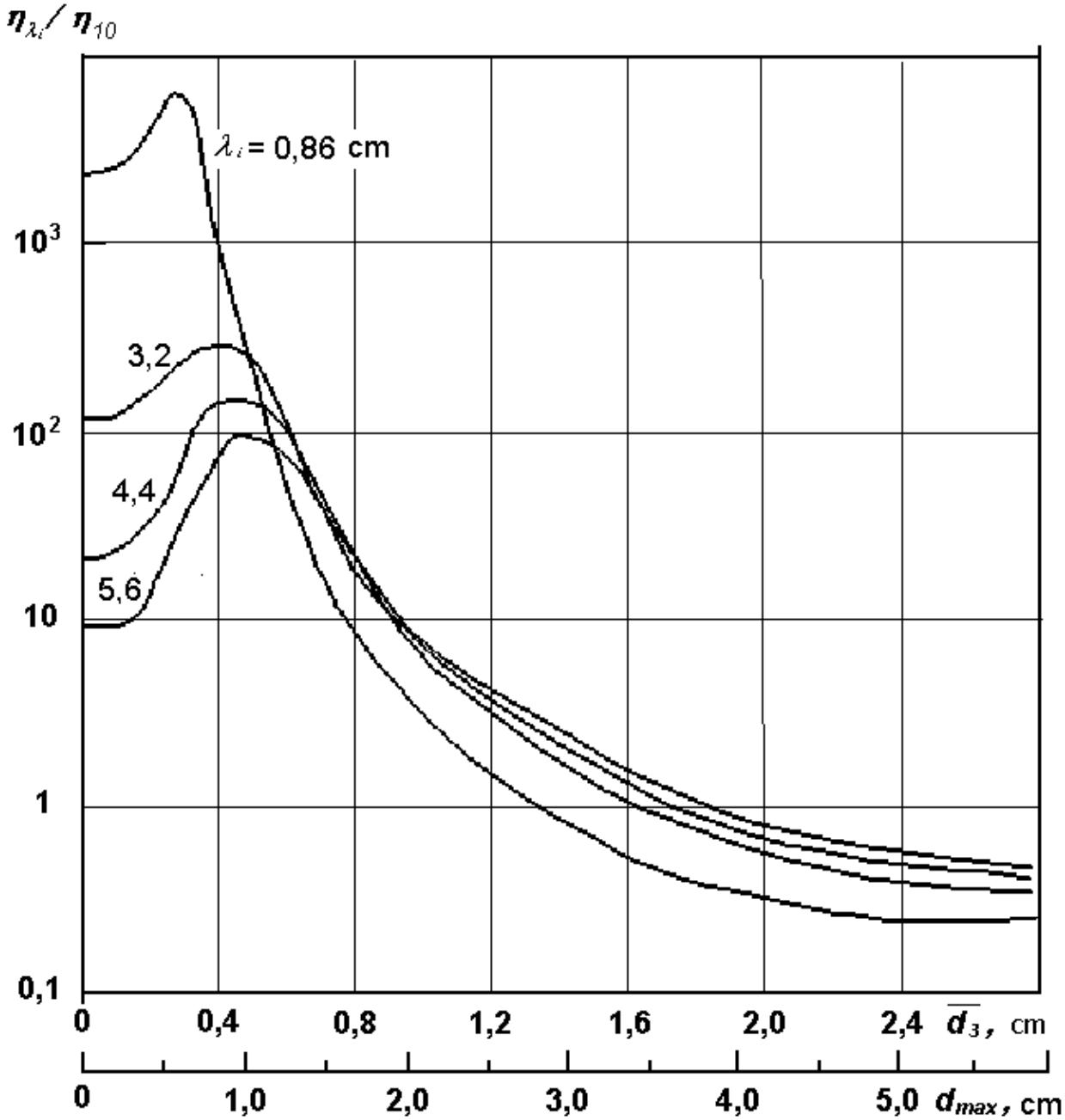


Рис. 7.8 – Зависимость $\eta_{\lambda i}/\eta_{\lambda j}$ от среднекубического $\overline{d}_3$ и максимального размера града d_{max} на указанных λ_i и λ_j = 10 см [25]

Для реализации третьего метода необходимо, чтобы ослабление на обеих длинах волн было существенным.

В случае малых частиц ($\pi d / \lambda < 0{,}13$) выражения (7.62) – (7.64) имеют точное аналитическое решение:

$$\eta_i / \eta_j = (\lambda j / \lambda i)^4 ; \tag{7.72}$$

$$k_{\lambda_i} / \eta_{\lambda j} = B \lambda_j^4 \lambda_i^{-1} d_3^{-3} ; \tag{7.73}$$

$$k_{\lambda i} / k_{\lambda j} = \lambda_j / \lambda_i , \tag{7.74}$$

где B – константа, слабо зависящая от температуры для ледяных частиц и равная $1{,}2 \cdot 10^3$ для капель воды. При λ_i = 3,2 см, и λ_j = 10 см $k_{3,2}/\eta_{10} \approx 3{,}8 \cdot 10^6 d_3^{-3}$.

В области крупных частиц ($d \sim \lambda$) отношения $\eta_{\lambda i}/\eta_{\lambda j}$, $k_{\lambda i}/\eta_{\lambda j}$ и $k_{\lambda i}/k_{\lambda j}$ имеют сложную зависимость от d_3, m и λ. Результаты расчетов по точным дифракционным формулам зависимости $\eta_{\lambda i}/\eta_{\lambda j}$ и $k_{\lambda i}/\eta_{\lambda j}$ от d_3 для различных диэлектрических свойств гидрометеоров приведены на рисунках 7.8 и 7.9.

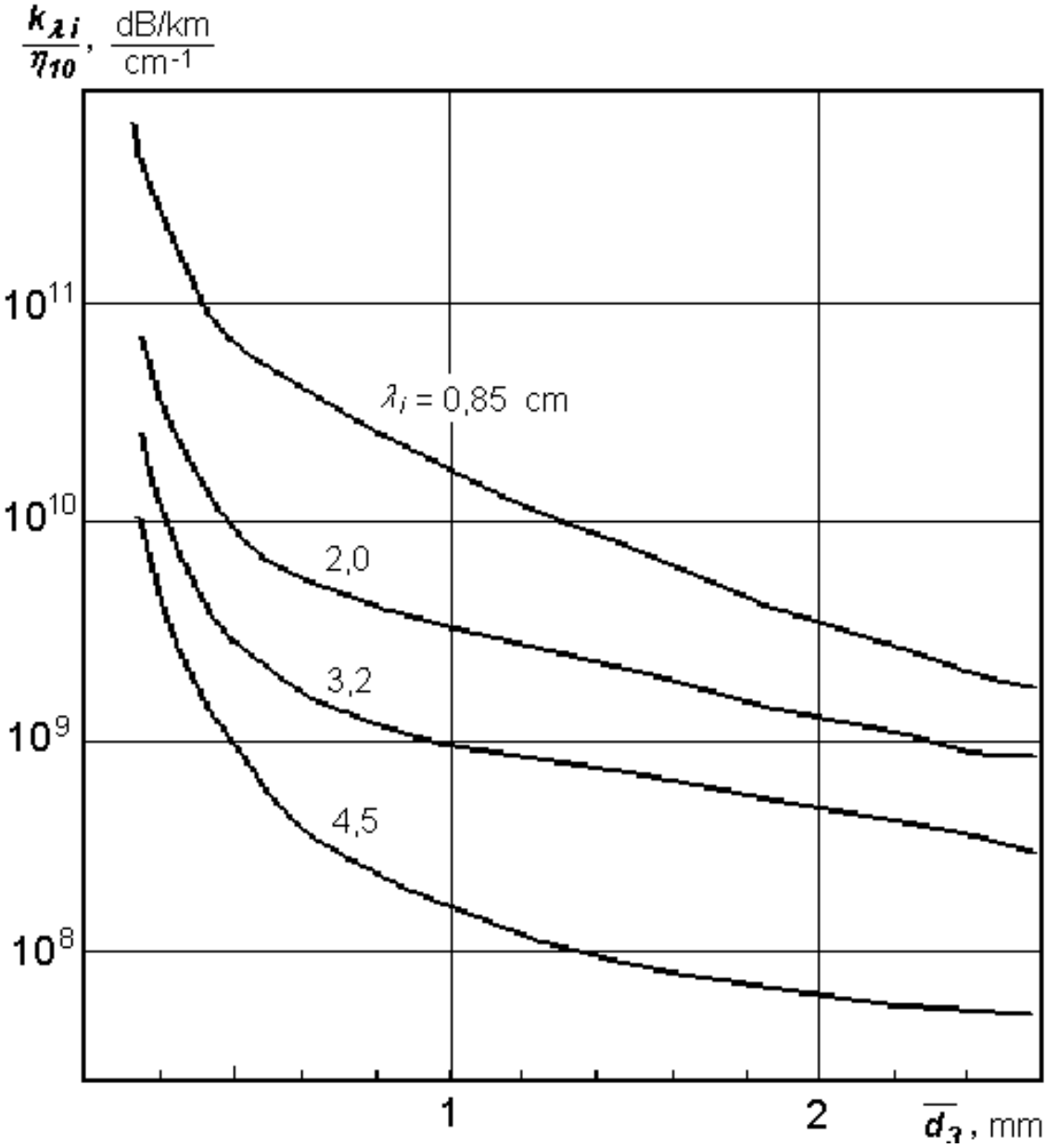


Рис. 7.9 – Связь $k_{\lambda i}/\eta_{\lambda j}$ с $\overline{d}_3$ спектра капель на указанных λ_i и λ_j = 10 см [25]

7.10 Доплеровский сдвиг частоты рассеянного поля

7.10.1 Рассеяние радиолокационного излучения гидрометеорами, движущимися радиально от МРЛ, приводит к изменению фазы и частоты радиоэха на величину

$$F_d = 2V\cos\alpha/\lambda, \tag{7.75}$$

где F_d – доплеровский сдвиг частоты; V – радиальная скорость цели относительно МРЛ; α – угол между направлением на цель и направлением ее движения.

МРЛ, которые обеспечивают измерение мощности радиоэха, его фазовую (когерентную) обработку и измерение средней доплеровской скорости $\overline{V}_d$ и среднеквадратичной ширины спектра скоростей σ_V, называют доплеровскими МРЛ (ДМРЛ).

7.10.2 ДМРЛ в предположении полного увлечения гидрометеоров воздушными потоками позволяют получить:

– поля радиальных скоростей горизонтального ветра;

– распределение по высоте скорости вертикальных потоков;

– определение вида осадков (град, дождь, снег) при углах зондирования близких к зениту;

– выделение области циклонических вихрей (мезоциклонов, смерчей);

– выделение шквальных линий, зоны повышенной турбулентности;

– локализацию зон горизонтального и вертикального сдвига ветра.

Решения этих задач базируется на измерении трехмерных полей радиальной доплеровской скорости V_r и среднеквадратичной ширины спектра скоростей σ_V.

7.10.3 Радиальное движение гидрометеоров в облаках и осадках может быть обусловлено горизонтальными и вертикальными воздушными потоками, турбулентностью и гравитационным падением гидрометеоров.

Ширина доплеровского спектра σ_V^2 определяет дисперсию радиальных скоростей гидрометров за счет разных факторов и может быть рассчитана [9, 20] из выражения:

$$\sigma_V^2 = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\left(V_i - \overline{V}\right)^2}{m-1} = \sigma_S^2 + \sigma_a^2 + \sigma_d^2 + \sigma_t^2, \tag{7.76}$$

где σ_S^2, σ_a^2, σ_d^2 и σ_t^2 – компоненты уширения спектра за счет сдвига ветра (индекс *s*), скорости вращения антенны (индекс *a*); разности скоростей гравитационного падения частиц разного размера (индекс *d*) и турбулентности (индекс *t*), соответственно.

Воздушные потоки в облаках имеют трехмерную структуру, поэтому для получения их структуры используются трех базисные доплеровские измерения, когда один и тот же объем пространства освещается тремя ДМРЛ, расположенными на некотором удалении друг от друга, или двух базисные измерения с привлечением для восстановления вертикальной составляющей потоков уравнения неразрывности. Однако на практике вместо двух– и трех базисных наблюдений используются однопунктные наблюдения с получением перечисленной выше информации при допущении однородности горизонтальных потоков и привлечением уравнения неразрывности.

Для этого используются следующие оригинальные алгоритмы обработки трехмерной информации.

7.10.4 Алгоритм Velocity-Azimuth-Display (VAD)

VAD алгоритм, впервые предложенный Лермитом и Атласом [2], позволяет получить вертикальный профиль ветра по данным о средней радиальной скорости ветра $\boldsymbol{v}_r$ на заданной высоте H, которая в случае однородного потока и малых углах обзора определяется из выражения:

$$V_r = (U \sin\beta + V \cos\beta)\cos\alpha\,, \qquad (7.77)$$

где U и V – радиальные скорости по осям X и Y; α и β вертикальный и азимутальный углы зондирования.

Измеряя V_r в двух точках конического обзора (рис. 7.10), получим систему уравнений для расчета величин U, V;

$$\left.\begin{aligned} V_{r1} &= (U \sin\beta_1 + V \cos\beta_1)\cos\alpha_1; \\ V_{r2} &= (U \sin\beta_2 + V \cos\beta_2)\cos\alpha_2 \end{aligned}\right\}. \qquad (7.78)$$

С помощью выражений (7.78) по данным конического сечения, используя значения V_{r1} и V_{r2} (на удаления r_1 и r_2) можно рассчитать значения U, V в облаке на разных высотах и построить вертикальные профили $U(H)$ и $V(H)$.

Радиальная компонента скорости ветра, измеряемая при круговом вращении антенны, зависит от азимута луча φ следующим образом:

$$V_r = W \sin\theta + U \sin\varphi \cos\theta + V \cos\varphi \cos\theta\,. \qquad (7.79)$$

В случае однородного ветра по данным измерений в равномерно распределенных по кругу точках можно получить значения $\overline{\boldsymbol{v}_r}$ и $\overline{W_r}$ с помощью дискретного преобразования Фурье:

$$\overline{V_r}(\varphi) + \overline{W_t}(\varphi)\sin\theta = \sum_{k=0}^{n-1} C_k e^{jk\varphi}\,, \qquad (7.80)$$

где C_k – комплексные коэффициенты ряда Фурье [9].

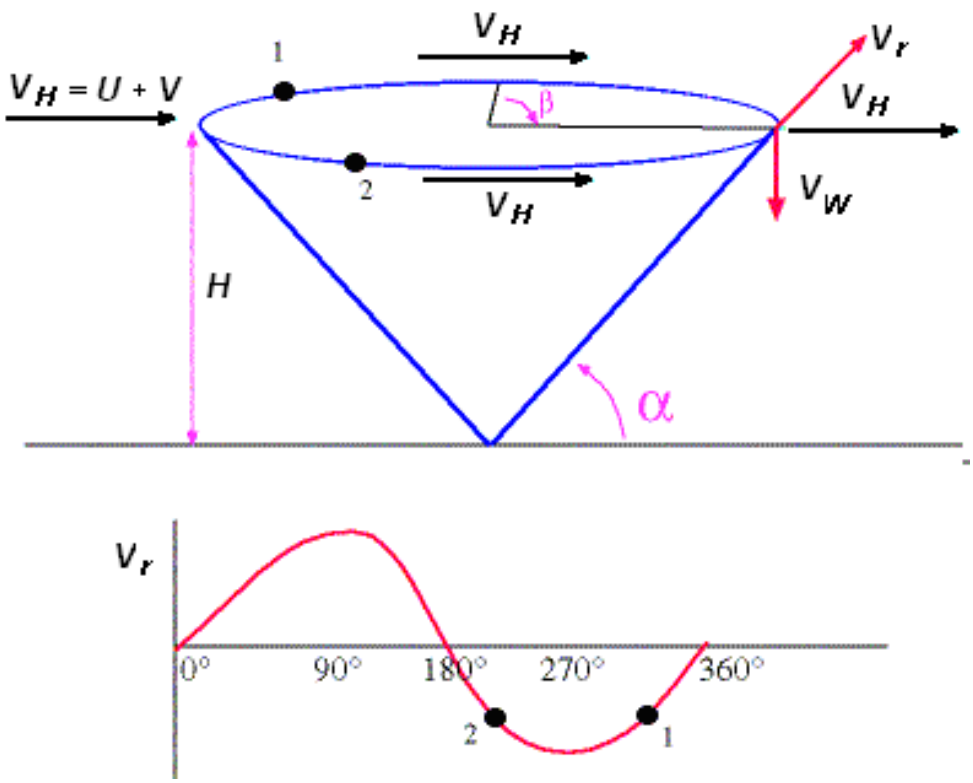


Рис. 7.10 – Схема измерения скорости ветра на заданной высоте [2]

С помощью Фурье-анализа величины $\overline{\boldsymbol{V}}_r + \boldsymbol{W}_t \sin\theta$ можно определить скорость и направление ветра, а также его деформацию:

– горизонтальная дивергенция ветра

$$divV_H \equiv \left(\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y}\right) = \frac{2}{r\cos^2\theta}\left(C_0 - W_0 \sin\theta\right); \qquad (7.81)$$

– горизонтальная скорость ветра

$$V_H = 2|C_1|\cos\theta; \qquad (7.81)$$

– направление ветра в горизонтальной плоскости

$$A = \arg C_1 - \pi; \qquad (7.82)$$

– деформация воздушных потоков

$$\frac{\partial U}{\partial X} - \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{4}{r\cos^2\theta} Re(C_2) \qquad (7.83)$$

$$\frac{\partial U}{\partial Y} + \frac{\partial V}{\partial X} = \frac{4}{r\cos^2\theta} Im(C_2) \qquad (7.84)$$

Другие важные характеристики, такие, как турбулентность, вертикальная скорость и дивергенция, не могут быть непосредственно получены с помощью метода VAD. Однако, используя уравнение неразрывности и, предполагая постоянство плотности воздуха ($\partial\rho/\partial t = 0$), можно получить вертикальную скорость, если известна величина W_0 на некоторой высоте над уровнем моря $H = H_1$:

$$\rho W_0 = exp\left(-\int_{z_1}^{z} PdH\right)\int_{z_1}^{z} Q(H)exp\left(\int_{z_1}^{z} PdH\right)dH + \rho W_0(H_1)exp\left(-\int_{z_1}^{z} PdH\right), \quad (7.85)$$

где $P(H) = -2\sin\theta / r\cos^2\theta$, а $Q(H) = 2\rho C_0 / r\cos^2\theta$.

Обычно величина W_0 берется в ясном небе в приземном слое (1 – 2 км), а для облачной атмосферы на высоте, где $W_0(H_1) = 0$.

Таким образом, с помощью одного ДМРЛ можно измерить вертикальные профили трех компонент скорости однородного в горизонтальной плоскости ветра.

7.10.5 Алгоритм Volume Velocity Processing (VVP)

Алгоритм VVP предусматривает трехмерный анализ однородного поля ветра по многим коническим сечениям и обеспечивает получение 11 параметров ветра, включая данные о скорости и направлении ветра, дивергенции, конвергенции и деформации воздушных потоков [9].

Если воздушный поток однороден в горизонтальной плоскости, то метод VVP для объема размером 30 км по дальности, 30° по азимуту и 1° по углу возвышения позволяет определить даже слабую мезомасштабную дивергенцию с точностью порядка 10^{-5} $с^{-1}$.

7.10.6 Алгоритм Uniform Wind Technique

Алгоритм UWT позволяет измерить [2, 9] три компоненты скорости однородного по горизонтали воздушного потока с помощью одного ДМРЛ на основе трехмерной модели линейного ветра по данным измерений VAD по многим коническим сечениям (например, с шагом по азимуту 1 градус и 500 м по вертикали). Для этого алгоритма, доплеровские данные на горизонтальном уровне выделены в равномерную сетку с заданным шагом порядка 20 км. Для каждой точки сетки, компонента средней радиальной скорости рассчитываются по составляющий средней доплеровской скорости, а тангенциальная (или азимутальная) компоненты скорости получаются из азимутального изменения доплеровских данных. В результате для каждой точки сетки может быть получен второй горизонтальный вектор ветра.

Данные о направлении и скорости ветра в виде векторов, указывающих направление с оперением, соответствующим скорости ветра (короткие – 5 м/с, длинные 10 м/с), отображаются на картах радиолокационной отражаемости, как показано на рисунке 7.11.

Циклоническое вращение в мезоциклонах позволяет судить о направлении ветра даже на линии нулевой скорости ветра. Направление ветра соответствует вектору, перпендикулярному радиальной линии,

соединяющей позицию ДМРЛ с линией нулевой скорости ветра, направленному к ДМРЛ.

Преимущество алгоритма UWT в сравнении с VVP методом состоит в том, что можно получить горизонтальное распределение вектора ветра, а не только один глобальный вектор. Недостатком алгоритма является допущение однородности поля ветра, которое может отличаться от реального поля ветра, особенно в случае грозоградовых облаков, в которых имеет место явно неоднородная структура ветра.

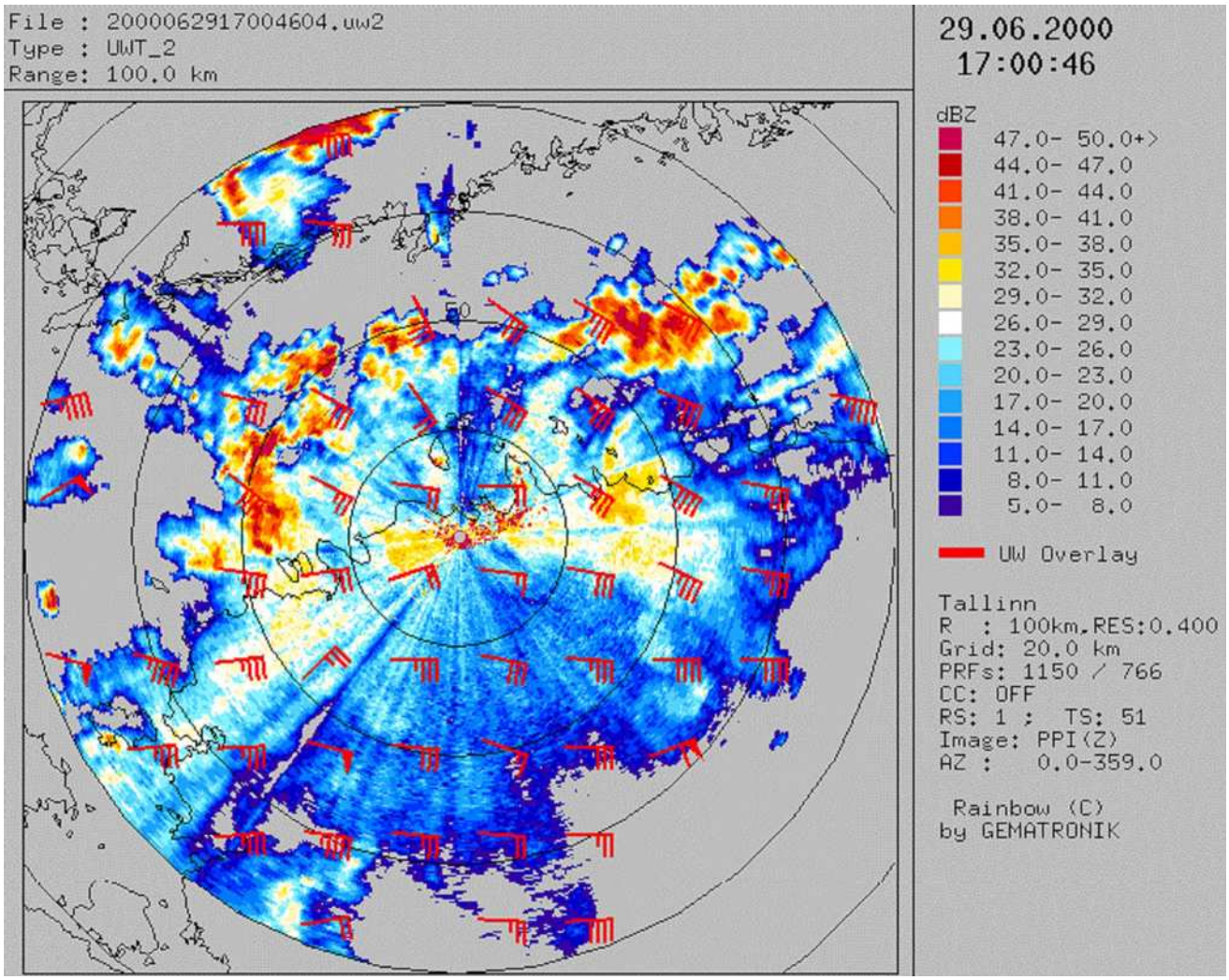


Рис. 7.11 – Пример карты, получаемой методом UWT [9]

Методы и алгоритмы обработки однобазисной доплеровской информации для получения основных выходных продуктов ДМРЛ, на основе которых осуществляется обнаружение смерчей, торнадо, шквальных линий, включая получение:

– карт радиальной скорости в заданном коническом сечении;

– карт средней радиальной скорости V_r в вертикальном сечении;

– карт среднеквадратичной ширины доплеровского спектра в заданном коническом сечении;

– профиля ветра, рассчитанные методом VAD;

– карты дивергенции воздушных потоков, полученные методом VVP;

– карты поля вектора скорости ветра в горизонтальной плоскости, восстановленные по методу UWT на фоне карт отражаемости.

7.10.7 Обнаружение зон турбулентности

Скорости движения воздуха и гидрометеоров имеют большую пространственно-временную изменчивость (особенно в конвективных облаках) и определяются совместным действием двух факторов:

а) крупномасштабных упорядоченных движений (потоков);

б) мелкомасштабных турбулентных движений разного масштаба.

Турбулентность среды обычно характеризуют значениями:

– среднеквадратичной шириной спектра пульсаций компонент скорости по горизонтали и вертикали σ_V и σ_W, измеряемой в м/с;

– коэффициента турбулентности K, измеряемого в м^2/с;

– скорости диссипации кинетической энергии турбулентности ε, измеряемой в см^2/с^3.

Значения σ_V и σ_W зависит не только от турбулентности, но и сдвига ветра в объеме зондирования, дисперсии скоростей радиального движения гидрометеоров, а также скорости движения антенны по азимуту или углу места (за счет изменения ансамбля гидрометеоров в объеме зондирования от импульса к импульсу).

Значение K для локальной изотропной турбулентности может быть определено по модели Ричардсона:

$$K = a\varepsilon^{1/3} L_T^{4/3}, \tag{7.86}$$

где a – безразмерный коэффициент (≈ 0,2); L_T – масштаб турбулентности.

Скорость диссипации турбулентной энергии ε, характеризует энергию, теряемую единицей массы воздуха за единицу времени из-за пульсаций скорости ветра

$$\varepsilon = \alpha s^{3/2}(k) k^{5/2}, \tag{7.87}$$

где α – безразмерный коэффициент, равный для пульсаций по продольной компоненте 53,4, а по вертикальной 35,3; k – автокорреляционная функция пульсаций продольной компоненты пульсаций скорости.

В облаках и свободной атмосфере турбулентные зоны чередуются со спокойными. Под турбулентными зонами обычно понимают области, где среднеквадратичные пульсации компонент скорости по горизонтали

и вертикали σ_V и σ_W превосходят 0,1 м/с. Наибольшая турбулентность отмечаются в кучево-дождевых облаках (табл. 7.3).

Таблица 7.3 – Характерные значения σ_V, σ_W, K и ε в облаках разных типов [28]

Тип облаков	σ_V, м/с	σ_W, м/с	K, м^2/с	ε, см^2/с^3
Кучевые (Cu)	0,5 ÷ 1,0	0,5 ÷ 1,0	1 ÷ 120	20 ÷ 300
Мощно-кучевые (Cu Cong)	1,0 ÷ 3,0	1,0 ÷ 3,0	200 ÷ 300	50 ÷ 500
Кучево-дождевые (Cb)	1,0 ÷ 6,0	1,0 ÷ 6,0	50 ÷ 300	≥ 1500
Слоисто-дождевые (Ns - Sc)	0,1 ÷ 0,9	0,2 ÷ 1,5	10 ÷ 15	4 ÷ 16
Слоисто-кучевые (Sc)	0,1 ÷ 0,7	0,1 ÷ 0,9	20 ÷ 25	8 ÷ 30

7.11 Деполяризация рассеянного поля

7.11.1 Рассеяние радиоволн несферическими и диэлектрически неоднородными гидрометеорами приводит к деполяризации рассеянного поля, разнице фаз между компонентами с разной поляризацией и т.д. Применение МРЛ с поляризационной обработкой сигналов расширяет возможности классификации вида гидрометеоров, основанной на использовании поляризационных параметров радиоэха.

Появлению в рассеянном поле поперечно поляризованной компоненты обусловлено тем, что падающее поле в несферической частице индуцирует ортогональные дипольные моменты, ориентированные по осям эллипсоида, сфероида и т. п. Излучение диполей, ориентированных в плоскости, отличной от плоскости поляризации падающего поля, приводит к формированию деполяризованной компоненты.

7.11.2 Степень деполяризации рассеянного поля определяется степенью несферичности частиц, их диэлектрическими свойствами и ориентацией относительно плоскости поляризации первичного поля. Она характеризуется соотношением поперечно-поляризованной компоненты радиоэха к основной, называемым *линейным деполяризационным отношением* $L_{DR} = 10lg\left(\frac{Z_{HV}}{Z_{HH}}\right)$, (где Z_{HV} и Z_{HH} – значения отражаемости при вертикальной и горизонтальной линейной поляризациях).

При реальных соотношениях осей, встречающихся в природе, для системы хаотически ориентированных капель воды интенсивность поперечно-поляризованной компоненты Z_{HV} не превышает 10% от интенсивности основной компоненты Z_{HH}, а для аналогичной системы

ледяных частиц не превышает 1%. В случае сухого града несферической формы деполяризация рассеянного поля незначительна. Она возрастает при обводнении градин в процессе их мокрого роста и таяния, оставаясь сравнимой со степенью деполяризации, создаваемой крупнокапельными ливневыми дождями.

7.11.3 Радиолокационная отражаемость осадков зависит от плоскости поляризации и характеризуется *дифференциальной отражаемостью* $Z_{DR} = 10lg\left(\frac{Z_{HH}}{Z_{VV}}\right)$, которая может измеряться путем чересперидного переключения плоскости поляризации излучаемой волны и принимаемого отраженного сигнала.

Значение Z_{DR} связано с размером, формой, плотностью и пространственной ориентацией гидрометеоров и совместно с отражаемостью Z позволяет распознавать дождь, ледяную крупу, снег, мокрый град, мокрый снег и кристаллы [20, 29, 30]. Однако информативность Z_{DR} снижается за счет больших различий в ослаблении радиоволн с горизонтальной и вертикальной поляризацией, слабой упорядоченности ориентации градин (вследствие их вращения), а также влияния состояния поверхности градин (сухая, обводненная) на значения Z_{DR}. Для мелкого града характерны значения $-1 < Z_{DR} < 1$, для крупного града $-1 < Z_{DR} < 4$, а для дождя $0 < Z_{DR} < 4$.

7.11.4 Радиоволны с горизонтальной и вертикальной поляризацией имеют разные скорости распространения в анизотропной среде и поэтому разные фазовые добавки. Это приводит к отличию начальной фазы радиоэха на горизонтальной и вертикальной поляризациях. *Дифференциальная фаза* $\Phi_{DP} = \Phi_{HH} - \Phi_{VV}$ (°) или *удельная дифференциальная фаза* $K_{DP} = \frac{\Phi_{DP}(R_1) - \Phi_{DP}(R_2)}{2(R_2 - R_1)}$ (°/км) нарастает на пути распространения в осадках.

Значение Φ_{DP} увеличивается с уменьшением длины волны, увеличением водности и интенсивности осадков и может использоваться для их измерения с помощью корреляционных соотношений. Значение K_{DP} также зависит от формы, ориентации частиц и их агрегатного состояния (для снега ее значение меньше, чем для дождя). Гораздо меньшая, чем у Z_{DR}, чувствительность к распределению капель и градин по размерам, независимость от ослабления в осадках и прямо пропорциональная зависимость ее величины от концентрации частиц делают применение K_{DP} очень эффективным для измерения осадков.

7.11.5 Для распознавания типа радиолокационных целей часто используется *коэффициент взаимной корреляции* между горизонтально и вертикально ориентированными компонентами радиоэха $|\rho_{HV}| = \frac{\langle Z_{VV} Z_{HH}^{*} \rangle}{\sqrt{\langle |Z_{HH}|^2 \rangle \langle |Z_{VV}|^2 \rangle}}$). Для большинства гидрометеоров $|\rho_{HV}|$) ≈ 1,0, а для радиолокационных целей не метеорологического происхождения (местников, насекомых, птиц, искусственных отражателей $|\rho_{HV}| < 1$. Условие $|\rho_{HV}| < 1$ также выполняется в тающем граде, снеге и дожде, содержащем сплюснутые капли размером 6 – 7 мм [20].

7.11.6 Использование МРЛ с круговой и эллиптической поляризацией позволяет расширить число измеряемых поляризационных параметров осадков за счет такого высокоинформативного параметра, как *круговое деполяризационное отношение* $C_{DR} = 10\lg\left(\frac{Z_{LL}}{Z_{LR}}\right) = 10\lg\left(\frac{Z_{RR}}{Z_{LR}}\right)$.

Величина C_{DR} высокочувствительна к среднему размеру капель и, следовательно, и к интенсивности дождя. Значения C_{DR} для моросящего дождя равны -35 ÷ 30 dB и увеличиваются по мере усиления дождя до -15 dB. В крупном граде C_{DR} достигает значений -3 dB, а в сухом снегопаде не превышает -22 dB.

Измерение перечисленных поляризационных характеристик расширяют возможности МРЛ и обеспечивают повышение точности измерения характеристик осадков за счет:

– автоматической калибровки МРЛ, основанной на независимости удельной дифференциальной фазы Φ_{DP} от потенциала МРЛ;

– надежной коррекции сигнала на ослабление в осадках за счет независимости K_{DP} от величины ослабления дифференциальной фазы;

– эффективной фильтрации сигналов от не метеорологических целей на основе свойств модуля коэффициента корреляции $|\rho_{HV}|$);

– автоматического распознавания типа гидрометеоров (града, дождя и снега), выявление зон обледенения, повышения точности измерения осадков как летних, так и зимних, основанных на совокупной оценке по данным измерений комплекса параметров: Z, Z_{DR}, K_{DP}, $|\rho_{HV}|$).

В таблице 7.4 даются типичные значения поляризационных характеристик для широкого набора радиолокационных целей, а в таблице 7.5 – типичные значения поляризационных характеристик гидрометеоров.

По данным таблиц 7.4 и 7.5 можно оценить тип гидрометеоров в разных частях облака, как показано на рисунках 7.24 и 7.25.

Таблица 7.4 – Значения поляризационных параметров радиоэха для различных радиолокационных целей [33].

Параметры (размерность)	Формула расчета	Облако	Морось	Дождь	Снег	Тающий снег	Град	Насекомые	Птицы	Самолет	Местники	Требуемая точность
Множитель отражаемости Z (dBZ)	$Z = 10\,lg \sum_{i=1}^{n} N_i D_i^6$	-30 ÷ 20	10 ÷ 20	20 ÷ 55	10 ÷ 40	< 45	40 ÷ 77	-30 ÷ 15	-10 ÷ 25	10 ÷ 50	0 ÷ 97	< 1 dB
Дифференциальная отражаемость, Z_{DR} (dB)	$z_{DR} = 10\,log_{10}\left(\frac{z_h}{z_v}\right)$	0	0	0,5 ÷ 4	0 ÷ 3	0 ÷ 3	-0,5÷0,5	-5 ÷ 10	-2 ÷ 3		~ 0	< 0,1 dB
Дифференциальная фаза, ϕ_{DP} (°)	$\phi_{DP} = \phi_{HH} - \phi_{VV}$										~1	< 5°
Удельная дифференциальная фаза, K_{DP} (°/km)	$K_{DP} = \frac{\phi_{DP}(r_2) - \phi_{DP}(r)}{2(r_2 - r_1)}$	0	0	0 ÷ 10	0 ÷ 2	0 ÷ 2	-1 ÷ 1	+	+			< 1°/km
Круговое деполяризационное отношение, C_{DR} (dB)	$C_{DR} = 10\,log_{10}\left(\frac{z_{II}}{z_{\perp}}\right)$	< -30	< -30	< -20	< -30			~ -20	~ 0	~ 0		< 1 dB
Линейное деполяризационное отношение, L_{DR} (dB)	$L_{DR} = 10\,log_{10}\left(\frac{z_{HV}}{z_{HH}}\right)$	< -34	< -34	-27 ÷ -34		-13 ÷ -18	-20÷-10					< 1 dB
Коэффициент взаимной корреляции $\lvert\rho_{HV}\rvert$	$\rho_{HV} = \frac{\langle s_{VV} s_{HH}^* \rangle}{\langle \lvert s_{HH}\rvert^2 \rangle^{1/2} \langle \lvert s_{VV}\rvert \rangle}$	< 0,9	< 0,9	> 0,95	0,8 ÷ > 0,95		0,9 ÷ 0,95	0,8	0,9		< 0,8	~ 0,005

Таблица 7.5 – Типичные значения поляризационных характеристик разных гидрометеоров [29]

Тип гидрометеоров	C_{DR}, dB	Z_{DR}, dB	L_{DR}, dB
Облачные капли	< -40	0	< - 50
Капли дождя малые→большие	-40 → -15	0,5 → 4,0	-36 → -24
Снежинки	-40 → -20	1 → 2	≈ -25
Тающий лед	-14 → -7	2 → 3	≈ -20
Крупа	≈ -20	≈ 0,5	-26 → -20
Град	> -5	-1 → 0	> -20

Однако вариации характеристик гидрометеоров (их температуры, формы, степени обводнения града и снежинок и др.), а также малые пределы вариации измеряемых параметров приводят к неоднозначности. Например, значение Z_{DR} для крупного, мелкого града и дождя варьирует в пределах от -1 до 4 dB, а значение $|\rho_{HV}|$) ≈ 0,8 – 0,9 для большинства гидрометеоров. Это требует высокой точности калибровки МРЛ и совершенствования поляризационных методов распознавания вида гидрометеоров.

7.12 Радиолокационные методы обнаружения града

Современные автоматизированные МРЛ с доплеровской и поляризационной обработкой информации обеспечивают измерение множества характеристик облаков и реализацию различных методов обнаружения града в них, основанных:

– на зависимости отражаемости облаков от размера гидрометеоров;

– частотной зависимости рассеяния радиолокационного излучения гидрометеорами разных размеров;

– деполяризации отраженного сигнала, связанной с несферичностью и диэлектрической неоднородностью гидрометеоров;

– доплеровском сдвиге частоты отраженного сигнала, связанном с движением гидрометеоров;

– зависимости интенсивности радиотеплового излучения гидрометеоров от их размера, фазового состояния и температуры и др.

Применение последних двух физических принципов обнаружения града в этом Руководстве не рассматриваются вследствие того, что,

несмотря на научную значимость, они малопригодны для оперативного применения:

– доплеровские методы получения размера и спектра частиц применимы только в режиме зондирования в зенит и близко к нему [33];

– радиолокационно-радиометрический метод позволяет локализовать области мокрого и сухого града (по соотношению радиояркостной температуры и отражаемости облаков), но не оперативен из-за необходимости медленного обзора пространства в режиме накопления радиотеплового излучения облаков [34].

7.12.1 Одноволновые методы

Наиболее простыми радиолокационными показателями градоопасности облаков являются параметры, указывающие на наличие в них важнейших условий образования града: высокое водосодержание переохлажденной части и возможность появление кристаллической фазы. Такие условия формируются в мощных кучево-дождевых облаках с интенсивными восходящими потоками, проникающими до больших высот и могущими поддержать растущие градины в области отрицательных температур длительное время.

Первые попытки радиолокационного обнаружения града показали, что вероятность выпадения града из облаков повышается с увеличением их:

– максимальной радиолокационной отражаемости (Z_m, dBZ);

– высоты верхней границы радиоэха (H_B, км);

– высоты верхней границы повышенного радиоэха с отражаемостью $\Delta Z = (Z_m - 10)$ dBZ ($H_{\Delta Z}$, км);

– высоты верхней границы изолиний отражаемости $Z = 45$ и $Z = 55$ dBZ (H_{Zi}, км) и степени переохлаждения на этих высотах ($t_{Hв}$, $t_{\Delta Z}$ и t_{Zi}, ^{o}C).

При этом высокое значение отражаемости Z_m характеризует наличие повышенной водности облака, низкая температура на уровнях повышенных значений Z_m ($t_{\Delta Z}$ и t_{Zi}) свидетельствует о расположении зоны повышенной водности в области температур, благоприятных для роста града, а низкое значение $t_{Hв}$ – о достижении вершиной облака температуры спонтанной кристаллизации переохлажденных капель и роста кристаллов, на которых могут образовываться зародыши града.

На практике вместо температурных характеристик $t_{Hв}$, $t_{\Delta Z}$ и t_{Zi} удобнее пользоваться измеряемыми на МРЛ высотами $H_в$, $H_{\Delta\eta}$ и H_η. Однако их значения имеют региональный и сезонный ход. Для исключения этого в [10, 35] показана целесообразность измерения вертикальной протяженности переохлажденного слоя облаков, и в частности,

превышений над уровнем изотермы 0 °С высот $H_в$, $H_{\Delta Z}$ и H_{Zi}: ($\Delta H_в = H_в - H_0$), ($\Delta H_{\Delta Z} = H_{\Delta Z} - H_0$) и $\Delta H_{Zi} = (H_{Zi} - H_0)$, соответственно.

Значения $\Delta H_в$, $\Delta H_{\Delta Z}$ и ΔH_{Zi} хорошо коррелируют с температурами $t_{Hв}$, $t_{\Delta Z}$ и t_{Zi}, так как в градовых облаках вертикальный градиент температуры близок к влажно адиабатическому ($dt/dH = \gamma_{ва}$ = -6,5 °С/км).

Наиболее информативными и удобными для применения в оперативной практике показателями градоопасности облаков из этой группы параметров являются Z_m и ΔH_{Zi} (например, ΔH_{45} и ΔH_{55}), измеренные на 10 см диапазоне [34]. Вероятность выпадения града повышается с увеличением значений Z_m и ΔH_{45}. На этом базируется ряд методов оперативной оценки градоопасности облаков. На стадиях образования, роста и начала выпадения града значения Z_m увеличиваются и превышают 50 dBZ, достигая в случае крупного града 75 dBZ, а значения ΔH_{45} обычно превышают 3 км, а на стадии завершения выпадения града значения ΔH_{45} могут быть и менее этого значения.

7.12.1.1 Вероятностно-статистический метод

Несмотря на высокую информативность рассмотренных выше параметров Z_m, ΔH_{45} и ΔH_B ни один из этих параметров не может однозначно характеризовать градоопасность облаков, так как имеются области неоднозначности, в которых могут наблюдаться как ливневые, так и градовые облака. Это можно видеть на рисунке 7.12, на котором представлены плотности распределения и вероятности впадения интенсивных ливневых осадков и града. Из рисунка 7.12 следует, что в интервале значений $45 < Z_m < 64$ dBZ, $1{,}2 < \Delta H_{45} < 4{,}5$ км и $2{,}8 < \Delta H_B < 8{,}5$ км на земле могут наблюдаться как ливневые осадки, так и град.

Для устранения этой неоднозначности необходимо использовать комплекс параметров. С этой целью на основе теоремы вероятности несовместных гипотез Байеса для пары гипотез «облако градовое» и «облако неградовое» разработан [35] вероятностно-статистический метод расчета вероятности выпадения града P_H:

$$P_H = \frac{1}{1+\prod_{i+1}^{n}\frac{\rho_R(X_i)}{\rho_H(X_i)}} \qquad (7.88)$$

где $\rho_R(X_i)$ и $\rho_Г(X_i)$ – условные плотности распределения параметра X_i в случае неградовых и градовых облаков, соответственно, построенные по статистическим обеспеченным выборкам данных измерений параметров X_i множества градовых и неградовых (ливневых) облаков.

В качестве наиболее информативных выбраны параметры Z_m, ΔH_{45} и ΔH_B. При этом выражение (7.88) принимает вид:

$$P_H = \frac{1}{1 + \frac{\rho_R(Z_m)}{\rho_H(Z_m)} \frac{\rho_R(\Delta H_{45})}{\rho_H(\Delta H_{45})} \frac{\rho_R(\Delta H_B)}{\rho_H(\Delta H_B)}} \qquad (7.89)$$

Функции $\rho_R(X_i)/\rho_H(X_i)$ можно представить в аналитическом виде:

$$\frac{\rho_R(X_i)}{\rho_H(X_i)} = AX_i^b, \qquad (7.90)$$

где A и b – константы аппроксимации, найденные путем аппроксимации экспериментальных данных, представленных на рисунке 7.12:

$$\frac{\rho_R(Z_m)}{\rho_H(Z_m)} = 9 \cdot 10^{13} Z_m^{-8}; \qquad \frac{\rho_R(\Delta H_{45})}{\rho_H(\Delta H_{45})} = 6{,}84 \cdot 10^3 \Delta H_{45}^{-8}.$$

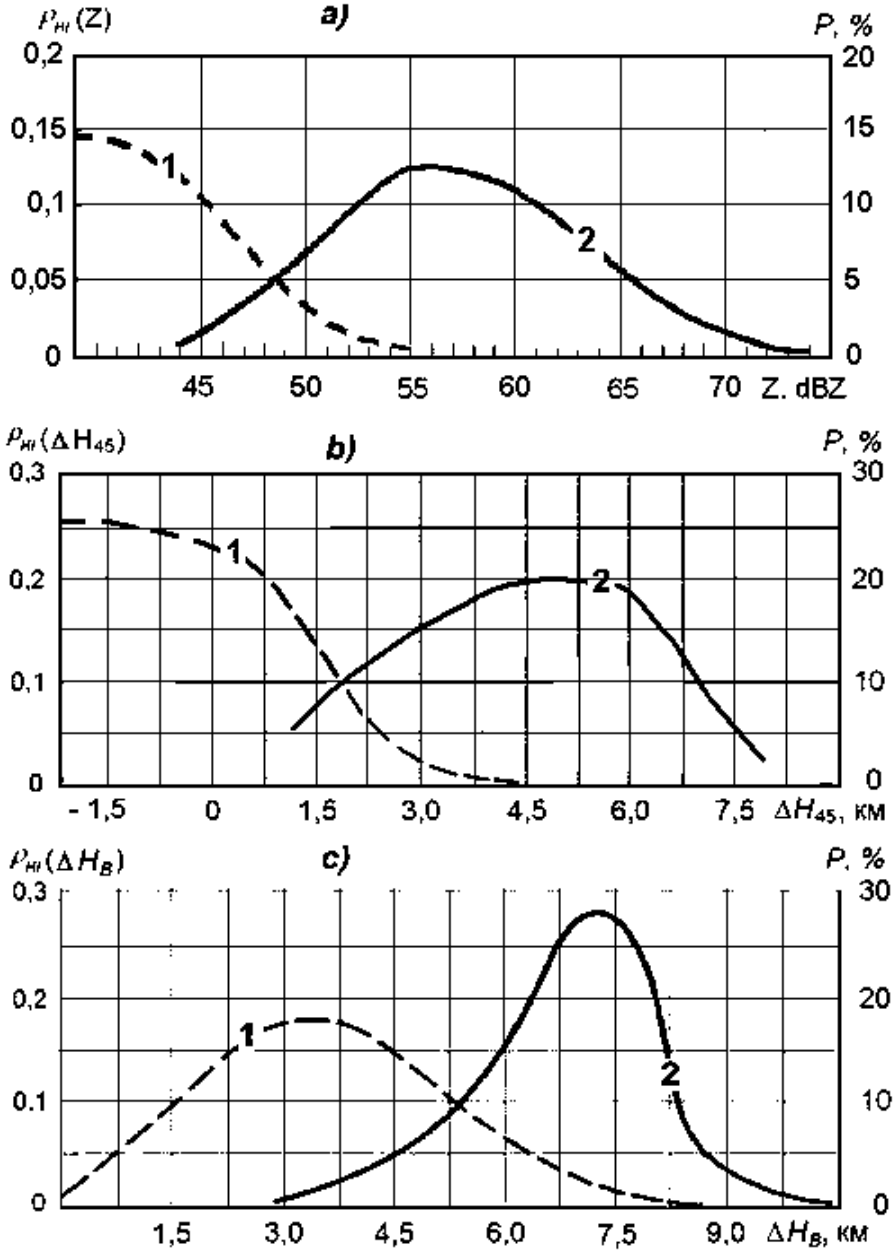


Рис. 7.12 – Условные плотности распределения ливневых (1) и градовых осадков (2) в зависимости от значений Z_m, ΔH_{45} и ΔH_B [35]

С учетом значений $\frac{\rho_R(\boldsymbol{x}_i)}{\rho_H(\boldsymbol{x}_i)}$, отбрасывая менее информативный параметр ΔH_B, получены новые комплексные параметры для распознавания градовых облаков:

$$Y_1 = \frac{\rho_R(Z_m)}{\rho_H(Z_m)} \frac{\rho_R(\Delta H_{45})}{\rho_H(\Delta H_{45})} = 3 \cdot 10^{17} (Z_m \cdot \Delta H_{45})^{-8}, \quad (7.91)$$

$$Y_2 = lg\, Y_1 = lg \frac{\rho_R(Z_m)}{\rho_H(Z_m)} \frac{\rho_R(\Delta H_{45})}{\rho_H(\Delta H_{45})} = 17{,}48 - 8\, lg(Z_m \cdot \Delta H_{45}), \quad (7.92)$$

с решающими правилами: $Y_1 < 1$ или $Y_2 < 0$ – облако градовое; $Y_1 > 1$ или $Y_2 > 0$ – облако неградовое (ливневое).

Экспериментальная проверка метода показала, что надежность распознавания градовых и ливневых облаках достигает 96% при его реализации на длине волны 10 см, на которой нет искажения информации за счет ослабления радиоволн (как это наблюдается на λ = 3,2 см) и особенности рассеяния на λ = 10 см позволяют лучше отличать крупнодисперсные облака от мелкодисперсных.

Функция Y_2 имеет тот же вид, что и дискриминантная функция Y_3 для разделения градовых и ливневых облаков, построенная из линейной комбинации радиолокационных параметров:

$$Y_3 = 1{,}223 Z_m + 0{,}507 \Delta H_{45} + 0{,}964 Hв, \quad (7.83)$$

с решающим правилом: $Y_3 > 50$ – облако градовое, $Y_3 < 50$ – неградовое.

Методы квазилинейной дискриминантной функции, рассмотренные в [36], полиномиальных разделяющих функций и многомерного анализа также сводятся к получению разделяющих функций из линейных, двух, трех– и многомерных комбинаций вышеперечисленных предикторов, которые можно получить из рассмотренных методов путем преобразования координат.

7.12.1.2 Критериальный метод

Наиболее простыми для оперативного применения являются следующие методы оценки градоопасности облаков на основе критериальных значений параметров Z_m и ΔH_{45} [38]:

а) вероятность выпадения града P_H может оцениваться по измеренным значениям Z_m и ΔH_{45} с помощью рисунка 7.13*;*

б) разделение ливневых, градоопасных, градовых и сверхмощных градовых облаков может осуществляться по измеренным значениям Z_m и ΔH_{45}, с помощью рисунка 7.14;

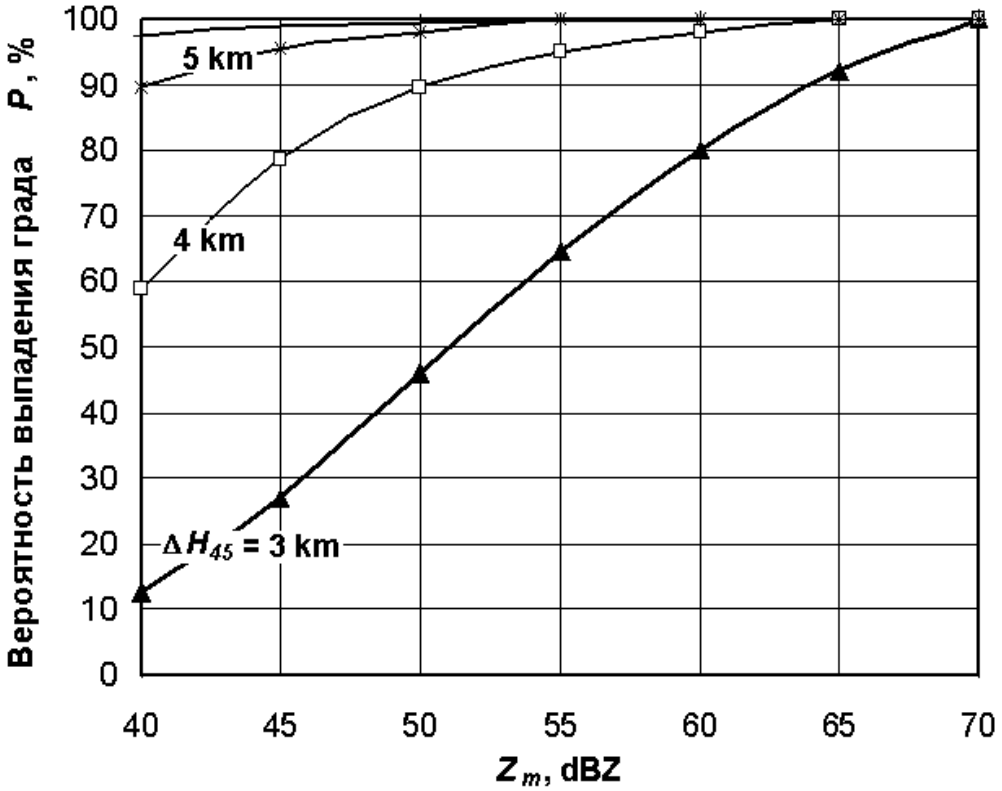


Рис. 7.13 – Вероятность выпадения града P_H в зависимости от Z_m при указанных значениях ΔH_{45} [38]

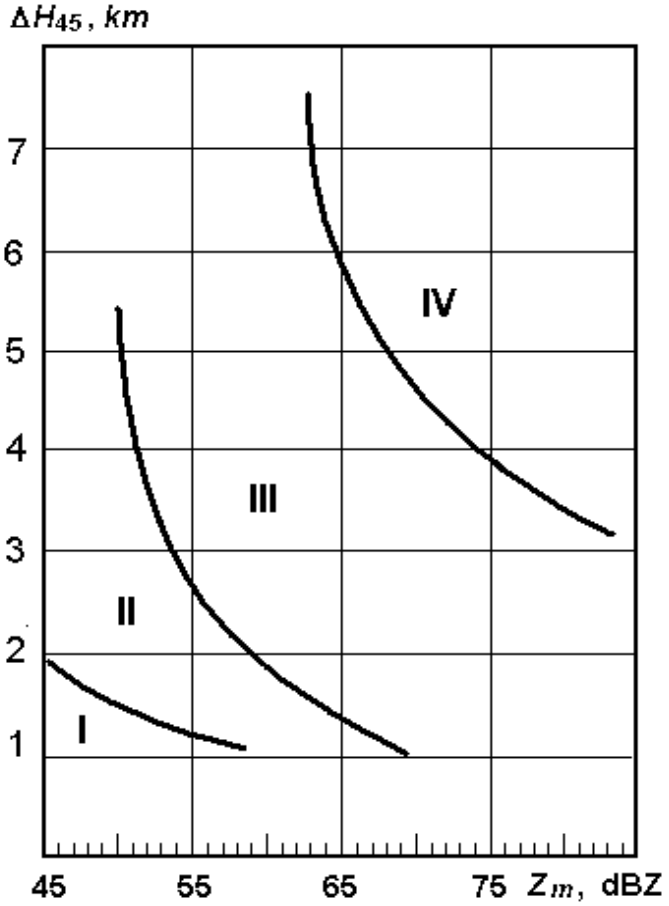


Рис. 7.14 – График разделения области ливневых (I), градоопасных (II), градовых (III) и мощных градовых (IV) облаков по значениям Z_m и ΔH_{45} [38]

в) в качестве эффективного параметра для разделения градовых и градоопасных облаков предлагается также использовать произведение ΔH_{45} и Z_m, так как это произведение характеризует наличие высокого содержания воды в области отрицательных температур (т.е. в зоне роста града). Вероятность выпадения града P_H быстро увеличивается с увеличением произведения $\Delta H_{45} \cdot Z_m$ (рис. 7.15). Аналитически эту зависимость можно представить выражением:

$$P_H = 1{,}25(\Delta H_{45} \cdot Z_m) - 145. \qquad (7.84)$$

Облака со значением $\Delta H_{45} \cdot Z_m > 160$ могут считаться градовыми, а из облаков с $\Delta H_{45} \cdot Z_m > 400$ выпадает крупный град [38].

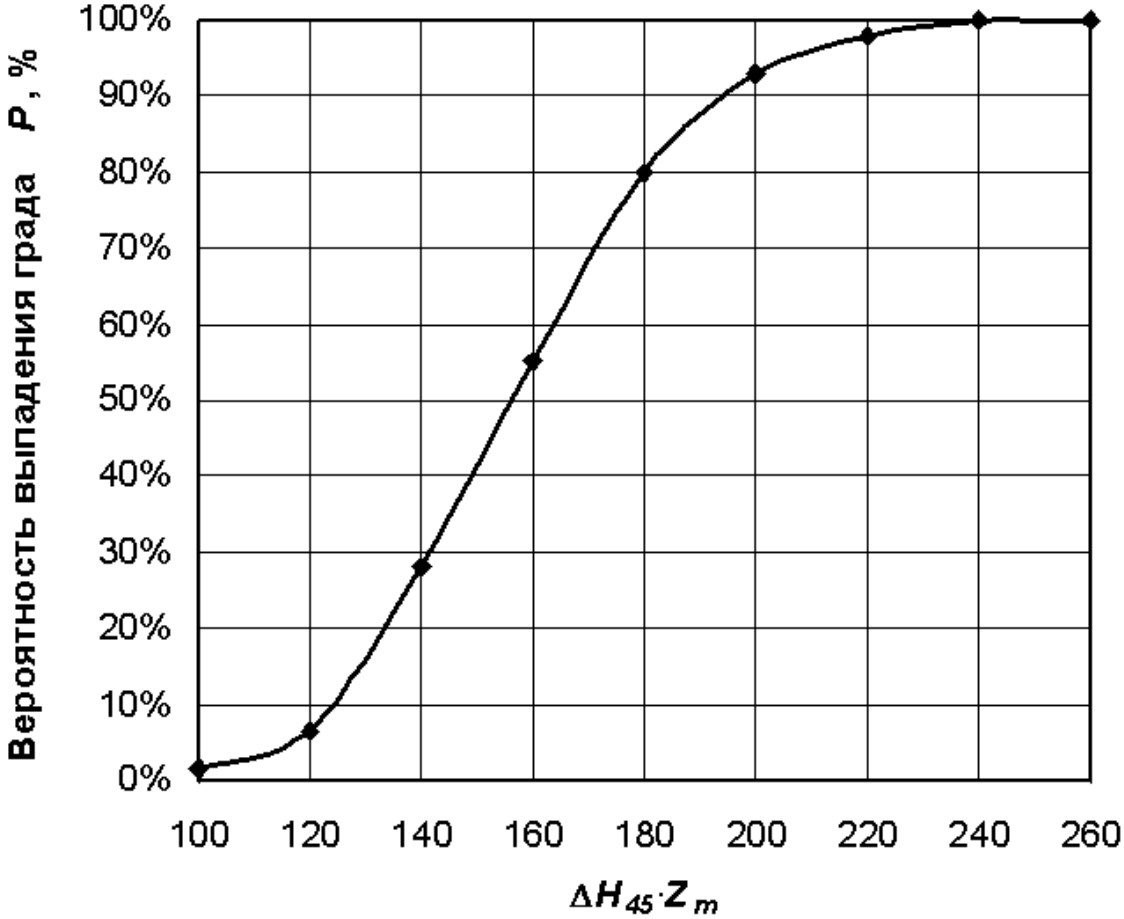


Рис. 7.15 – Вероятность выпадения града в зависимости от произведения $\Delta H_{45} \cdot Z_m$

Для успешного предотвращения градобитий, помимо распознавания зрелых градовых облаков, а также определения степени их градоопасности по значениям $P_Г$, крайне важно определение потенциальной градоопасности вновь зарождающихся облаков.

Информацию о потенциальной градоопасности облаков могут дать закономерности их зарождения и развития. Многолетние исследования динамики развития градовых облаков на Северном Кавказе и других

регионах показывают, что наиболее ранним указателем потенциальной градоопасности облаков является высокое зарождение их первого радиоэха [10, 38] и их быстрое развитие. Первое радиоэхо градовых ячеек обычно зарождается на высоте 5 ÷ 8 км, на 2 ÷ 4 выше уровня конденсации при температуре от -12 до -20°С.

Облака, первое радиоэхо которых зародилось выше уровня изотермы 0 °С на 1 км в 83% случаев становятся градовыми (рис. 7.16) в среднем через 6 ÷ 10 мин, а облака, первое радиоэхо которых зародилось в теплой части атмосферы и вблизи изотермы 0 °С, редко достигают градовой стадии [10, 39].

На более поздних стадиях развития показателем предградового состояния облаков является тенденция в повышении значений Z_m и ΔH_{45}.

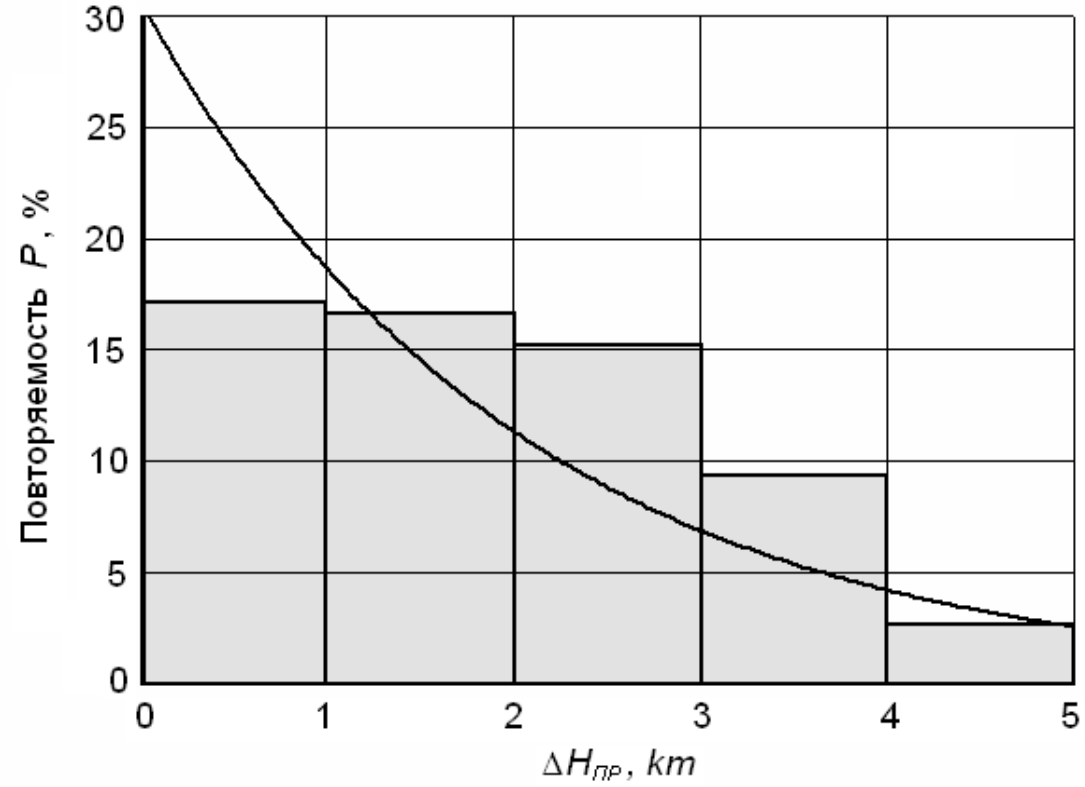


Рис. 7.16 – Повторяемость высоты зарождения первого радиоэха градовых облаков над уровнем изотермы 0 °С

Критерием перехода облака в градовое состояние может служить значение ΔH_{45} > 3 км. Наблюдения показали, что в случае развития градообразующих ячеек значения Z_m и ΔH_{45} увеличиваются значительно быстрее, чем в случае развития ячеек, не достигающих градовой стадии.

Таким образом, критериями потенциальной градоопасности облаков являются:

– зарождение первого радиоэха выше уровня изотермы -8 °С;
– быстрое развитие облака или его конвективных ячеек (КЯ).

7.12.1.3 Метод карт

Оперативную оценку градоопасности облаков и выделение наиболее градоопасных из их множества следует осуществлять [38]:

а) По картам верхней границы изолиний Z_{45} и ***Z_{50}***. По данным этих карт градоопасными считаются облака или их отдельные КЯ, имеющие высоту ΔH_{45} > 3 км, градовыми – облака, имеющие высоту изолинии ΔH_{50} и ΔH_{55} > 3 км (рис. 7.17), а сверхмощными градовыми – облака, имеющие высоты ΔH_{65} > 3 км.

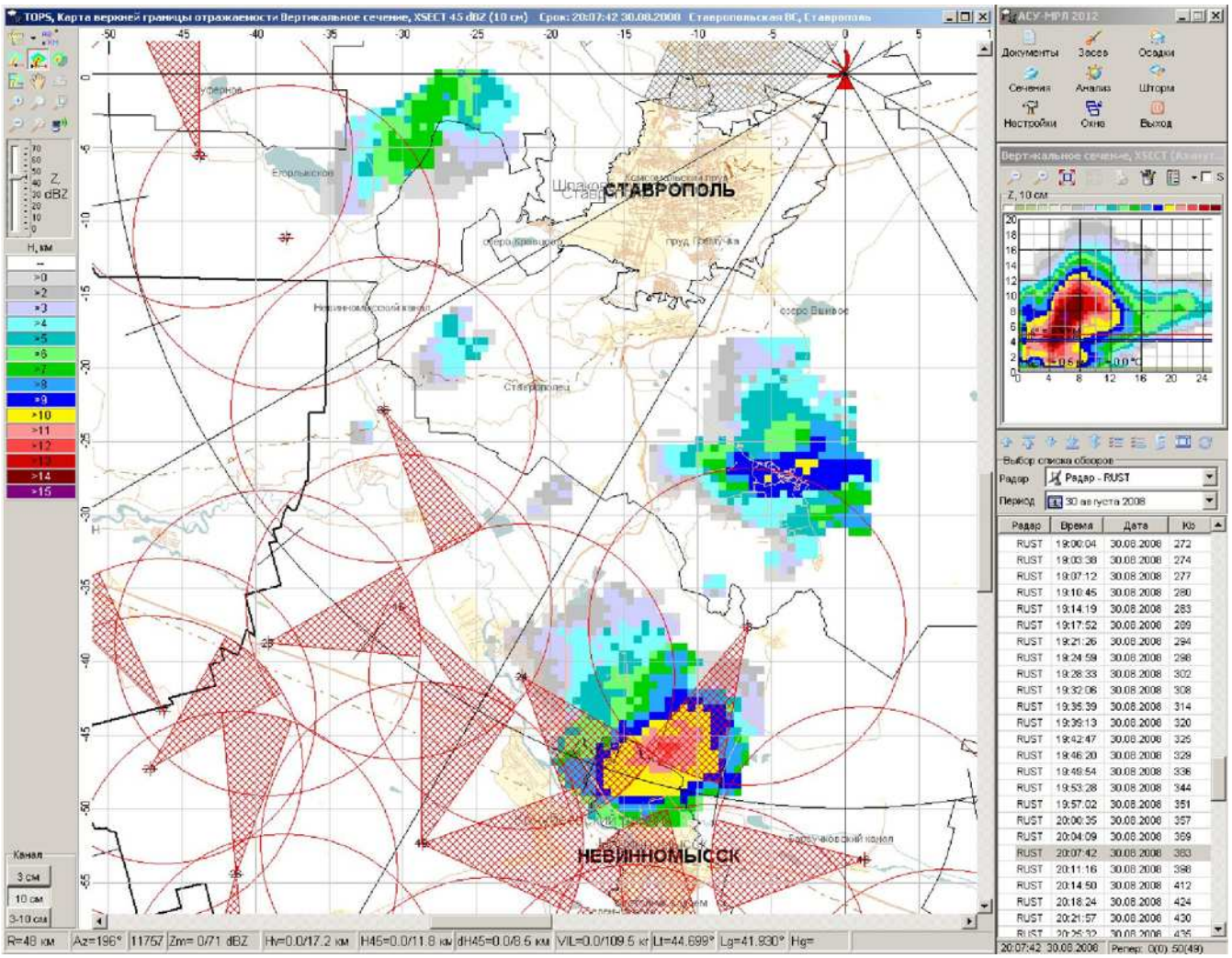


Рис. 7.17 – Карта верхней границы изолинии Z_{45}. В сверхмощном градовом облаке, из которого выпадает град до 6 см севернее города Невинномысск, ΔZ_{45} достигает высоты 12 км, в более слабых градовых облаках она несколько ниже

б) По карте горизонтального сечения на высоте 3 км над уровнем изотермы 0 °С (рис. 7.18). Градоопасными считаются облака или их КЯ, в которых на этой высоте выделяется контур Z_{45} (на рисунке 7.18 отображен желтым цветом), градовыми – облака, в которых на этой высоте выделяется контуры Z_{50} и Z_{55}, а в случае крупного града высвечиваются контуры Z_{65} и Z_{70}.

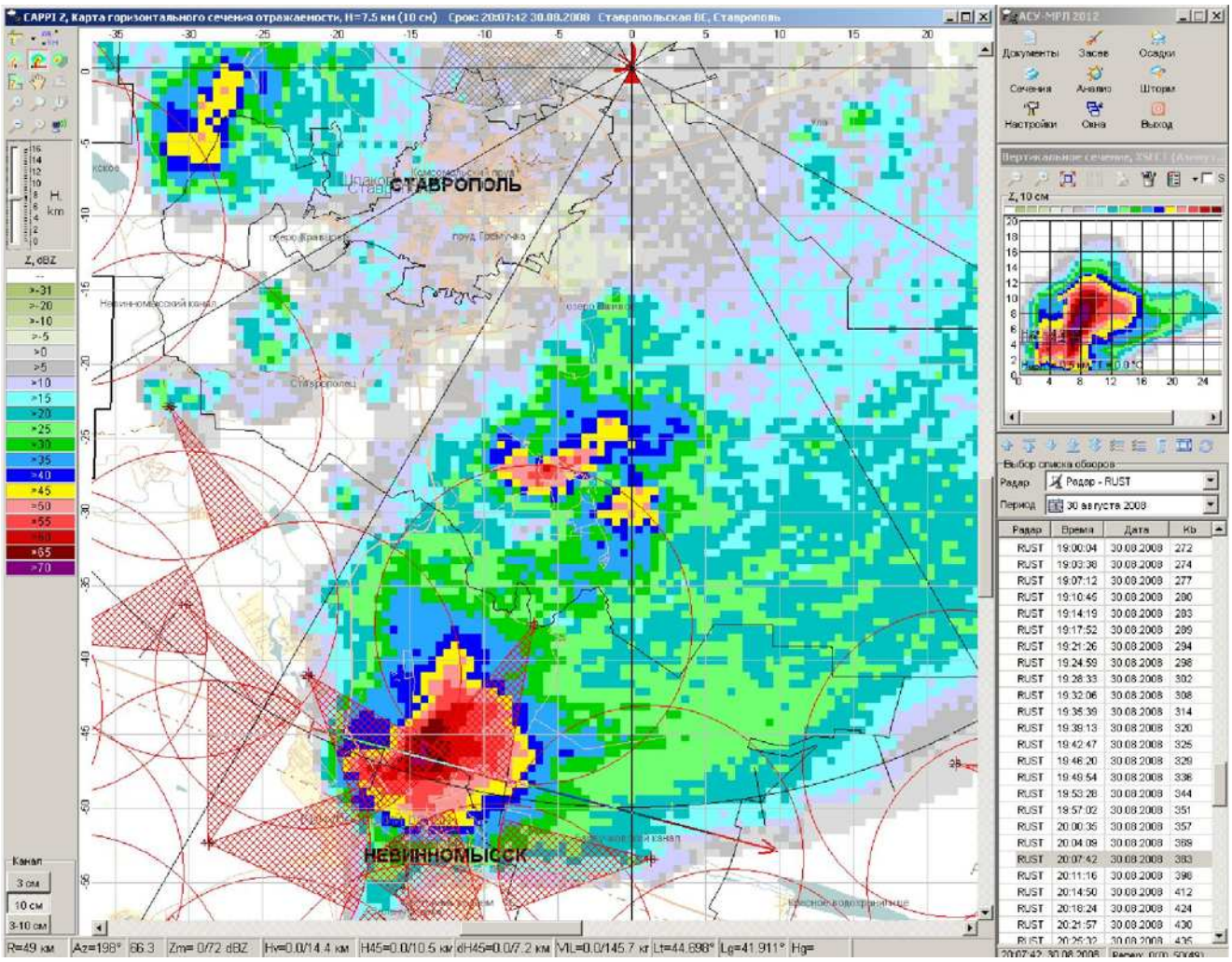


Рис. 7.18 – Карта горизонтального сечения на высоте 3 км над уровнем изотермы 0 °С. В сверхмощном градовом облаке к северу от Невинномысска высвечиваются контуры Z_{45}, Z_{55} и Z_{65}, а в более слабых градовых облаках – контуры Z_{45} [38]

в) По карте двухуровневого сечения, на котором на фоне карты изолиний Z_{45} и Z_{55} вблизи поверхности земли отображается карта максимума отражаемости слоя от уровня изотермы -6 °С (H_{-6}) до уровня (H_{-6} + 5 км) (рис. 7.19). Облака и их КЯ, в которых на этой высоте выделяется контур Z_{50} считаются градоопасными, а облака, в которых на этой высоте выделяются контуры Z_{55} и Z_{65} считаются градовыми.

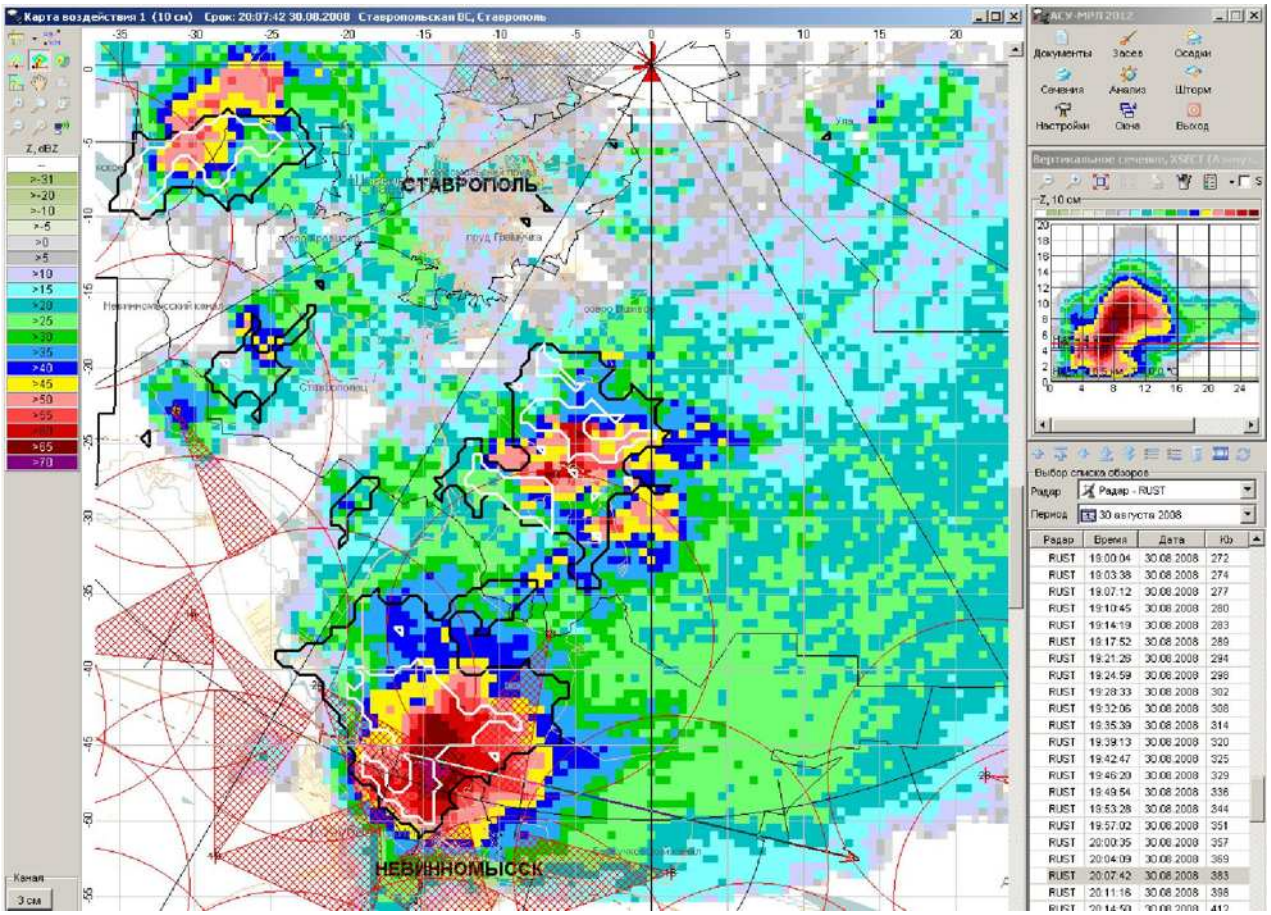


Рис. 7.19 – Карта двухуровневого сечения. Во всех градовых облаках Z_m выше уровня -6 °С превышает 55 dBZ, а вблизи земли высвечиваются изоконтуры Z_{55} dBZ (белые кривые), что свидетельствует о том, что из них выпадает град [38]

Совместное отображение в 4 окнах всех этих карт и карты Z_m позволяет более адекватно использовать метод карт и ранжировать семейство одновременно наблюдаемых облаков по степени их градоопасности. На рисунке 7.20, можно видеть:

– на карте максимальной отражаемости Z_m облачного слоя от земли до 16 км выделяются 6 КЯ, в которых Z_m > 50 dBZ (рис. 7.20*а*);

– на карте горизонтального сечения на высоте (H_0 + 3 км) остается только 3 градовые КЯ (№ 12, № 16 и № 18), в которых имеются контуры Z_{45} и Z_{50} (рис. 7.20*б*);

– на карте верхней границы изолинии Z_{50} остаются те же 3 градовые ячейки (№ 12, № 16 и № 18), которые имеют высоту изолинии Z_{50} > 3 км (рис. 7.20*в*);

– на карте двухуровневого сечения также выделяются те же 3 градовые ячейки, у которых в переохлажденном слое выделяются контуры Z_m = 50 и 55 dBZ (рис. 7.20*г*).

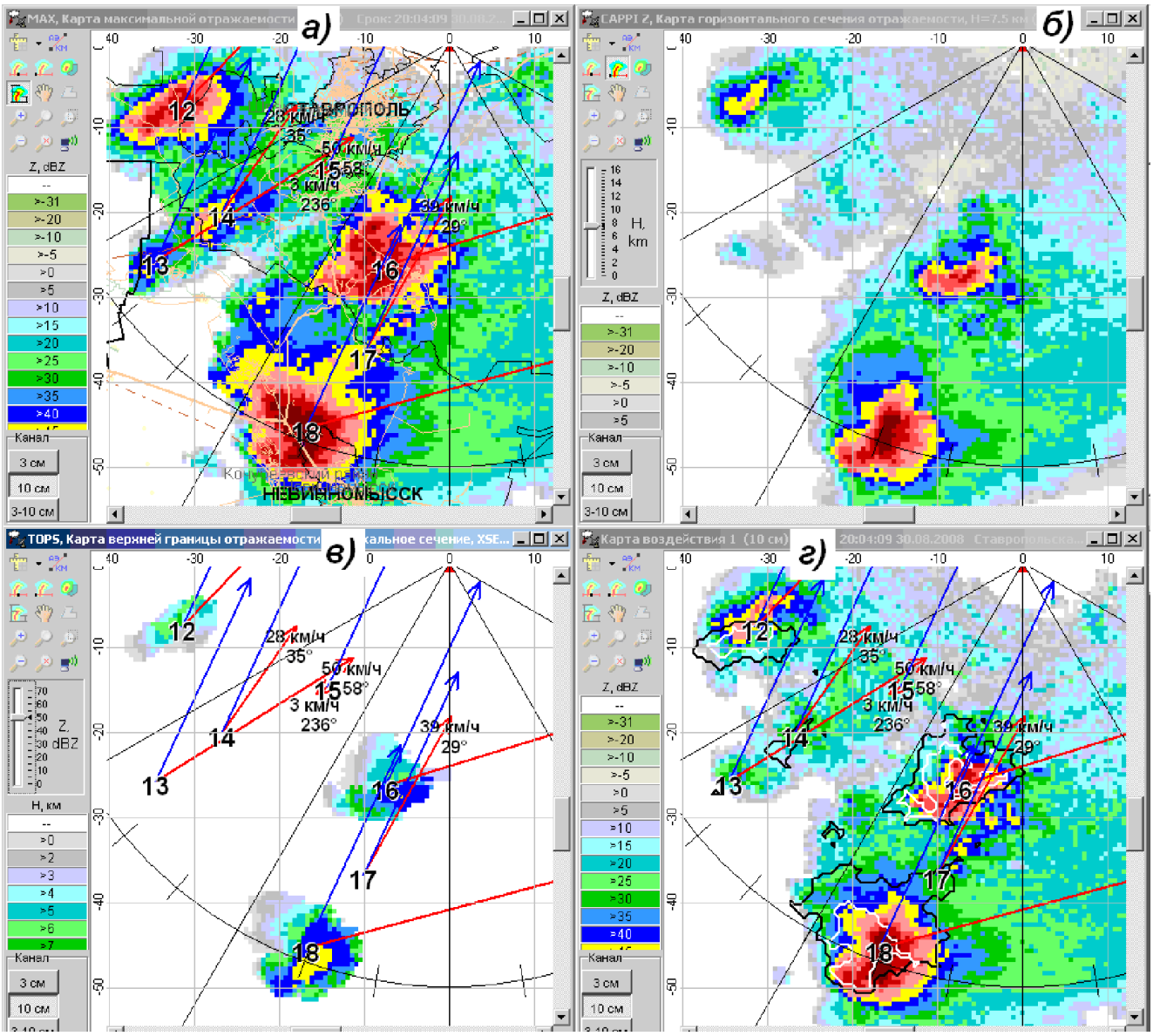


Рис. 7.20 – Иллюстрация к методу обнаружения града методом карт [38]:
а) – карта Z_m; ***б)*** – карта горизонтального сечения на высоте (H_0 + 3); ***в)*** – карта верхней границы изолинии Z = 50 dBZ; ***г)*** – карта двухуровневого сечения

Таким образом, метод карт позволяет на практике противоградовой защиты оперативно выделить градовые и градоопасные КЯ в многоячейковой облачной системе. Оценку степени их градоопасности следует осуществлять путем поочередного просмотра карт:

– горизонтального сечения, начиная от высоты (H_0 + 3) до (H_0 + 6 км). Чем выше обнаруживаются контуры Z_{45}, Z_{50}, Z_{55}, Z_{60} и Z_{65}, тем выше степень градоопасности облака или его КЯ. Наличие контуров Z_{60} и Z_{65} на высотах (H_0 + 6 км) является признаком выпадения крупного града;

– верхней границы изолиний Z_{45}, Z_{50}, Z_{55}, Z_{60} и Z_{65}. Чем больше высота верхней границы этих контуров, тем выше градовый потенциал облака или его КЯ.

7.12.1.4 Оценка градоопасности облаков по водосодержанию

Автоматизация обработки радиолокационной информации позволяет помимо таких одномерных параметров как Z_m, ΔH_{45} и ΔH_B измерять двумерные и трехмерные параметры, которые могут более адекватно характеризовать градоопасность облаков, имеющих трехмерную структуру. Обработка данных о пространственном распределении отражаемости позволяет получить [40, 41]:

– максимальное значение и карту распределения по площади приведенной водности облака q (кг/м^2), называемой в зарубежной литературе VIL (Vertical Integrated Liquid Water Content [9]), характеризующее интегрированное по всей толще облака водосодержание, приходящееся на единицу площади основания (на 1 м^2);

– максимальные значения и карты приведенной водности переохлажденной толщи облака выше изотерм 0 и -6 ^{o}C, соответственно, Δq_0 и Δq_{-6} (кг/м^2), характеризующие суммарное водо– и льдосодержание слоя роста града;

– V_{15}, V_{25}, V_{35}, V_{45}, V_{55} и V_{65} – объемы облака или его КЯ с Z > 15, 25, 35, 45, 55 и 65 dBZ, соответственно, (V_{Zi}, км^3);

– ΔV_{15}, ΔV_{25}, ΔV_{35}, ΔV_{45}, ΔV_{55} и ΔV_{65} – объемы облака или КЯ выше изотермы 0 ^{o}C с Z > 15, 25, 35, 45, 55 и 65 dBZ (ΔV_{Zi}, км^3);

– M_{15}, M_{25}, M_{35}, M_{45}, M_{55} и M_{65} – интегральные водности объемов облака или КЯ внутри изолиний Z > 15, 25, 35, 45, 55 и 65 dBZ (M_{Zi}, тонн);

– ΔM_{15}, ΔM_{25}, ΔM_{35}, ΔM_{45}, ΔM_{55} и ΔM_{65} – интегральные водности объемов выше изотермы 0 ^{o}C с Z > 15, 25, 35, 45, 55 и 65 dBZ (ΔM_{Zi}, тонн).

Основное водосодержание градовых облаков в стадии развития сосредоточено в их переохлажденном слое, в стадии зрелости – в слое от земли до высоты 8 – 10 км, а в стадии диссипации – в приземном слое [40].

Соотношение значений приведенных водностей q, Δq_0 и Δq_{-6} градовых облаков зависит от стадии их эволюции:

– в стадии развития значения q, Δq_0 и Δq_{-6} близки друг к другу, так как основная водность сосредоточена в слое роста града;

– в стадии зрелости градового облака водность переохлажденного слоя Δq_0 и Δq_{-6} составляет около половины значения q;

– после начала выпадения града основное водосодержание облака смещается вниз – в область положительных температур;

– в стадии диссипации сначала наблюдается быстрое уменьшение до нуля значений Δq_{-6}, несколько позже значений Δq_0, а потом и значений q_m.

Карты приведенной водности переохлажденного слоя Δq_0 являются показателями стадии развития градовых облаков. Уменьшение значений Δq_0 до 2 кг/м^2 свидетельствует о переходе облака в неградовое состояние и отсутствии града в зоне роста града, даже когда в приземном слое град еще продолжает выпадать и значение q этого слоя достаточно большое.

Объем градовых облаков варьирует в пределах $10^3 < V_{15} < 5{\cdot}10^4$ км^3, а объем области локализации града V_{45} составляет около 5 – 25% от объема всего облака, но ее вклад в интегральное водосодержание может достигать 30 – 60% в зависимости от интенсивности градообразования. Значения параметров ΔV_{45}, ΔV_{55}, ΔV_{65}, являются информативными показателями градоопасности облаков и физического эффекта АВ, так как нулевые значения ΔV_{55}, ΔV_{65} и минимальные значения ΔV_{45} свидетельствуют об отсутствии зоны града в облаке, а большие значения ΔV_{45}, ΔV_{55}, ΔV_{65} являются показателем интенсивного градообразования.

Приведенная водность и интегральное водосодержание градовых облаков значительно больше, чем в ливневых и слоисто-дождевых облаках [40]. В градовых облаках значения q_m обычно превышает 18 кг/м^2, в ливневых дождях варьирует в пределах от 1 до 25 кг/м^2, а в слоисто-дождевых облаках обычно меньше 1,0 кг/м^2 [40, 41].

Интегральное водосодержание градовых облаков M_{15} обычно варьирует в пределах от 10^5 до $5{\cdot}10^6$ т, достигая в случае града катастрофической интенсивности $M_{15} \approx 7{\cdot}10^6$ тонн [41].

Из двумерных и трехмерных параметров наиболее информативными для оценки градоопасности облаков являются Δq_{-6}, ΔM_{45}, ΔM_{55} и ΔM_{65}, непосредственно характеризующие водосодержание зоны роста града.

Значение $\Delta q_{-6} > 25$ кг/м^2, $\Delta M_{45} > 5{\cdot}10^5$, $\Delta M_{55} > 5{\cdot}10^4$ и $\Delta M_{65} > 10^2$ т встречаются только в градовых облаках. Оперативное выделение градовых и градоопасных облаков может быть выполнено по карте Δq_{-6}.

На рисунке 7.21 ***а), б)***, ***в)*** и *г)* показана карта максимальной отражаемости и карты приведенной водности всего облачного слоя q_m, Δq_0 и Δq_{-6}, соответственно. На карте максимальной отражаемости и карте q_m отмечается несколько кучево-дождевых облаков, представляющиеся достаточно опасными, на карте Δq_0 их меньше, а на карте Δq_{-6} остаются только мощное градовое облако на юго-востоке и три градовые ячейки одного из облаков на севере.

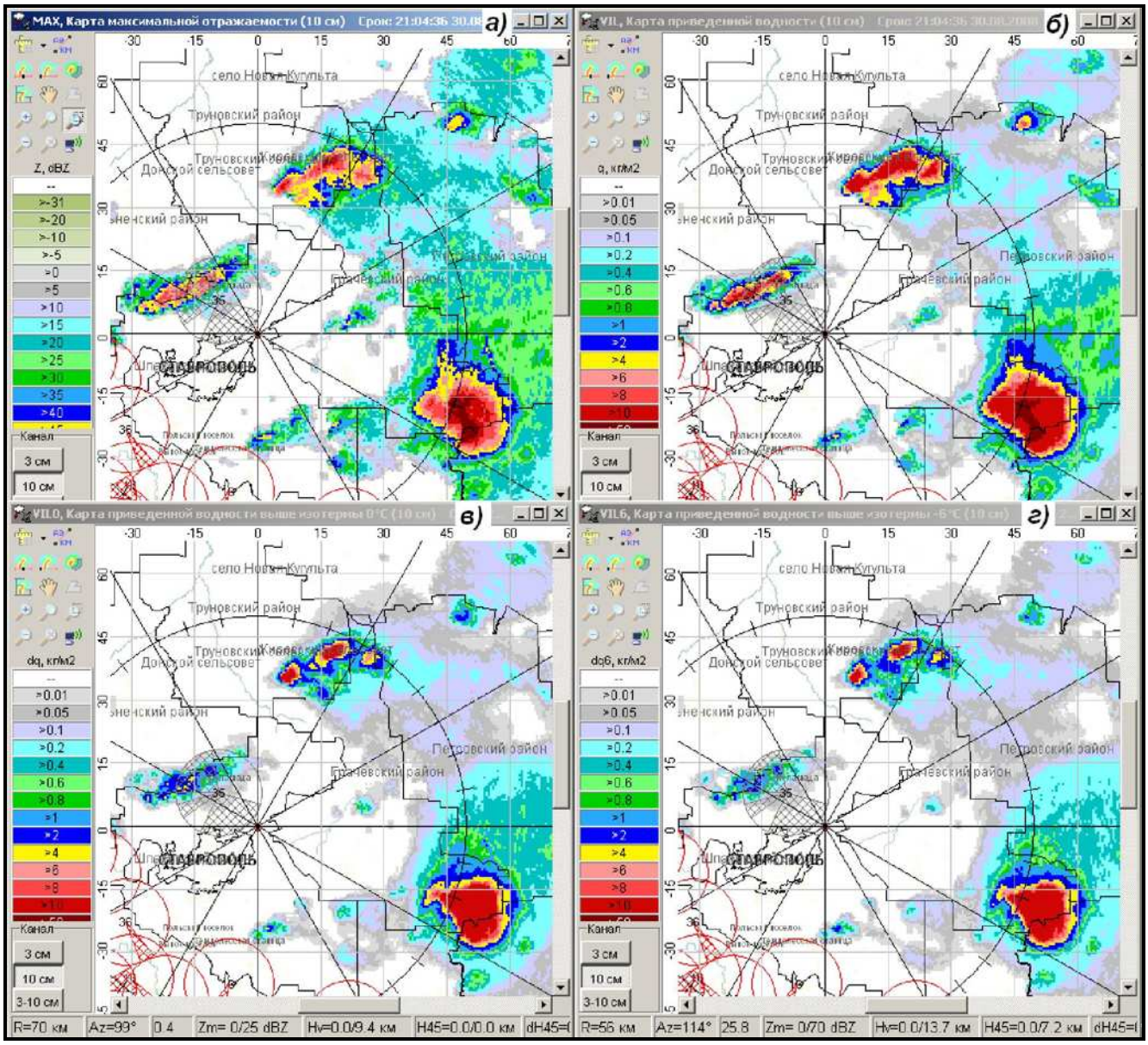


Рис. 7.21 – Многооконное отображение карт градовых и градоопасных КЯ***:***
а) карта максимальной отражаемости; ***б)*** карта приведенной водности всего облачного слоя (q_m, кг/м^2); ***в)*** и ***г)*** карты приведенной водности облачного слоя выше изотерм 0 и -6 ^{o}C (Δq_0 и Δq_{-6}, кг/м^2)

7.12.2 Двухволновый метод

Радиолокационная отражаемость облаков и осадков зависит от размера, концентрации, диэлектрических свойств гидрометеоров и длины волны. При прочих равных условиях отражаемость на λ = 10 см в диапазоне размеров рассеивающих частиц от 0,5 до 5 см увеличивается значительно быстрее, чем на λ = 3,2 см [14, 15]. Отношение отражаемости на двух длинах волн (например, на 3,2 и 10 см) при размерах рассеивающих частиц менее 8 мм (в дождях) почти постоянно и равно примерно 100 $\pm$ 2 dB и мало варьирует в зависимости от типа

гидрометеоров и интенсивности осадков. При появлении крупных частиц (градин) на фоне дождя это отношение резко уменьшается. Эта зависимость отражаемости гидрометеоров разных размеров от длины волны обеспечивает возможность двухволнового обнаружения града.

Градовые очаги двухволновым методом выделяются по критериям ($Z_{3,2}$ - Z_{10}) < 3 dBZ и Z_{10m} > 45 dBZ (Абшаев, 1966 [10, 24 – 27]). Значение ($Z_{3,2}$–Z_{10}) позволяет выделить область крупных частиц [10], а критерий Z_{10m} > 45 dBZ отсекает снегопады, в которых размер хлопьев снега могут достигать 3 см, но значение Z_m не превышает 45 dBZ.

Оптимальными длинами волн для двухволнового обнаружения града являются λ_i = 3,2 см, и λ_j = 10 см [10, 27]. На этих длинах волн теоретические и экспериментальные значения ($Z_{3,2}$ - Z_{10}) варьируют в дождях и граде в зависимости от размера частиц в пределах $-23 \le Z_{3,2} - Z_{10} \le 4$ (рис. 7.22).

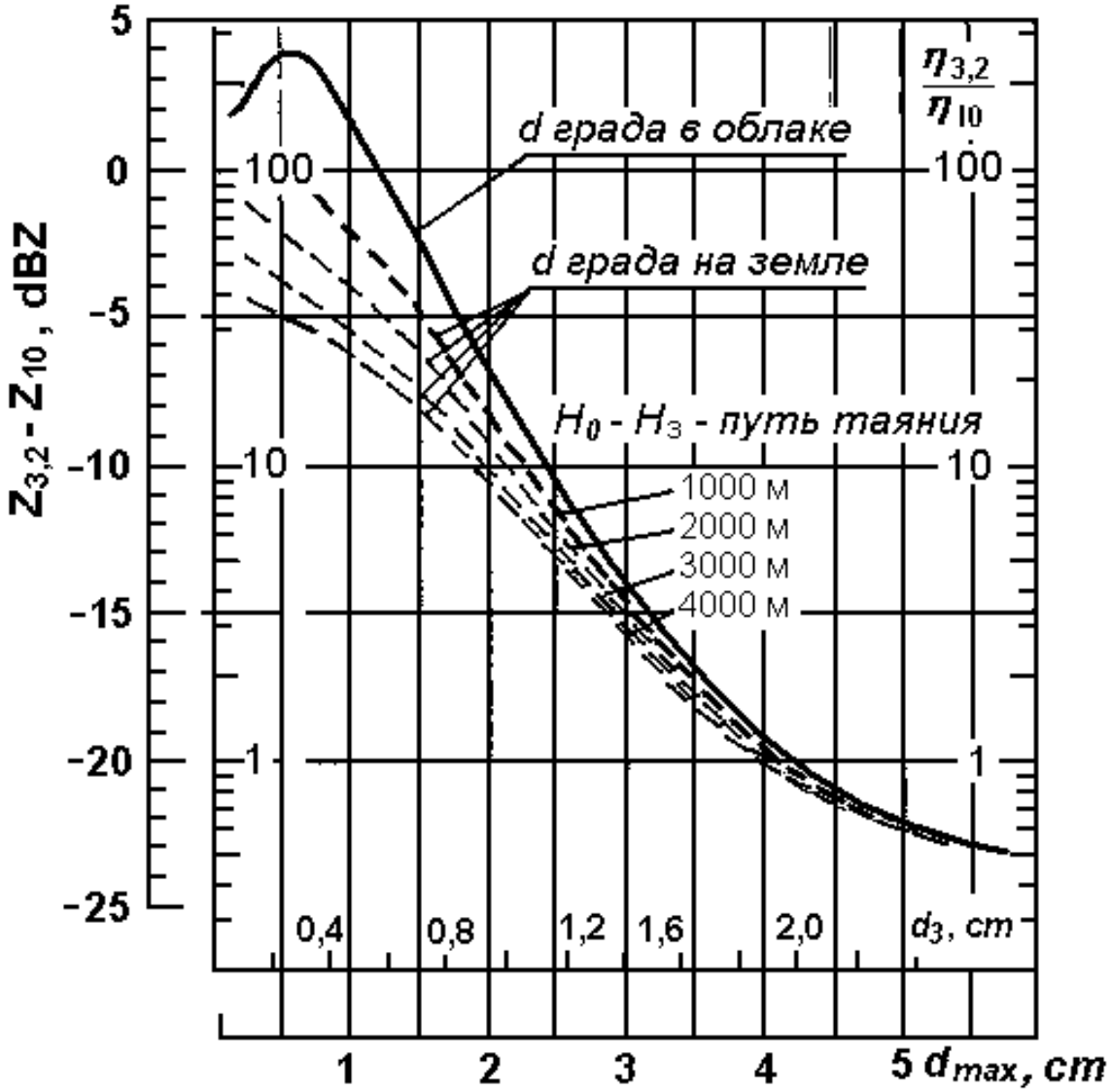


Рис. 7.22 – График определения размера града двухволновым методом: сплошная кривая – в облаках; пунктирные – в осадках с учетом таяния на пути от H_0 до

поверхности земли H_3 [10, 25]

С увеличением максимального размера града d_{max} от 0,8 до 5,0 см значение ($Z_{3,2}$ - Z_{10}) уменьшается на 27 dBZ. Эта зависимость используется для определения размера града в облаках и осадках. Размер града оценивается с учетом коррекции на ослабление на λ = 3,2 см [27, 42] и таяния града ниже изотермы 0 °С с помощью рисунка 7.22 или по формулам:

$$d_3 = 0{,}583 \cdot 10^{0{,}027(Z_{10} - Z_{3,2})}; \qquad (7.85)$$

$$d_{max} = 1{,}33 \cdot 10^{0{,}027(Z_{10} - Z_{3,2})}. \qquad (7.86)$$

Градиенты в радиальном распределении разностного сигнала $\lg \frac{P_{3,2}(R)}{P_{10}(R)}$ позволяют определить границы областей локализации града (Абшаев, 1966 [10, 42], (Eccles and Atlas, 1970 [43]. Пренебрегая ослаблением в облаках и осадках на длине волны 10 см и дифференцируя разностный сигнал по расстоянию, имеем:

$$\frac{d}{dR} \lg \frac{P_{3,2}(R)}{P_{10}(R)} = \frac{d}{dR}\left(Z_{3,2} - Z_{10}\right) - 2\int_0^R k_{3,2}(R) dR, \qquad (7.87)$$

где $P_{3,2}(R)$ и $P_{10}(R)$ – радиальные профили мощности радиоэха на λ = 3,2 и 10 см; $k_{3,2}(R)$ – коэффициент ослабления на λ = 3,2 см в облаках и осадках.

В дождях первое слагаемое выражения (7.87) близко к нулю, а на границах градового очага значительно превышает второе слагаемое, выделяя ближнюю и дальнюю границы градового очага в виде разнополярных импульсов (рис. 7.23*д*). После преобразования этих импульсов в однополярные (рис. 7.23*е*) на индикаторах ИКО и ИДВ или на мониторе компьютера границы градового очага высвечиваются в виде узкой полосы (рис. 7.23*ж*).

Достоинством этого метода выделения градового очага является возможность оперативного выделения градовых очагов на фоне ливневых осадков в режиме кругового обзора без каких-либо измерений. Замена абсолютных измерений на относительные (на основе отношения $lg \frac{P_{3,2}(R)}{P_{10}(R)}$) исключает влияние точности определения потенциалов обоих каналов МРЛ и их нестабильности. От значений метеопотенциалов обоих каналов зависит только уровень отсчета разностного сигнала, а местоположение границ градовых очагов не изменяется. Это позволяет осуществлять относительную калибровку двухволнового МРЛ на дождь и корректировать значения метеопотенциалов двухволнового МРЛ.

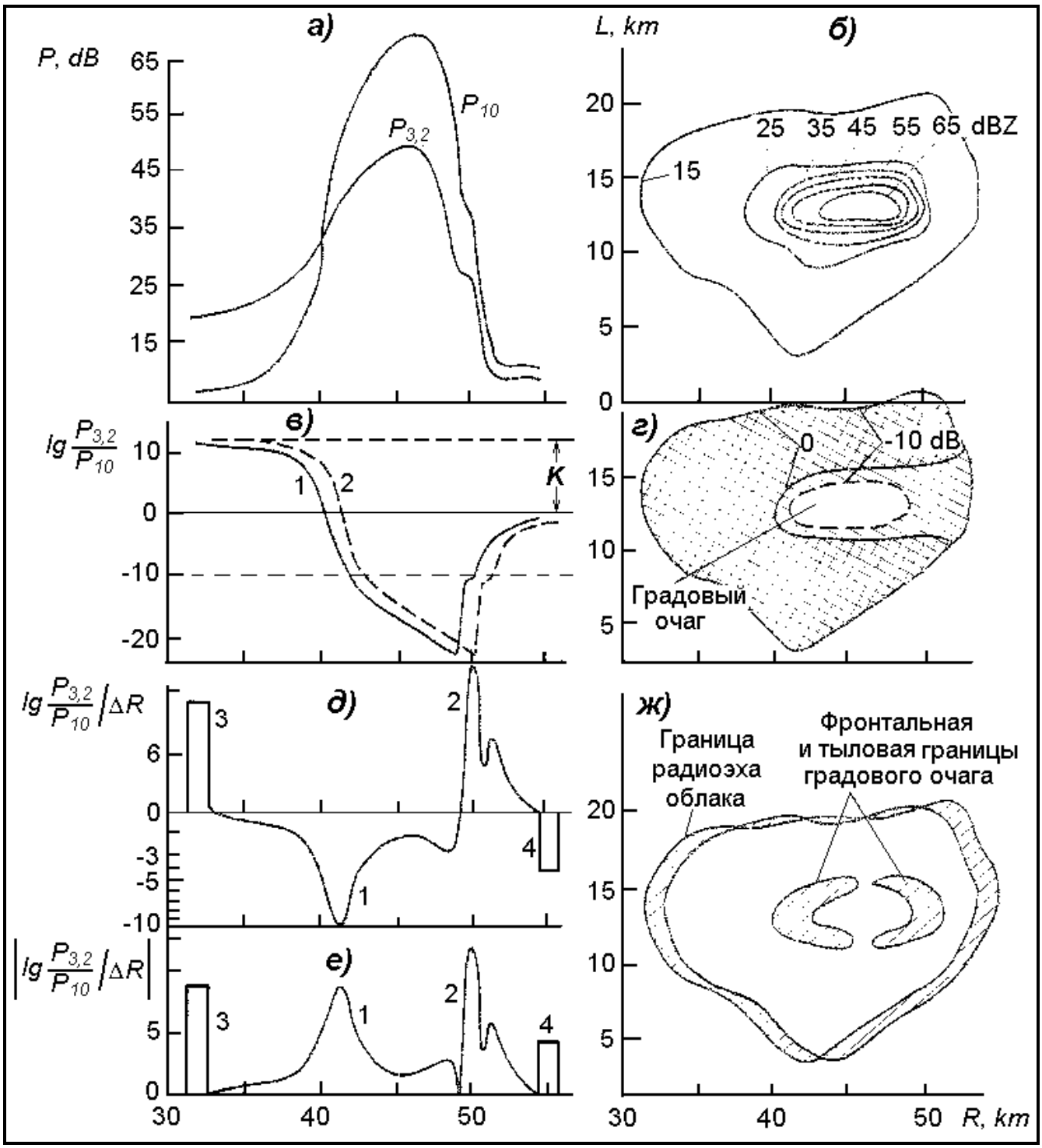


Рис. 7.23 – Форма радиоэха градового облака на индикаторах типа «А» и ИКО при различных способах отображения [27]: ***а)*** радиальное распределение мощности радиоэха на λ = 3,2 и 10 см; ***б)*** карта изолиний Z_{10}, dBZ; ***в)*** радиальное распределение $lgP_{3,2}(R)/P_{10}(R)$ без задержки (1) и с задержкой на ΔR (2); K – полное ослабление 3.2 см. излучения на двойном пути; ***г)*** градовый очаг, выделяемый по порогам $10\,lgP_{3,2}(R)/P_{10}(R)$ = 0 и 10 dB; ***д)*** и ***е)*** радиальное распределение дифференциала разностного сигнала, выделяющего границы градового очага (1 и 2) и границы радиоэха (3 и 4); ***ж)*** границы градового очага на ИКО

Основным требованием метода является одинаковая по обоим каналам ширина и пространственное совмещение диаграмм излучения. Это требование реализовано в конструкции антенной системы радиолокатора «МРЛ-5», созданного для обеспечения противоградовых работ и штормооповещения [10].

Недостатками двухволнового метода является погрешности, вносимые ослаблением 3,2 см излучения. Этот недостаток достаточно эффективно устраняется введением коррекции на ослабление по методике, изложенной в [39, 44] и др.

При точной калибровке обоих каналов и введении коррекции на ослабление на λ = 3,2 см двухволновый метод обеспечивает повышение точности измерения размера и кинетической энергии града, интенсивности и количества осадков по сравнению с одноволновым методом.

7.12.3 Поляризационный метод

Отличие формы гидрометеоров от сферической приводит к появлению в отраженном сигнале деполяризованной компоненты и ряда специфических факторов. Применение поляризационных МРЛ открыло возможность измерения комплекса таких поляризационных характеристик радиоэха, как: линейное деполяризационное отношение L_{DR}, линейная дифференциальная отражаемость Z_{DR}, удельная дифференциальная фаза K_{DP} и коэффициент взаимной корреляции $|\rho_{HV}|$, позволяющих оценить вид гидрометеоров в облаках и обнаружить град на фоне дождя [29 – 32]:

– значение L_{DR} варьирует в дождях в пределах $-27 < L_{DR} < -34$ dB, в граде $-20 < L_{DR} < -10$ dB, а в снеге $-13 < L_{DR} < -18$ dB (рис. 7.24);

– значение Z_{DR} в ливневом дожде варьирует в пределах $0 < Z_{DR} < 4$ dB, а граде в пределах $-0{,}5 < Z_{DR} < 0{,}5$ dB (рис. 7.25).

– значение K_{DP} в дождях варьирует от 0 до 10, а в граде от -1 до 1;

– значение $|\rho_{HV}|$ в дождях обычно больше 0,95, а в граде $\approx$ 0,9 - 0,95.

Исходя из этого, для обнаружения града с помощью поляризационного МРЛ рекомендуются сочетание следующих критериев: $Z_m > 55$ dBZ; $-0{,}5 < Z_{DR} < 2{,}5$ dB; $0{,}7 < K_{DP} < 0{,}95$; $|\rho_{HV}| < 0{,}95$ [29 – 31].

Однако на рисунках 7.24 и 7.25 можно видеть наличие неоднозначности разделения областей дождя и града (сухого и обводненного), мелких и крупных капель дождя, крупы и снега. Малые различия значения Z_{DR} в областях мокрого града и дождя (от 1 до 4 dB), сухого, гигантского града и крупы приводят к неопределенности (рис. 7.23), которая разрешается в большей степени по значению отражаемости Z, а не по значению Z_{DR}.

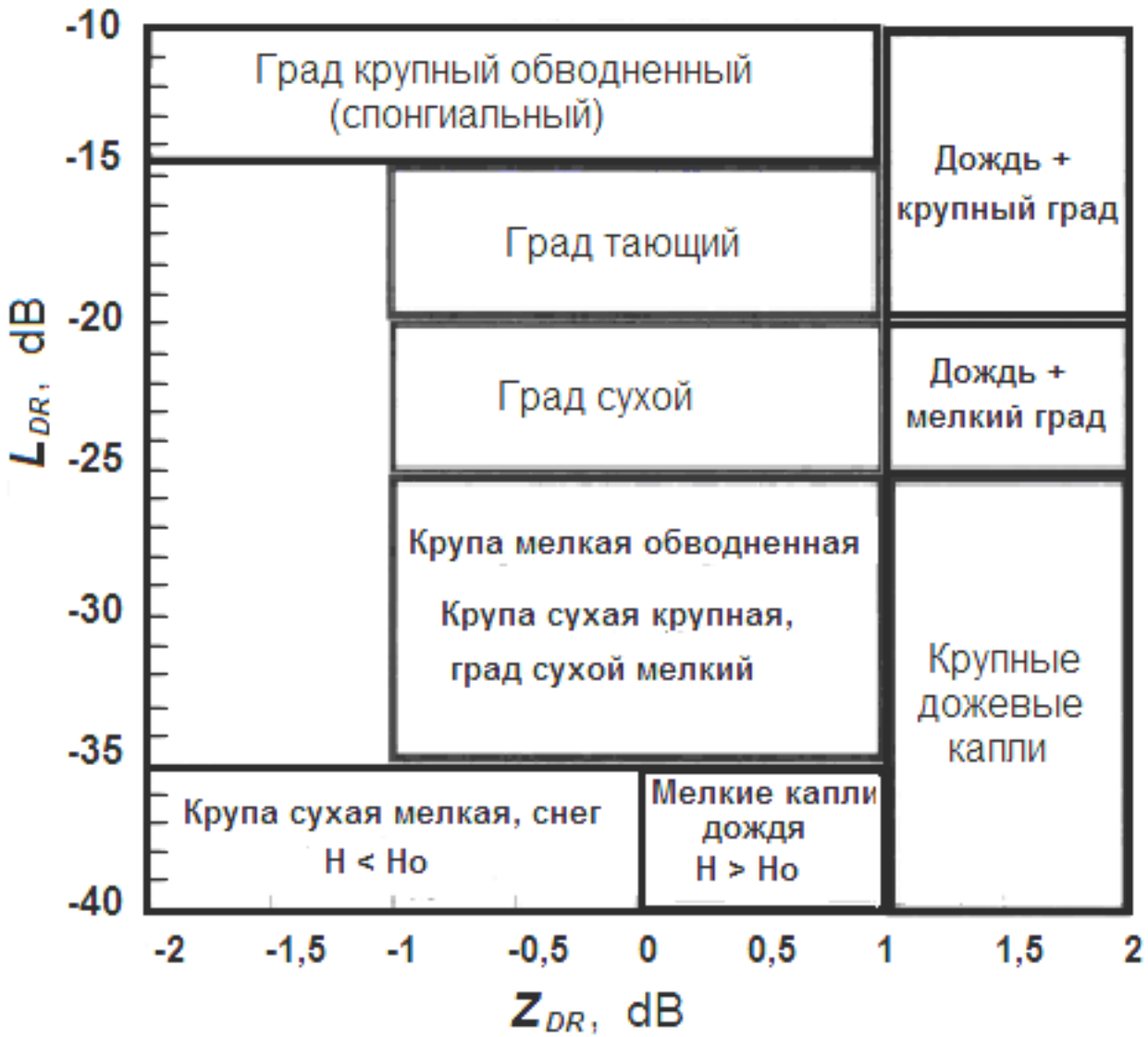


Рис. 7.24 – График распознавания вида облачных частиц по Z_{DR} и L_{DR} [29]

Из рисунка 7.25 следует, что области дождя и града гораздо эффективнее разделяются по значению Z, так как в области дождя и крупы $Z < 55$ dBZ; в области мокрого и сухого града $53 < Z < 65$ dBZ, а в области крупного града $Z > 65$ dBZ.

Возникают подобные проблемы однозначности идентификации града и дождя по значениям K_{DP} и $|\rho_{HV}|$. Для разрешения этих неоднозначностей в [30, 31] предложен метод нечеткой логики, основанный на построении по экспериментальным данным функций принадлежности значений поляризационных характеристик радиоэха (L_{DR}, Z_{DR}, K_{DP}, $|\rho_{HV}|$ и Z) к тому или иному виду гидрометеоров. Построен классификатор вида гидрометеоров [30, 31], рекомендуемый для применения в системе оповещения об опасных явлениях США.

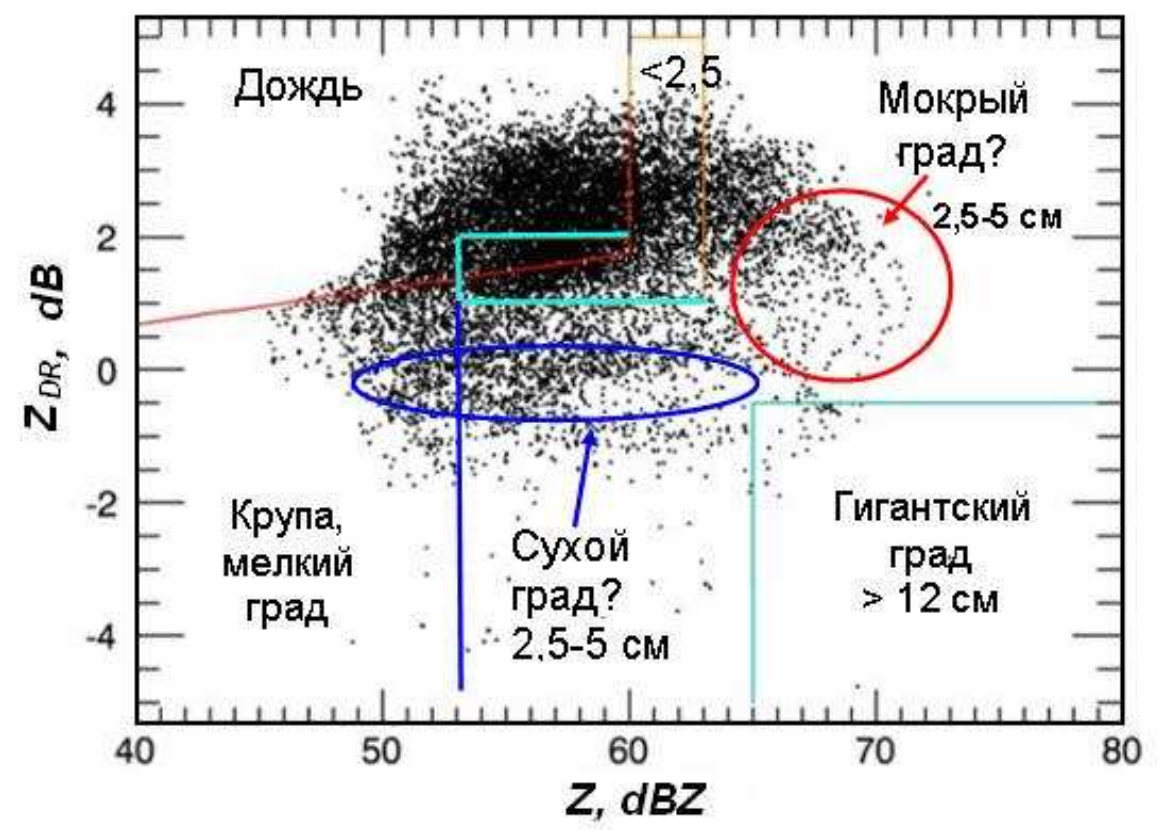


Рис. 7.25 – Разделение града и дождя по значениям Z и Z_{DR} при угле зондирования 0,5 градуса [20]

7.12.4 Критерии распознавания крупного града

7.12.4.1 Высокоинформативными указателями выпадения крупного града являются характерные особенности в структуре радиоэха облаков:

а) наличие навеса мощного радиоэха (иногда со свесом), накрывающего обширную область слабого радиоэха (рис. 7.26*а*), свидетельствующего о наличии мощной струи восходящего потока и возможности длительного нахождения зародышей града в слое роста града [10, 38, 45, 46];

б) наличие крюка радиоэха с высокими градиентами отражаемости в приземном слое (рис. 7.26*б*), окаймляющего восходящий поток и свидетельствующего о наличии зоны конвергенции и вращении восходящего потока [10, 38, 45, 46];

в) наличие радиального выступа (шипа) радиоэха с Z_{10} < 30 dBZ за градовым очагом на средних высотах протяженностью от 10 до 30 км (рис. 7.27). Этот выступ формируется за счет тройного рассеяния радиолокационного излучения [47]: в градовом очаге рассеяние вперед с отклонением к земле, потом отражение от земли в направлении градового очага и, наконец, рассеяние градовым очагом в направлении МРЛ (т.е. градовый очаг → земля → градовый очаг → МРЛ).

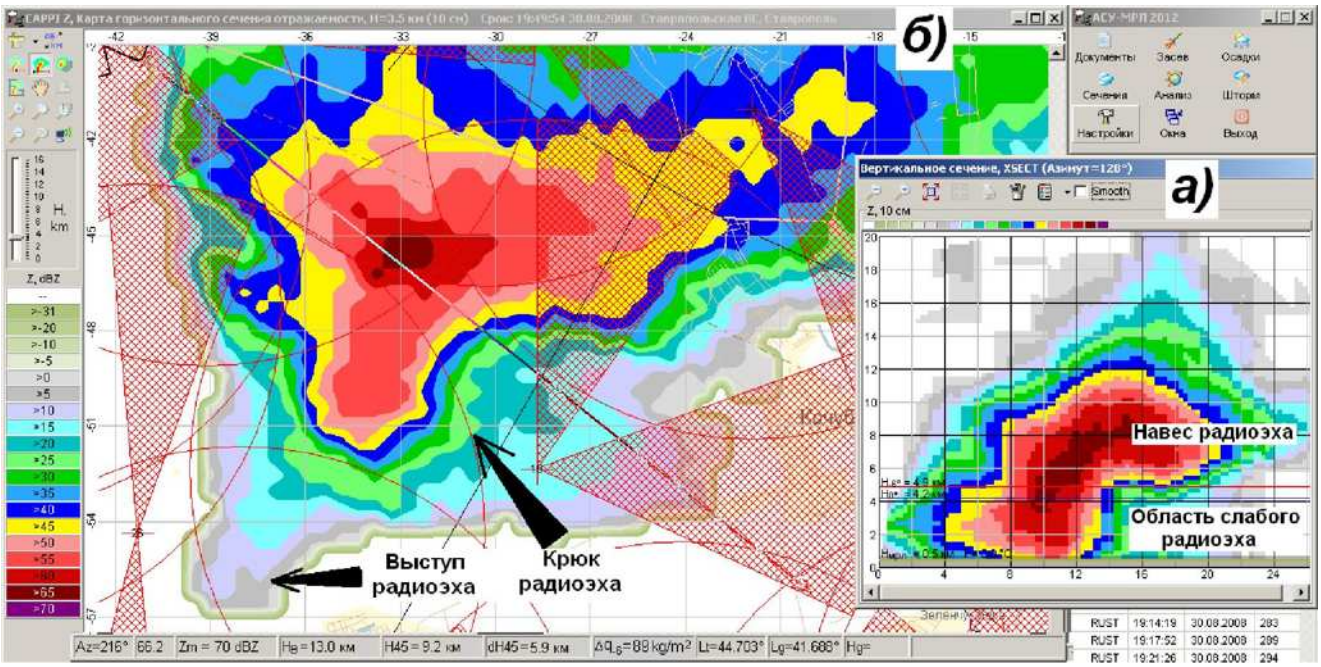


Рис. 7.26 – Характерные особенности структуры градового облака с крупным градом: навес мощного радиоэха, крюк и выступ радиоэха

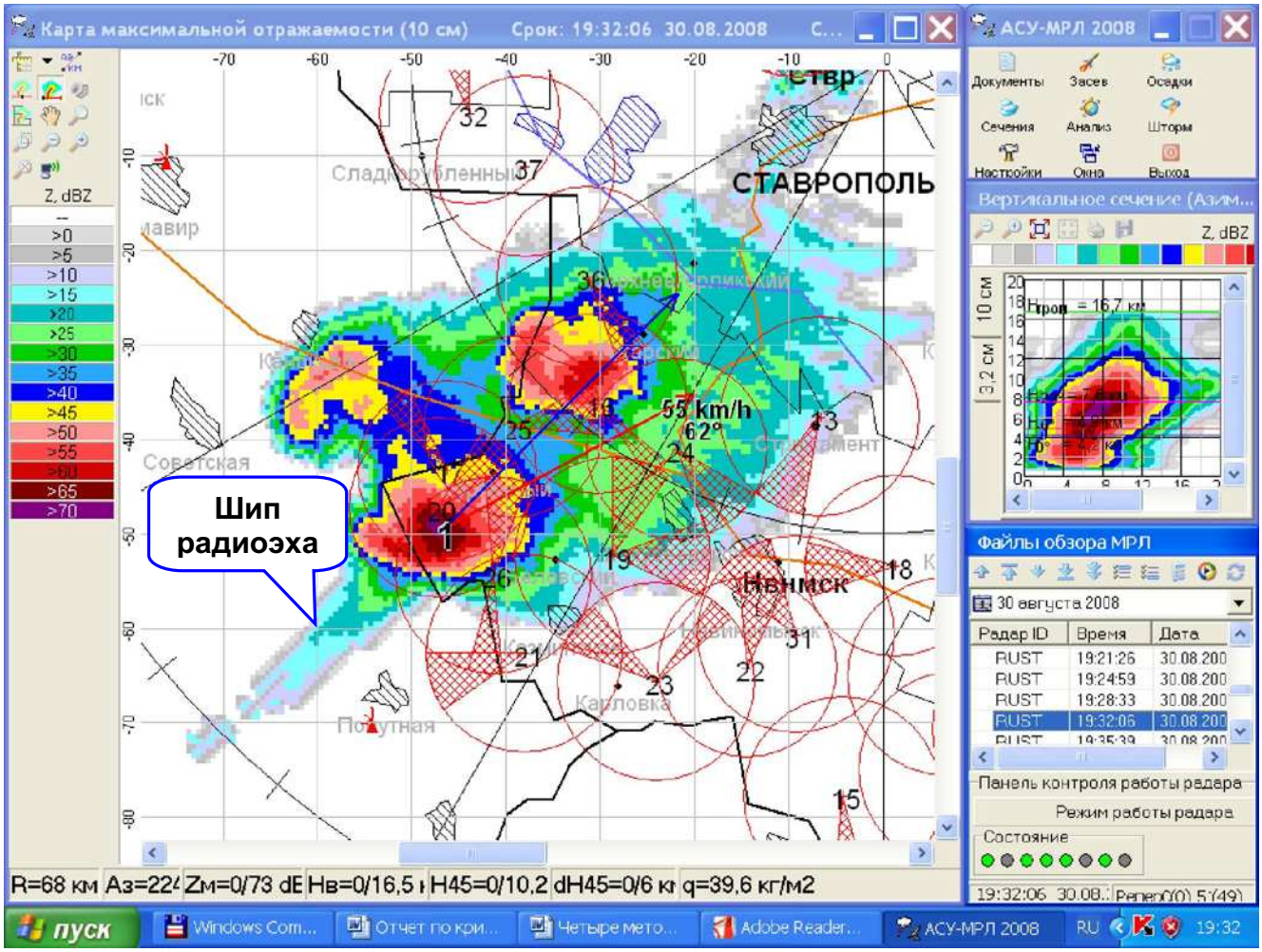


Рис. 7.27 – Выступ (шип) радиоэха мощного градового облака, наблюдавшегося на Северном Кавказе 30.08.2008 г. [38]

По мере тангенциального смещения облака относительно МРЛ этот выступ также смещается, располагаясь радиально от МРЛ за градовым очагом [38]. Ширина выступа изменяется соответственно изменению ширины градового очага с Z_{10} > 65 dBZ. Однако такой выступ радиоэха обнаруживается не во всех случаях выпадения крупного града, так как его возникновение связано с аномальной рефракцией радиоволн, обусловленной инверсией температуры и влажности атмосферы, в свою очередь связанной с вертикальным профилем интенсивности осадков. Наличие этого выступа является признаком крупного града, но его отсутствие не означает, что крупного града нет.

г) В службе погоды Австралии [48] для обнаружения крупного града используется «Градовая номограмма» (рис. 7.28), по которой идентификация града размером больше 2, 4 и 6 см осуществляется в зависимости от высоты изоэхо Z = 50 dBZ и высоты изотермы 0°С.

д) В США в системе оповещения об опасных явлениях WDSS используется алгоритм HDA (Hail Detection Algorithm [49, 50]), предусматривающий отображение размера града на фоне радиоэха. Размер града рассчитывается путем интегрирования потока кинетической энергии града выше уровня H_0 с весовыми коэффициентами, зависящими от высот H_0 и H_{-20}. При этом в оценке максимального размера града основное значение имеет высокая отражаемость в слое роста града.

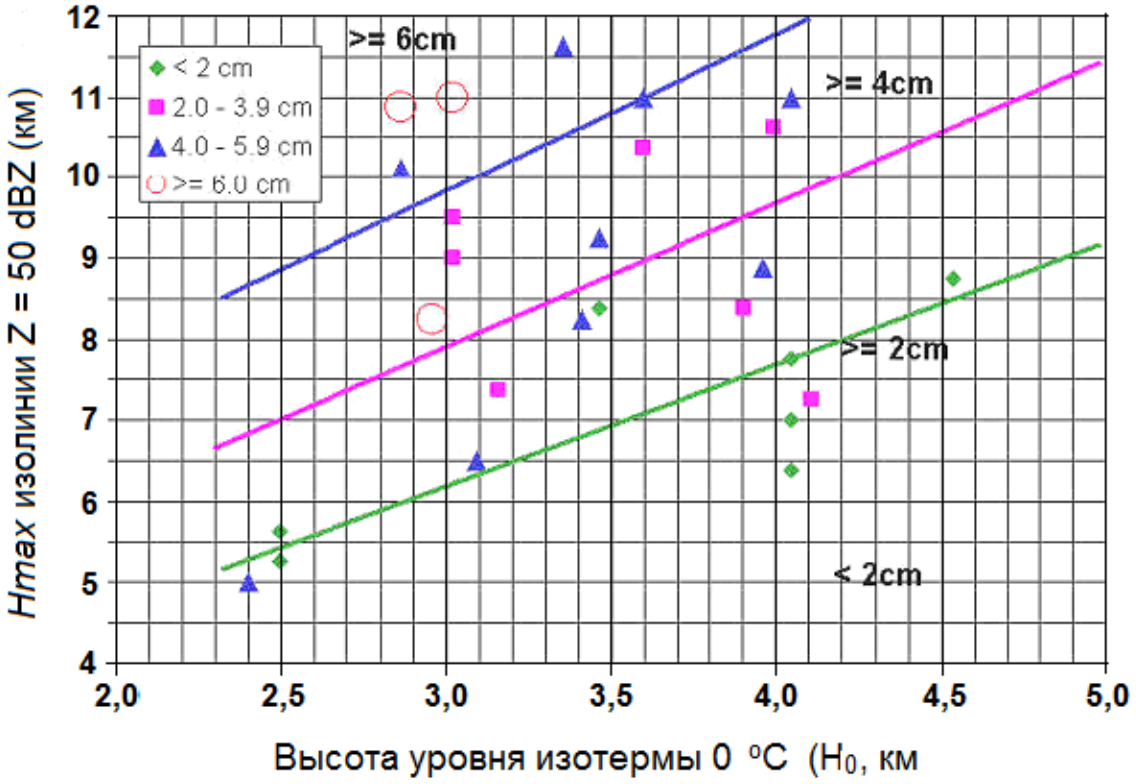


Рис. 7.28 – «Градовая номограмма» применительно к климатологии града в области Сиднея [48]

е) В [51 и др.] предложены методы оценки размера града по значению VIL (т.е. по значению q_m) и плотности VIL, равной VILD = VIL/H_B (рис. 7.29). Однако, учитывая тот факт, что большой вклад в значения этих параметров могут вносить высокое водосодержание интенсивных осадков в теплом слое, более целесообразно для обнаружения града измерять водосодержание переохлажденного слоя облаков.

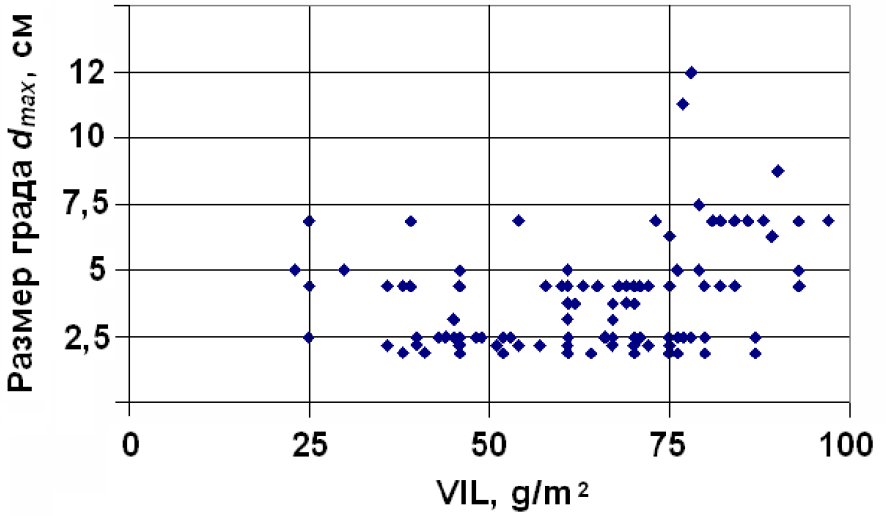


Рис. 7.29 – График оценки размера града по значению VIL [51]

ж) С учетом изложенного рекомендуется распознавания мелкого, среднего и крупного града осуществлять по критериальным значениям радиолокационных характеристик, представленным в таблице 7.6.

Таблица 7.6 – Критерии мелкого, среднего и крупного града

Радиолокационные параметры	Мелкий град, d_{max} < 1 см	Средний град, 1 < d_{max} < 3 см	Крупный град, d_{max} > 3 см
Z_m, dBZ	45 ÷ 55	55 ÷ 65	> 65
ΔH_{45}, км	3 ÷ 4	4 ÷ 7	> 6
ΔH_{55}, км	1 ÷ 3	2,5 ÷ 6	> 5
ΔH_{65}, км	0	1 ÷ 3	> 2,5
$\Delta H_{45} \cdot Z_m$	140 ÷ 180	180 ÷ 400	> 400
Δq_m, кг/м^2	20 ÷ 40	35 ÷ 80	> 70
Δq_0, кг/м^2	15 ÷ 35	30 ÷ 70	> 50
ΔM_{45}, тонн	$10^4 \div 3 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^5 \div 2 \cdot 10^6$	> 10^6
ΔM_{55}, тонн	$10^3 \div 10^5$	$10^5 \div 10^6$	> $5 \cdot 10^5$
ΔM_{65}, тонн	0	$10^3 \div 5 \cdot 10^4$	> $5 \cdot 10^4$
$Z_{10} - Z_{3,2}$, dBZ	0 ÷ 5	5 ÷ 15	> 15
Z_{DR}, dB	< 0	-0,5 ÷ 2,0	0,5 ÷ 2,3
L_{DR}, dB	-30 ÷ -20	-25 ÷ -15	-20 ÷ -10
K_{DP}, °/км		-1 ÷ 1	0,7 ÷ 0,95
$\lvert\rho_{HV}\rvert$		0,9 ÷ 0,95	< 0,95

и) Границы градовых осадков на земле при высотах изотермы 0 °С выше 3 км следует выделять по границе полосы контура 55 dBZ в приземном слое или по карте кинетической энергии града.

7.13 Ограничения радиолокационных методов измерений

7.13.1 Современные автоматизированные метеорологические радиолокаторы (МРЛ и ДМРЛ) являются наиболее информативным источником информации о пространственной структуре полей облачности, явлениях погоды, виде, интенсивности и количестве осадков, направлении и скорости перемещения облачных систем. Это обуславливает широкое применение радиолокационной информации для краткосрочных и сверхкраткосрочных прогнозов погоды, штормооповещения и обеспечения безопасности авиационного, морского и дорожного движения, гидрологических прогнозов и оповещения о вероятности паводков и селей ливневого происхождения.

Автоматизированные МРЛ и ДМРЛ являются незаменимым инструментом для обнаружения, распознавания типа облаков и управления операциями по модификации погоды с целью предотвращения града, искусственного увеличения осадков, улучшения погодных условий над мегаполисами.

Для решения этих задач во многих странах созданы радиолокационные метеорологические сети, круглосуточно обеспечивающие потребителей информацией о фактической погоде [52].

7.13.2 При интерпретации радиолокационных данных, сравнении данных соседних МРЛ и сшивке их информации в единое поле могут быть значительные расхождения, связанные с различными источниками ошибок и спецификой радиолокационных измерений [53]. Для корректного измерения параметров облаков, обеспечения надежного обнаружения града и измерения характеристик осадков необходимо обеспечить:

– высокую точность горизонтирования, ориентирования, градуировки измерительного тракта МРЛ, определения его метеорологического потенциала и автокалибровки в каждом цикле обзора;

– применение корректных алгоритмов первичной и вторичной обработки радиолокационной информации;

– учет уширения радиолуча, нарастающего с расстоянием, приводящего к уменьшению коэффициента заполнения радиолуча и занижению отражаемости облаков на больших удалениях;

– учет нарастающего с расстоянием удаления радиолуча от поверхности земли (из-за различия в их кривизне) и могущего привести к серьезным ошибкам при измерении высот облаков;

– учет ослабления радиоволн в волноводном тракте, ветрозащитном укрытии, атмосферных газах, облаках и осадках;

– исключение углов закрытия обзора местными предметами;

– учет аномальной рефракции радиоволн и др.

Некорректный учет этих факторов приводит к тому, что при сравнении данных соседних МРЛ на одни и те же облака, могут быть ощутимые различия в значениях отражаемости, высот радиоэха, интенсивности и количества осадков, расхождения с данными наземных наблюдений, а также ложные грозы и очаги осадков, связанные с аномальной рефракцией.

7.13.3 *Проблемы, связанные с настройкой, градуировкой и абсолютной калибровкой МРЛ:*

– неудачная настройка УПЧ и АПЧ приемного устройства;

– нестабильность коэффициента усиления приемного устройства;

– повышенные потери в волноводном тракте и вращпереходах;

– размещение облучателя не в фокусе рефлектора и с перекосом;

– ошибки горизонтирования и ориентирования антенны МРЛ, приводящие к завышению или занижению высот радиоэха и ошибкам определения координат облаков;

– неточность установки углов сканирования антенны, исключающая возможность качественной фильтрации радиоэха местных предметов;

– ошибки в градуировке измерительного тракта и определении метеопотенциала МРЛ, приводящие к ошибкам измерения отражаемости;

– ошибки в расчете радиолокационной отражаемости (без учета ослабления в газах атмосферы, облаках, осадках и ветрозащитном укрытии);

– неправильные расчеты высот радиоэха (без учета кривизны и ширины радиолуча).

Ошибки в подготовке МРЛ, как источника информации, и нестабильность его потенциала во времени, могут приводить к ошибкам измерения отражаемости облаков, интенсивности и количества осадков, размера и кинетической энергии града. Это в свою очередь приведет к неточному распознаванию категорий объектов воздействия.

Для устранения некоторых технических недостатков применяемых в противоградовых работах «МРЛ-5», отработавших свои ресурсы, целесообразно провести их модернизацию, включая замену:

– СВЧ усилителя на базе ЛБВ на малошумящий СВЧ усилитель;

– лампового шум генератора на твердотельный шум генератор;

– синхронизатора и усилителя промежуточной частоты приемных устройств на цифровые устройства;

– изношенных датчиков углового положения антенны;

– системы управления приводом антенны на цифровую систему.

7.13.4 *Коэффициент заполнения радиолуча* (K_L) обычно полагают равным 1, но это справедливо только в случае обширных полей однородных осадков из слоисто-дождевых облаков и высоком уровне линии таяния снега. В случае кучево-дождевых облаков K_L уменьшается с расстоянием, так как области высокой отражаемости могут не заполнять зондирующий объем. На удалении R = 200 км при θ = 1,5 градуса диаметр луча достигает 5,2 км. Поперечные размеры локальных максимумов отражаемости обычно меньше этого, поэтому радиолуч охватывает области более низкой отражаемости и значение Z_m может быть занижено на несколько dBZ (например, при K_L = 0,5 на 3 dBZ, а при K_L = 0,3 на 5,2 dBZ). Эти занижения нарастают с расстоянием, приводя к размазыванию градиентов отражаемости, занижению высот повышенного радиоэха и т.д.

Компенсация занижения Z_m путем прибавления эмпирически найденной поправки 0,05 dB/км, начиная с расстояния 100 км [54], частично решает проблему занижения Z_{max}, но не может компенсировать размазывание градиентов отражаемости. Кроме того, величина поправки зависит от масштаба конвективных ячеек и градиентов отражаемости, имеющих региональный ход. Таким образом, допущение K_L = 1,0 может быть одним из серьезных источников ошибок радиолокационных измерений осадков и расхождений данных соседних МРЛ.

В разделе 12.3.1.4 представлена попытка компенсации рассматриваемого занижения отражаемости в зависимости от масштаба неоднородностей облаков и градиентов отражаемости. Однако следует отметить, что эти характеристики зависят от типа облаков (конвективные, слоистообразные), а также имеют региональные различия, требующие дальнейшего исследования.

7.13.5 *Уширение луча* приводит также к завышению высот радиоэха. Во избежание этого при расчете высоты радиоэха следует вычитать половину диаметра луча и учитывать его кривизну относительно поверхности земли:

$$H_B = [R^2 + 7{,}225\cdot10^7 + 2R\cdot8500\cdot\sin\alpha]^{0,5} - 8500 - R\sin\theta/2 + H_{МРЛ}, \quad (7.87)$$

где эффективный радиус кривизны луча $r_{ЭЗ}$ = 4/3$r_З$ = 8500 км; $r_З$ = 6371 км радиус Земли [9].

7.13.6 *Удаление радиолуча от поверхности земли* вследствие различия кривизны радиолуча и поверхности земли приводит к тому, что даже при стандартной рефракции луч с увеличением расстояния все выше поднимается над поверхностью земли и на расстоянии более 150 км практически не охватывает зону осадков. Такой «перелет» радиолуча приводит к занижениям Z_m, площади, интенсивности и количества осадков, размера и кинетической энергии града, нарастающим с расстоянием, а на расстоянии около 200 км осадки вообще могут не обнаруживаться. В случае слоисто-дождевых облаков луч может охватывать «яркую линию» таяния снега даже при нулевых углах сканирования, что приводит к завышению отражаемости от 5 до 16 dB и количества осадков до 5 раз.

7.13.7 *Углы закрытия обзора:* В горной местности неизбежно возникают углы закрытия приземного слоя, ограничивающие обзор.

Например, даже невысокий Ставропольский хребет (300 – 600 м) закрывает обзор Ставропольского «МРЛ-5» в западном и юго-западном направлении на 0,5 – 1,5 градуса. Это приводит к серьезному занижению параметров облаков и осадков в этих направлениях, сокращению площади и интенсивности осадков, в том числе, и градовых. Это же наблюдается в секторах закрытия обзора деревьями, мачтами и другими сооружениями. Размещение МРЛ на подавляющих высотах может решить эту проблему, но не всегда реализуемо из-за отсутствия коммуникаций. Кроме того, при этом требуется обзор при углах ниже горизонта, чтобы обнаружить осадки в ближней зоне.

7.13.8 *Аномальная рефракция радиоволн*, особенно суперрефракция, связанная с выхолаживанием приземного слоя атмосферы за счет радиационных потерь почвы в безоблачные ночи, а также за счет испарения осадков, приводит к обнаружению радиоэха местных предметов ниже радиогоризонта. Без фильтрации аномального радиоэха они могут интерпретироваться как очаги осадков, гроз и даже града. Эти ложные очаги являются серьезной помехой при автоматизированных наблюдениях и могут создавать большой слой ложных осадков. Аномальная рефракция приводит также к искажению высот радиоэха.

Фильтрация радиоэха местных предметов должна быть предусмотрена в программном обеспечении применяемой системы обработки радиолокационной информации, как это выполнено в системе «АСУ-МРЛ» [55].

8 МАКРОФИЗИКА ГРАДОВЫХ ПРОЦЕССОВ

8.1 Классификация градовых процессов

В зависимости от термодинамических условий и пространственной структуры ветра в атмосфере могут развиваться градовые процессы (ГП) различных типов, имеющие разную ячейковую структуру и динамику развития, различное пространственное строение и время существования КЯ, а также различные закономерности их эволюции во времени [1 – 6]. Классификация ГП [1, 4, 5] осуществляется:

– *по числу КЯ*: одноячейковые и многоячейковые ГП;

– *по времени существования КЯ*: коротко и долго живущие;

– *по особенностям структуры и эволюции*: ГП с хорошо организованной структурой и КЯ, имеющими непрерывное распространение в пространстве, и слабо организованной структурой с дискретным распространением;

– *по структуре облачной системы*: компактные кластеры КЯ, линия грозоградовых КЯ и без явной организации структуры.

8.1.1 По особенностям структуры и динамики развития ГП делятся [4] на следующие основные типы (рис. 8.1):

– одноячейковые ГП, облачная система которых состоит из осесимметричных, не взаимодействующих между собой малоподвижных и короткоживущих КЯ, зарождающихся в любой части облачной системы, из которой град выпадает локальными пятнами;

– неупорядоченные многоячейковые ГП, облачная система которых состоит из осесимметричных и несимметричных слабо взаимодействующих между собой КЯ, зарождающихся в любой части облачной системы, движущихся в разных направлениях с разной скоростью, из которых град выпадает пятнами или полосами;

– упорядоченные многоячейковые ГП, облачная система которых состоит из несимметричных периодически зарождающихся на наветренном фланге, взаимодействующих между собой КЯ, движущихся в Северном полушарии преимущественно вправо, а в Южном полушарии влево от направления ведущего потока, из которых град выпадает полосами;

– ГП переходного (гибридного) типа с различными модификациями, имеющими в структуре и динамике развития особенности упорядоченных многоячейковых и суперячейковых ГП, из которых град выпадает полосами;

– суперячейковые ГП, состоящие из одной мощной несимметричной КЯ, длительное время существующей в стадии квазистационарного состояния и движущейся в Северном полушарии вправо, а в Южном полушарии – влево от направления ведущего потока, из которой град выпадает протяженной полосой.

Град может выпадать также из отдельных КЯ фронтальной полосы грозовых очагов, предшествующих формированию того или иного типа ГП

8.1.2 Повторяемость ГП различных типов зависит от региональных условий и может изменяться от года к году. Наименьшую повторяемость (от 5 до 10% случаев) имеют суперячейковые ГП (рис. 8.1), но в ряде регионов они дают от 60 до 80% ущерба от градобитий.

Следует отметить, что тип ГП отчетливо проявляется на стадии максимального развития, до которого могут наблюдаться поля облачности без четкого проявления перечисленных признаков ГП разных типов.

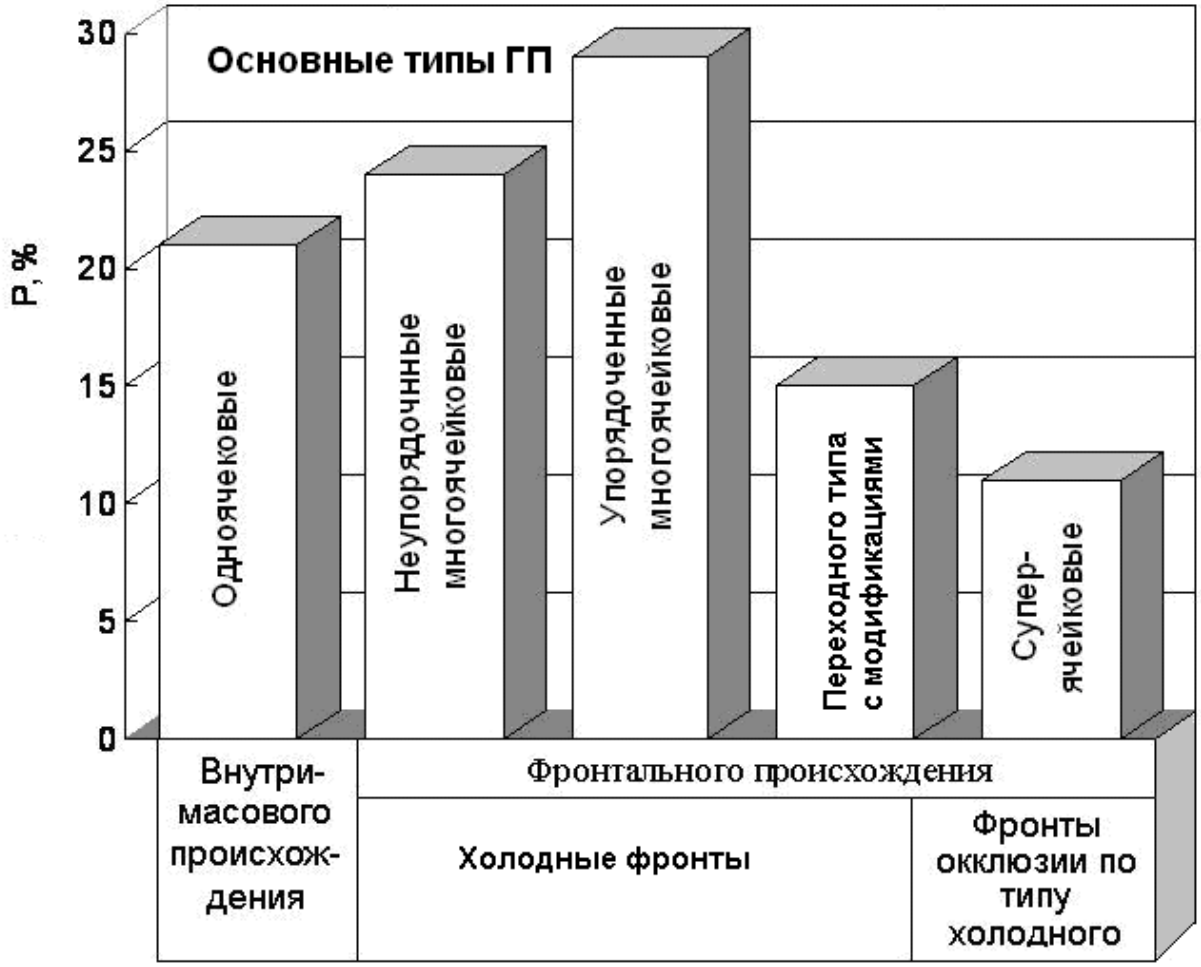


Рис. 8.1 – Повторяемость *P*, % основных типов ГП на Северном Кавказе и синоптические ситуации, при которых они наблюдаются

8.1.3 Несимметричные КЯ ГП по особенностям строения и эволюции во времени делятся (рис. 8.2) на два класса [6]:

а) с правосторонним развитием (рис. 8.2*а*), имеющие область восходящего потока и область нового роста на правом наветренном фланге и движущиеся вправо от ведущего потока, характерные преимущественно для ГП Северного полушария, но отмечающиеся и в Южном полушарии;

б) с левосторонним развитием (рис. 8.2*б*), имеющие область восходящего потока и область нового роста на левом наветренном фланге и движущиеся влево от ведущего потока, чаще встречающиеся в ГП Южного полушария, но отмечающиеся и в Северном полушарии.

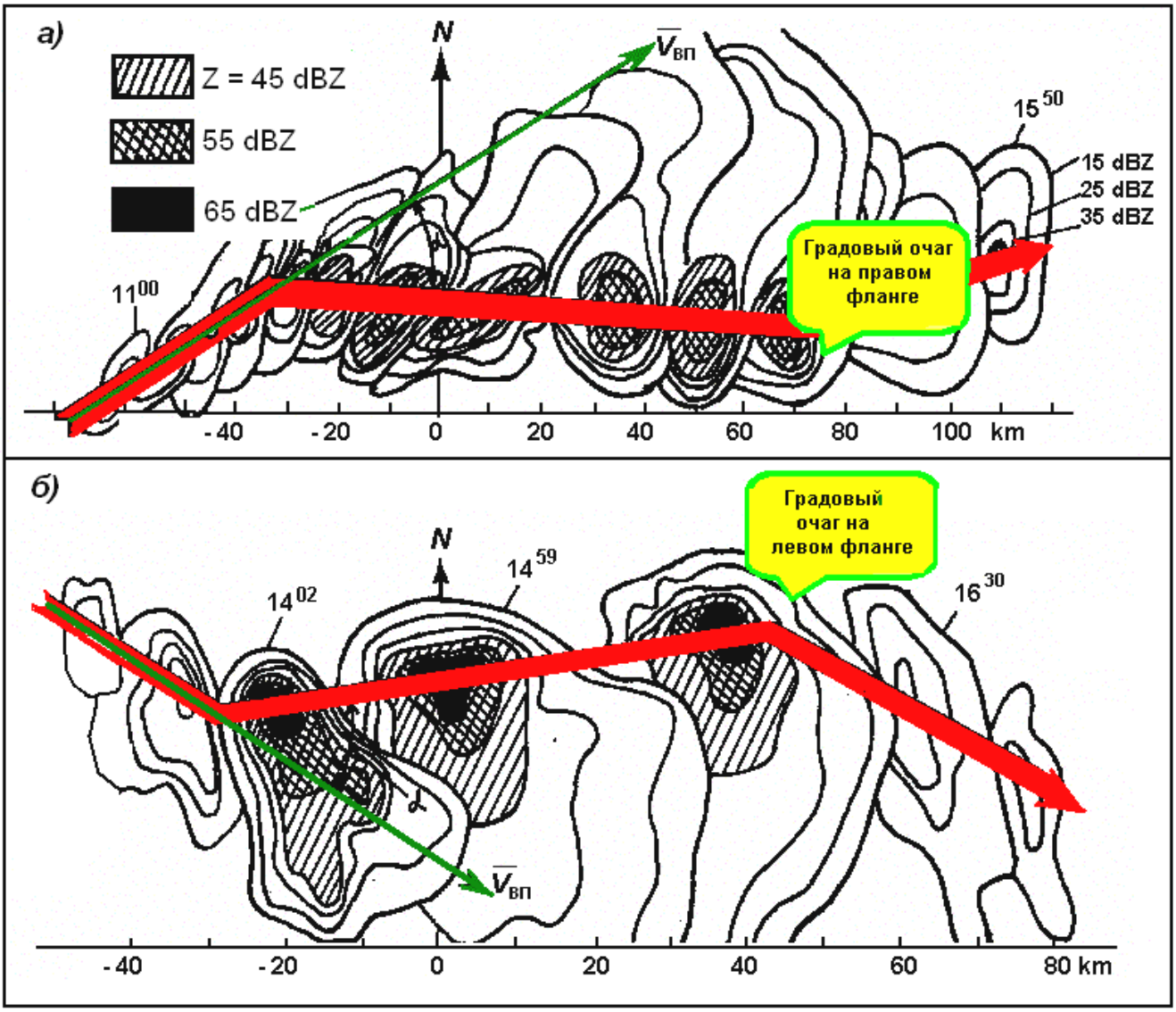


Рис. 8.2 – Структура и перемещение радиоэха суперячейковых облаков с правосторонним (*а*) и левосторонним (*б*) развитием

ГП с правосторонним и левосторонним развитием могут наблюдаться одновременно или с небольшим сдвигом во времени на одной и той же территории. В таких случаях градовые полосы могут иметь разное направление и даже пересекаться (рис. 8.3). Место засева градовых

облаков с правосторонним и левосторонним развитием существенно отличается, поэтому для успешного предотвращения града очень важно правильно определить класс ГП.

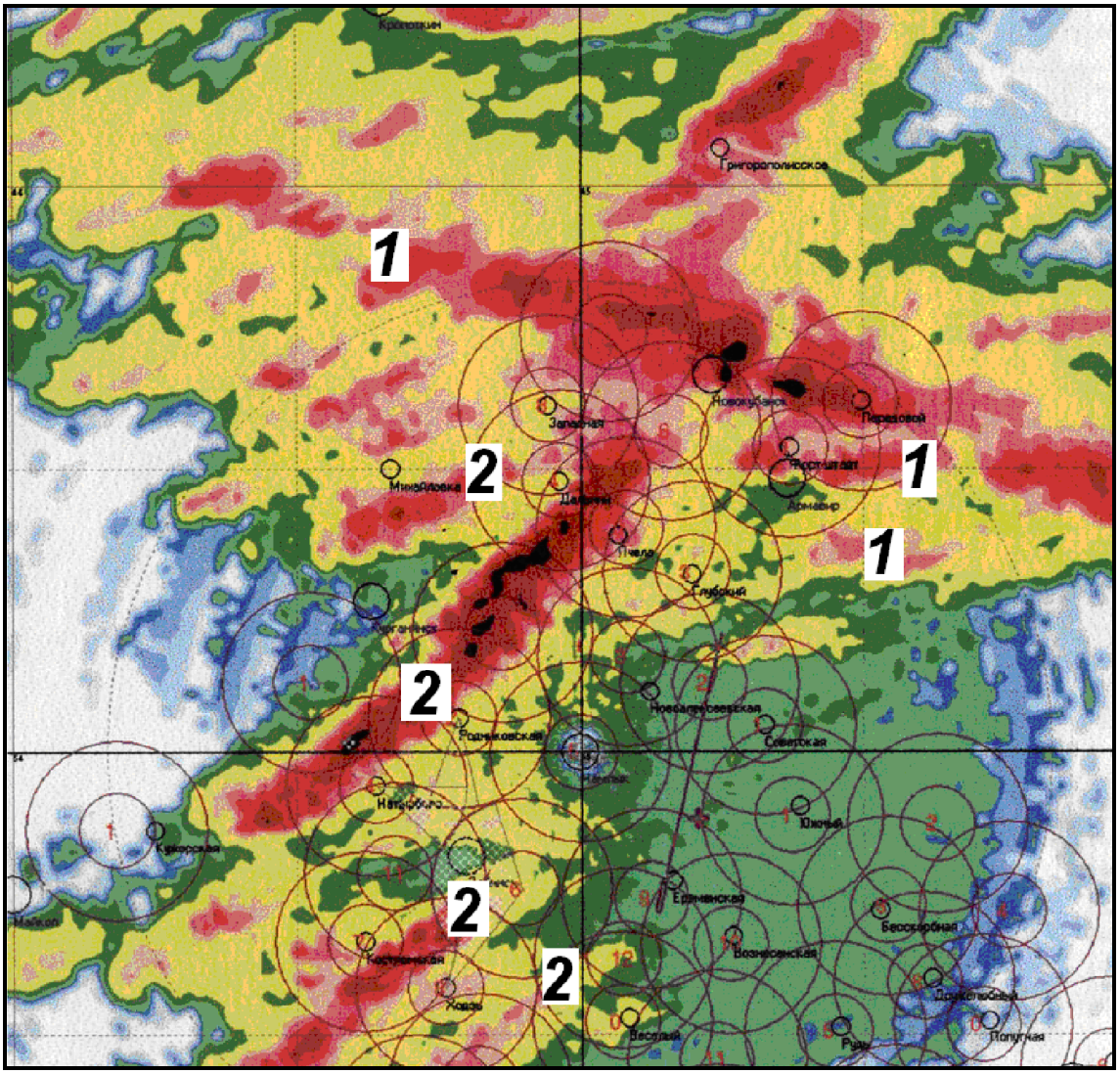


Рис. 8.3 – Пример траекторий перемещения градовых облаков с правосторонним (1) и левосторонним (2) развитием. 07.06.2004. Краснодарский край

8.1.4 Все типы ГП развиваются в дни с конвективной неустойчивостью и повышенным влагосодержанием атмосферы (особенно в приземном слое), а основополагающим фактором развития ГП с различной структурой КЯ (осесимметричных и несимметричных) является пространственная структура ветра, представление о которой дает годограф ветра (рис. 8.4):

– в случаях малой скорости ветра на всех высотах и соответственно малых сдвигах ветра (рис. 8.4*а*) формируются одноячейковые ГП с осесимметричными КЯ;

– в случаях когда, скорость ветра нарастает с высотой без изменения его направления (рис. 8.4*б*) формируются упорядоченные многоячейковые ГП с двумерно несимметричными КЯ, имеющими наклон в направлении ветра;

– в случаях когда, скорость ветра нарастает с высотой, в приземном слое имеется его разворот, а в среднем и верхнем слое направление сохраняется (рис. 8.4*в*), формируются суперячейковые ГП с трехмерно несимметричными КЯ.

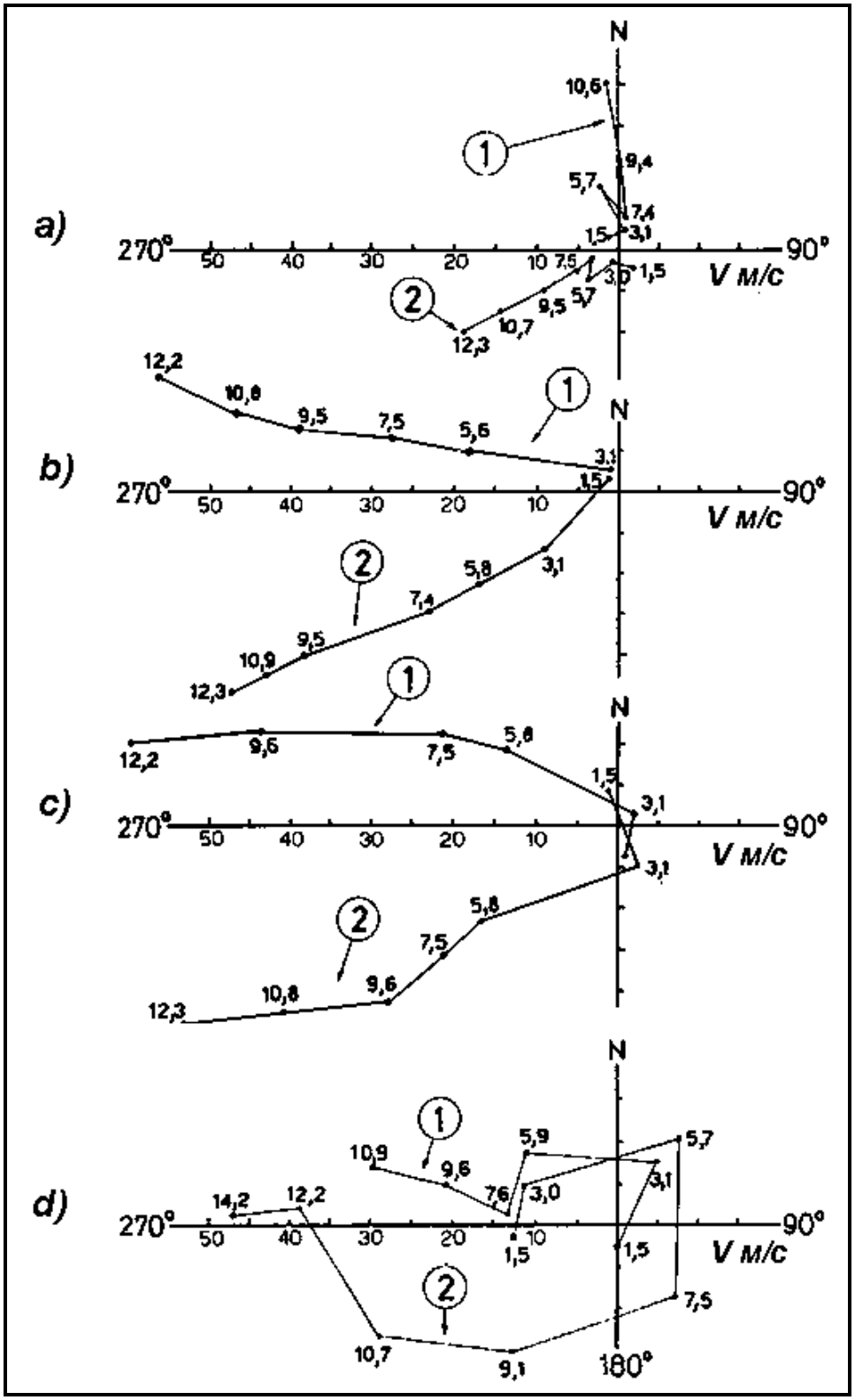


Рис. 8.4 – Типовые годографы ветра в дни с одноячейковыми (***a***), упорядоченными многоячейковыми (***b***), суперячейковыми (***c***) и неупорядоченными многоячейковыми (***d***) ГП с левосторонним (**1**) и правостороннем развитием (**2**)

Во многих случаях пространственная структура ветра отличается от этих идеализированных вариантов. В этих случаях развиваются ГП промежуточных типов: неупорядоченные и переходного типа.

Анализ многолетних данных показал, что интенсивность градобитий зависит от закономерностей эволюции градовых облаков, из которых наибольшее значение имеют скорость развития и количество КЯ:

– интенсивный град обычно выпадает из быстро развивающихся градовых облаков. Мощные градовые облака, как правило, имеют высокую скорость роста в стадии первого радиоэха;

– высокая скорость развития облака на стадии первого радиоэха способствует достижению большой мощности в стадии его зрелости.

Интенсивность градобитий зависит от количества КЯ:

– вероятность интенсивных градобитий обычно уменьшается с увеличением количества одновременно существующих КЯ;

– при развитии мощных суперячейковых облаков наблюдается тенденция диссипации остальных КЯ;

– разделение мощных градовых облаков на несколько КЯ приводит к понижению интенсивности градобитий;

– мощные градовые ячейки способствуют зарождению на наветренном фланге новых КЯ.

В свою очередь темп развития ГП и количество КЯ зависит от термодинамических характеристик атмосферы и структуры ветра в ней. Повышенная конвективная неустойчивость и влагосодержание приземной атмосферы способствует высокой скорости развития ГП, а структура ветра определяет пространственную структуру КЯ, тип ГП, количество развивающихся КЯ и длительность их существования.

8.2 Структура и динамика развития градовых процессов

8.2.1 Одноячейковые градовые процессы

Одноячейковые ГП развиваются в малоградиентных полях пониженного и повышенного давления в дни с малыми скоростями ветра во всем слое облакообразования ($V_{ВП} < 30$ км/ч) и малыми ($\gamma < 10^{-3}$ с$^{-1}$) сдвигами ветра (рис. 8.4*а*) и имеют следующие особенности [1, 4]:

а) облачная система обычно состоит из нескольких одновременно существующих пространственно изолированных (иногда и не изолированных) и не взаимодействующих между собой осесимметричных КЯ, имеющих разные стадии развития (рис. 8.5);

б) радиоэхо КЯ в горизонтальном сечении имеет округлую форму и поперечные размеры порядка от 5 до 15 км, а в вертикальном сечении –

осесимметричную форму, которая существенно трансформируется во времени и может служить показателем стадии развития;

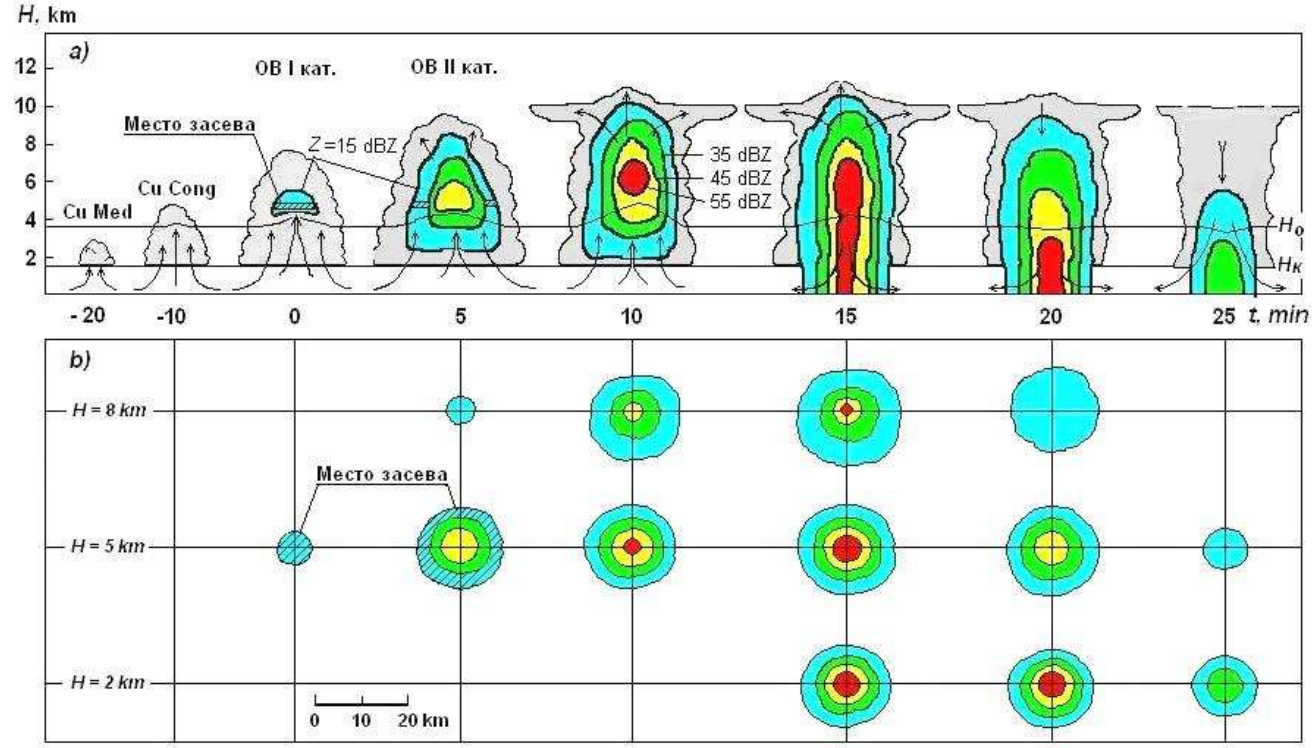


Рис. 8.5 – Схема эволюции во времени отдельной КЯ в одноячейковых ГП: ***а)*** эволюция вертикального сечения радиоэха КЯ (серым цветом показана не обнаруживаемая МРЛ часть КЯ); ***б)*** эволюция горизонтальных сечений радиоэха КЯ на высотах 2, 5 и 8 км. Рекомендуемое место засева указано штриховкой

в) первое радиоэхо КЯ появляется после длительного (от 20 до 30 минут) развития конвективного облака и конденсационного роста облачных частиц. Оно зарождается на стадии начала коагуляционного роста частиц над зоной восходящего потока в виде накрывающего его сверху навеса и обнаруживается МРЛ, когда размеры облачных частиц достигают 100 мкм;

г) первое радиоэхо градообразующих КЯ зарождается в области отрицательных температур на высотах от 4 до 8 км над уровнем моря;

д) после появления первого радиоэха высоко зарождающихся КЯ отмечается быстрый (взрывной) рост мощности радиоэха, поперечных размеров и вертикальной протяженности радиоэха (в первую очередь максимума достигает высота повышенного радиоэха), и зачастую через 5 – 10 минут обнаруживается град, а через 10 – 15 минут отмечается максимальная высота радиоэха (H_B);

е) после достижения максимума развития область повышенного радиоэха с частицами осадков начинает распространяться вниз в область восходящих потоков, выпадающие осадки подавляют восходящие потоки и

стимулируют нисходящие потоки, которые ведут к разрушению КЯ. Поэтому КЯ этого типа ГП являются короткоживущими (от 20 до 40 мин);

ж) указателем зоны восходящих потоков является область «слабого радиоэха», в которой восходящие потоки выносят облачные частицы на большие высоты, а продукты конденсации и сублимации не успевают за время подъема вырасти до размеров, создающих обнаружимое радиоэхо;

и) КЯ малоподвижны или перемещаются с относительно малыми скоростями (от 5 до 25 км/ч) по разным направлениям и с разными скоростями (под влиянием орографической циркуляции);

к) при разрушении одной КЯ в другом месте зарождаются новые;

л) количество одновременно существующих КЯ обычно тем меньше, чем большей мощности достигают они в своем развитии;

м) место зарождения новых КЯ носит случайный характер и определяется контактной конвекцией, обусловленной характером рельефа и подстилающей поверхности. В условиях Северного Кавказа развитие одноячейковых ГП зачастую начинается над горами в первой половине дня и постепенно их развитие перемещается (во второй половине дня) в предгорья и примыкающую равнину. Новые КЯ зарождаются независимо от местоположения предыдущих и слабо дрейфуют над местностью с разной скоростью и по разным направлениям;

н) вследствие короткого времени жизни и малой подвижности КЯ град из них обычно выпадает локальными пятнами с поперечными размерами от 0,1 до 6 км.

8.2.2 Многоячейковые процессы

Облачные системы многоячейковых ГП состоят из нескольких одновременно существующих КЯ, находящихся на разных стадиях развития, имеющих поперечные размеры порядка от 20 до 90 км и высоты радиоэха от 10 до 14 км. В зависимости от пространственной структуры ветра в атмосфере могут реализоваться два различных по строению и динамике развития подтипа многоячейковых ГП [3, 4]: упорядоченные, неупорядоченные.

8.2.2.1 ***Неупорядоченные многоячейковые ГП*** являются переходным типом процессов от одноячейковых к упорядоченным многоячейковым. Они развиваются в дни, когда направление ветра в атмосфере изменяется с высотой (например, в приземном слое – восточный, в слое от 3 до 5 км – юго-западный, в слое от 5 до 8 км – северо-западный и т.п.), а его скорость значительна на всех высотах. Такая структура ветра обусловливает асимметрию конвективных ячеек (КЯ), находящихся на периферии облачной системы, разное направление

наклона и навеса их радиоэха и даже разные направления и скорости перемещения. Их особенностями является следующее:

а) облачная система состоит из нескольких, а зачастую из множества слабо взаимодействующих между собой КЯ (рис. 8.6), находящихся на разных стадиях развития;

б) КЯ в зависимости от своего местоположения могут иметь разное строение: находящиеся в центре облачной системы имеют преимущественно осесимметричное строение, а на периферии облачной системы – обычно несимметричное строение и навес радиоэха, указывающий на местоположение восходящего потока;

в) направление навеса радиоэха для разных КЯ обычно различно и связано с направлением действующего на них потока, поэтому навес радиоэха КЯ может быть ориентирован как вправо, так и влево от ведущего потока. Соответственно, КЯ могут иметь правостороннее либо левостороннее развитие;

г) КЯ могут возникать в любой части облачной системы и иметь различные направления и скорости перемещения;

д) место возникновения новых КЯ и диссипации старых трудно предсказать, что осложняет АВ на них;

е) град может выпадать пятнами из малоподвижных КЯ и полосами из несимметричных перемещающихся КЯ.

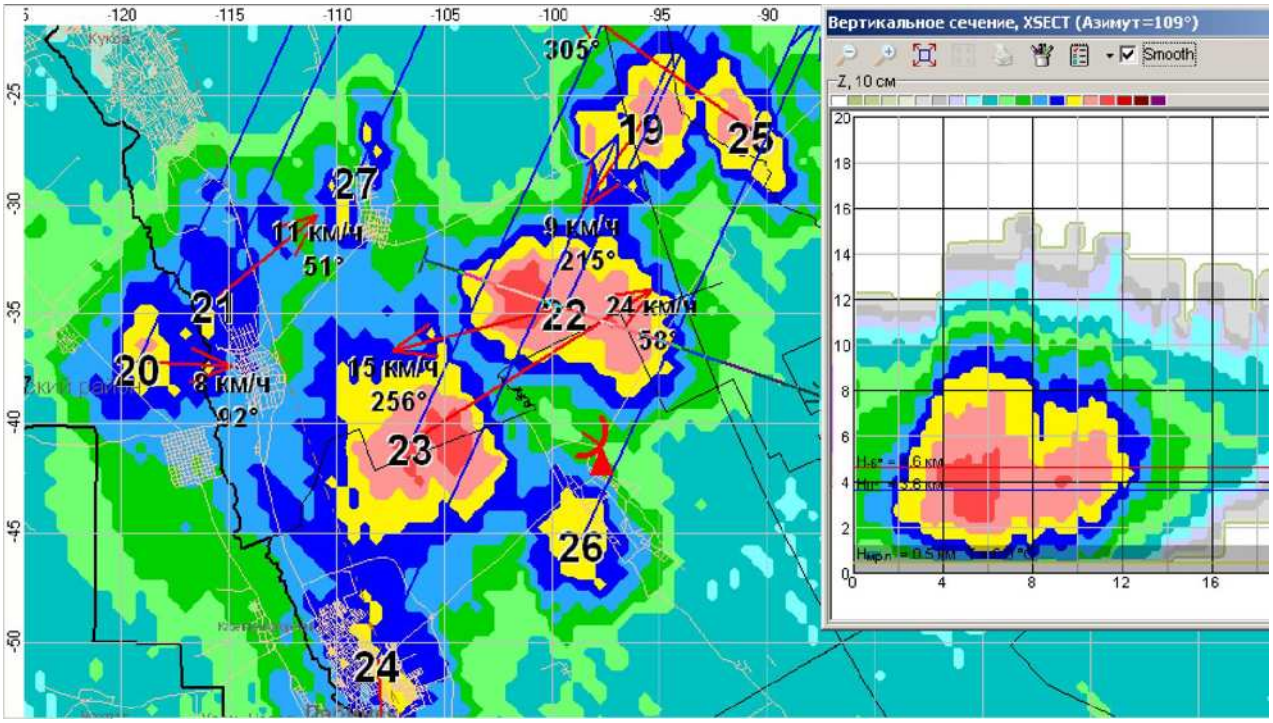


Рис. 8.6 – Облачная система неупорядоченного многоячейкового ГП. Номера КЯ (19 – 26) указаны в хронологическом порядке их зарождения; красными стрелками показаны вектора перемещения КЯ с указанием направления и скорости; справа во врезке показано вертикальное сечение КЯ № 22

8.2.2.2 ***Упорядоченные многоячейковые ГП*** имеют фронтальное происхождение и развиваются в дни, когда направление ветра в слое облакообразования почти не меняется, а его скорость растет с высотой. Скорость ведущего потока $V_{ВП}$ варьирует от 40 до 100 км/ч Сдвиг ветра обычно умеренный от 10^{-4} до $5{\cdot}10^{-3}$ $с^{-1}$. Наличие такого сдвига ветра обусловливает асимметричность КЯ и в отличие от КЯ одноячейковых ГП, обеспечивается лишь частичное торможение восходящих потоков выпадающими осадками и более продолжительное существование КЯ. Они представляют собой класс хорошо организованных по структуре и динамике развития ГП, имеющих следующие отличительные особенности:

а) облачная система обычно состоит из трех и более несимметричных взаимодействующих между собой КЯ и периодически обновляется за счет развития новых КЯ (рис. 8.7 и 8.8);

б) новые КЯ обычно зарождаются на наветренном фланге облачной системы (в Северном полушарии на правом наветренном фланге, а в Южном полушарии на левом наветренном фланге), а диссипация старых КЯ происходит на подветренном фланге;

в) усиление очередной КЯ приводит к зарождению на ее правом фланге новой КЯ, которая, быстро развиваясь, своими осадками частично подавляет восходящий поток, питающий предыдущую (материнскую) КЯ, приводит к ее ослаблению и диссипации;

г) периодичность появления новых КЯ в условиях Северного Кавказа составляет от 10 до 30 минут;

д) за время существования упорядоченных многоячейковых ГП может развиваться несколько, а иногда и десятки КЯ;

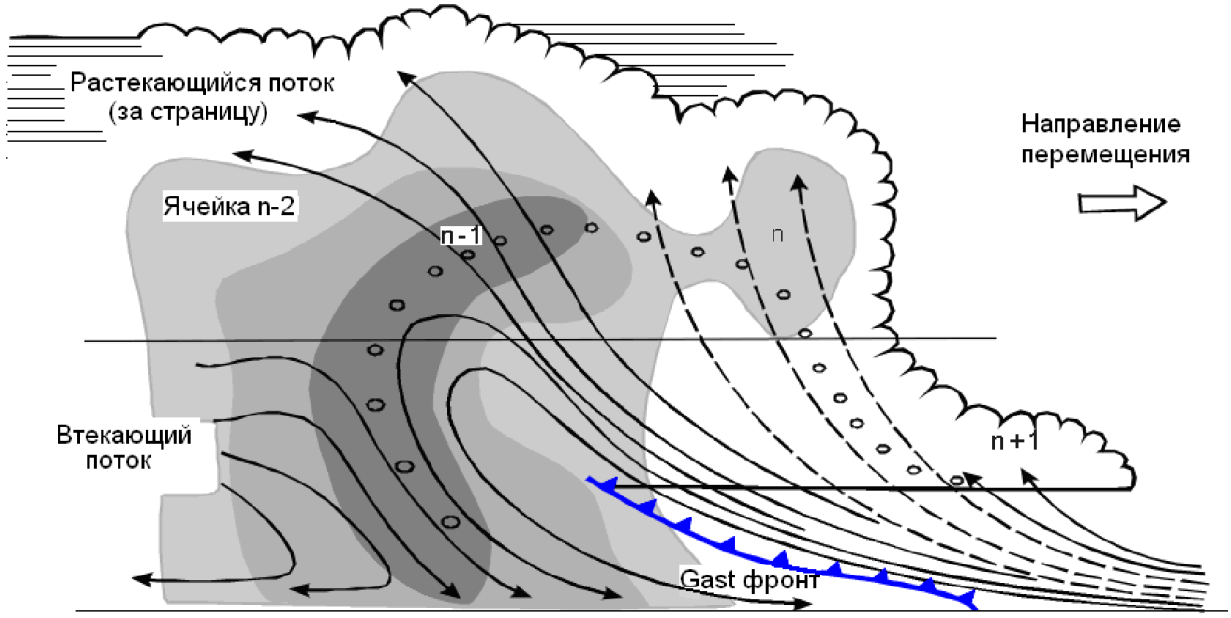


Рис. 8.7 – Схема ячейковой структуры облачной системы упорядоченного многоячейкового ГП по Браунингу и Футу [7] (n, n – 1, n + 1 – номера КЯ)

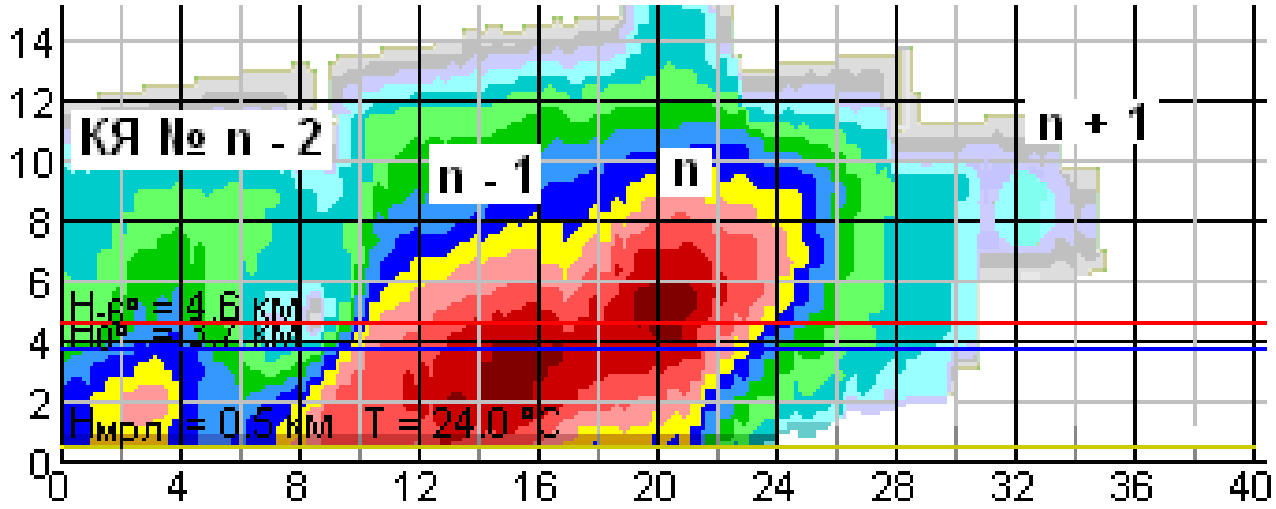


Рис. 8.8 – Вертикальное сечение реального упорядоченного многоячейкового процесса на Северном Кавказе

е) КЯ многоячейкового ГП имеют структуру и поведение, подобные одноячейковым ГП, но при этом имеют значительную асимметричность и наклон в направлении перемещения или вправо от него в виде навеса мощного радиоэха, являющегося указателем области восходящих потоков, выделяемой в структуре радиоэха как область слабого радиоэха. Время существования этой области составляет от 10 до 20 минут, а скорость восходящих потоков может достигать от 20 до 40 м/с;

ж) градовый очаг располагается преимущественно на наветренной стороне КЯ, а область восходящего потока – впереди и правее градового очага. Градовый очаг имеет наклон в сторону зоны восходящих потоков, образуя над ней навес мощного радиоэха;

и) навес радиоэха градовых КЯ обычно направлен вправо от направления смещения облачной системы и вправо от направления перемещения КЯ;

к) первое радиоэхо градовых КЯ обычно зарождается выше уровня изотермы 0 °С (на высотах от 4 до 8 км);

л) направление перемещения облачной системы (т. е. из распространения процесса облакообразования) отклоняется вправо от направления ведущего потока на угол β, варьирующий в пределах от 5° до 40° (он складывается из перемещения КЯ и периодического развития новых КЯ на правом фланге);

м) КЯ движутся влево от облачной системы (под углом от 0° до 30°), но вправо от ведущего потока (на угол от 5° до 40°), который тем больше, чем интенсивнее ГП;

н) скорость перемещения облачной системы от 2 до 2,5 раз меньше скорости ведущего потока, а КЯ отстают от него примерно от 1,5 до 2 раз.

Причем слабые КЯ увлекаются ведущим потоком, а мощные градовые КЯ отстают от него и движутся вправо;

о) скорость перемещения КЯ варьирует в пределах от 30 до 50 км/ч, достигая иногда 80 км/ч;

п) градобития при этих ГП могут наблюдаться из нескольких КЯ, каждая из которых дает полосу града от 3 до 10 км шириной и от 10 до 50 км длиной, поэтому градобития охватывают значительную площадь.

8.2.3 Процессы переходного типа

ГП переходного типа относятся к классу хорошо организованных и имеют различные *модификации*, промежуточные между упорядоченными многоячейковыми и суперячейковыми. Они развиваются в дни с высокой конвективной неустойчивостью и повышенным влагосодержанием атмосферы, когда ветер одного направления нарастает с высотой, но в приземном слое имеет направление, отличное от ветра в среднем слое облакообразования. Их развитию благоприятствует прохождение холодных фронтов и фронтов окклюзии по типу холодного [3, 4]. Эти ГП сопровождаются интенсивными градобитиями и имеют четыре подтипа:

8.2.3.1 *Первый подтип* ГП переходного типа на стадиях развития и диссипации обычно состоит из 2 или 3 КЯ и имеет особенности упорядоченного многоячейкового процесса, но на стадии максимального развития имеет мощную КЯ с особенностями строения и динамики развития, характерную для суперячейки (рис. 8.9).

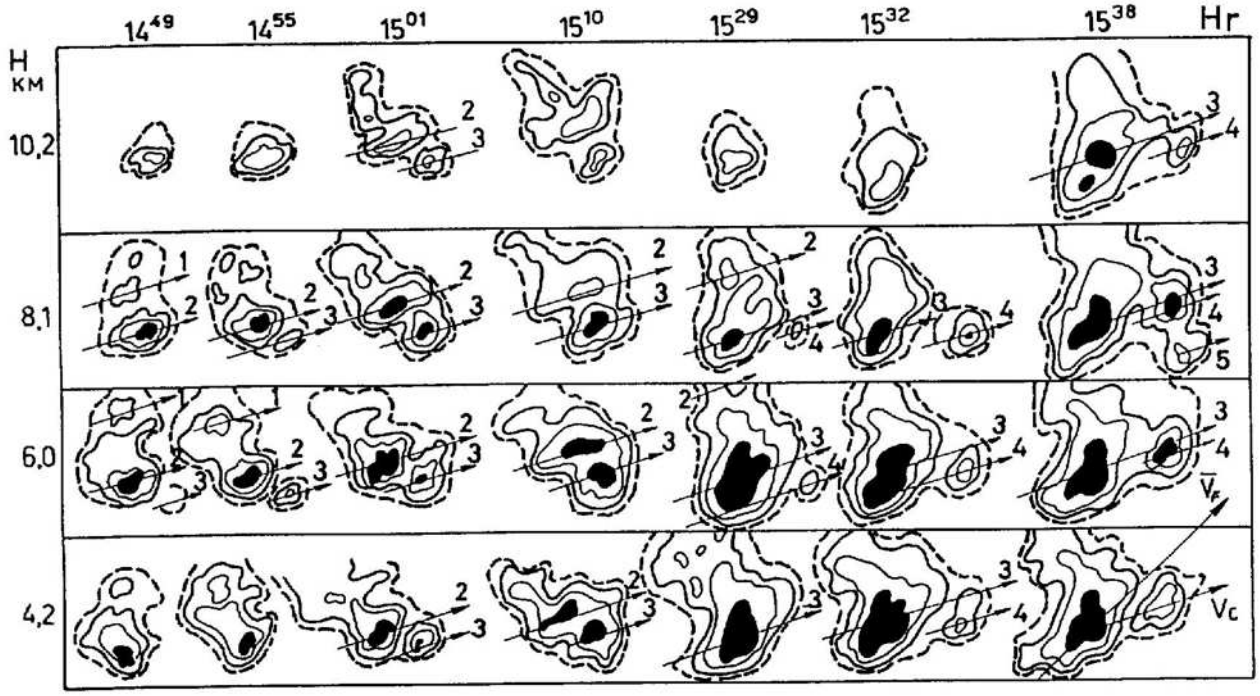


Рис. 8.9 – Характерная картина эволюции ГП переходного типа первого подтипа [4]. Стрелками показано направление перемещения КЯ

На третьем этапе суперячейка трансформируется в упорядоченный многоячейковый ГП. КЯ в нем, как и в случае упорядоченных многоячейковых ГП, несимметричны, имеют навес радиоэха, ориентированный вправо от направления перемещения на угол φ от 0° до 40°. Направление перемещения КЯ на стадии максимального развития отклоняется вправо от ведущего потока на угол от 0° до 30°.

8.2.3.2 *Второй подтип* ГП переходного типа состоит из нескольких периодически возникающих на правом фланге новых КЯ (рис. 8.10), но в отличие от упорядоченных многоячейковых ГП КЯ пространственно разнесены (их радиоэхо изолировано друг от друга).

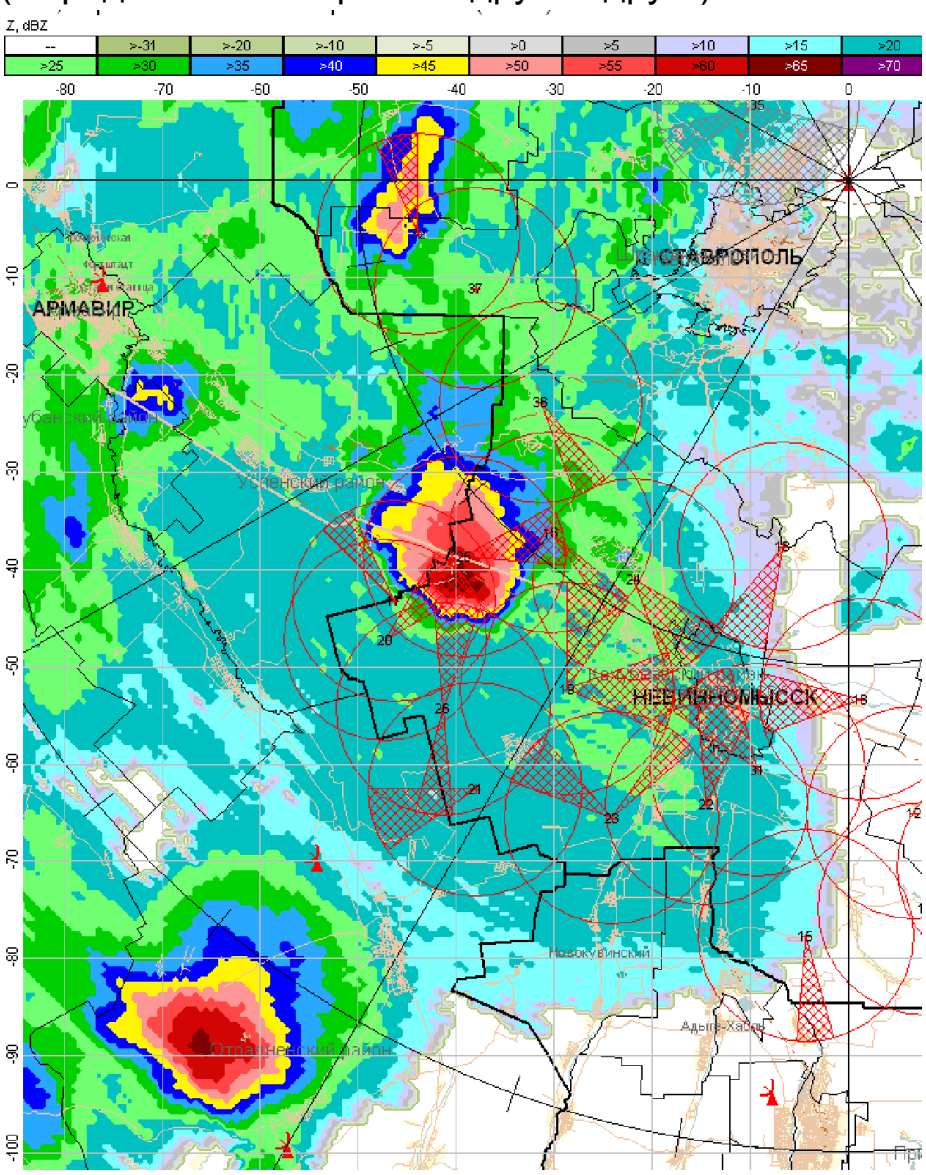


Рис. 8.10 – Карта Z_m при втором подтипе ГП переходного типа

Структура и динамика развития каждой КЯ похожи на то, что наблюдается в суперячейках (несимметричное строение, навес радиоэха, квазинепрерывное обновление во фронтальной правофланговой части). На Северном Кавказе в течение дня может наблюдаться от 5 до 7 таких

КЯ, каждая из которых дает полосу града. Новые КЯ формируются на наветренном фланге справа от предыдущей, на удалении от 20 до 40 км и с периодичностью от 40 до 60 минут. Полосы осадков из каждой КЯ обычно параллельны друг другу (рис. 8.11) и ориентированы вправо от ведущего потока, а процесс облако– градообразования отклоняется вправо от ведущего потока на угол до 90°.

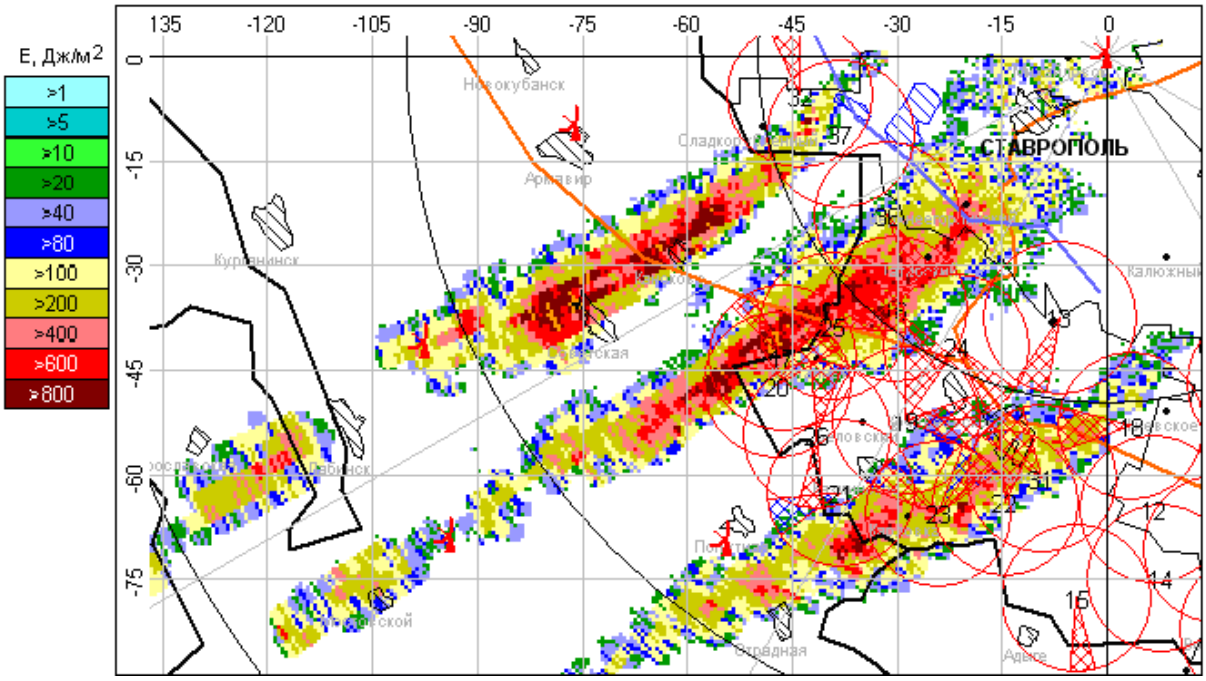


Рис. 8.11 – Карта кинетической энергии града при втором подтипе ГП переходного типа

8.2.3.3 *Третий подтип* ГП переходного типа на первом этапе имеет структуру и особенности суперячейки со значительным отклонением навеса радиоэха вправо от направления перемещения. В дальнейшем навес радиоэха постепенно разворачивается по направлению перемещения, а на наветренном фланге формируется второй навес радиоэха (вторая область восходящих потоков) под углом 90° к направлению перемещения облака. Через 10 – 20 мин старый навес исчезает, новый увеличивается и также начинает разворачиваться на подветренную сторону. Подобные ротации зоны восходящих потоков с цикличностью около 90 минут отмечаются и в мощных многоячейковых ГП.

8.2.3.4 *В четвертом подтипе* ГП переходного типа после появления двух зон питания суперячейки в области нового навеса радиоэха формируется новая КЯ, которая быстро усиливается и превращается в суперячейку, а старая оттесняется на подветренный фланг и диссипирует. Полоса градовых осадков при этом непрерывна, но имеет изломы.

8.2.4 *Суперячейковые ГП*

Суперячейковые ГП обычно формируются при прохождении фронтов окклюзии по типу холодного в дни с умеренной и сильной конвективной неустойчивостью, высоким влагосодержанием приземного слоя атмосферы, где формируется восходящий поток.

Ветер (со средним и сильным сдвигом) имеет одно направление в среднем и верхнем слое облакообразования и разворот в нижнем слое тропосферы примерно на 90° (с юго-восточного на юго-западный). Такая структура ветра благоприятствует пространственному разделению области восходящих потоков и выпадающих осадков, исключая, тем самым, подавление восходящих потоков осадками и обеспечивая длительное существование суперячейки. Суперячейковые ГП являются наиболее мощными среди ГП и имеют [1 ÷ 6] следующие особенности:

а) облачная система состоит из одной сверхмощной КЯ, имеющей обычно эллиптическую форму, с характерными горизонтальными размерами от 30 до 50 км и высотой от 11 до 16 км (рис. 8.12);

б) характерной особенностью суперячеек является наличие на наветренном фланге обширного навеса радиоэха протяженностью от нескольких км до 20 км (рис. 8.13). Навес радиоэха является указателем наличия мощного восходящего потока, скорость которого обычно составляет от 20 до 40 м/с;

в) Основание области восходящего потока выделяется в виде области слабого радиоэха (рис. 8.13), ограниченного во фронтальной и правофланговой частях высокими градиентами отражаемости и крюком радиоэха в приземном слое. Сверху область восходящего потока накрывает навес мощного радиоэха (иногда и свесом радиоэха). Область навеса радиоэха может изменяться в размерах, но сохраняется продолжительное время;

г)градовый очаг и зона повышенного радиоэха в суперячейках смещены на наветренный фланг, располагаются на стыке с зоной мощных восходящих потоков и частично накрывают ее (рис. 8.12*в*);

д) развитию суперячеек обычно предшествует облачная система из нескольких КЯ или фронтальная полоса грозовых очагов. При этом суперячейка формируется из новой КЯ, зарождающейся на правом наветренном фланге облачной системы;

е) после формирования суперячейка приобретает хорошо организованную структуру, которая сохраняется в течение длительной стадии квазистационарного состояния, в которой она без существенных изменений характеристик может существовать до нескольких часов. В этой стадии суперячейка перемещается почти прямолинейно со скоростью

примерно в 2 раза меньше скорости ведущего потока, отклоняясь от направления ведущего потока на угол от 10° до 90° (рис. 8.14): вправо – в случае правостороннего развития и влево – в случае левостороннего развития;

ж) по мере развития суперячейки все другие КЯ распадаются, и к моменту ее максимального развития в радиусе нескольких десятков км других КЯ не наблюдается. В течение одного дня может наблюдаться от 2 до 4 суперячейковых облаков, разнесенных во времени зарождения от 1 до 2 ч и в пространстве от 30 до 70 км [4].

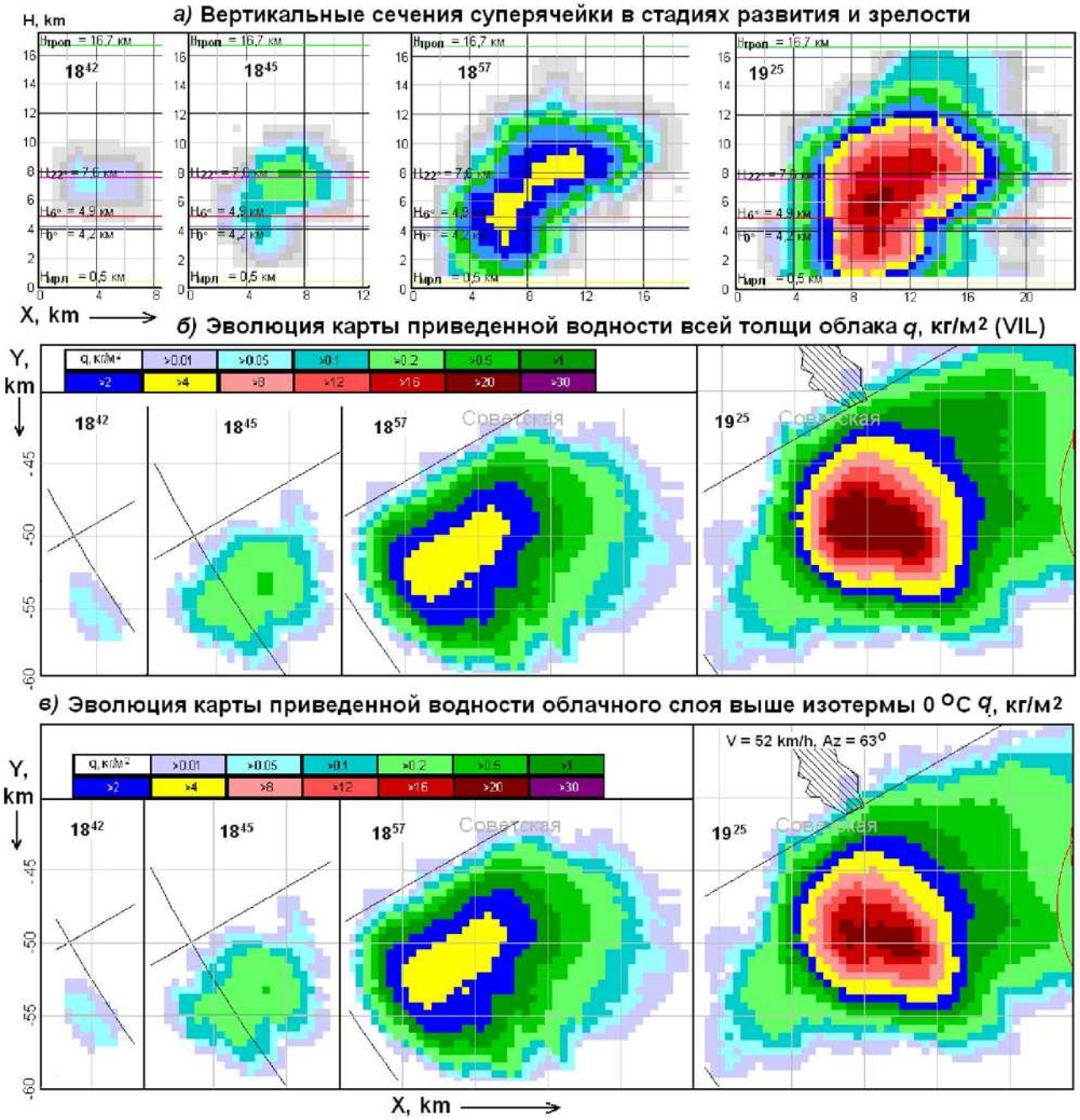


Рис. 8.12 – Эволюция структуры радиоэха суперячейки от начала развития до стадии зрелости: ***а)*** вертикальные сечения в изолиниях Z: в период зарождения в 18^{42}, в стадии развития в 18^{45} и 18^{57} и в стадии зрелости в 19^{25}; ***б)*** и ***в)*** карты приведенной водности всей толщи и переохлажденного слоя облака

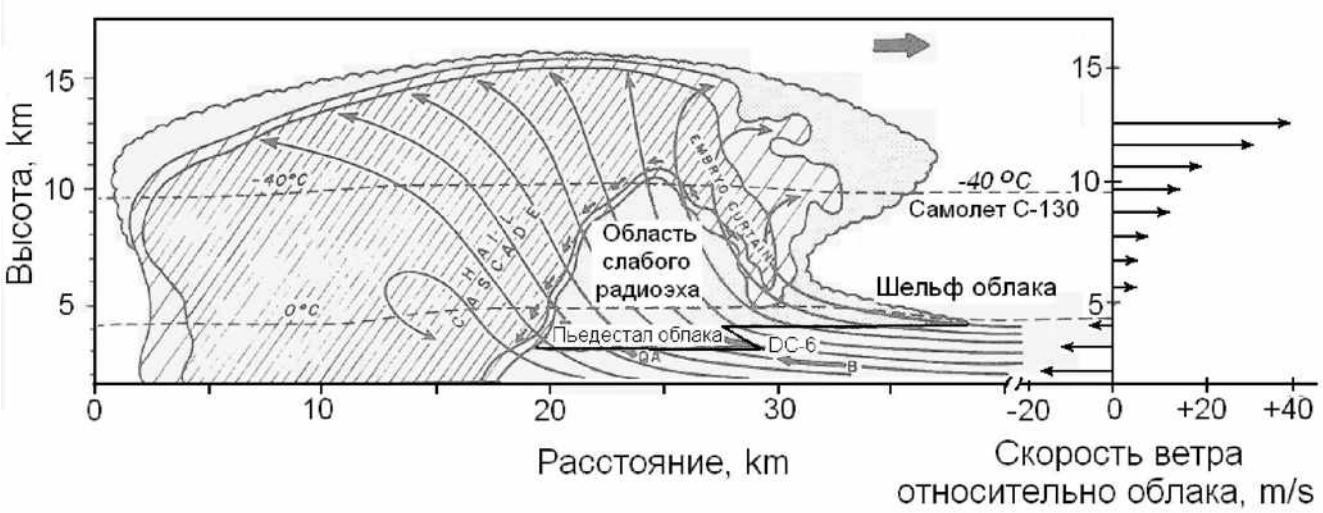


Рис. 8.13 – Вертикальное сечение суперячейкового градового облака (Fleming storm) в азимуте 340 – 160 градусов с указанием места зарождения и траектории градин (показано стрелочками). Справа показан профиль скорости ветра по данным радиозондирования в 50 км южнее [7]

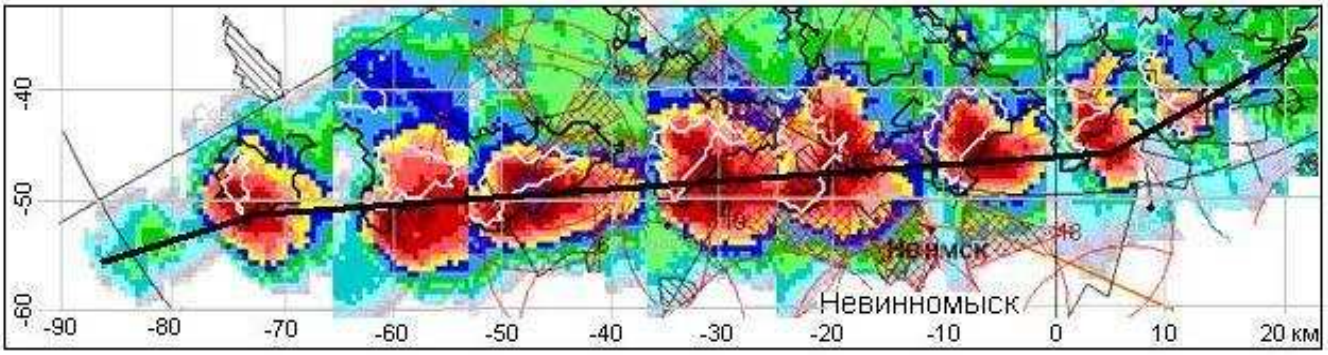


Рис. 8.14 – Траектория перемещения суперячейкового градового облака

и) суперячейковые облака, как и другие мощные градовые облака, обтекаются горизонтальными потоками воздуха в окружающей атмосфере (рис. 8.15), взаимодействие которых с мощными восходящими потоками обусловливает развитие фидерных облаков на наветренном фланге и смещение по мере развития в область основного втока в облако.

к) Суперячейковые ГП сопровождаются катастрофическими градобитиями, шквальным ветром, интенсивными осадками, приводящими к паводкам и селям, а также смерчами, усугубляющими их разрушительный потенциал. Ширина полосы града может варьировать от 4 до 20 км, а ее длина от нескольких десятков км до 200 км. Отмечаются случаи, когда длина градовых дорожек достигает 300 км, а ширина 40 км. Диаметр выпадающего града может иногда достигать 6 см и более. На Северном Кавказе их долю приходится в отдельные годы до 70% ущерба, наносимого всеми градобитиями.

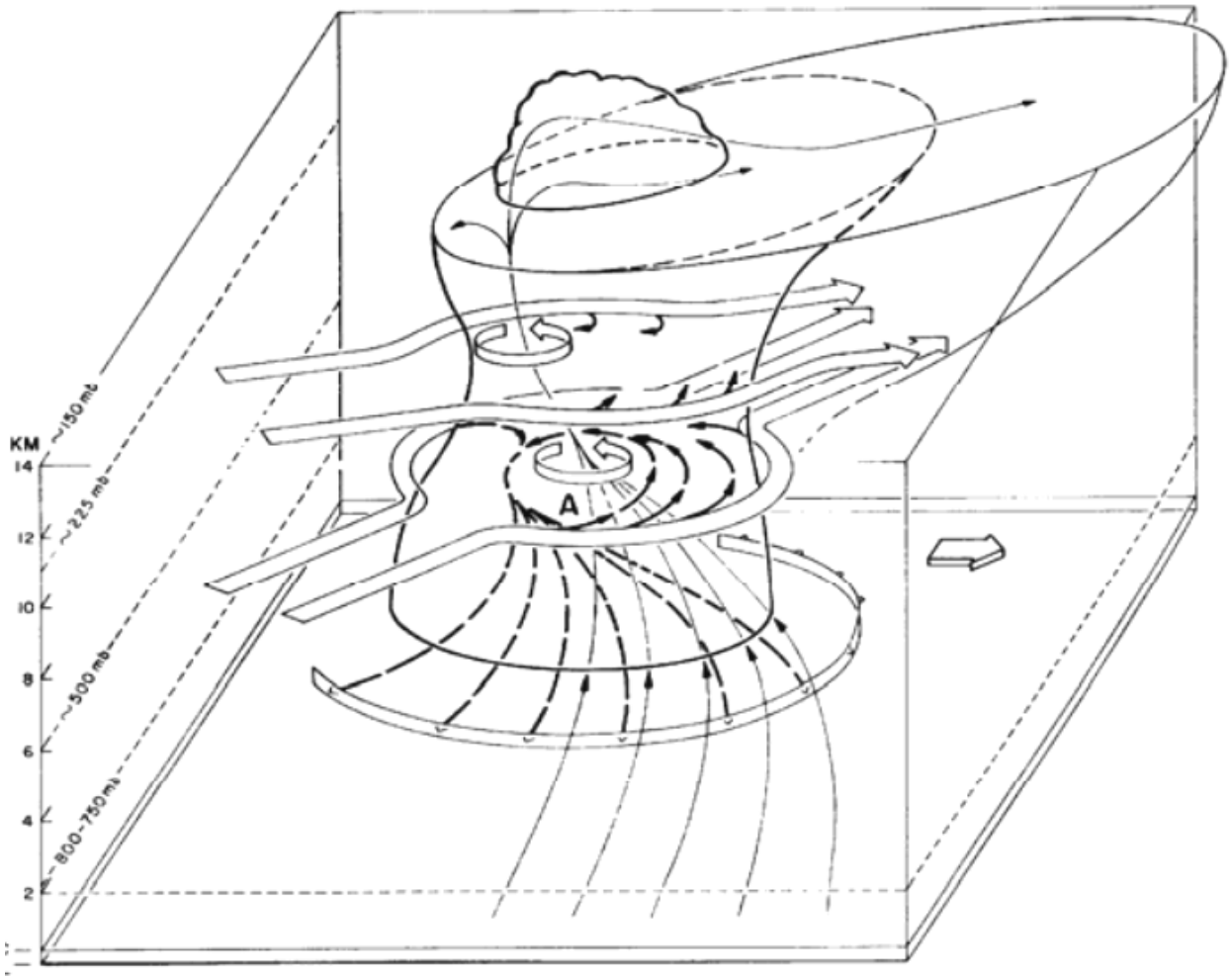


Рис. 8.15 – Схема обтекания суперячейки воздушными потоками [8]

Большая продолжительность жизни суперячеек обусловлена также тем, что интенсивные градовые и ливневые осадки на наветренном фланге стимулируют формирование мощного нисходящего потока, который, растекаясь у поверхности земли, образует мезофронт (Gast фронт, или фронт порыва) и шквал порывистого ветра. Этот фронт распространяется впереди зоны осадков (рис. 8.16) и обусловливает вынужденный подъем предоблачного воздуха [7], скорость подъема которого значительно возрастает выше уровня конденсации за счет выделения теплоты конденсации. Интенсивный процесс образования града и его выпадение поддерживает существование мезофронта, который стимулирует формирование мощной струи восходящего потока. Такой устойчивый процесс градообразования имеет непрерывное распространение в пространстве за счет квазинепрерывного обновления во фронтальной части и разрушения в тыловой. Обновление во фронтальной части происходит дискретно [4, 7] за счет развития с периодичностью от 2 до 5 мин фидерных облаков, первое радиоэхо которых возникает на наветренном фланге навеса радиоэха суперячейки, и сливается с ним по мере развития.

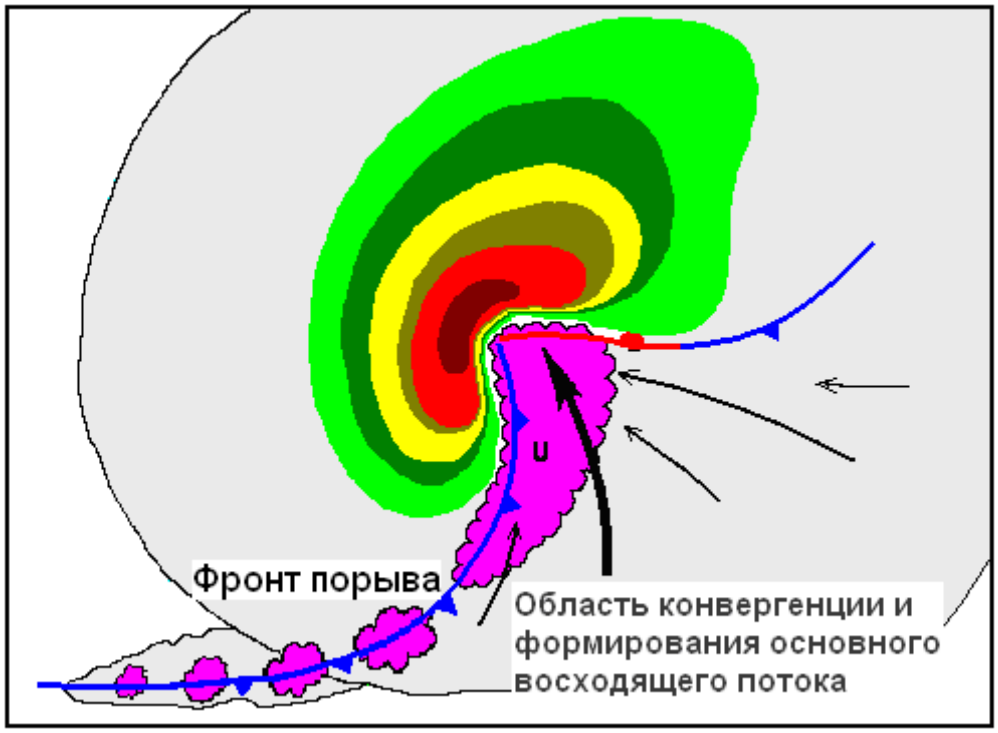


Рис. 8.16 – Схема облачной системы суперячейкового облака [7]

8.2.5 Следует отметить, что град может выпадать также из некоторых КЯ фронтальной полосы грозовых очагов, предшествующих формированию многоячейковых и суперячейковых ГП (рис. 8.17)

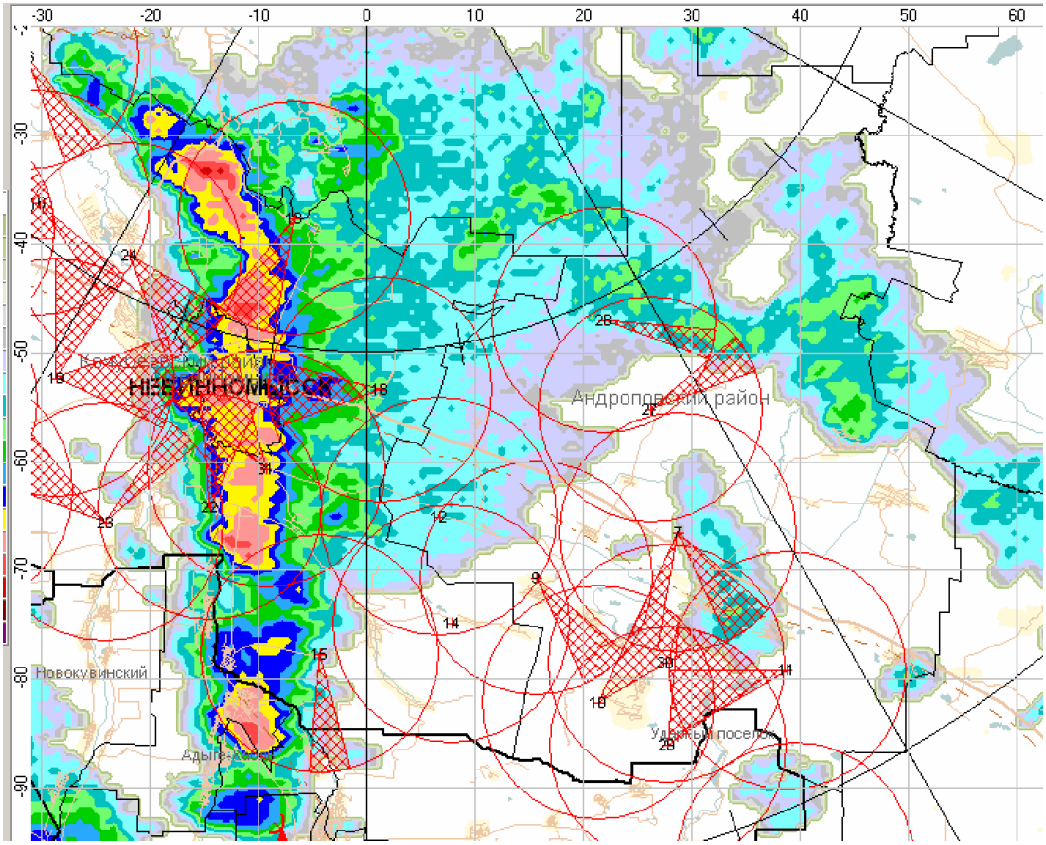


Рис. 8.17 – Фронтальная полоса грозовых очагов, предшествующая формированию многоячейковых, переходного типа и суперячейковых ГП

8.3 Особенности перемещения градовых облаков

Направление и скорость перемещения градовых облаков определяются вектором ведущего потока ($V_{ВП}$) и зависит от стадии развития и мощности градовых облаков, а также физико-географических особенностей региона.

8.3.1 *В одноячейковых процессах*, развивающихся в малоподвижной атмосфере, КЯ движутся с малыми скоростями и по разным направлениям, по-видимому, под влиянием орографической циркуляции.

8.3.2 В суперячейковых и многоячейковых процессах КЯ на стадиях развития и диссипации смещаются по направлению и со скоростью ведущего потока, а на стадии квазистационарного состояния перемещаются вправо от него. Фудзита [9] это объяснял действием сил Кориолиса и Магнуса. Обширная область восходящего потока в мощных градовых облаках представляет собой область низкого давления, имеющую под влиянием сил Кориолиса циклоническое вращение. На вращающийся против часовой стрелки восходящий поток, находящийся в поле горизонтального ветра, действует сила Магнуса, отклоняющая его вправо от ведущего потока. Действие этих сил тем больше, чем больше W и $V_{ВП.}$ Следовательно, чем мощнее градовое облако, тем на больший угол может отклониться направление его перемещение от ведущего потока.

По более современным представлениям, действие силы Кориолиса при таких мезомасштабных процессах мало и отклонение направления перемещения мощных градовых от направления ведущего потока объясняется другими причинами. В Северном полушарии направление циклонического вращения восходящего потока направлено навстречу ведущему потоку и происходит вычитание их скоростей, а на правом фланге направление ведущего потока и циклонического вращения восходящего потока совпадает и происходит их сложение. Вычитание скоростей на левом фланге и уменьшение скорости потока в соответствии с законом Бернулли приводит к повышению давления, а их сложение к понижению давления на правом фланге (рис. 8.18). В результате этого восходящий поток распространяется в сторону меньшего давления – вправо от ведущего потока, и облако, питаемое восходящим потоком, вращающимся против часовой стрелки, имеет правостороннее развитие и движется вправо от ведущего потока [6].

В южном полушарии направление вращения циклонов и восходящих потоков обратное (рис. 8.19). Вследствие этого восходящий поток в южном полушарии распространяется влево от ведущего потока и облако с вращающимся по часовой стрелке восходящим потоком, имеет

левостороннее развитие и движется влево от направления ведущего потока.

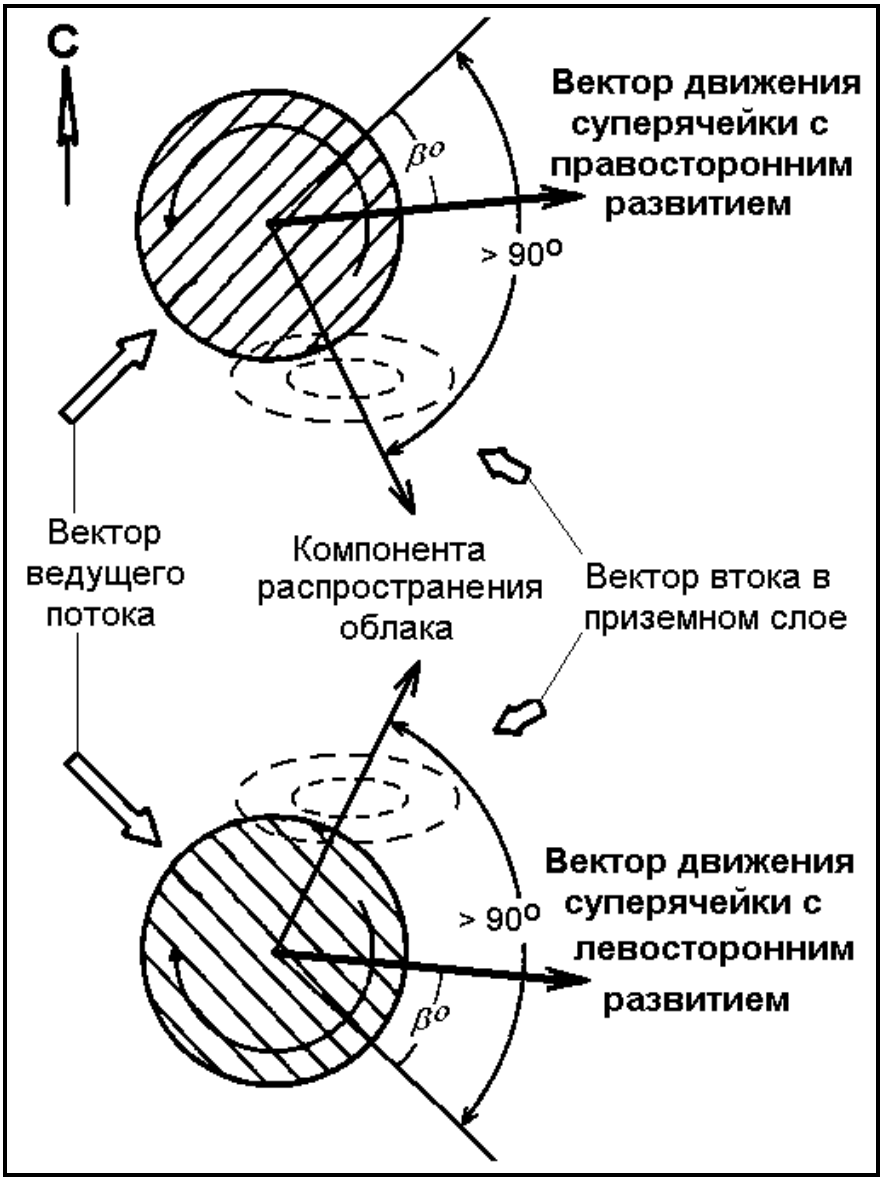


Рис. 8.18 – Иллюстрация к механизму правостороннего и левостороннего развития и перемещения мощных градовых облаков [6]

Этот эффект мал при слабых восходящих потоках и усиливается по мере их усиления. Поэтому особенностью перемещения мощных КЯ суперячейковых, переходного типа и многоячейковых ГП является следующее:

– на стадиях развития и диссипации они перемещаются по направлению ведущего потока со скоростью $V_{КЯ} \approx V_{ВП}$;

– на стадии квазистационарного состояния они отстают от потока в 1,5 ÷ 2 раза, а направление их перемещения отклоняется от ведущего потока в северном полушарии вправо и в южном полушарии влево (рисунки 8.2 – 8.3 и 8.14). Угол поворота суперячеек может варьировать от 0 до 60^0 (чаще около 30^0).

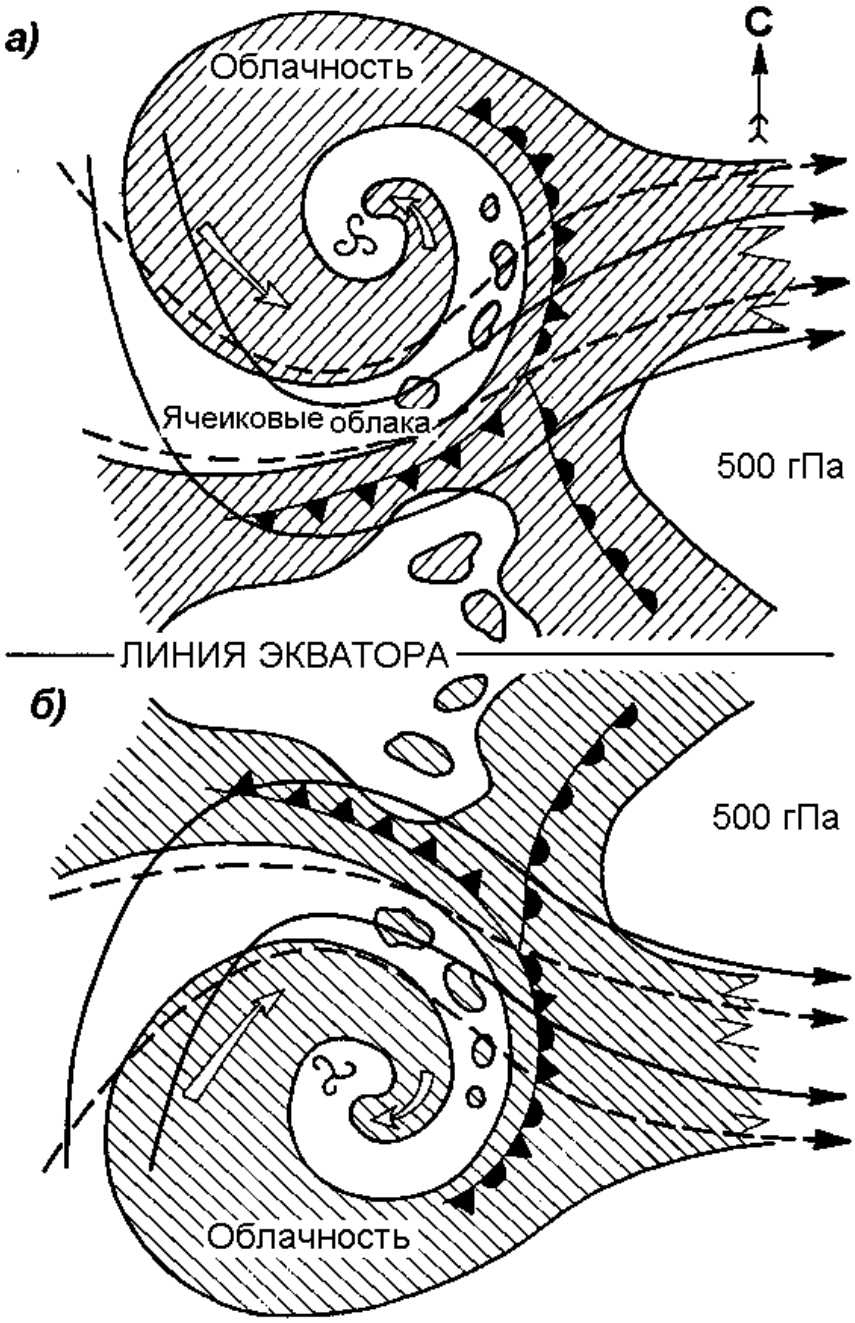


Рис. 8.19 – Схема строения циклона в Северном (*а*) и южном (*б*) полушариях с указанием направления их вращения [6]

Таким образом, траектории движения мощных несимметричных градовых облаков имеют вид ломаной линии. Они движутся с переменной скоростью в зависимости от стадии развития.

8.3.3 Интенсивные ГП Северного Кавказа зарождаются над горными плато в верховьях рек Малки и Кубани (район метеостанций Шиджатмаз и Бермамыт, ежегодно отмечающих до 16 случаев выпадения града). От этого района градовые облака смещаются на прилежащие предгорья и равнину. В зависимости от направления ведущего потока их траектории

расходятся веером (рис. 8.20). Выделяются три преимущественных направлений перемещения суперячеек [10], зародившихся в этом регионе:

– на северо-восток по направлению ущелий рек Кумы, Малки и Баксана с выходом на Ставропольскую равнину;

– на восток, пересекая ряд ущелий и хребтов под углом около 30^0;

– на юго-запад, поперек направлению основных ущелий Большого Кавказа (рек Малка, Баксан, Чегем, Нальчик, Черек) по горным и предгорным районам Кабардино-Балкарии и Северной Осетии.

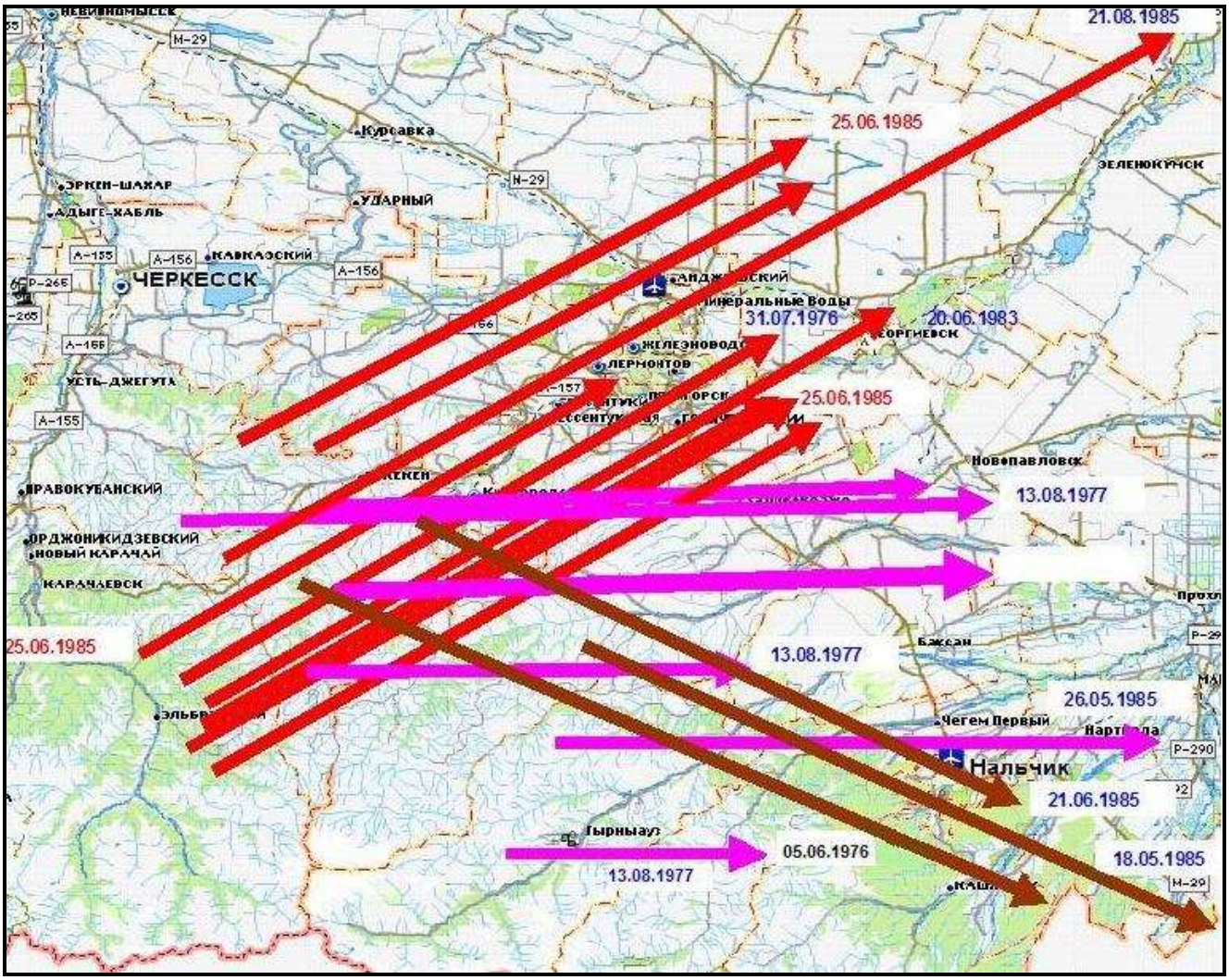


Рис. 8.20 – Три основных направления перемещения суперячейковых облаков в центральной части Северного Кавказа

Пересечение горных хребтов независимо от их ориентации (вдоль или поперек перемещения) не оказывает существенного влияния на характеристики мощных КЯ, хотя профиль местности на пути их перемещения изрезан глубокими ущельями с неоднородностями рельефа около 1 км по высоте и 5 ÷ 8 км по горизонтали. Некоторая пульсация

значений Z_m, H_B, ΔH_{45} и размера града по пути перемещения не коррелирует с масштабом неоднородности рельефа.

Таким образом, неоднородности рельефа указанного масштаба не оказывают существенного влияния на мощность, направление и скорость перемещения зрелых суперячеек и градовых ячеек многоячейковых процессов, с установившейся системой циркуляции. Более серьезное влияние рельефа ощущается на стадиях развития градовых процессов, когда приподнятость рельефа и определенная экспозиция склонов, согласно [11], способствует формированию восходящих потоков в конкретных местах и по конкретной траектории и более частому развитию градовых облаков.

8.3.4 Следует отметить еще одну особенность движения градовых облаков, заключающуюся в том, что область втока в мощных КЯ зарождается почти на наветренном фланге, во времени разворачивается вокруг центра массы КЯ против часовой стрелки и, когда оказывается на подветренном фланге, исчезает и вновь зарождается на наветренном фланге облачной системы. Кроме того, отмечается циклонический разворот облачной системы многоячейковых процессов вокруг центра масс. Это особенно хорошо заметно на долгоживущих крупномасштабных процессах Ферганской долины [3] и объясняется тем, что правый фланг градового процесса распространяется быстрее чем левый, так как

$$V_{Прав} = V_{КЯ} + V_{Расп} + V_{Дискр}, \quad (8.1)$$

$$V_{Центр} = V_{КЯ} + V_{Расп}, \quad (8.2)$$

$$V_{Лев} = V_{яч.} \quad (8.3)$$

где $V_{Прав}$, $V_{Лев}$ и $V_{Центр}$ – скорости перемещения правого, левого флангов и центра облачной системы; $V_{КЯ}$ – скорость перемещения КЯ; $V_{Расп}$ – скорость непрерывного распространения радиоэха новых КЯ; $V_{Дискр}$ – скорость дискретного распространения радиоэха за счет возникновения новых КЯ на правом фланге.

Разность скоростей распространения левого и правого фланга приводит к циклоническому развороту облачной системы многоячейковых процессов. Когда большая полуось облачной системы развернется поперек ведущего потока, формируются новые КЯ на наветренном фланге, левофланговые ячейки диссипируют, большинство КЯ вновь выстраиваются вдоль ведущего потока и начинается следующий цикл разворота. Таким образом, облачная система совершает долговременные колебательные движения. Период колебания в ГП Ферганской долины составляет 2 ÷ 4 часа, поэтому они лучше выявляются на долгоживущих, крупномасштабных облачных системах, состоящих из многих конвективных ячеек.

8.3.5 Анализ статистических данных о направлении и скорости движения КЯ Северного Кавказа в результате совместного влияния ведущего потока, орографии, мощности и типа градовых процессов показал, что в большинстве случаев ГП имеют правосторонне развитие. Мощные градовые облака перемещаются вправо от ведущего потока преимущественно с запада на восток или юго-запада на северо-восток. Скорости их перемещения в стадии квазистационарного состояния среднем в 1,5 – 2 раза меньше скорости ведущего потока.

В последние годы в связи с изменениями в глобальной циркуляции атмосферы и направлении вторжения холодных фронтов отмечаются случаи перемещения градовых облаков с юга на север и даже с юго-востока на северо-запад. На Северном Кавказе чаще стали наблюдаться ГП с левосторонним развитием.

8.3.6 В Молдавской противоградовой службе (Старостин и др. 1980, [12, 13]) на основе радиолокационных исследований выявлено наличие мезомасштабных структур полей радиоэха кучево-дождевых облаков, формирование которых при скоростях ведущего потока до 20 км/ч часто происходит по граням таких структур (рис. 8.21*а*).

Показано, что приращение элементов этих структур, выделяемых в Лагранжевой системе координат (системе координат движущейся со скоростью и по направлению ведущего потока), могут определить направление развития облачной системы, включая место развитие новых КЯ и приращение радиоэха существующих КЯ.

Считается, что развитие новых КЯ возможно из узла в узел по граням структуры (рис. 8.21*а*), а эволюция существующих КЯ в направлении навеса их радиоэха. Приращения радиоэха на карте Лагранжа реализуются в двух направлениях: по направлению основного навеса радиоэха и почти перпендикулярно ему за счет развития новых КЯ на наветренном фланге (рис. 8.21*б*). Карты эволюции облаков в Лагранжевой системе координат, автоматически получаемые на «АСУ-МРЛ», используются в Молдавской противоградовой службе для уточнения местоположение объема засева и оптимизации его размера [13].

Однако следует отметить, что формирование указанных мезомасштабных структур нарушается при развитии мощных градовых облаков, а также при больших скоростях ведущего потока, когда они, трансформируются в полосы радиоэха [14].

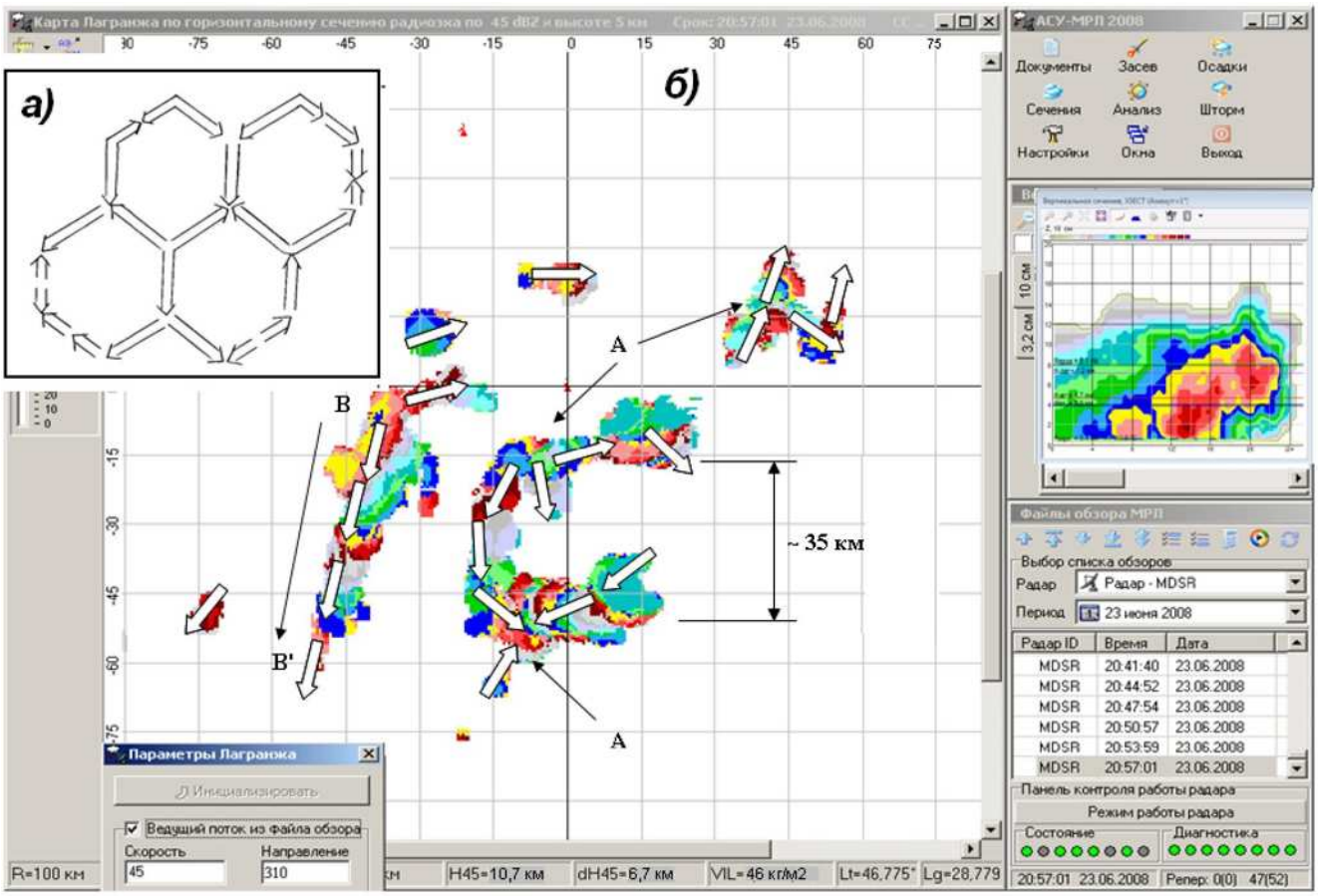


Рис. 8.21 – Фрагмент карты Лагранжа: ***а)*** по схеме Старостина [12]; ***б)*** по данным «АСУ-МРЛ» за период с 18 до 21 часа 23.06.08. Стрелками указаны направления развития облачных образований: А – «узлы», В – В’ – «грань» [14]

8.4 Стадии эволюции градовых облаков

8.4.1 В эволюции КЯ в ГП можно выделить три стадии: *развития, квазистационарного состояния и диссипации* (рис. 8.20).

8.4.1.1 *Стадия развития* начинается в момент формирования первого радиоэха и завершается образованием града. В этот период значения Z_m, ΔH_{45}, ΔH_{45}, Δq_m и других параметров КЯ увеличиваются. Длительность стадии развития (τ_1) во всех типах градовых процессов составляет от 5 до 12 минут в зависимости от термодинамического состояния атмосферы. Этой стадии предшествует длительное время развития (около 25 ÷ 30 минут) до появления первого радиоэха.

8.4.1.2 *Стадия квазистационарного состояния* охватывает период с момента завершения стадии развития до начала стадии диссипации и характеризуется тем, что параметры КЯ достигают максимального значения и пульсируют в небольших пределах.

Длительность стадии квазистационарного состоянии (τ_2) в многоячейковых и переходного типа ГП варьирует от 10 до 60 мин (рис. 8.22*б*), а в суперячейковых ГП может достигать нескольких часов (рис. 8.22*в*).

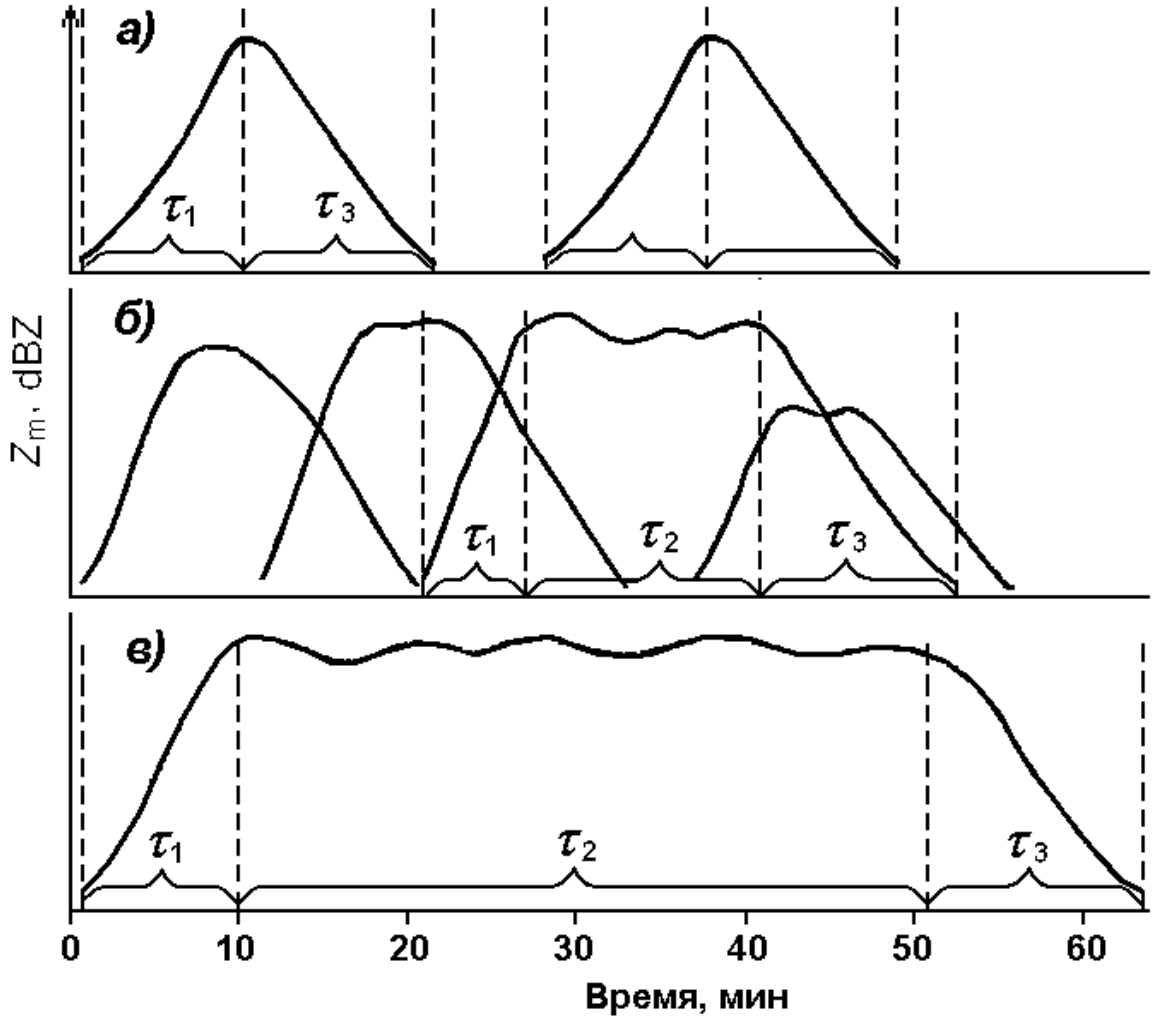


Рис. 8.22 – Стадии эволюции КЯ в одноячейковых (*а*), упорядоченных многоячейковых (*б*), суперячейковых и переходного типа ГП (*в*)

8.4.1.3 *Стадия диссипации* это период, когда облако переходит в неградовое состояние, значения Z_m, ΔH_{45}, Δq_m и другие параметры КЯ уменьшаются вплоть до исчезновения радиоэха. Длительность стадии диссипации во всех типах ГП составляет порядка 10 ÷ 20 мин.

8.4.1.4 *Общее время жизни* радиоэха конвективной ячейки определяется по формуле:

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3. \qquad (6.4)$$

В осесимметричных КЯ одноячейковых и неупорядоченных многоячейковых ГП за стадией развития следует стадия диссипации, минуя стадию квазистационарного состояния (рис. 8.22*а*), так как образовавшийся град выпадает прямо на восходящий поток, подавляет

его и приводит к диссипации КЯ. Поэтому время существования радиоэха осесимметричных КЯ наиболее короткое и редко превышает 30 ÷ 40 мин.

В несимметричных ячейках многоячейковых процессов после стадии развития следует стадия квазистационарного состояния, а затем стадия диссипации, но к моменту диссипации одной ячейки достигает квазистационарного состояния следующая и т.д. (рис. 8.22*б*). При этом максимальные характеристики облачной системы возрастают по мере развития новых ячеек, и градовый процесс в целом достигает максимума развития, а потом в следующих ячейках Z_m, ΔH_{45}, Δq_m убывают до диссипации процесса. По данным многолетних наблюдений полное время жизни упорядоченных многоячейковых ГП варьирует в пределах $65 < \tau < 270$ мин при $\tau_{mod} \approx 80$ мин [3, 4, 6].

Наиболее долгоживущими в них являются суперячейковые ГП, имеющие длительную стадию квазистационарного состояния (рис. 8.22*в*). Полное время их существования τ может достигать нескольких часов.

9 Микрофизика градовых процессов

9.1 Микрофизические характеристики градовых облаков

9.1.1 Фазовая структура градовых облаков

В градовых облаках отмечаются все типы гидрометеоров: облачные капли и кристаллы, агрегаты кристаллов, снежная и ледяная крупа, дождевые капли и градины. Их содержание в разных частях облака, как показано на рисунке 9.1, существенно отличается.

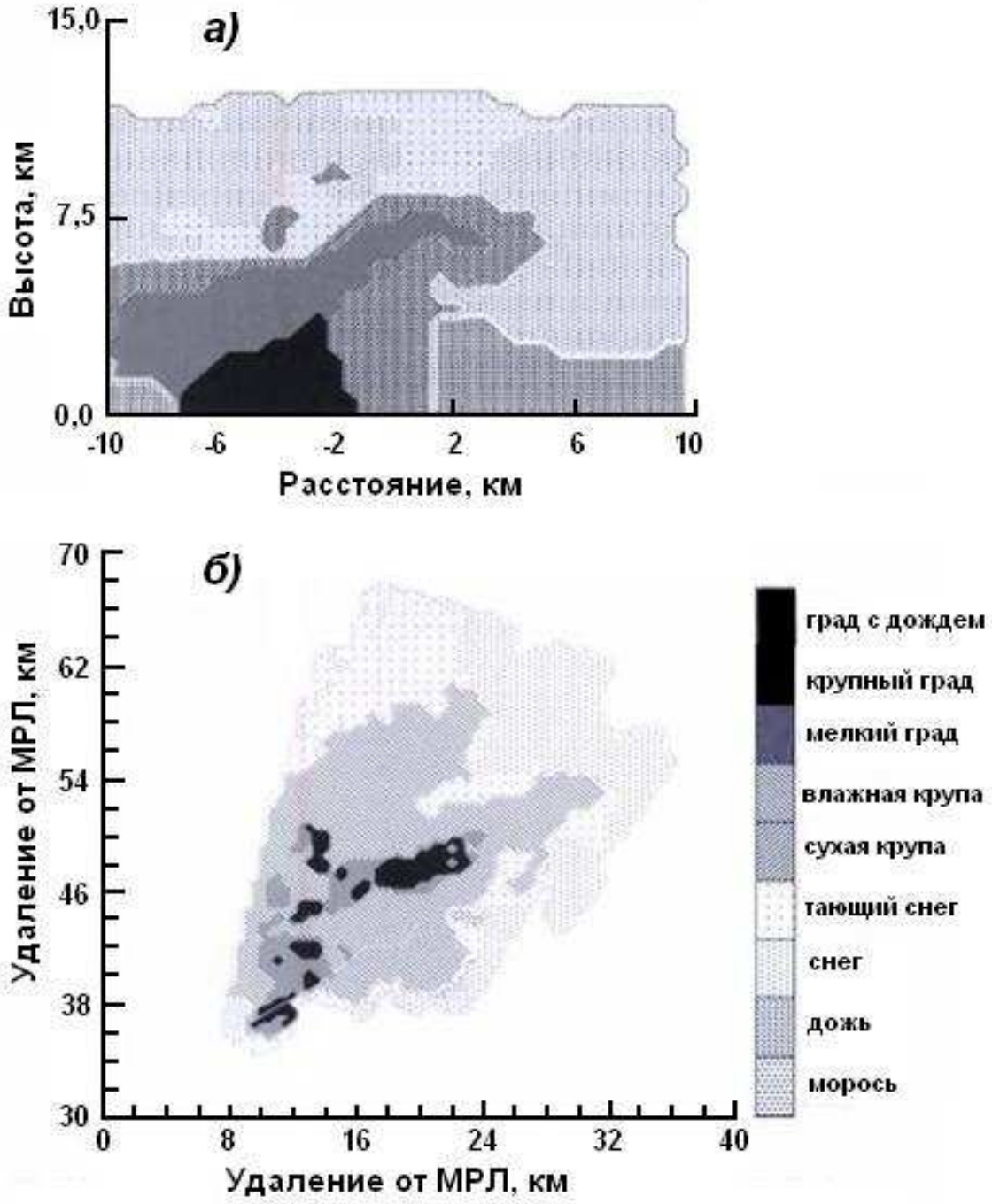


Рис. 9.1 – Фазовая структура градового облака по поляризационным характеристикам радиоэха [1, 2]

Верхняя часть и наковальня градовых облаков, вытянутая в направлении ветра на высотах, в основном содержит кристаллы различного габитуса и агрегаты кристаллов, хотя и облачные капли также могут отмечаться до высот с температурой -40 °С.

В среднем слое градовых облаков, где происходит зарождение и рост града, наблюдаются все перечисленные выше типы гидрометеоров, но их концентрации и соотношения зависят от высоты и структуры вертикальных и горизонтальных потоков. Сложная структура вертикальных потоков и их пульсации порождает крайне неоднородную фазовую структуру градовых облаков, как в горизонтальном, так и вертикальном сечении (рис. 9.2).

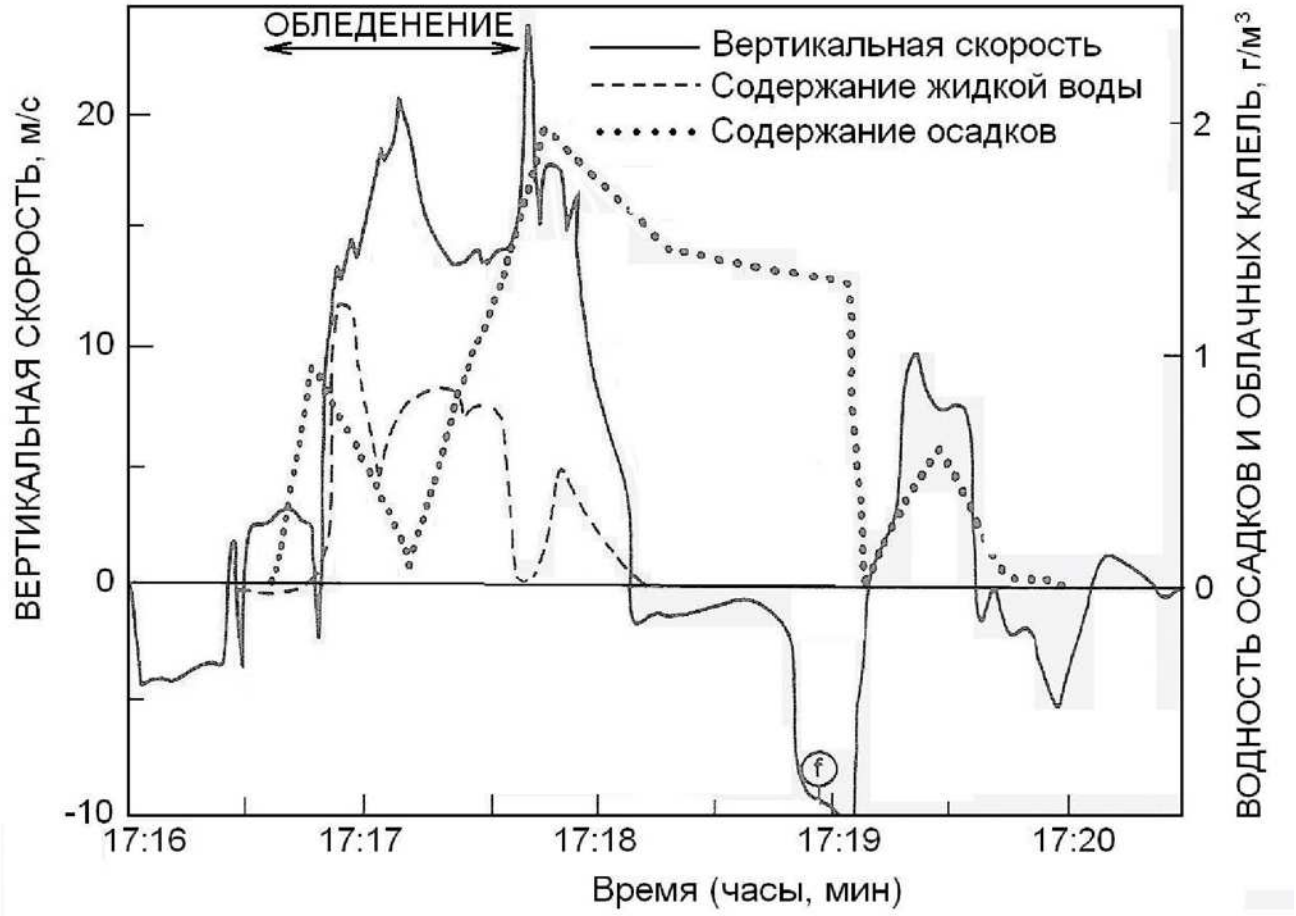


Рис. 9.2 – Распределение вертикальных потоков, облачных капель размером менее 50 мкм и водности частиц осадков размером более 250 мкм в градовом облаке по данным самолета Т-28 [3]

В нижнем слое отмечаются ливневые и градовые осадки, содержание которых во фронтальном, тыловом, левом и правом флангах сильно отличается. Обычно наиболее крупные градины и наиболее интенсивные ливневые осадки выпадают на правом наветренном фланге. К подветренному флангу размер града и интенсивность ливневых осадков убывает.

9.1.2 Водность и водосодержание градовых облаков

Водность (содержание воды в единице облачного объема q в г/м^3) в разных частях градовых облаков варьирует в зависимости от стадии развития и интенсивности процесса в больших пределах и включает две компоненты:

– содержание воды в облачных каплях и кристаллах, имеющих размеры менее 100 мкм;

– содержание воды в частицах осадков, имеющих размеры более 0,1 мм (дождевые капли, крупа, градины).

Соотношение этих компонент также значительно варьирует в пространстве и времени.

Максимальное содержание облачных капель (мелкокапельной водности) отмечается на стадии развития мощно-кучевого облака перед появлением крупных частиц, достигая почти адиабатических значений (3 – 4 г/м^3). После зарождения крупных частиц и начала их коагуляционного роста мелкокапельная водность быстро уменьшается до 1 ÷ 1,5 г/м^3 и менее, а содержание воды в частицах осадков увеличивается, достигая в случае мощных ГП от 5 до 10 г/м^3.

Интегрированное по высоте (по всей толще градового облака) содержание воды, приходящейся на 1 м^2 поверхности земли (приведенная водность q_{Σ},) может достигать 100 кг/м^2 (рис. 9.3*б*). При осаждении этой воды на поверхности земли образуется слой осадков до 100 мм [4]. В таких случаях обычно формируются весьма опасные ливневые паводки.

Интегрированное по всему объему облака содержание воды M в сверхмощных градовых облаках может достигать $6 \cdot 10^6$ тонн (рис. 9.3*в*). Следует отметить, что основной вклад в суммарное содержание воды таких облаков вносит град, который содержится внутри контура отражаемости $Z > 45$ dBZ, хотя объем облака внутри этого контура может составлять 15 – 30% от всего объема облака.

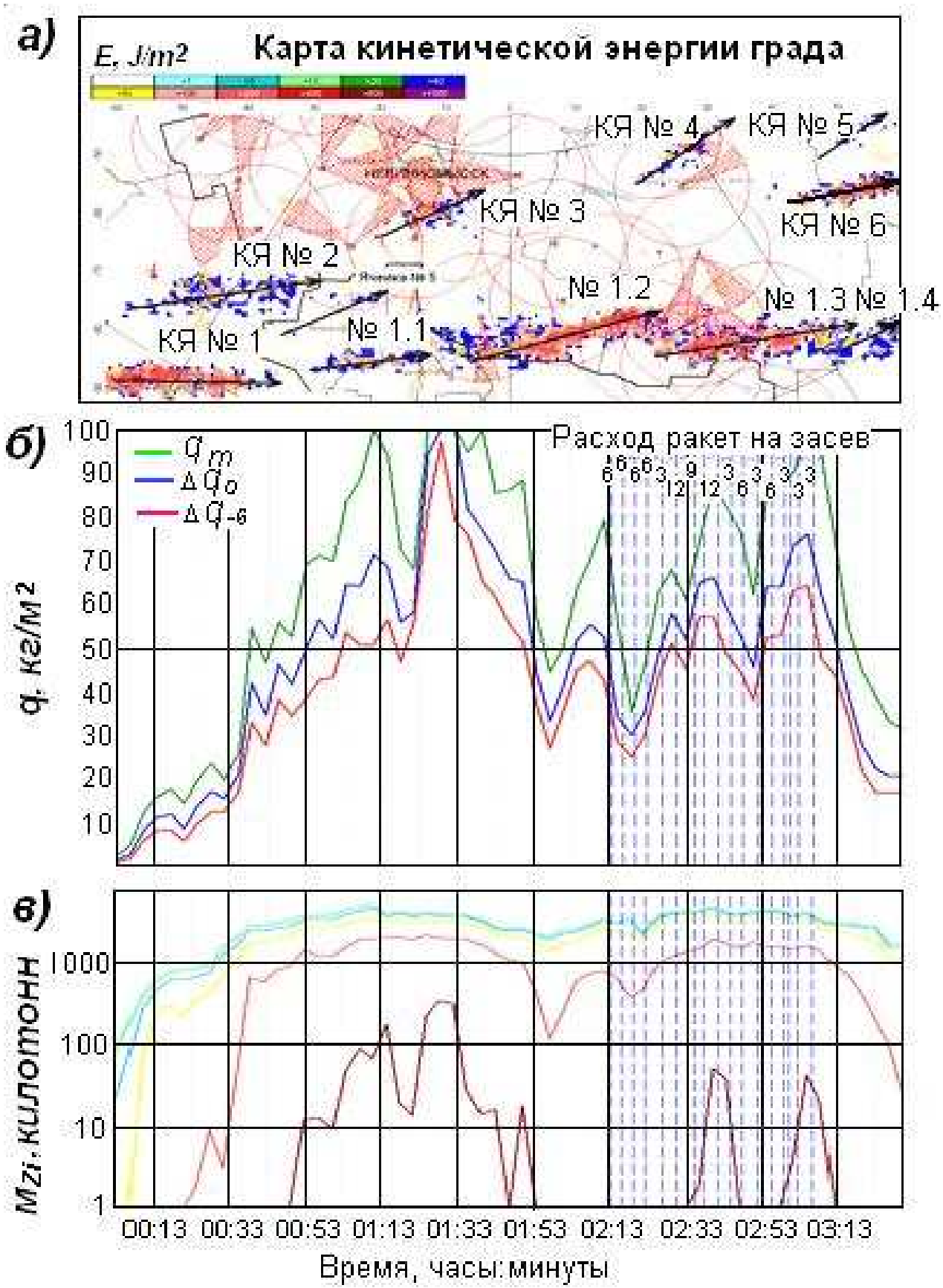


Рис. 9.3 – Временной ход водосодержания КЯ в ГП, наблюдавшемся в Ставропольский крае, 22.09.2010 г.: ***а)*** – карта кинетической энергии града, выпадавшего из разных КЯ»; ***б)*** – максимальная приведенная водность: q_m – всей толщи КЯ; Δq_0 – слоя выше изотермы 0 °С; Δq_{-6} – слоя выше изотермы -6 °С; ***в)*** интегральное водосодер-жание M_{Zi} всей толщи КЯ внутри изоконтуров отражаемости Z = 15, 25, 35 …65 dBZ

9.2 Стадии градообразования

9.2.1 В конвективно-неустойчивой атмосфере по мере прогрева подстилающей поверхности и действия динамических факторов (вторжение холодного фронта, заток холода на высотах или обтекание гор) в приземном слое начинается спонтанная конвекция теплого влажного воздуха в виде отдельных пузырей (термиков). При подъеме термиков относительная влажность воздуха в них повышается, при достижении 100% влажности начинается конденсация водяного пара на ядрах конденсации, содержащихся в поднимающемся воздухе, и формирование кучевых облаков. Выделение тепла конденсации (598 кал/г) приводит к увеличению скорости подъема и формированию пульсирующих восходящих потоков и дальнейшему развитию кучевых облаков, некоторые из которых при благоприятных условиях достигают мощно-кучевой стадии (Cu Cong). В процессе их длительного развития (порядка 25 – 30 минут) в них происходит усиление восходящих потоков, увеличение концентрации облачных капель и их конденсационный рост. Облачные капли могут находиться в жидком переохлажденном состоянии до температуры -30 ^{o}C и ниже. Однако при достижении вершины Cu Cong уровня естественной кристаллизации в облаке появляются кристаллы и агрегаты кристаллов, начинают также замерзать наиболее крупные капли, сформировавшиеся на гигантских ядрах конденсации. Зарождение ледяных частиц ускоряет процесс осадкообразования, так как они растут быстрее, чем капли за счет перегонки пара с капель на кристаллы в соответствии с механизмом Бержерона-Финдайзена.

Когда размер кристаллов или их агрегатов превышает 80 – 100 мкм, а размер капель 30 мкм их скорость роста многократно ускоряется за счет захвата более мелких капель – начинается процесс быстрого коагуляционного роста и формирования зародышей града размерами 1 ÷ 3 мм. Концентрация таких зародышей по данным авиационных исследований [5 – 8] может достигать $10^3 \div 10^4$ м^3. Более мелкие из них выносятся в верхнюю часть облака, где мала водность облака, наиболее крупные могут выпасть из облака, так как скорость их гравитационного падения превышает скорость восходящего потока. Однако некоторая часть зародышей града может находиться в переохлажденной облачной среде длительное время и вырасти до градин больших размеров.

Наиболее крупные градины начинают выпадать, преодолевая торможение восходящим потоком. В их аэродинамическую тень вовлекаются более мелкие градины, и происходит обрушение градовых осадков. При прохождении теплого слоя облака и подоблачного слоя

происходит таяние градин. Мелкие градины могут полностью растаять, образуя крупные капли дождя, а крупные градины только обтаивают и достигают земли в твердом состоянии.

9.2.2 Процесс градообразования независимо от типа и пространственной структуры облаков можно условно разделить на четыре стадии [9, 10]:

- формирование условий зарождения града;
- зарождение града (образование зародышей градин);
- рост града;
- выпадение града.

9.2.3 В соответствии со стадиями градообразования в структуре радиоэха градовых облаков выделяются четыре зоны [9]:

9.2.3.1 *Зона формирования* **I**, которая располагается в переохлажденной части области нового роста градового облака (рис. 9.4), где происходит формирование условий для зарождения града: формируются восходящие потоки, идет накопление жидкокапельной влаги, происходит преимущественно конденсационный рост облачных частиц постепенно переходящий в коагуляционный рост. Зона формирования расположена в фидерных облаках зрелых градовых КЯ и во вновь развивающихся КЯ одноячейковых ГП в интервале температур от -5 до -20 °С и имеет радиолокационную отражаемость Z_{10} < 15 dBZ;

9.2.3.2 *Зона зарождения града* **II** представляет собой переохлажденную часть области нового роста градового облака, имеющая радиолокационную отражаемость 15 < Z_{10} < 45 dBZ. Она расположена в интервале температур от -5 до -30 °С во фронтальной части навеса радиоэха несимметричных градовых КЯ и области первого радиоэха осесимметричных КЯ в относительно слабом (от 2 до 7 м/с), но усиливающемся во времени восходящем потоке, где начинается интенсивный коагуляционный рост облачных частиц;

9.2.3.3 *Зона роста града* **III**, представляет собой область высокого содержания зародышей града и растущих градин, расположенную в навесе радиоэха в усиливающихся во времени восходящих потоках, в интервале температур от 0 до -40 °С, имеющая радиолокационную отражаемость Z_{10} > 45 dBZ;

9.2.3.4 *Зона выпадения града* **IV**, представляет собой область локализации выпадающего (наиболее крупного) града и нисходящих потоков, расположенную в слое от поверхности земли до уровня изотермы -15 °С, имеющую радиолокационную отражаемость Z_{10} > 55 dBZ.

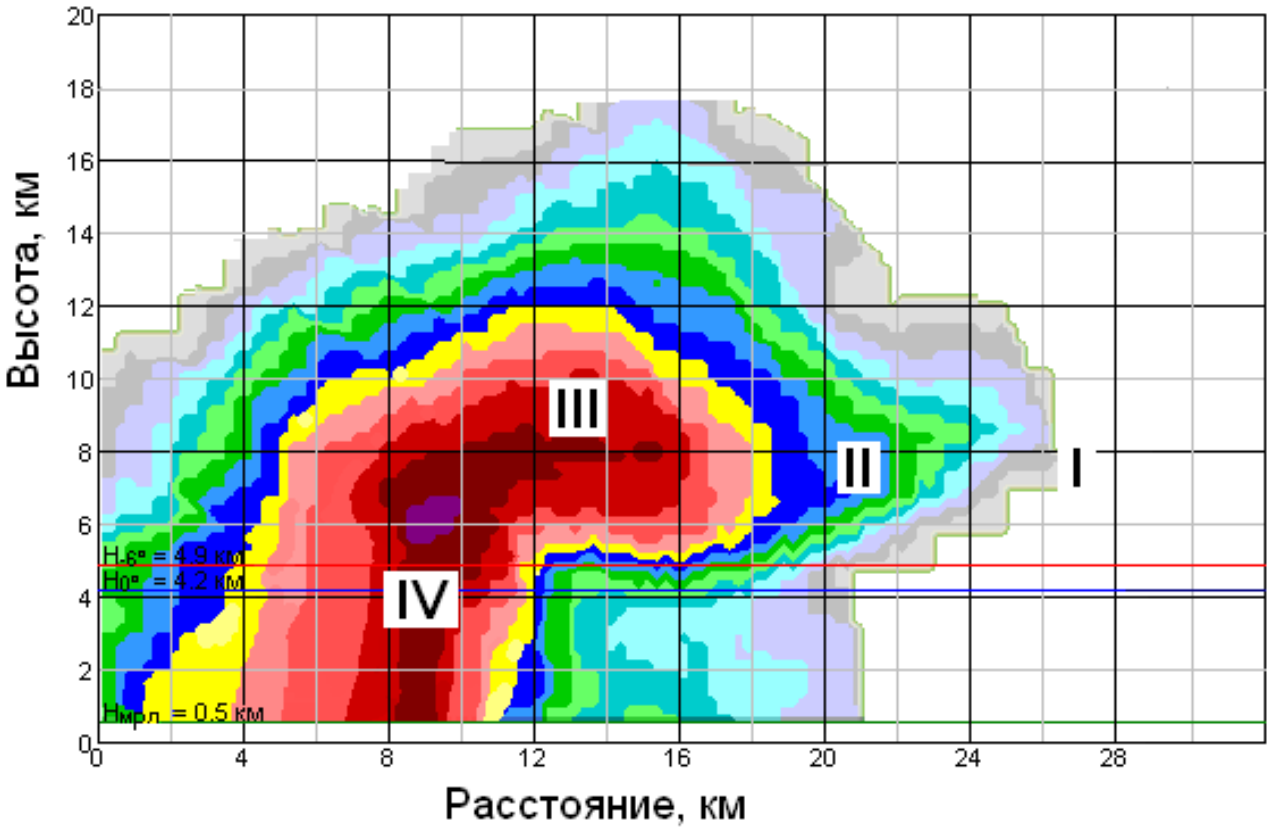


Рис. 9.4 – Местоположение зон формирования (I), зарождения (II), роста (III) и выпадения града (IV) в суперячейковом градовом облаке

9.3 Природа зародышей града

9.3.1 Зародышами града являются крупа либо замерзшая капля диаметром около 1 мм [10 – 13] с различной их повторяемостью. Формирование обоих типов зародышей начинается на начальной стадии градообразования задолго до появления первого радиоэха и требует длительного времени.

9.3.2 Крупяные зародыши града могут формироваться за счет роста и обзернения кристаллов, появляющихся в верхней части КЯ на достаточно ранних стадиях развития. При этом они могут попадать в более благоприятные условия роста, опускаясь вдоль границ восходящего потока [14 – 16], а также в областях с пониженными значениями пульсирующих восходящих потоков. Длительность стадии формирования (от 20 до 40 минут) вполне достаточна для дендритного роста, обзернения и превращения кристаллов в снежную крупу. Эффективным источником снежной крупы может быть также автозасев или засев из наковальни соседних облаков агрегатами кристаллов, которые быстро (за время от 3 до 5 минут) превращаются в крупу за счет обзернения.

9.3.3 Источником капельных зародышей могут быть 4 процесса [8, 12]:

а) на начальной стадии градообразования – зарождение крупных капель на гигантских и сверхгигантских ядрах конденсации, их рост и замерзание;

б) на последующих стадиях – слияние мелких капель при соударениях. Но это длительный процесс, проходящий при скорости восходящих потоков $5 < W < 20$ м/с, водности $2 < q_{мф} < 4$ г/м^3 и температуре $0 < t < -12$ °С;

в) таяние крупы, опускающейся ниже уровня изотермы 0 °С, и подъем капель в зону зарождения и роста града восходящими потоками;

г) срыв капель размером от 0,8 до 2,0 мм с растущих градин или тающих градин, которые являются мощным генератором таких капель.

Последний механизм может быть очень эффективен при повышенной водности мелкокапельной фракции в облачном слое с температурой от 0 до -10 ^{o}С [8]. Концентрация капельных зародышей града тем больше, чем больше водность и температура в зоне роста града.

9.3.4 Первыми крупными частицами в развивающихся градоопасных облаках, создающими первое радиоэхо, обычно является снежная крупа [15, 16]. Она же зарождается в фидерных облаках зрелых градовых КЯ и, втягиваясь в основное облако, превращается в зародыши града. Наиболее быстрое зарождение града отмечается путем обзернения агрегатов плоских кристаллов и замерзания срывающихся с растущих градин капель при $5 < W < 15$ м/с, мелкокапельной водности $1 < q_{мф} < 2$ г/м^3 при температуре ниже -20 °С.

Капельные зародыши, сформировавшиеся из растаявшей крупы и срывающихся с градин капель, являются вторичными и могут появляться после зарождения крупы и града.

9.4 Механизм образования града

9.4.1 *Стадия формирования условий зарождения града* проходит в развивающемся конвективном облаке в течение длительного времени, которое варьирует от 20 до 40 минут в зависимости от термодинамического состояния атмосферы.

На этой стадии происходит формирование струи восходящего потока, увеличение водности мелкокапельной фракции ($q_{мф,}$ г/м^3) до 3 – 4 г/м^3 и конденсационный рост частиц. Увеличиваясь во времени, скорости восходящих потоков достигают значений $W \approx 5 – 7$ м/с. Мелкокапельная водность облака достигает максимального близкого к адиабатическому значению. Концентрация облачных капель достигает $10^8 < N < 10^9$ м$^{-3}$, а

максимальный диаметр капель 100 мкм при модальном значении около 10 мкм.

Задолго до зарождения первого радиоэха в верхней части облака на естественных ядрах сублимации и за счет засева из наковальни зрелых *Св* появляются кристаллы, могущие длительное время (от 15 до 20 мин) расти за счет перегонки пара с капель, а в дальнейшем за счет обзернения превращаются в крупу миллиметровых размеров.

Эта стадия завершается зарождением первого радиоэха с Z_{10} около 15 dBZ и формированием микрофизических и динамических условий, необходимых для зарождения града и роста града. В зрелых несимметричных градовых облаках эта стадия проходит в фидерных облаках, первое радиоэхо которых сливается с фронтальной частью навеса радиоэха основного облака.

При зарождении первого радиоэха в переохлажденной части облака осадкообразование происходит через ледяную фазу, и КЯ могут достигать градового состояния, а при его зарождении вблизи 0°С и ниже КЯ редко достигают градовой стадии. Более быстрый механизм роста ледяных частиц (по Бержерону-Финдайзену) обеспечивает более быстрое развитие градоопасных КЯ по сравнению с не градоопасными.

9.4.2 *Стадия зарождения града* проходит в области слабых (до 5 м/с), но нарастающих во времени восходящих потоках на наветренном фланге основной струи восходящего потока, на крупе или каплях, возникающих на гигантских ядрах конденсации. К концу стадии зарождения града концентрация облачных капель диаметром от 5 до 150 мкм составляет $10^8 < N_K < 10^9$ м$^{-3}$, капельная водность от 0,5 до 4,0 г/м^3, а концентрация крупы диаметром от 0,6 до 2 мм (т.е. потенциальных зародышей града) достигает $10^3 < N_{Kp} < 10^4$ м$^{-3}$ [6 – 8].

9.4.3 *Стадия роста града* проходит в области навеса радиоэха в усиливающихся во времени мощных восходящих потоках [5, 9, 14] при температуре от 0 до -30°С путем коагуляции с переохлажденной мелкокапельной и крупнокапельной фракцией. В случае образования гигантских градин отмечается также захват и примерзание мелких градин на поверхности крупных.

9.4.3.1 В процессе роста града реализуется множество сложных микрофизических эффектов [8]:

– срыв крупных капель с растущих градин, часть которых замерзает и становится зародышами града, а другая часть захватывается растущими градинами;
– размножение кристаллов по механизму Халлета-Моссопа [17];
– агрегация кристаллов и их обзернение;

– столкновение растущих градин и зародышей града, ведущее к смерзанию либо отскоку с разбрызгиванием имеющейся на них воды, сколу кристаллов и др.

9.4.3.2 Эти процессы ведут к сложной и крайне неоднородной микроструктуре зоны роста града, порождают огромные концентрации зародышей града. В областях восходящих потоков с $10 < W < 15$ м/с концентрация крупы (снежной и ледяной) достигает $10^3 < N_{Кр} < 10^4$, а концентрация крупных капель (около 1 мм) достигает 10^3 м$^{-3}$ [6 – 8]. Крупные капли концентрируются в зонах повышенных водностей и температуры, а крупа в зонах малых водностей.

По мере увеличения концентрации крупы и крупных капель водность мелкокапельной фракции $q_{мф}$ быстро (за 3 – 4 минуты) уменьшается до $0{,}5 < q_{мф} < 1{,}5$ г/м^3. Концентрация кристаллов и агрегатов кристаллов достигает 10^3 – 10^4 м$^{-3}$ и 10^2 – 10^3 м$^{-3}$, соответственно, возрастая в областях низкой температуры, водности и скорости восходящих потоков.

9.4.3.3 *Концентрация зародышей града* в зоне роста практически всегда избыточна и превышает концентрацию выпадающих градин в 100 – 1000 раз [18].

9.4.3.4 *Рост града носит избирательный характер* [9, 10], в результате чего менее 1% зародышей вырастают в градины. Условием избирательности является баланс скоростей гравитационного падения градин V_g и восходящего потока W_m, а также скоростей роста града и нарастания восходящего потока, т. е.:

$$V_g \le W_m, \tag{9.1}$$

$$\frac{dV_g}{dt} = \frac{dW_m}{dt}. \tag{9.2}$$

При нарушении этого баланса зародыши града или растущие градины будут либо выброшены из зоны роста града вверх (при $V_g < W_m$), либо выпадут из нее (при $V_g > W_m$), не достигнув больших размеров. Поэтому не все зародыши града могут дорасти до крупных размеров. Это зависит от начальных размеров, места появления и последующих траекторий движения зародышей. Поздно появившиеся мелкие зародыши с большой вероятностью будут выброшены в верхнюю часть облака, а рано появившиеся и быстро растущие зародыши не будут удерживаться восходящим потоком, и выпадут (о чем свидетельствует выпадение отдельных крупных капель из навеса радиоэха суперячеек). Большое количество этих капель может приводить к предотвращению роста града, за счет вымывания зоны «формирования» и зоны зарождения града.

9.4.3.4 *Зависание* некоторой части зародышей града, а впоследствии растущих градин, в зоне роста с нарастающими во времени восходящими потоками обеспечивает их удержание в зоне повышенной водности в течение длительного времени, необходимого для роста града до больших размеров. При отсутствии условий для такого зависания даже при больших скоростях восходящего потока град не может образоваться.

Плотность градин повышается по мере роста града, так как при их малых размерах преобладает режим сухого роста с плотность до 0,8 г/см^3, а у крупных градин преобладает режим мокрого роста с образованием прозрачного льда плотностью до 0,93 г/см^3. При водности около 3 г/м^3 и температуре около -15 ÷ 20 ^{o}C происходит спонгиальный рост града с вкраплением незамерзших пузырьков воды размером до 1 мм [19, 20].

При этом пульсирующий характер восходящих потоков и связанные с этим значительные пространственно-временные вариации водности облака, концентрации и размера градин приводят к изменению режимов роста градин и образованию их слоистой структуры.

9.4.3.5 *Время роста града* складывается из трех стадий [6 – 8]:

– время формирования крупяных зародышей диаметром до 1 мм при температуре от -5 до -25 ^{o}C, составляющее 10 ÷ 15 минут;

– время роста градин от 0,5 см до 2 см составляет около 20 минут при плотности градин 0,9 г/см^3 и адиабатической водности, равной 2,5 г/м^3. Это время увеличивается при уменьшении мелкокапельной водности облака и сокращается с увеличением водности;

– время роста градин от 2 см до 3 и более см составляет 5 ÷ 15 минут в зависимости от конечного размера градин.

Таким образом, общее время роста градин от момента зарождения до диаметра 3 см и более составляет порядка 25 ÷ 35 минут и в течение этого длительного времени они должны находиться в зоне роста.

По радиолокационным данным град диаметром более 1 см обнаруживается через 5 – 25 минут (в среднем 8 минут) после появления первого радиоэха [9].

9.4.5 *Стадия выпадения града* начинается в момент, когда скорость гравитационного падения градин (V_g) превысит скорость восходящего потока (W_m). Град начинает выпадать, преодолевая восходящий поток, и продолжает расти до уровня изотермы 0°C. Неоднородность и пульсирующий характер восходящих потоков приводит к тому, что обрушение градовых осадков происходит в виде ряда вертикальных полос. Обрушение начинается с узких конусов, постепенно расширяющихся во времени и обуславливает пульсирующий поток градин и неоднородность выпадения града на земле.

В теплой части атмосферы за счет таяния градин и срыва с них капель воды повышается доля дождевой компоненты, и образуются смешанные осадки, хотя зачастую первыми достигают поверхности земли наиболее крупные градины. Мелкие градины (диаметром менее 1 см) при высоте изотермы 0 ^{o}C над уровнем земли более 2 км успевают полностью растаять, диаметр градин среднего размера (1 – 3 см) уменьшается, а крупные градины достигают земли без существенного изменения в размерах [19, 20].

9.5 Распространение процесса градообразования

9.5.1 Распространение процесса градообразования в пространстве в зависимости от типа ГП может реализоваться в 3 вариантах [9, 14]:

– *дискретном;*
– *непрерывном;*
– *дискретно-непрерывном.*

9.5.2 *В одноячейковых ГП* все стадии градообразования последовательно проходят в одном объеме пространства в одной КЯ (рис. 9.5*a*), потом – в следующей КЯ, поэтому процесс градообразования имеет *дискретное распространение*. Малые скорости перемещения КЯ и короткое время выпадения града из них приводит к тому, что град выпадает локальными пятнами.

9.5.3 *В суперячейковых ГП* все четыре стадии градообразования проходят одновременно в разных точках пространства:

– формирование условий для зарождения града происходит в фидерных облаках у ведущего края навеса радиоэха основного облака;
– зона зарождения града располагается во фронтальной части навеса радиоэха;
– зона роста града – в средней и тыловой частях навеса радиоэха;
– зона выпадения града – в столбе максимального радиоэха.

Квазинепрерывное обновление зоны формирования и последовательная смена стадий градообразования в каждой точке пространства обеспечивают *непрерывное распространение процесса градообразования* в пространстве и непрерывную полосу града на поверхности земли (рис. 9.5*c*).

9.5.4 *В упорядоченных многоячейковых ГП* градообразование имеет *дискретно-непрерывное распространение*: дискретное за счет периодического зарождения новых КЯ на наветренном фланге и непрерывное за счет непрерывности распространения градообразования в каждой КЯ (рис. 9.5*b*). Это способствует выпадению града в виде

нескольких параллельных полос, которые могут быть разнесены по площади или перекрываться. Зона формирования условий зарождения града располагается во вновь зарождающихся КЯ и в фидерных облаках у ведущего края навеса радиоэха зрелых градовых КЯ. Зоны зарождения и роста – в навесе мощного радиоэха, а зона выпадения града – в области максимального радиоэха в приземном слое тыловой части КЯ.

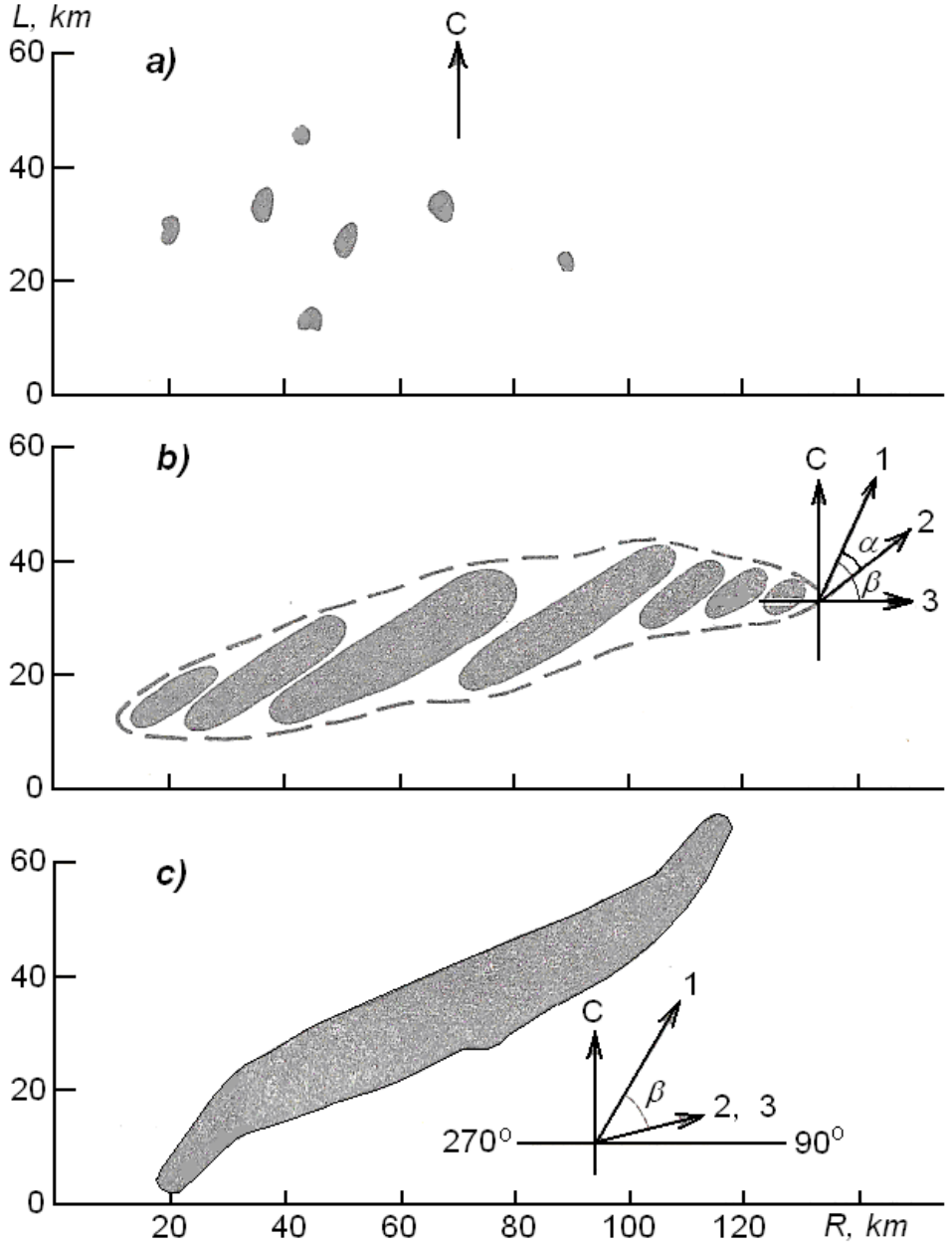


Рис. 9.5 – Схема градовых осадков из ГП разных типов

9.5.5 *В неупорядоченных многоячейковых ГП* градообразование имеет также *дискретно-непрерывное распространение:* в несимметричных КЯ – непрерывное с выпадением полос града, а в осесимметричных малоподвижных КЯ все стадии градообразования последовательно проходят в одном объеме пространства, что обуславливает выпадение града в виде пятен.

10 ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ГРАДА

10.1 Основные физические принципы предотвращения града

Энергетика атмосферных процессов вообще и градовых облаков в частности столь велика, что прямое энергетическое воздействие на них практически невозможно [1]. Поэтому методы предотвращения неблагоприятных явлений погоды и града базируются на активном воздействии на уязвимое звено в механизме их формирования с тем, чтобы небольшое физическое, химическое или механическое воздействие могло бы изменить естественный ход физических процессов.

Такими уязвимыми звеньями являются конвективная неустойчивость атмосферы, фазовая неустойчивость переохлажденных облаков и туманов, коллоидальная неустойчивость теплых облаков и туманов. Научной основой реализации фазовой и коллоидальной неустойчивости облаков и туманов являются следующие физические эффекты:

А) Конвективная неустойчивость атмосферы, обусловленная тем, что градиент понижения температуры с высотой в подоблачном слое превышает сухоадиабатический градиент, а в облаке влажно-адиабатический градиент, приводит к тому, что объем воздуха смещенный вверх с ускорением поднимается выше, а при опускании – движется с ускорением вниз. Конвективные облака развиваются в дни с конвективной неустойчивостью, поэтому создание в них импульсов нисходящих потоков и по данным теоретических и экспериментальных исследований приводит к развитию нисходящих потоков, приводящих к динамическому разрушению мощно-кучевых и кучево-дождевых облаков.

Б) При прочих равных условиях упругость насыщающего водяного пара надо льдом меньше, чем над водой с максимумом при -12 ^{o}C (рис. 10.1). Вследствие этого в смешанных облаках имеет место пересыщение водяного пара относительно кристаллов. Это приводит к росту кристаллов и снижению упругости водяного пара. Образующийся дефицит упругости водяного пара приводит к испарению переохлажденных капель, находящихся в окружении кристаллов. В результате перегонки пара с капель на кристаллы количество облачных капель уменьшается, кристаллы растут, ускоряя процесс осадкообразования (Бержерон, 1933 [2]). Это обуславливает фазовую неустойчивость переохлажденных облаков и туманов.

Рис. 10.1 – Зависимость упругости насыщения водяного пара над водой (P_B) и льдом ($P_Л$) от температуры

Шеффер в 1946 году [3] открыл, что введение сухого льда (CO_2) в переохлажденное облако приводит к быстрому замораживанию капель и образованию кристаллов льда за счет того, что сухой лед, имеющий температуру испарения -78,5 °С, вызывает спонтанное замерзание переохлажденных облачных капель. Воннегат в 1947 году [4] показал, что эффективное кристаллизующее действие оказывает введение в переохлажденное облако частиц AgI, которые гораздо проще применять на практике АВ на облачные процессы и туманы.

В) Упругость насыщающего водяного пара над каплями растворов ниже, чем над каплями чистой воды (закон Рауля). Поэтому введение в облако гигроскопических частиц приводит к конденсации на них водяного пара, образованию капель раствора, которые растут за счет перегонки пара с чистых облачных капель.

Г) Упругость насыщающего водяного пара над крупными облачными каплями меньше, чем над мелкими, вследствие того, что работа выхода молекул воды тем меньше, чем больше кривизна поверхности. Поэтому крупные облачные капли растут, а мелкие испарятся, обусловливая коллоидальную неустойчивость дисперсной среды.

Эти физические эффекты положены в основу большинства методов предотвращения града, искусственного увеличения осадков и рассеяния туманов.

В целях оптимального использование этих физических эффектов для предотвращения крайне сложного процесса градообразования предложены следующие физические концепции:

– *полная кристаллизация* переохлажденной части облака, исключающая коагуляционный рост града;

– *теория конкуренции*, предусматривающая увеличение концентрации зародышей града с целью замедления роста града за счет нехватки жидко-капельной влаги (Сулаквелидзе Г.К., 1963 [5 – 6]);

– *укрупнение капель с последующим их замораживанием* с целью создания большой концентрации конкурирующих зародышей града (Бартишвили, Ломинадзе и др., 1964 [7]);

– *динамическое воздействие* с целью подавления восходящего потока (Вульфсон и Левин, 1968 [8]);

– *понижение траектории градин*, с целью ухудшения условий их роста (Browning, Foote, 1977 [9]);

– *ускорение осадкообразования* в зоне формирования условий зарождения града, приводящее к вымыванию этой зоны и исключающее зарождение и рост града (Абшаев, 1966 [10 – 12]).

10.2 Полная кристаллизации переохлажденной части облака

Полное замораживание переохлажденной части облака действительно может исключить коагуляционный рост града и обеспечить прерывание и предотвращение градообразования [13]. Для этого требуется непрерывный пространственно-временной засев переохлажденной части градовых и градоопасных облаков.

Однако это требует нереально большого расхода льдообразующих реагентов, особенно в случае суперячейковых ГП, в которых обширная струя восходящего потока непрерывно вносит в облако огромное количество влаги. При площади втока 100 км^2 и скорости восходящих потоков в основании суперячейкового облака 3 м/с и абсолютной влажности приземного воздуха 12 г/м^3 в облако втекает около $3{,}6 \cdot 10^{10}$ г/с водяного пара. При конденсации в облаке большей части этого пара приток воды в облако составляет около $3 \cdot 10^{10}$ г/с ($3 \cdot 10^4$ т/с), что сравнимо с количеством воды, текущей в таких крупных реках как Волга, Дунай.

Количество облачных капель, конденсирующихся в таком облаке за 10 минут, составляет порядка $6 \cdot 10^{21}$ шт. Чтобы их заморозить, необходимо внести в восходящий поток около 10 тысяч ракет типа «Алазань-6» даже при не реальном условии, что каждая кристаллизующая частица заморозит 1 облачную каплю.

Таким образом, предотвращение градообразования путем полной кристаллизации переохлажденной части облака практически не реализуемо из-за чрезмерно большой потребности средств воздействия.

10.3 Стимулирование благоприятной конкуренции

10.3.1 Теория конкуренции предусматривает ограничение роста града за счет искусственного увеличения концентрации зародышей града в зоне зарождения и роста града [5 – 6] и базируется на следующих представлениях о механизме образования града.

Скорость восходящих потоков в конвективных облаках нарастает с высотой до некоторого максимального значения W_m и потом убывает к вершине. Это способствует подъему капель радиусом ≈ 20 мкм, сформировавшихся на гигантских ядрах конденсации, их росту до 100 мкм. Эти капли задерживаются выше уровня W_m, растут за счет коагуляции с более мелкими каплями, и, достигнув критического диаметра (более 5 мм), разбрызгиваются на несколько крупных капель (эффект Ленарда). Эти капли также растут и разбрызгиваются. Такой механизм размножения крупных капель в облаке, называемый цепным процессом Ленгмюра, способствует формированию «зоны аккумуляции» крупных капель над уровнем W_m. Водность «зоны аккумуляции» Q_m, согласно представлениям Г.К. Сулаквелидзе, ограничена подъемной силой восходящих потоков:

$$Q_{\mathrm{m}} = \frac{W_m^2 - V_{\mathrm{k}}^2}{2g}\,\bar{\rho}\,, \qquad (10.1)$$

где V_k – критическая скорость падения разбрызгивающихся капель (≈ 9 м/с); g – ускорение силы тяжести; $\bar{\rho}$ – средняя плотность атмосферы на уровне «зоны аккумуляции».

При $W_m < V_k$ аккумуляции не происходит. Если «зона аккумуляции» формируется в теплой части атмосферы, то образуются ливневые осадки. Если она формируется в области отрицательных температур, то некоторые капли замерзают, становятся зародышами града, которые в дальнейшем быстро растут в «зоне аккумуляции» за счет коагуляции с крупными каплями. На основе этого механизма образования града был

предложен метод прогноза града [6], согласно которому град ожидается в дни, когда выше уровня изотермы 0 °С значение W_m > 10 м/с.

Эти представления о механизме образования града позволили Сулаквелидзе Г.К. сформулировать физическую концепцию и метод предотвращения града, основанные на концепции конкуренции. Согласно этой концепции для предотвращения града необходимо увеличить естественную концентрацию зародышей града N_0 в 10^3 – 10^4 раз, добавив N_i искусственных зародышей. Конкуренции за ограниченную водность крупнокапельной фракции приведет к уменьшению размера растущих градин в соответствии с выражением:

$$\overline{R}_e \le \overline{R}_0 \sqrt[3]{\frac{N_0}{N_0 + N_i}} \qquad (10.2)$$

где $\overline{R}_0$ и $\overline{R}_e$ – средний размер града при естественном ходе роста града и после искусственного увеличения концентрации зародышей.

Из формулы (10.2) следует, что увеличение концентрации зародышей в 1000 раз может привести к уменьшению размера града в 10 раз, и он может растаять в теплой части атмосферы. Этому благоприятствует, по мнению Сулаквелидзе [6], наличие зоны аккумуляции крупных переохлажденных капель, мгновенно кристаллизуемых при внесении в нее льдообразующих реагентов, и может обеспечить создание большой концентрации искусственных зародышей града.

10.3.2 Последующие исследования градовых облаков показали, что процесс образование града значительно сложнее. Зарождение града чаще происходит через ледяной механизм (особенно в облаках с «холодным» основанием). Зондирование градовых облаков с помощью самолета-лаборатории Т-28, проведенное в нескольких регионах мира на разных уровнях высоты, в том числе в областях первого радиоэха, в зонах зарождения, роста и выпадения града [15 – 18 и др.] показало отсутствие в них зон аккумуляции крупных переохлажденных капель. Установлено также, что первичные зародыши града образуются преимущественно на крупе с появлением большинства капельных зародышей в стадии роста града. Очевидно, что зоны аккумуляции крупных капель за счет цепного процесса Ленгмюра могут формироваться только в «теплых» облаках. В градовых облаках это исключается потому, что в них первое радиоэхо обычно зарождается в интервале температуры от -10 до -25 °С, где большинство крупных капель замерзают и не могут участвовать в цепном процессе размножения. Это в корне изменяет представление о принципах воздействия на процесс градообразования и ставит под сомнение работоспособность теории конкуренции.

10.3.3 Предположение об ограниченной водности зоны роста града, в результате чего может быть предотвращен рост града при высокой концентрации искусственных зародышей также не приемлемо, так как восходящий поток непрерывно вносит капельную влагу в область роста града, но только часть этой влаги превращается в осадки. По данным многочисленных исследований [15, 19] осадкообразующая эффективность градовых облаков довольно низкая (особенно суперячейковых) и достигает всего 17 – 30% (рис. 10.2).

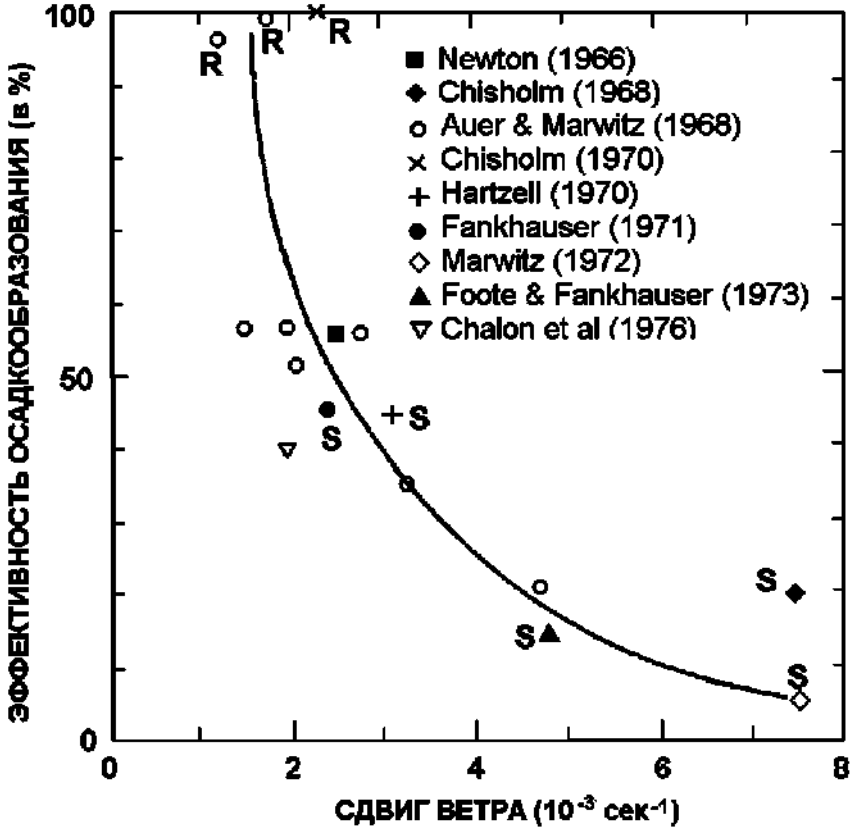


Рис. 10.2 – Эффективность осадкообразования (отношения количества осадков ко втоку водяного пара) в конвективных облаках в зависимости от вертикального сдвига ветра от основания до вершины облаков:
S – в градовых облаках; R – в ливневых [15]

При такой эффективности осадкообразования увеличение концентрации зародышей града не может существенно замедлить рост града из-за нехватки жидкой воды, так как она в избытке вносится восходящими потоками и скорее приведет к увеличению осадкообразующей эффективности облака и массы образующегося града. К такому же выводу пришли, анализируя физические основы этого метода Атлас [20], Браунинг [15], Денис [13] и др.

10.3.4 По данным авиационных исследований [16 – 18] естественная концентрация ледяной и снежной крупы в зонах зарождения и роста града составляет 10^3 – 10^4 в м^3 при общей массе около 1 г/м^3. Это означает, что

концентрация зародышей града в зоне роста всегда избыточна, однако это не предотвращает рост некоторой части зародышей до опасных размеров, так как рост града носит *избирательный характер* (Абшаев, 1966), в результате чего менее 1% зародышей вырастают в градины.

10.3.5 Увеличение естественной концентрации зародышей града за счет засева кристаллизующими реагентами в 100 – 1000 раз физически невозможно, так как их масса превысила бы 100 г/м^3, а радиолокационная отражаемость после засева увеличилась бы на 20 – 30 dB. Временной ход радиолокационной отражаемости областей засева не подтверждает такого резкого увеличения отражаемости.

10.3.6 Следует также отметить, что при внесении реагента в зону роста града, искусственные кристаллы и сформировавшиеся на них частицы будут выброшены сильными восходящими потоками в наковальню, а создание смешанной фракции может привести к ускорению роста града [11, 12]. Для исключения этого засев необходимо осуществлять в областях слабых восходящих потоков и до того как сформируются естественные зародыши града. Но это приведет к реализации других физических процессов, а не предусматриваемых концепцией конкуренции.

10.4 Укрупнение капель с последующим их замораживанием

Концепция укрупнения капель с последующим замораживанием, предложенная Бартишвили, Ломинадзе и др. в 1964 [7, 21] предусматривала комбинированный засев облаков: гигроскопическими частицами в теплой части облака, кристаллизующими частицами в переохлажденной части. Предполагалось, что гигроскопические частицы стимулируют укрупнение капель в теплой части облака и уменьшение водности восходящего потока. В результате этого уменьшается питание жидкой водой переохлажденной части облака и ухудшаются условия роста града. Часть аномально крупных капель, образовавшихся на искусственных гигантских гигроскопических частицах, может быть перенесена в верхнюю переохлажденную часть облака, где внесение кристаллизующего реагента их заморозит, повышая концентрацию потенциальных зародышей града.

Реализация этой концепции требует проведения воздействия на первичные процессы осадкообразования, а без этого сводится к концепции конкуренции. В части укрупнения капель и вымывания водности восходящего потока эта концепция близка к концепции ускорения осадкообразования, рассматриваемой ниже. Однако рекомендуемое

авторами место внесения гигроскопического реагента – вблизи основания облака в зоне максимальной отражаемости, а кристаллизующего – в зоне роста града не могло дать желаемого эффекта, так как в обеих этих зонах уже содержатся крупные частицы, и идет интенсивный процесс естественного осадкообразования.

10.5 Понижение траектории растущих градин

Концепция понижения траектории [9, 15] предусматривает стимулирование раннего образования зародышей града с тем, чтобы их рост проходил на более низких уровнях (где меньше содержание жидкой воды) и в течение более короткого времени. Она базируется на том, что, не пройдя через область максимальных восходящих потоков, градины не могут вырасти до больших размеров. Для реализации этой концепции предлагается засев области зарождения града гигроскопическими или кристаллизующими реагентами. По существу эта концепция является следствием концепции ускорения осадкообразования, которая рассматривается ниже.

Попытка практической реализации концепции с помощью шашек с гигроскопическим реагентом ЮАР, предпринятая во Франции [22], пока не привела к желаемому результату.

10.6 Динамическое подавление восходящих потоков

10.6.1 Динамический метод воздействие предусматривает подавление восходящих потоков, без которых не возможен рост града.

Энергетика градовых облаков, высвобождаемая при конденсации водяного пара и замерзания значительной части облачной воды, сравнима с энергией ядерных взрывов [1]. Это подтверждают элементарные расчеты. В суперячейковых облаках, как было сказано выше, конденсируется около $3 \cdot 10^{10}$ г водяного пара в секунду. С учетом того, что при конденсации водяного пара выделяется 597 кал/г, а при замерзании облачной воды – 80 кал/г, общее количество энергии, выделяемой при конденсации такого количества водяного пара, составляет около $1{,}8 \cdot 10^{13}$ кал/с. При замерзании части облачной воды дополнительно выделится около $2 \cdot 10^{11}$ кал/с. В течение периода существования суперячейкового градового облака (около 2 часов) высвобождается около $1{,}5 \cdot 10^{17}$ калорий, что сравнимо с энергией взрыва ядерного заряда массой, эквивалентной 1,5 т тринитротолуола.

Это свидетельствует о том, что энергетическое воздействие с целью подавления восходящих потоков практически невозможно. Поэтому авторы динамического метода воздействия (Вульфсон и Левин, 1968 [8]) предложили реализовать его за счет использования энергии собственной конвективной неустойчивости облаков путем инициирования в них импульсов нисходящих потоков, которые будут усиливаться в конвективно-неустойчивой атмосфере. При этом инициирование импульсов нисходящих потоков предлагалось осуществлять с помощью:

– ударных волн и продуктов ликвидации артиллерийских снарядов, подрываемых в верхней части радиоэха конвективных облаков;
– сброса с вершины облаков грубодисперсных порошков;
– пролетом реактивного самолета при больших углах тангажа;
– зависания вертолета над вершиной конвективных облаков.

Эксперименты по артиллерийскому обстрелу (Абшаев и Черенкова, 1967, Бибилашвили и Калов, 1981 [23]) и сбросу грубодисперсных порошков (Гайворонский, 1972 [24], Серегин, 1981 [25], Колосков Б.П., Корнеев и др. [26, 27]) показали возможность разрушения локальных мощно-кучевых облаков. При этом эффективность воздействия тем выше, чем больше энергия неустойчивости атмосферы [27]. Однако применение перечисленных методов инициирования нисходящих потоков для разрушения зрелых градовых облаков не дали желаемого результата вследствие недостаточности масштаба динамического возмущения. Кроме того при воздействии на такие облака важен выбор места воздействия. Воздействие в области сильных восходящих потоков и их тыловой части приводит к появлению локальных просветов радиоэха, но не к разрушению градового облако в целом [23].

10.6.2 В [28] предложен оптимизированный авиационно-динамический метод, основанный на массированном засеве фидерных облаков, питающих материнское градовое облако, готовыми центрами коагуляции, которые стимулируют быстрое осадкообразование, вымывание облачной воды, преждевременное выпадение осадков и подавление слабых в этой области восходящих потоков. В качестве материала для засева предложено использовать грубодисперсные порошки или разбрызгивать воду. Засев предлагается осуществлять с помощью самолетов типа БЕ-200, который может загружать до 12 т грубодисперсных порошков или воды (которую он может набирать при скольжении по поверхности водоема) и обеспечивать порционный или непрерывный сброс вдоль траектории полета над вершинами фидерных облаков.

Численное моделирование [29] показало, что оптимальным размером вводимых центров коагуляции являются частицы диаметром около 30 мкм.

При введении в вершины фидерных облаков 1000 кг такого аэрозоля обеспечивается полное вымывание облачной воды за 4 ÷ 5 минут и стимулируется выпадение в 10^4 – 10^5 раз большего количества осадков. Такое количество осадков может подавить слабые восходящие потоки и привести к быстрому динамическому разрушению фидерных облаков, являющихся областями будущего градообразования в зрелых градовых облаках. Это подтверждают многочисленные эксперименты [25 – 27] по успешному разрушению мощно-кучевых облаков путем сброса грубодисперсных порошков даже в гораздо меньших количествах. Разрушение фидерных облаков в свою очередь может лишить дальнейшего квазинепрерывного обновления зрелых градовых облаков и привести к прерыванию выпадения града.

10.7 Стимулирование преждевременного осадкообразования

10.7.1 Принцип преждевременного осадкообразования предусматривает стимулирование более раннего и быстрого (чем при естественном ходе процесса) осадкообразования в областях будущего градообразования, преждевременное выпадение которых может привести к вымыванию водности областей будущего градообразования, аэродинамическому торможению и подавлению слабых еще восходящих потоков и ликвидации условий градообразования [10].

10.7.2 Концентрация зародышей града в зонах зарождения и роста града достигает $10^3 \div 10^4$ м$^{-3}$ [11, 18] и превышает концентрацию градин не менее чем в 100 раз, так как рост града носит избирательный характер.

Условием избирательности по данным доплеровских измерений скоростей восходящих потоков и гравитационного падения градин в зоне роста [30] является баланс скоростей гравитационного падения градин V_g и восходящего потока W_m и их нарастания во времени, согласно выражениям (9.1) и (9.2).

Необходимым условием роста градин является их длительное время нахождения в благоприятных условиях (в восходящем потоке в области отрицательных температур и повышенной водности). Это возможно только в области нарастающих во времени скоростей восходящих потоков, удерживающих растущие градины в зоне роста.

При нарушении этого баланса скоростей зародыши града или растущие градины будут либо выброшены из зоны роста града вверх (при $V_g << W_m$), либо выпадут из нее (при $V_g > W_m$). Поэтому только некоторые зародыши града могут дорасти до больших размеров. Это зависит от начальных размеров, места появления и последующих траекторий

движения зародышей. Поздно появившиеся мелкие зародыши выбрасываются в верхнюю часть облака, а рано появившиеся и быстро растущие зародыши не могут удерживаться восходящим потоком и выпадают, что подтверждается выпадением отдельных крупных капель из навеса радиоэха градовых облаков.

Избирательность роста града является *слабым звеном* в цепи градообразования. Даже небольшое ускорение (или замедление) роста частиц за счет воздействия может нарушить указанный баланс скоростей, и, следовательно, нарушить условия роста града и привести к предотвращению их роста за счет преждевременного выпадения осадков.

Подтверждением этого является естественный механизм, препятствующий выпадению града над морскими акваториями, где обилие крупных гигроскопических частиц морской соли приводит к быстрому осадкообразованию и вымыванию облаков до того, как сформируются мощные восходящие потоки, необходимые для роста града.

Ускорение осадкообразования стимулируется путем создания в точках и линиях засева начальной концентрации искусственных кристаллизующих частиц порядка $5 \cdot 10^{10} \div 10^{11}$ м$^{-3}$ [11, 31], которая неминуемо приведет к агрегации образующихся кристаллов. Последующее обзернение агрегатов кристаллов облачными каплями приводит к образованию больших концентраций снежной крупы (рис. 10.3).

Это подтверждают результаты экспериментов по засеву переохлажденного тумана микродозами кристаллизующего реагента в поточной камере холода ВГИ, в которых получено [32], что через 2 – 4 мин после внесения в камеру микродоз (1 мг) хладореагентов (жидкий азот, углекислота, пропан) или кристаллизующих реагентов при концентрации кристаллов в переохлажденном тумане $N_{кр} \approx 10^5$ м$^{-3}$ начинается агрегация кристаллов. Агрегация интенсивно проходит при $N_{кр} = 10^6 \div 10^7$ м$^{-3}$ и имеет два максимума при -13 и -5 ^{o}C, соответствующих максимумам роста и естественного размножения кристаллов. Через 2 минуты при температуре -13 ^{o}C и 4 минуты при -5 ^{o}C отмечается появление агрегатов размером сотни мкм и в дальнейшем их бурный рост за счет обзернения. При этом 1 г льдообразующего состава и хладореагента при температуре -10 ^{o}C дает около 10^{10} агрегатов, а при -6 ^{o}C около $2 \cdot 10^9$ агрегатов, соответственно, но не $10^{12} \div 10^{13}$ отдельных кристаллов, как это принято считать при оценке льдообразующей эффективности реагентов.

Исследования, проведенные в Германии в аэродинамической трубе [33], показали более быстрый рост агрегатов кристаллов по сравнению с ледяными шариками такого же размера. Это обусловлено тем, что коэффициент захвата облачных капель агрегатами кристаллов за счет их

продуваемости может в 10 раз превышать коэффициент захвата равновеликих сплошных ледяных шариков и уменьшается по мере образования крупы и уменьшения пористости агрегатов. Эти эксперименты показали, что малая плотность агрегатов компенсируется высоким значением коэффициента захвата и дает возможность очень быстрого (за 3 – 5 минут) обзернения агрегатов и превращения их в крупу.

Результаты натурных экспериментов по АВ на облака с целью предотвращения града и увеличения осадков в проектах NHRE, XIPLEX и других показали [15], что любой засев твердой углекислотой или пиротехническими шашками с AgI приводит к агрегации кристаллов из-за большой их начальной концентрации. По данным самолетов-лабораторий, оборудованных датчиками спектра, фазового состояния и формы частиц, основным механизмом образования осадков в засеянных конвективных облаках является формирование рыхлых агрегатов, с последующим таянием и образованием дождя.

Натурные авиационные и радиолокационные исследования взаимодействия льдообразующих реагентов с облачной средой, проведенные в Канаде [34] показали, что основным (но не единственным) источником зародышей града являются фидерные облака, развивающиеся на наветренном фланге зрелого градового облака.

Авиационные данные по эволюции микроструктуры показали [34], что в засеянных фидерных облаках обычно отмечается резкое повышение концентрации и агрегация ледяных кристаллов с последующим обозрением, а не медленный процесс их сублимационного роста. Крупа мм размеров в засеянных облаках образуется в высоких концентрациях и на низких высотах за 6 – 8 минут, а в аналогичных незасеянных (контрольных) облаках такая крупа образуется через 20 – 24 минут и в меньших концентрациях. Первое радиоэхо засеянных облаков появляется через 8 минут после засева, а незасеянного – через 16 минут.

При изучении эволюции вида и спектра гидрометеоров после засева идентичных конвективных облаков реагентами AgI и CO_2 установлено [34], что первые 6 минут после засева, развитие ледяных кристаллов несколько отличается, но последующие пролеты и радиолокационные наблюдения показали, что количество осадков и время ускорения осадкообразования мало отличались в зависимости от типа реагента.

Такое ускорение формирования крупы (на 12 ÷ 16 минут) нарушает баланс скоростей, необходимый для поддержания ее в зоне роста, так как восходящие потоки нарастают более медленно. Крупа в засеянных облаках выпадает, не вступая в процесс градообразования. Время от первого радиоэха до выпадения осадков 1 мм/час (Z = 25 dBZ) на земле составляет около 8 минут, а в незасеянных облаках через 13 минут [34].

Преждевременное выпадение может оказать серьезное микрофизическое и динамическое воздействие на облако, включая резкое сокращение жидкокапельной водности засеянного объема, динамические эффекты подавления восходящего потока за счет аэродинамического торможения и охлаждения воздуха при таянии крупы ниже изотермы 0 °С и испарения осадков в подоблачном слое. При этом динамические эффекты могут превышать эффекты, создаваемые сбросом грубодисперсных порошков, взрывом снарядов и т.п.

10.7.3 Реализация механизма ускорения осадкообразования путем массированного засева фидерных облаков льдообразующими реагентами включает в себя [11, 31] следующую цепь физических явлений (рис. 10.3):

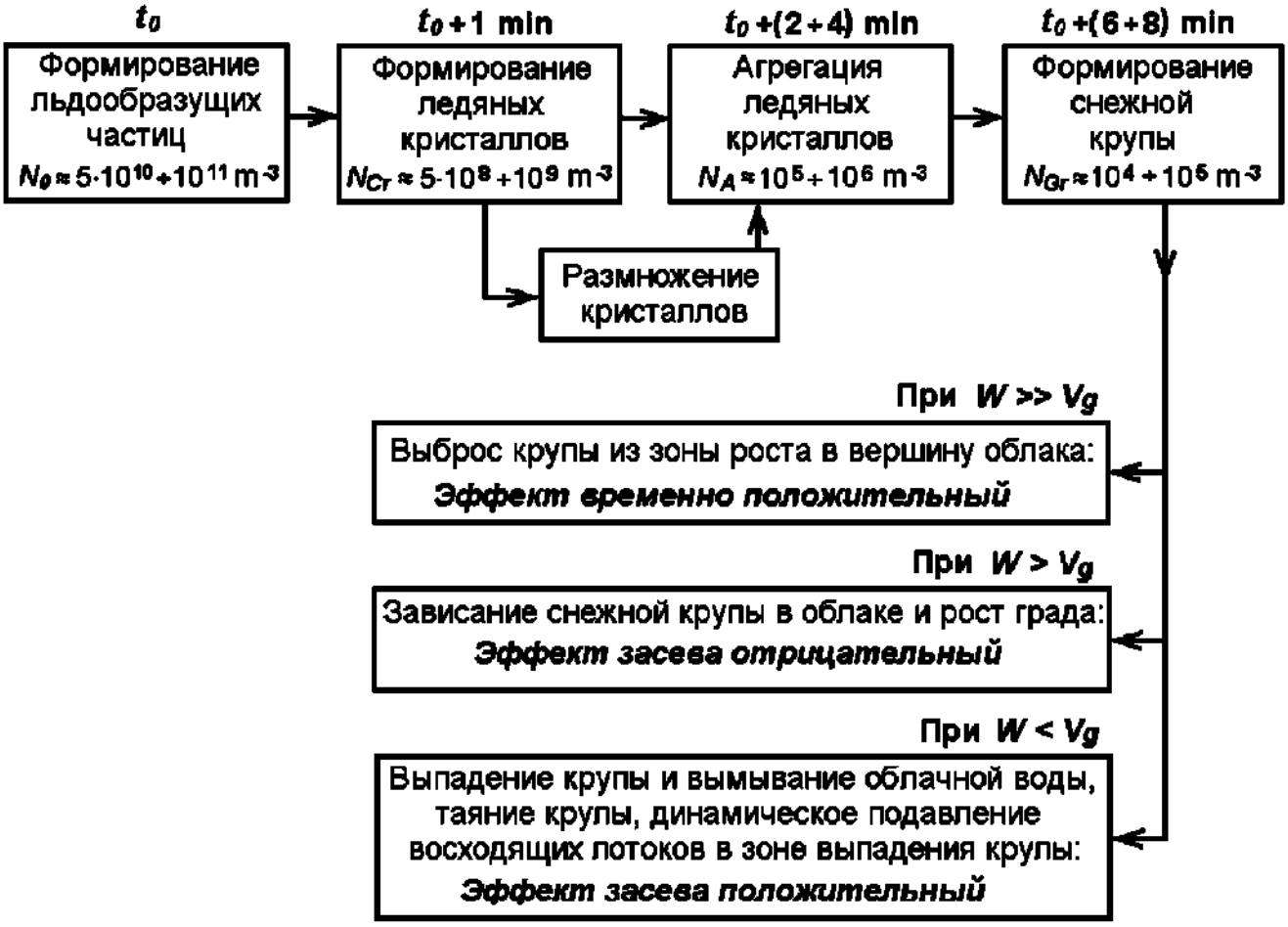


Рис. 10.3 – Схема реализации концепции ускорения осадкообразования [58].
t_0 – время внесения реагента

– создание в зоне формирования условий зарождения града (в трассе засева) начальной концентрации льдообразующих ядер $N_0 \approx 5 \cdot 10^{10} \div 10^{11}$ м$^{-3}$, которая быстро уменьшается за счет турбулентной диффузии [35, 36];

– формирование в течение 1 минуты после засева искусственных кристаллов в концентрации $N_{Cr} \approx 5 \cdot 10^8 \div 10^9$ м$^{-3}$ согласно [37];

– интенсивный рост и агрегация кристаллов согласно [31, 32], образование через 2 – 4 минут после засева агрегатов кристаллов размером 0,2 – 0,6 мм в концентрации $N_A \approx 10^5 \div 10^6$ м$^{-3}$;

– обзернение агрегатов кристаллов согласно [32] и превращение их через 6 – 8 минут после засева в снежную крупу в концентрации $N_{Gr} \approx 10^4 \div 10^5$ м$^{-3}$ и размером порядка 1 ÷ 5 мм, как следует из экспериментов по засеву развивающихся конвективных облаков [34];

– нарушение баланса скоростей, обуславливающего избирательный рост града согласно [11];

– выпадение крупы, вымывание облачной воды в зоне формирования условий зарождения града, подавление слабого в этой области восходящего потока за счет аэродинамического торможения преждевременными осадками и уменьшения плавучести, обусловленной таянием крупы в локальном слое ниже уровня 0 ^{o}C изотермы и испарением осадков в подоблачном слое.

Согласно рисунку 10.3, механизм ускорения осадкообразования может обеспечить положительный эффект только при засеве областей слабых восходящих потоков с $W \cong 2 – 5$ м/с.

При засеве области более сильных восходящих потоков ($5<W<10$ м/с) образующаяся крупа может удерживаться в зоне роста града и привести к увеличению массы градовых осадков [11, 20].

При засеве области очень сильных восходящих потоков ($W > 10 \div 15$ м/с), крупа может выбрасываться из зоны роста града вверх, что позволит получить только временный положительный результат.

При слишком раннем засеве, когда водность и восходящие движения в фидерных облаках слишком малы, условия для реализации механизма агрегации и обзернения кристаллов не оптимальны.

Условия ускорения осадкообразования не выполняются также при недостаточной начальной концентрации кристаллизующих частиц. По данным теоретического моделирования [36] начальная концентрация кристаллов за счет турбулентной диффузии уменьшается за время формирования кристаллов (за 1 минуту) примерно в 100 раз. При концентрации кристаллов менее 10^7 м$^{-3}$ механизм быстрого осадкообразования за счет их агрегации практически не работает [31] и укрупнение частиц происходит за счет длительного дендритного роста отдельных кристаллов.

Таким образом, принцип ускорения осадкообразования определяет время засева, место засева и дозировку реагента.

10.7.4 На рисунке 10.4 представлена схема места зарождения и траекторий частиц осадков при естественном процессе градообразования и при АВ в соответствии с рассмотренными пятью последними концепциями предотвращения града. Показано рекомендуемое место

создания искусственной крупы в соответствии с концепцией ускорения осадкообразования в фидерных облаках до того как в них образуются естественные зародыши града.

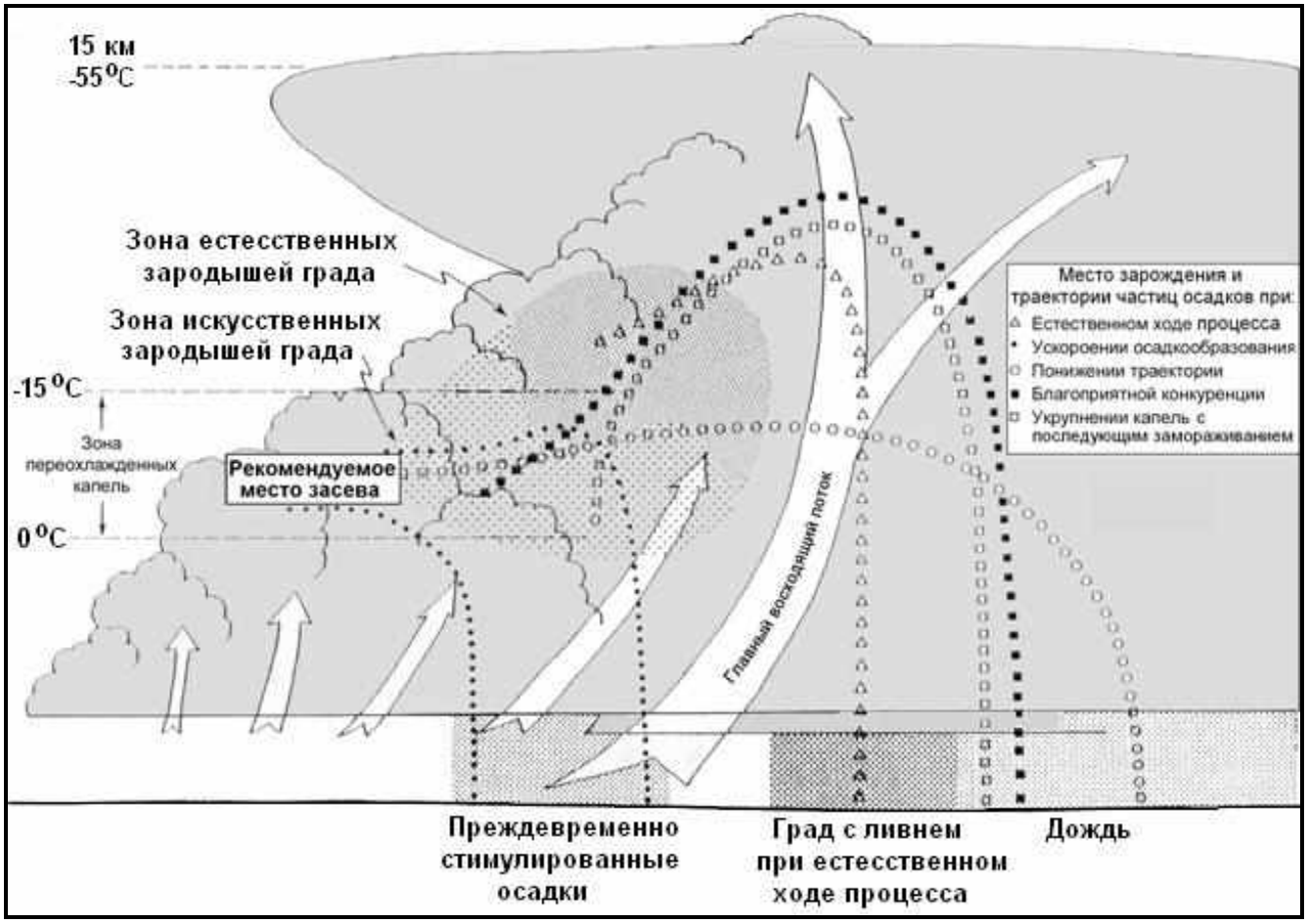


Рис. 10.4 – Место зарождения и траектории частиц осадков при естественном ходе процесса градообразования и при реализации различных концепций воздействия [38]

Из рисунка 10.4 следует, что по концепции благоприятной конкуренции и укрупнению капель с последующим замораживанием траектории растущих градин проходят несколько выше, чем при естественном ходе процесса из-за замедления их роста. По концепции понижения траекторий они проходят ниже, чем при естественном ходе процесса, не попадая в область сильных восходящих потоков. Предполагается, что эти траектории приведут к выпадению дождя в тыловой части облака.

По концепции ускорения осадкообразования искусственные частицы осадков (крупа) выпадают раньше, не попадая в область главных восходящих потоков, и приводят к выпадению дождя во фронтальной части облака перед естественными градовыми осадками.

10.7.5 Обычно рассмотренные концепции предотвращения града противопоставляются друг другу. Однако анализ показывает, что все они

(кроме гипотезы полной кристаллизации) тесно взаимосвязаны, а концепция ускорения осадкообразования объединяет их в единую цепь физических процессов:

А) Она предусматривает вымывание и обеднение облачной воды в областях будущего градообразования преждевременными осадками, которое предусматривалось методом укрупнения капель с последующим замораживанием по Бартишвили и др. [7].

Б) Раннее укрупнение частиц может приводить к понижению траектории их роста по Браунингу и Футу [9].

В) Преждевременное выпадение осадков может привести к динамическим эффектам подавления неокрепших восходящих потоков за счет создания импульса нисходящих потоков, уменьшения их плавучести при таянии крупы в теплой части атмосферы по Вульфсону и Левину [8]. Возникающие при этом динамические эффекты могут значительно превышать, эффекты, полученные при сбросе упаковок цемента, которые по экспериментальным данным Гайворонского [24], Серегина [25] и Корнеева [26, 27] эффективно разрушают мощно-кучевые облака.

Г) Создание гигантской концентрации искусственной крупы до зарождения естественных зародышей града может наилучшим образом способствовать их конкуренции по Г.К. Сулаквелидзе [6].

Д) Ранний засев и ускорение осадкообразования стимулируют динамические эффекты быстрого развития конвективных облаков за счет высвобождения скрытой теплоты фазовых переходов и увеличения плавучести по Дж. Симпсон [39] и Орвиллу [40].

10.7.6 В пользу концепции ускорения осадкообразования свидетельствует два серьезных фактора:

А) Во-первых, целью засева облаков (и туманов) кристаллизующими и гигроскопическими реагентами является ускорение укрупнения мелких облачных частиц, стимулирование их коагуляционного роста и реализация фазовой и коллоидальной неустойчивости облачной среды.

Б) Во-вторых, быстрое осадкообразование в морских облаках, связанное с обилием крупных гигроскопических частиц морской соли, приводящих к ускоренному осадкообразованию, практически исключает выпадение града над морскими акваториями. Следовательно, естественный механизм предотвращения града реализуется через быстрое осадкообразование.

10.8 Оптимальные схемы засева градовых облаков

10.8.1 Место и время засева градовых облаков являются ключевыми вопросами АВ на градовые процессы, так как термодинамические и микрофизические характеристики объема засева определяют условия диффузии и взаимодействия реагентов с облачной средой, степень влияния на процесс градообразования и в конечном итоге эффективность противоградовых операций.

Исходя из различий в механизме образования града, месте зарождения и характере распространения градообразования в пространстве, изложенных выше, следует, что место внесения реагента должно зависеть от стадии развития и типа ГП (его пространственной структуры и динамики развития):

– прерывание *дискретного распространения* процесса градообразования в пространстве в одноячейковых процессах следует проводить путем раннего обнаружения и засева высоко зарождающихся новых КЯ на стадии их первого радиоэха и ближайшие 2 ÷ 4 минуты после его зарождения;

– *прерывание дискретно-непрерывного* процесса градообразования в многоячейковых процессах может быть достигнуто за счет разрушения вновь зарождающихся КЯ и прерывания выпадения града из зрелой градовой ячейки;

– прерывание процесса *непрерывного распространения* градообразования в суперячейковых облаках должно осуществляться путем засева обновляющейся части навеса радиоэха и ближайших к нему фидерных облаков.

10.8.2 Приведенный выше обзор технологий ПГЗ показывает, что место и время засева градовых облаков зависит от принятой концепции и возможностей применяемых средств засева, они в разных технологиях ПГЗ, существенно отличаются.

По мере развития современной российской технологии ПГЗ было предложено несколько вариантов засева, изображенных на вертикальном сечении суперячейкового градового облака на рисунке 10.5:

– авторы первого варианта ракетного метода Карцивадзе, Гайворонский, Серегин [14, 24, 25] предлагали засевать фронтальную часть максимума радиоэха зрелых градовых облаков, показанную на рисунке 10.4 прямоугольником А;

– автор теории конкуренции и артиллерийского метода ПГЗ Сулаквелидзе [6], предлагал засевать область зарождения и роста града (прямоугольник Б).

– автор концепции ускорения осадкообразования и современной ракетной технологии ПГЗ Абшаев [11] предложил засевать область формирования условий зарождения града (прямоугольник В);

– Ашабоков, Федченко, Тлисов и Шаповалов [41] предложили засевать область стыка струи восходящего и нисходящего потоков (прямоугольник Г), предполагая, что эта область содержит много крупных капель, и их замораживание может создать большую концентрацию конкурирующих зародышей. Однако такой засев, как видно из рисунка 10.6, может привести к выбросу реагента и образующихся кристаллов мощными восходящими потоками в вершину облака или их опусканию нисходящими потоками в основание облака с вымыванием интенсивными осадками.

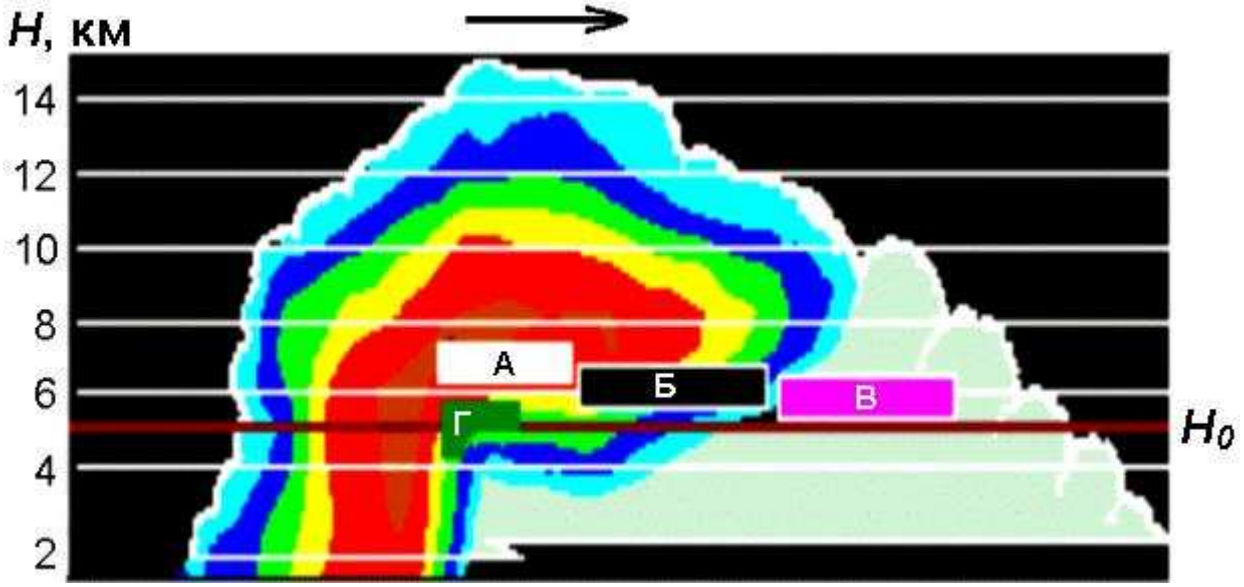


Рис. 10.5 – Вариации места засева градового облака, предложенные в процессе развития российской технологии ПГЗ: А – по Карцивадзе и Гайворонскому; Б – по Сулаквелидзе; В – по Абшаеву; Г – по Ашабокову, Федченко, Шаповалову

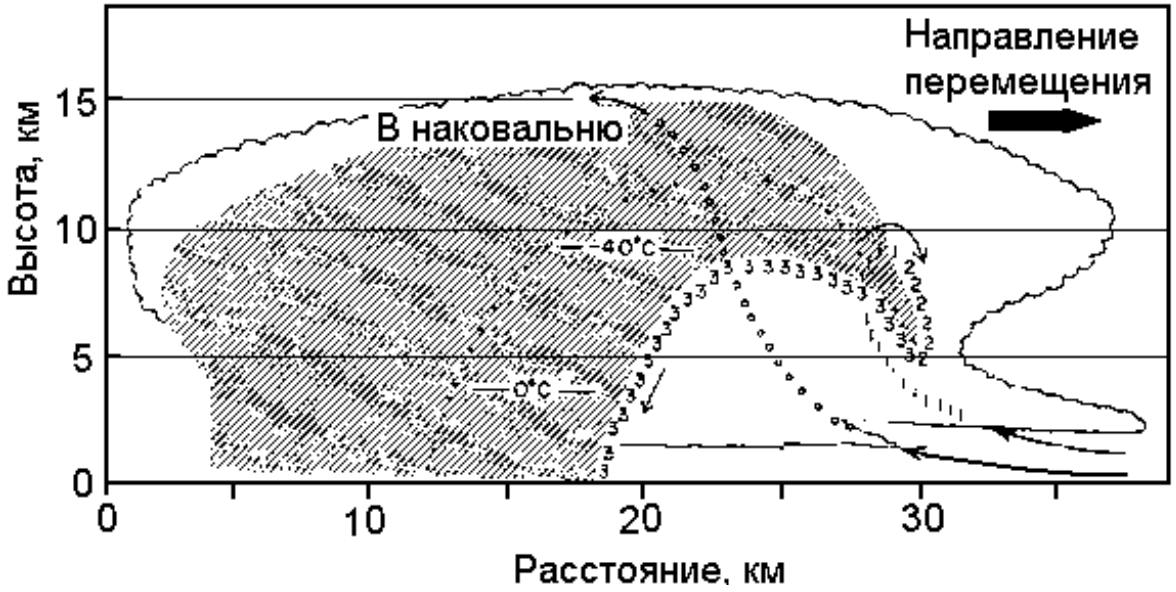


Рис. 10.6 – Схема траекторий зародышей в вертикальном сечении суперячейкового облака: 0 и 1 – зародыши, возникшие в сильном восходящем потоке, которые будут выброшены в наковальню; 2 и 3 зародыши, которые попадут в главный восходящий поток и могут вырасти до больших градин [15]

10.8.3 В 1960 – 1970 гг. область засева в соответствии с [64] выделялась впереди по направлению перемещения зоны выпадения града (рис. 10.7а). Боковые границы области засева ограничивались по касательным к изолиниям Z = 45 dBZ, тыловая граница была также ограничена изолинией Z = 45 dBZ, а передняя граница вынесена на 2 – 3 км за границу радиоэха. Практика применения такой схемы засева с использованием артиллерийского комплекса «Эльбрус-4» показала, что при воздействии на мощные градовые облака, как правило, отмечалась полоса града на защищаемой территории, на проекции которой была расположена полоса точек внесения кристаллизующего реагента.

10.8.4 По результатам анализа таких случаев и на основе исследования структуры градовых облаков было установлено, что навес радиоэха, в котором зарождается и растет град, обычно направлен вправо от направления перемещения облака от 10 до 90 градусов [9, 11, 15]. С учетом этого фактора область засева в 1980 – 1994 гг. была смещена на правый фланг навеса радиоэха, как показано на рисунке 10.7b.

Кроме того, учитывая, что на Северном Кавказе градовые процессы имеют преимущественно правостороннее развитие, но примерно в 12 – 15% случаев отмечаются градовые процессы с левосторонним развитием, характерным для южного полушария, схемы засева градовых облаков были дифференцированы применительно к Северному и Южному полушариям [31, 53 – 59]. С учетом этого фактора сложились схемы засева, регламентированные действовавшим до 2010 г. РД 52.37.96-98. Применение этих схем засева с выделением навеса радиоэха и определением его направления обеспечило повышение эффективности прерывания града зрелых градовых облаков, но не во всех случаях.

10.8.4 Последующие детальные исследования структуры градовых облаков и наложение радиолокационных, авиационных и спутниковых данных показало [51], что фидерные облака формируются на наветренном фланге зрелого градового облака (рис. 10.8). По мере развития они перемещаются ведущим потоком, обтекающим материнское облако, и втягиваются в навес радиоэха, ответственный за образование града.

С учетом этой особенности в структуре и динамике развития градовых облаков в РД 52.37.731 предложено область засева мощных градовых облаков сдвинуть на наветренный фланг навеса радиоэха с тем, чтобы охватить засевом область формирования фидерных облаков на ранних стадиях их развития (до втягивания в основной восходящий поток в навесе радиоэха). При этом область засева должна охватывать полукругом фронтальную часть навеса радиоэха и ее наветренный фланг до вектора

ведущего потока, проведенного через тыловую границу навеса радиоэха, а также расширена за границу радиоэха на 3 – 5 км (рис. 10.7c).

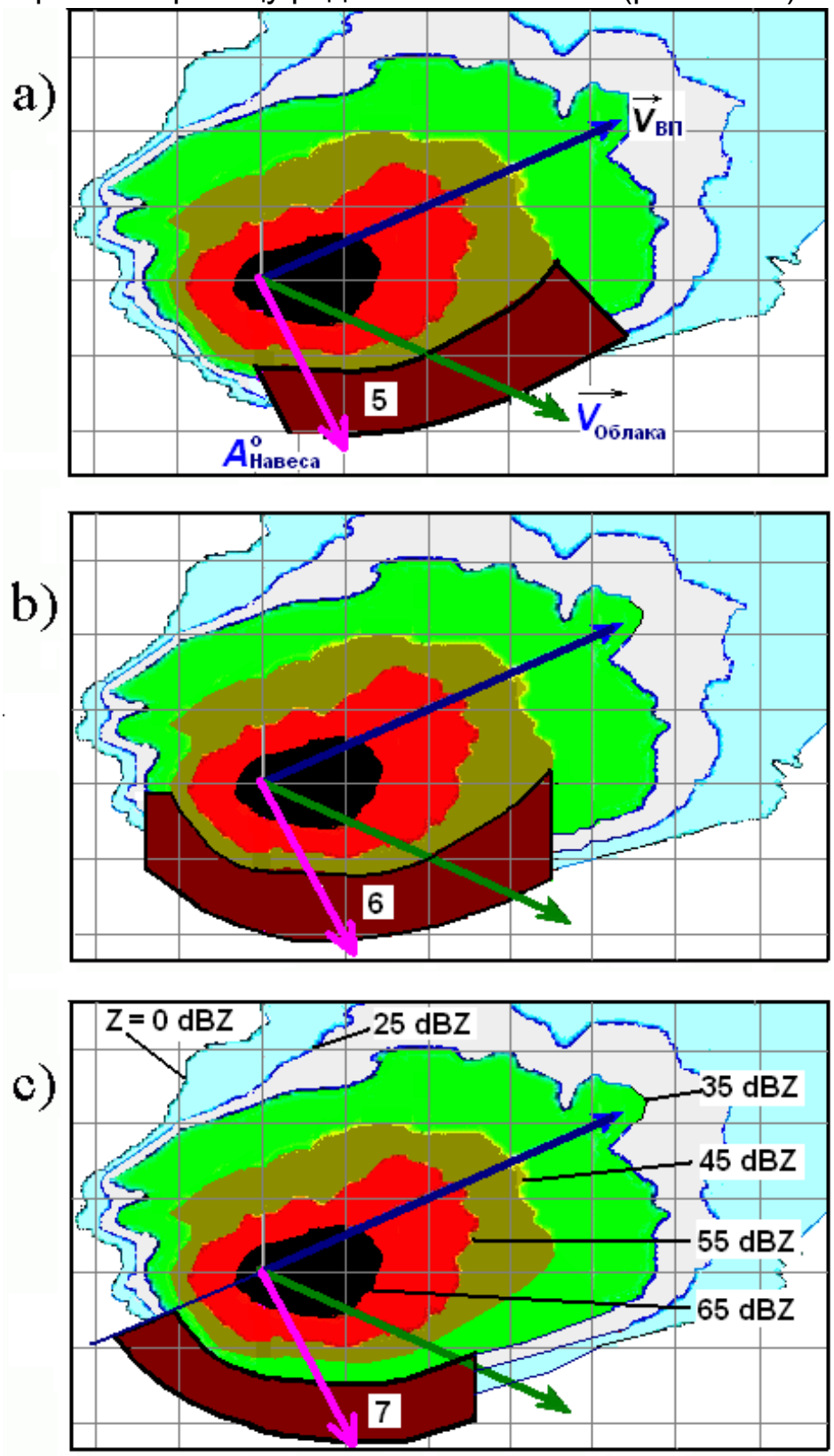


Рис. 10.7 – Эволюция схемы засева мощных градовых облаков по концепции ускорения осадкообразования: a) – схема засева, применявшаяся в 1970 – 1985 гг.; b) – схема засева, применявшаяся в 1985 – 1995 гг.; c) усовершенствованная схема засева, применяемая в настоящее время [58]

Рис. 10.8 – Положение визуальной границы облака и растущих башен фидерных облаков относительно границы радиоэха градового облака [51]

Испытания этой схемы засева при АВ на ГП с левосторонним развитием (в Аргентине) и при АВ на ГП с правосторонним развитием (на Северном Кавказе) показали повышение эффективности воздействия, сокращение времени достижения эффекта воздействия, сокращение расхода ПГИ на засев ОВ IV категории от 200 шт. и более до 80 (рис. 10.9).

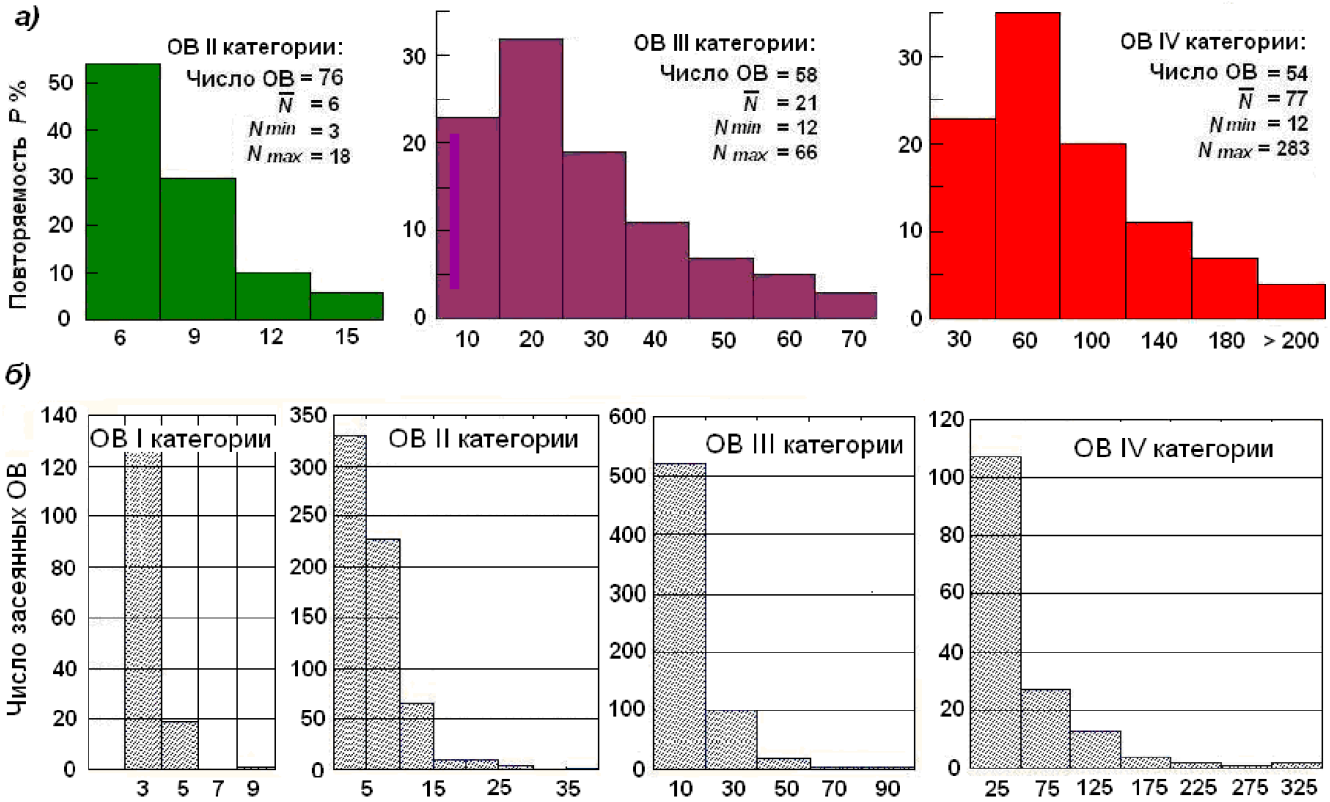


Рис. 10.9 – Расход ПГИ на засев ОВ разных категорий: ***а)*** с левосторонним развитием в Аргентине; ***б)*** правосторонним развитием на Северном Кавказе

С учетом результатов этих испытаний в РД 52.37.731 введена *усовершенствованная схема засева мощных градовых облаков,* предусматривающая:

– расширение области засева *на наветренный фланг* путем продления границы площадки засева до вектора ведущего потока, проведенного по тыловой границе навеса радиоэха, как показано на рисунке 10.7с;

– сокращение площадки засева с правой стороны путем проведения ее правой границы параллельно направлению навеса радиоэха по касательной к правой границе изолинии Z_{10} = 55 dBZ (ранее она проводилась по изолинии Z_{10} = 45 dBZ).

Таким образом, место засева варьировалось в зависимости от концепции засева. Даже в рамках одной концепции (ускорение осадкообразования) схемы засева корректировались несколько раз по мере накопления научных знаний и уточнения концептуальных моделей градовых облаков. Они могут корректироваться в дальнейшем на основе детальных экспериментальных и теоретических исследований макро– и микрофизических процессов в градовых облаках и получения новых научных знаний о механизме образования града.

Например, учитывая, что фидерные облака до зарождения в них частиц осадков (размером более 100 мкм) не обнаруживаются применяемыми МРЛ, для определения их местоположения и более точной локализации объема засева разработана система сопряжения радиолокационных и спутниковых данных. На этой основе в «АСУ-МРЛ» предусмотрено получение синтезированной карты, на которой двухуровневое сечении радиоэха, служащее для локализации объема засева, отображается на фоне спутниковой картины облачности в инфракрасном диапазоне. Такая карта обеспечивает возможность визуализации местоположения фидерных облаков относительно радиоэха градового облака, а также более раннее обнаружение формирования новых КЯ.

11 ТЕХНОЛОГИИ ПРОТИВОГРАДОВОЙ ЗАЩИТЫ

11.1 Основные технологии противоградовой защиты

11.1.1 Человечество во все времена стремилось защититься от града, начиная с попыток изгнания злых духов запуском стрел в градовые облака, барабанным боем, стрельбой из пушек и мортир (рис. 11.1). В XIX веке в Грузии и во Франции были даже созданы службы, которые обстреливали градовые облака из пушек в течение многих лет. Однако ученые доказали, что такой обстрел не эффективен и градины в открытом пространстве невозможно раздробить акустическими и взрывными волнами [42] и эти службы были ликвидированы.

11.1.2 В последние годы энергично пропагандируются методы защиты от градобитий с помощью наземных ионизаторов воздуха, а также ацетиленовых пушек типа «Корвалан» (рис. 11.2). Во многих странах, убедившись в бесполезности, сдали эти пушки на металлолом. Но некоторые коммерческие фирмы продолжают создавать новые конструкции таких пушек и склонить сельхозпроизводителей к их применению.

Эти методы не имеют научной основы и Всемирная Метеорологическая Организация (ВМО) не рекомендует их применять.

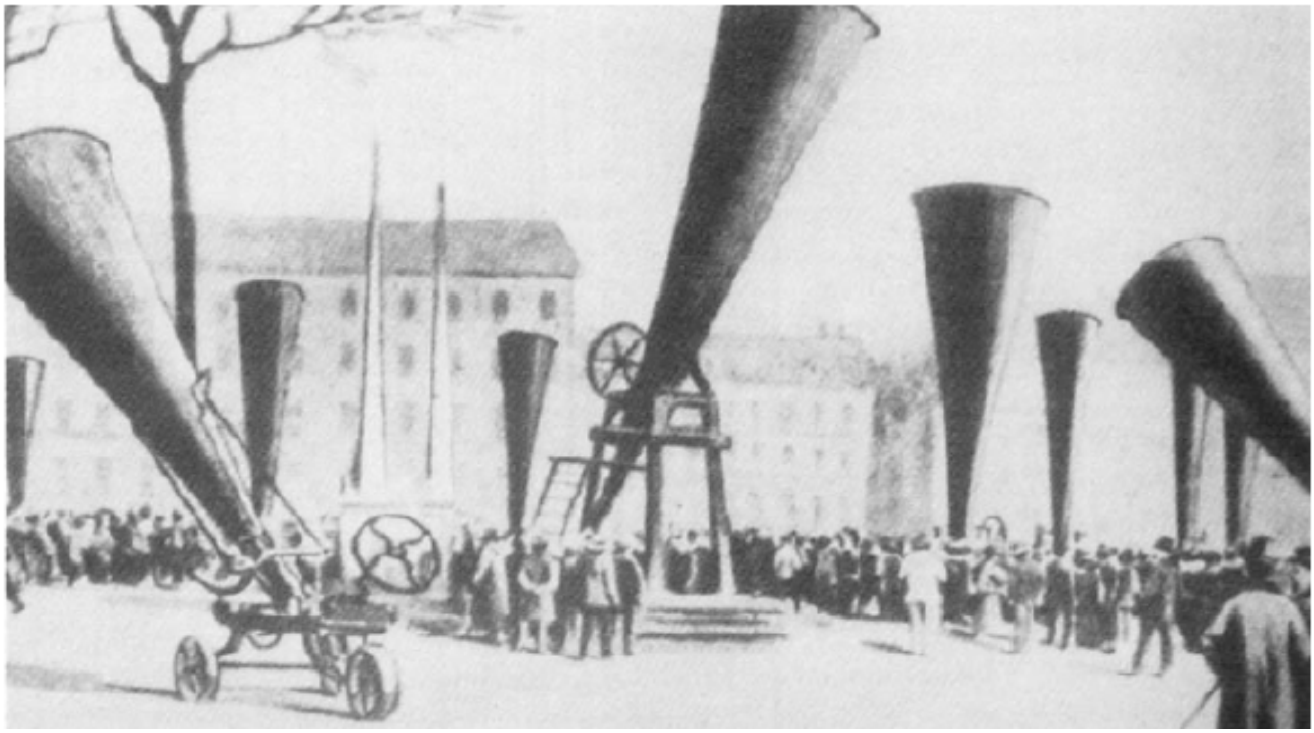
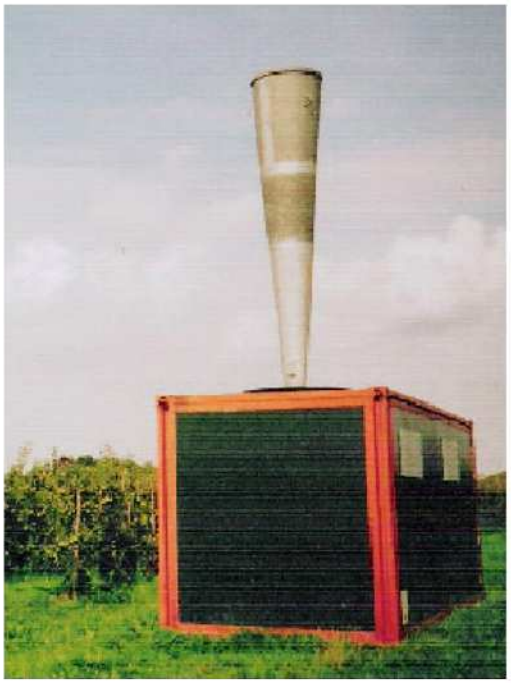


Рис. 11.1 – Выставка-продажа противоградовых мортир на 3 Международном противоградовом конгрессе (1901 г., г. Леон, Франция)



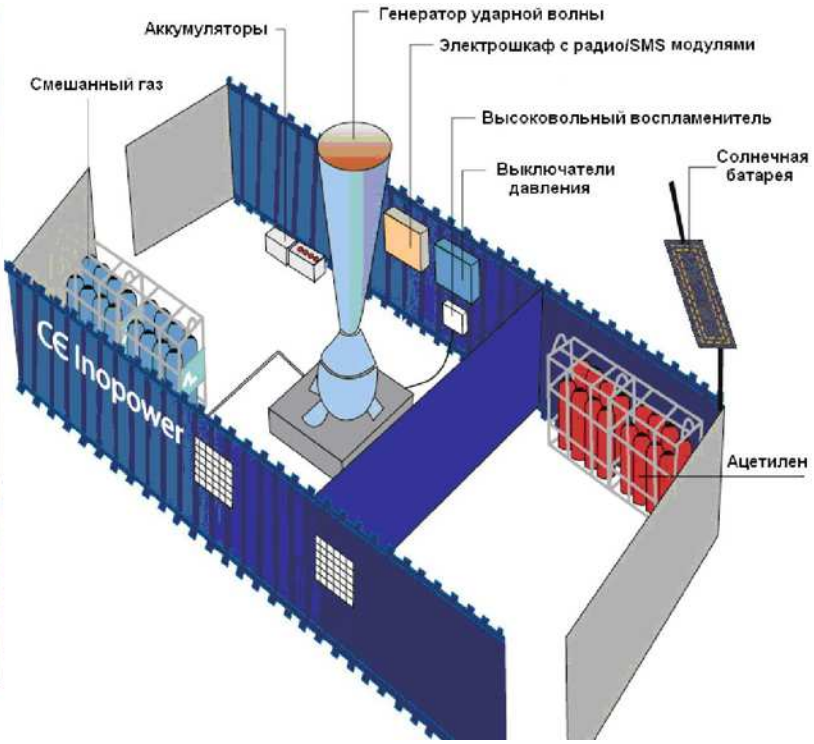


Рис. 11.2 – Ацетиленовые пушки типа «Корвалан», применяемые во Франции, Италии, Нидерландах, Аргентине, Армении и др.

11.1.3 Для защиты от града садов, виноградников и цветников издавна применяются противоградовые сетки, которыми накрывают зеленые насаждения (рис. 11.3). Укрытия бывают с наклонной сеткой или горизонтальной сеткой, с крепежами к металлическим или бетонным опорам. Наклонная сетка (в отличие от горизонтальной) не утяжеляется массой града, так как град скатывается в междурядья. Ранее применялись металлические сетки. В настоящее время их вытеснили сетки из современных материалов: полиэтилена, пропилена, ластика, которые обладают высокой прочностью, легкостью, не гниют и не токсичны. Срок службы их составляет от 3 до 8 и более лет. Размер ячейки сеток варьирует от 2,5 х 4 до 6 х 11 мм, масса от 33 до 70 г/м^2. В зависимости от цвета (черные, цветные) сетки дают затенение от 30 до 50%, обеспечивая защиту плодов от солнечных ожогов.

Однако такая защита очень дорогая (от 5 ÷ 11 тысяч долларов/га) и оправдывает себя только при защите элитных и высокоурожайных садов, виноградников и цветников на площадях, измеряемых единицами и десятками га. Кроме того, имеют место проблемы экологической чистоты защищаемой продукции, так как птицы не могут залетать под сеточные укрытия, что ведет к размножению насекомых, защиты от которых требует повышенной обработки растений ядохимикатами.

Рис. 11.3 – Противоградовые сетки IRDIUM [Интернет рекламы]

11.1.4 Защита больших площадей осуществляется методами активного воздействия на градовые облака путем их засева льдообразующими реагентами (*AgI*, CO_2) с помощью противоградовых ракет, артиллерийских снарядов, авиационных и наземных генераторов льдообразующего аэрозоля.

Эти научно-обоснованные методы ПГЗ начали развиваться с 1956 г. С тех пор апробировано много различных подходов, различающихся между собой концептуальными моделями градовых облаков, способами их распознавания, физическими принципами воздействия, способами и техническими средствами реализации активного воздействия.

Наиболее распространенными являются следующие технологии ПГЗ, предусматривающие модификацию процесса градообразования за счет засева градовых облаков кристаллизующими реагентами:

– ***авиационный*** – в США, Канаде, Аргентине, Австрии, Германии, Греции, а ранее в Кении и ЮАР;

– ***артиллерийский*** – в Китае, в Монголии, а ранее в России, Азербайджане, Армении, Грузии, Узбекистане и Таджикистане;

– ***ракетный*** – в России, Украине, Молдавии, Узбекистане, Таджикистане, Аргентине, Болгарии, Китае, Сербии, Словении, Македонии, Хорватии, Черногории, а ранее в Грузии, Азербайджане, Армении, Венгрии и Бразилии;

– ***наземно-генераторный*** – в Бразилии, Франции, Италии, Испании, Швейцарии, Венгрии, Канаде, Хорватии и др.

В некоторых странах используется комбинация этих технологий:

– *авиационный совместно с наземными генераторами* – в Аргентине, США и Германии;

– ***ракетно-артиллерийский*** – в Китае, а ранее в России, Узбекистане, Таджикистане, Азербайджане, Армении и Грузии.

Эти технологии имели и имеют различные модификации в разной степени реализуются в организационно-техническом плане. Противоградовые работы, осуществляемые в разных странах, серьезно отличаются друг от друга:

– по научным концепциям засева;
– технологии засева и реализуемости концепций засева;
– способам обнаружения ОВ и локализации объема засева;
– техническим средствам обнаружения засева градовых облаков;
– расходу реагента;
– методам оценки эффективности;
– финансовым затратам на реализацию засева.

В некоторых странах с годами меняются площади защиты и способы засева. Так, например, в семи республиках бывшего СССР артиллерийский засев трансформировался в ракетно-артиллерийский, а в настоящее время ракетный засев полностью вытеснил артиллерийский. С годами изменяются площади защиты.

11.2 Наземно-генераторная технология

Наземно-генераторная технология ПГЗ основана на засеве кристаллизующими частицами приземной атмосферы с помощью ацетоновых или пиротехнических генераторов аэрозоля AgI. Эти генераторы расставляются на ЗТ и ее наветренном фланге и дистанционно включаются за 4 часа до ожидаемого по прогнозу начала развития градовых облаков. Например, в ряде регионов Франции на площади 55 000 км^2, с годовыми потерями около 110 млн долларов США осуществляется проект ANELFA [42 – 45], начатый в 1952 г.

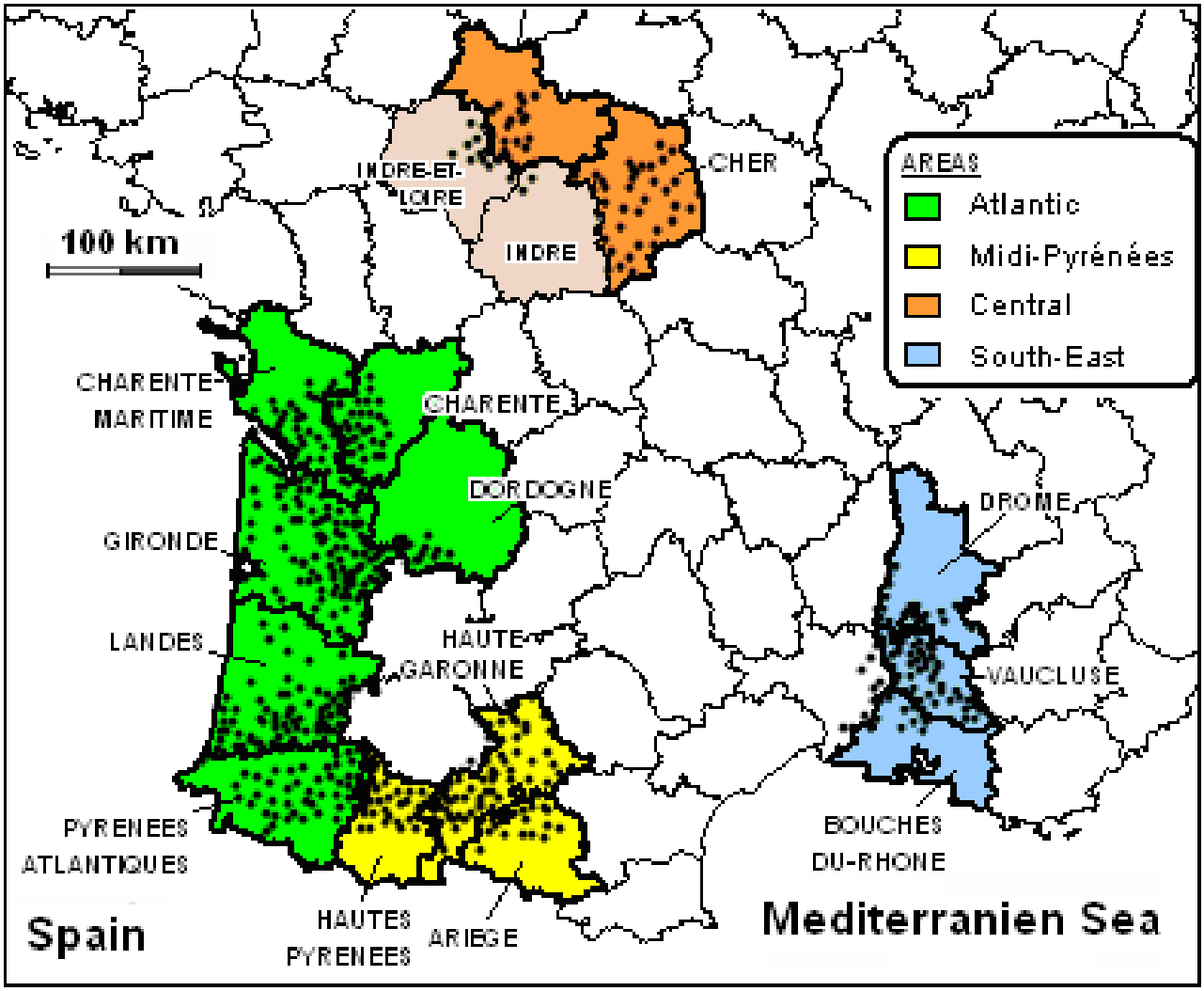


Рис. 11.4 – Сеть наземных генераторов в проекте ANELFA во Франции [46]

В этом проекте ПГЗ используются 660 ацетоновых генераторов аэрозоля AgI, производящих $2 \cdot 10^{11}$ c^{-1} активных (при -15 ^{o}C) кристаллизующих частиц. Каждый генератор диспергирует 8 г AgI в час и может работать в течение 10 часов, а годовой расход AgI при работе всей сети достигает 1200 кг и более.

Предполагается, что аэрозоль AgI заносится в градовые облака конвективными потоками. Однако эта технология не гарантирует попадание аэрозоля AgI в градовые облака в требуемой концентрации. Большая часть реагента может уноситься горизонтальными потоками на подветренные районы в соответствии с розой ветров.

По данным страховых агентств кинетическая энергия града при плотности генераторов 11 шт. на 1000 км^2 по данным сети градовых подушек уменьшается в среднем на 48%, а ущерб от града сокращается примерно на 40% [45, 46].

Такая же низкая эффективность технологии в Швейцарии, Италии, Канаде, Бразилии и других странах обусловлена следующими причинами:

– значительная часть реагента может уноситься горизонтальными потоками и не попадает в зону конвергенции и соответственно в струи восходящих потоков, питающих градовые облака;

– значительная часть льдообразующих ядер теряет активность под влиянием солнечной радиации до попадания в облако;

– попадающая в облако часть реагента во многих случаях столь сильно разбавлена, что создаваемые концентрации льдообразующих ядер недостаточны для предотвращения градообразования;

– значительная часть реагента, вносимого в облако сильными восходящими потоками, попадает в зону роста града, где может только интенсифицировать рост града.

Таким образом, метод наземных генераторов не обеспечивает целенаправленного засева градовых облаков и тем более объемов облака ответственных за будущее градообразование и имеет низкую эффективность. Кроме того, чрезмерное загрязнение йодистым серебром вокруг наземных генераторов может создать экологические проблемы, связанные с уничтожением микрофлоры, развитием непредсказуемых мутационных процессов и т. д.

11.3 Авиационная технология

Авиационная технология ПГЗ предусматривает [47 – 51] засев восходящих потоков кристаллизующими реагентами (AgI) и хладагентами (жидкий пропан, сухой лед). Применяется несколько вариантов засева (рис. 11.5):

– засев восходящего потока с уровня основания облаков с помощью бортовых пиротехнических или ацетоновых генераторов аэрозоля AgI;

– сбрасывание с уровня вершины фидерных облаков пиротехнических шашек с AgI или гранул CO_2 с помощью дозаторов;

– запуск ракет «воздух - воздух» с уровня основания облака.

Например, в штате Северная Дакота, США [47, 48], начиная с 1961 г. на площади 26278 км^2 осуществляется засев облаков восемью самолетами (два герметизированных самолета с вершины и шесть с подоблачного слоя). В проектах предотвращения града, выполненных в последние годы фирма Weather Modification Incorporated (WMI) в Канаде и Аргентине [48 – 50], практиковала прямое введение кристаллизующего реагента с помощью бортовых генераторов и пиропатронов при пролете через фидерные облака на уровне с температурой около -6 ^{o}C.

Преимуществами авиационной технологии являются охват больших территорий при минимуме средств засева (несколько самолетов) и

персонала и возможность визуального обнаружения и точного засева фидерных облаков, не создающих обнаружимое радиоэхо.

Основными недостатками этой технологии является:

– систематический недозасев объема будущего градообразования, так как засев осуществляется вдоль траектории полета, а повторный пролет возможен через 3 ÷ 5 минут (или требует применения нескольких самолетов одновременно);

– часть ОВ в сложных для полетов метеорологических условиях (особенно ночью) не может быть засеяна или засевается частично.

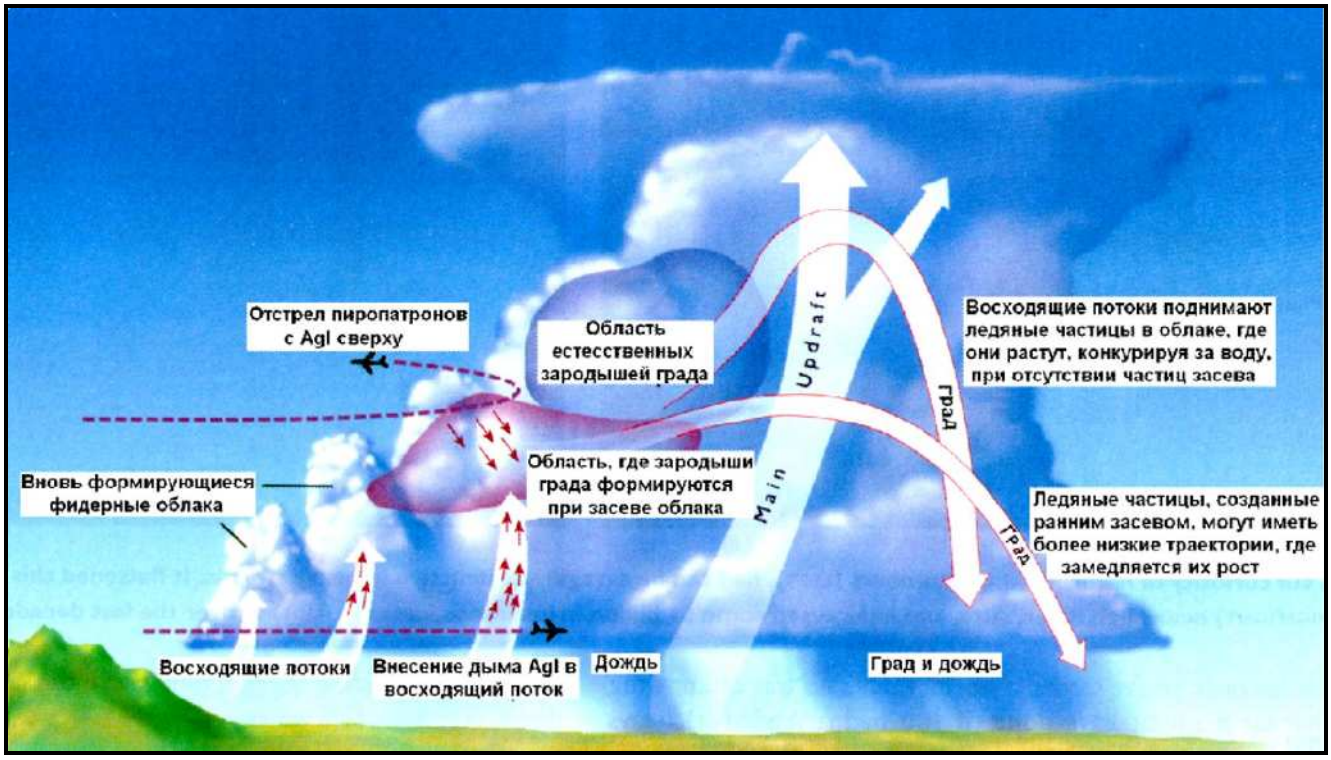


Рис. 11.5 – Схемы авиационного засева с вершины и основания облака [49]

11.4 Артиллерийская технология

Достоинством артиллерийского способа засева градовых облаков является то, что он позволяет с высокой точностью вводить реагент непосредственно в желаемую часть облака на требуемой высоте. Артиллерийская технология применялась на Северном Кавказе, в Азербайджане, Армении, Грузии, Таджикистане и Узбекистане с 1963 по 1992 г., а в настоящее время применяется в Китае и Монголии.

В СССР использовался артиллерийский комплекс в составе зенитной пушки «КС-19» и специально созданного противоградового снаряда «Эльбрус-4» калибра 100 мм. В ограниченном масштабе использовался также комплекс в составе пушки «КС-30» и снаряда «Эльбрус-3» калибра 130 мм радиусом действия 18 км.

Снаряд «Эльбрус-4» [6] обеспечивал засев градовых облаков в радиусе 14 км, возгоняя взрывом 75 г AgI с созданием $4 \cdot 10^{14}$ частиц кристаллизующего аэрозоля в объеме взрыва диаметром около 20 м.

Снаряд «Эльбрус-4М», использовавшийся для реализации комбинированного метода ПГЗ [7], обеспечивал диспергирование в облаке 235 г NaCl, создавая в объеме взрыва около 10^{10} – 10^{11} частиц NaCl.

В Китае и Монголии используются зенитные снаряды калибра 37 мм, содержащие 1 – 3 г AgI [52].

К недостаткам артиллерийской технологии относятся:

– дискретность засева и большой расход снарядов;

– недостаточная оперативность засева всего требуемого объема (особенно в случае крупномасштабных градовых облаков) без применения автоматики, запрещаемой правилами безопасности. Для устранения этой проблемы в Армении применялись батареи из 4 орудий [53];

– повышенная опасность применения.

Эти недостатки привели к тому, что с 1990 г., артиллерийский способ засева облаков был постепенно заменен на ракетный способ.

11.5 Ракетная технология ПГЗ

11.5.1 Ракетная технология ПГЗ засева градовых облаков кристаллизующими реагентами, применяется в большинстве стран и проектов ПГЗ [38, 55 – 59, 62 и др.], обеспечивает точную и оперативную доставку реагента в области будущего градообразования, с созданием требуемой концентрации кристаллизующих частиц. Оперативность засева определяется техническими характеристиками применяемых ракет и пусковых установок.

Недостатками ракетной технологии (также как и артиллерийской) являются:

– необходимость создания сети удаленных ракетных пунктов с их инфраструктурой и большой численностью обслуживающего персонала;

– трудность применения в регионах с интенсивным воздушным движением, особенно частной авиации, летающей вне расписания.

11.5.2 ***Сравнительный анализ*** перечисленных технологий показывает, что засев приземного слоя атмосферы с помощью наземных генераторов не может гарантировать того, что конвективные потоки занесут кристаллизующие частицы в требуемые области облаков.

Авиационная технология предусматривает более точный засев фидерных облаков, питающих градовое облако [49]. Однако при этом реагент с уровня основания облака попадает на уровень

градообразования, согласно [60, 61], за время порядка 10 – 12 мин, сравнимое со временем градообразования. Кроме того, при одном пролете самолета осуществляется засев, эквивалентный засеву одной ракетой (рис. 11.6).

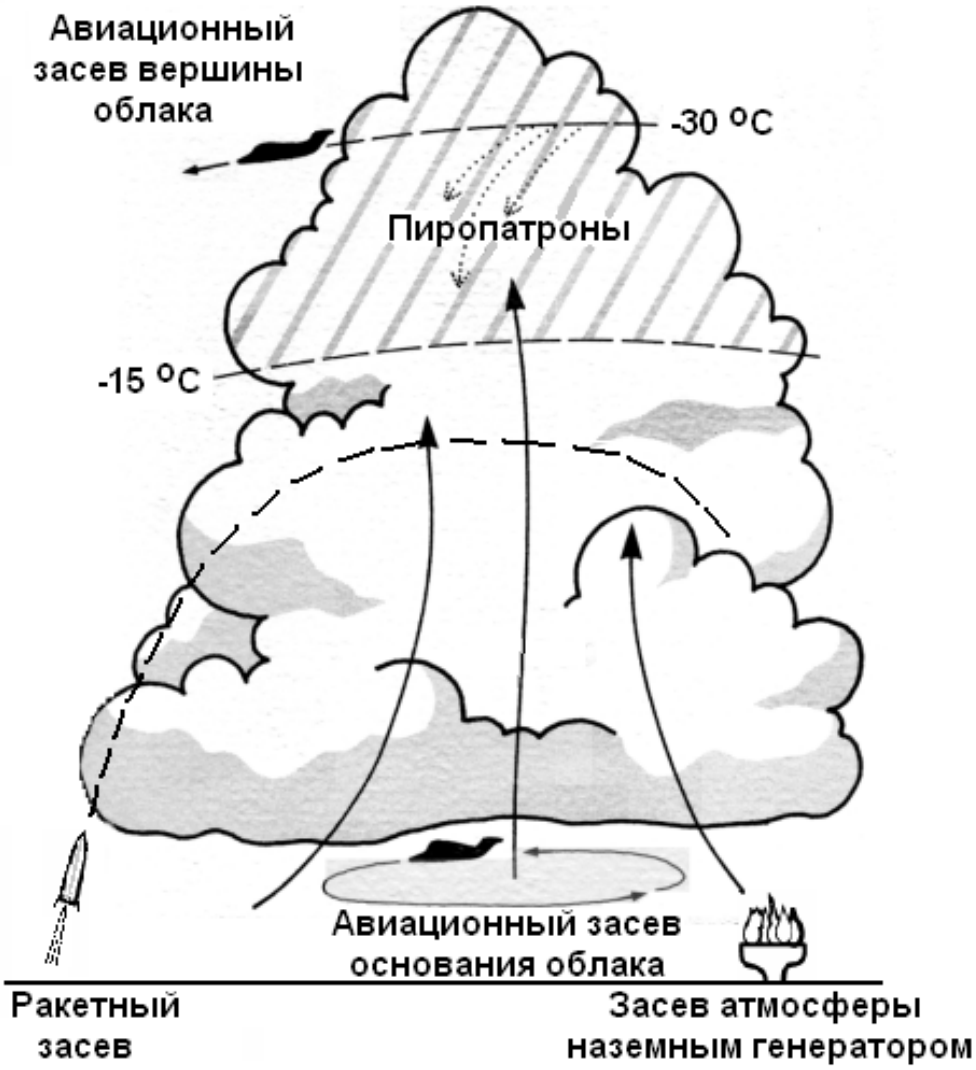


Рис. 11.6 – Ракетный, авиационный и наземный способы засева

Ракетная и артиллерийская технологии могут обеспечить прямой засев требуемой части облака в требуемой дозировке, на требуемой высоте и за короткое время. Преимущества ракетной технологии засева:

– высокая степень готовности и оперативности засева (через 1 мин после обнаружения градовой опасности) за счет круглосуточной готовности ракетных пунктов в течение всего сезона защиты;

– высокая степень надежности реализации засева при любой метеорологической ситуации в любое время суток;

– возможность запуска десятков ракет в течение 1 – 2 мин, обеспечивающего засев больших облачных объемов, которые авиационным методом могут быть засеяны за 20 – 30 минут.

11.6 Этапы развития ракетно-артиллерийской технологии

В СССР в период 1956 – 1962 гг. были разработаны три варианта метода предотвращения града, которые прошли испытания в период с 1963 по 1966 г., а с 1967 г. начали применяться для производственной защиты сельскохозяйственных культур от градобитий.

11.6.1 Первый метод предусматривал *артиллерийский засев кристаллизующими реагентами* областей зарождения и роста града с целью резкого увеличения концентрации зародышей града и уменьшения размера града за счет их конкуренции за жидкокапельную влагу. Этот метод был создан в ВГИ под руководством Г.К. Сулаквелидзе [6] и применялся в России на Северном Кавказе, в Армении, Азербайджане, Узбекистане и Таджикистане на площади около 6,5 млн га.

11.6.2 Второй метод ПГЗ предусматривал *комбинированный артиллерийский засев гигроскопическими и кристаллизующими реагентами* областей повышенного радиоэха градоопасных облаков с целью изменения условий роста града за счет перераспределения жидкокапельной влаги между теплой и переохлажденной частями облака. Этот метод был разработан в Закавказском научно-исследовательском институте (г. Тбилиси) под руководством В.С. Ломинадзе и Я.Т. Бартишвили [7, 21] и применялся в Грузии на площади около 0,6 млн га.

11.6.3 Третий метод ПГЗ предусматривал *ракетный засев* областей повышенного радиоэха с целью создания дополнительных конкурирующих зародышей града. Он был разработан в Институте Геофизики АН Грузинской ССР (г. Тбилиси) и Центральной аэрологической обсерватории (г. Долгопрудный) под руководством А.И. Карцивадзе, И.И. Гайворонского и Ю.А. Серегина [14, 24, 25] и применялся в Грузии и Молдавии на площади около 3,2 млн га.

11.6.4 В первые годы реализация указанных методов осуществлялась институтами разработчиками под руководством авторов. В 1967 году для производственной защиты посевов от градобитий было создано десять территориальных Военизированных служб (ВС) по АВ на гидрометеорологические процессы, а в 1980 г. – Научно-производственный центр противоградовой защиты (НПЦ ПГЗ) ВГИ, на который были возложены научно-методическое руководство противоградовыми работами, разработка новых и совершенствование существующих методов и технических средств ПГЗ. С 1980 по 1984 г. техника и технология ПГЗ во всех регионах были унифицированы на базе разработанных в НПЦ ПГЗ под руководством М.Т. Абшаева:

– единых методов и средств обнаружения и распознавания градовых облаков (радиолокатора МРЛ-5 и руководства по его применению [11, 63]);

– новой технологии АВ, базирующейся на ускорении осадкообразования из областей будущего градообразования [11, 31] и дифференцированных схемах засева облаков различной структуры и стадии развития;

– более совершенных ракетных противоградовых комплексов «Алазань», «Кристалл», «Небо», «Алан» [31, 56, 57];

– автоматизированной радиолокационной системы управления противоградовыми операциями [30];

– единых руководящих и нормативно-технических документов, регламентирующих организацию и проведение ПГЗ;

– централизованного обучения и аттестации персонала всех ВС на ежегодных курсах по воздействию, по прогнозу града и техническим средствам радиолокации, ракетным и артиллерийским комплексам и связи.

На основе дальнейшего совершенствования этого унифицированного метода сформировалась современная российская автоматизированная ракетная технология ПГЗ [56 – 59].

11.7 Основные положения российской ракетной технологии ПГЗ

Современная российская автоматизированная ракетная технология ПГЗ предусматривает радиолокационное обнаружение и ракетный засев областей будущего градообразования в градовых и градоопасных облаках [58, 59]. Ее реализация включает следующие операции (рис. 11.7):

– прогноз града, мезорайона развития, типа и интенсивности градового процесса;

– круглосуточные радиолокационные наблюдения, обнаружение и распознавание градовых и градоопасных облаков (ОВ);

– выделение в ОВ областей будущего градообразования, являющихся объемами засева;

– расчет координат пуска ПГИ и их передача по каналам радиосвязи на ракетные пункты воздействия (ПВ);

– пуск ракет, содержащих кристаллизующий реагент;

– оперативная радиолокационная оценка эффекта воздействия;

– сбор и обработка данных об ущербе, причиненном градом;

– оценка физической и экономической эффективности ПГЗ.

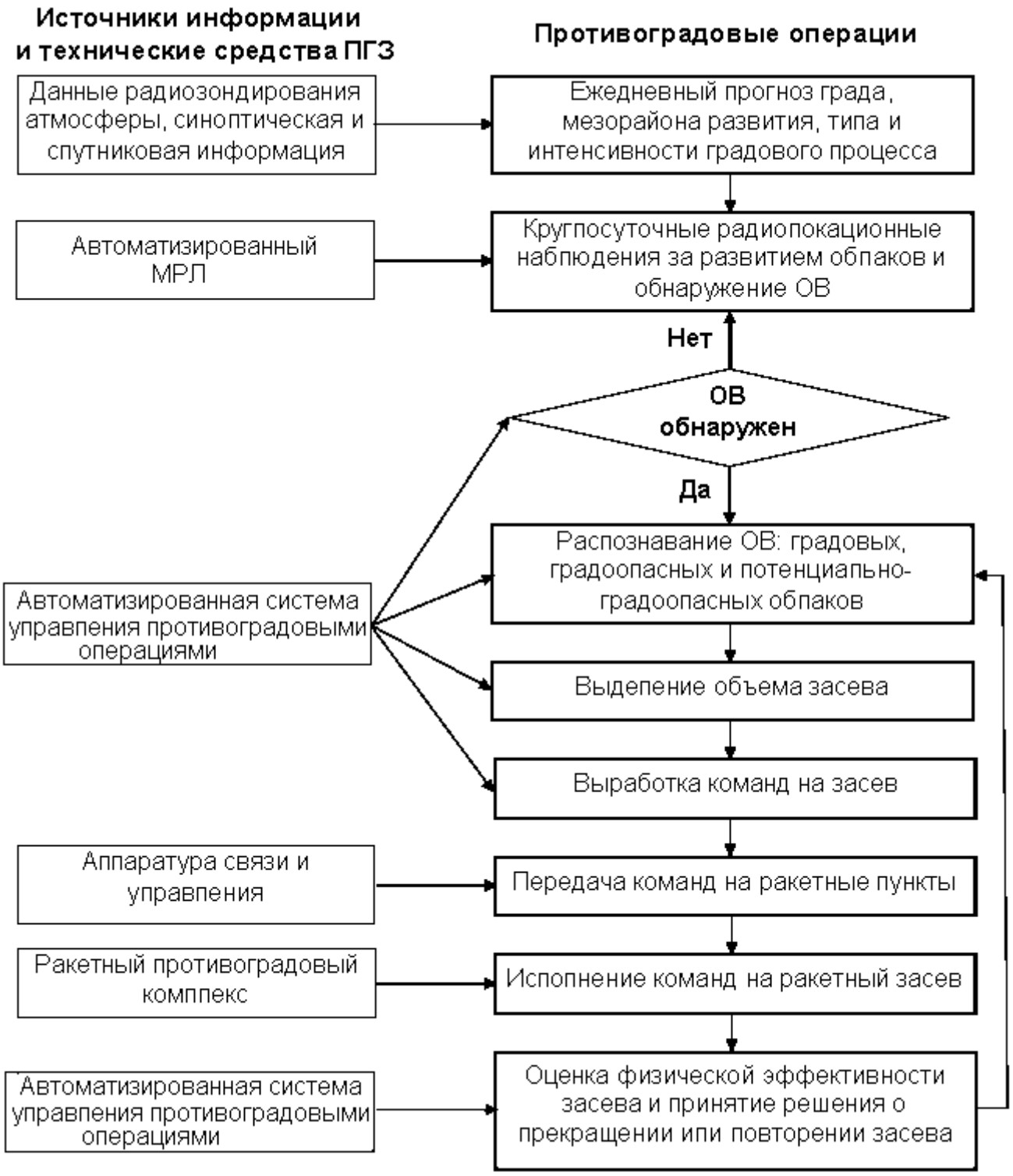


Рис. 11.7 – Блок-схема технологического процесса ПГЗ [62]

Основные положения современной автоматизированной российской ракетной технологии ПГЗ заключаются в следующем:

11.7.1 ***Физический принцип воздействия*** – ускорение осадкообразования в областях будущего градообразования развивающихся и зрелых градовых облаков путем их массированного засева кристаллизующими реагентами [11, 31, 58] с целью:

а) вымывания областей нового роста (зон формирования и зарождения града) преждевременными осадками;

б) динамического подавления слабых восходящих потоков преждевременными осадками;

в) понижения траектории растущих градин;

г) создания благоприятных условий конкуренции естественных зародышей града с искусственными, созданными на ранних стадиях градообразования одновременно с естественными.

Ускорение осадкообразования стимулируется путем создания в фидерных облаках столь высокой начальной концентрации искусственных кристаллизующих частиц (порядка 10^{11} $м^{-3}$ и более).

11.7.2 ***Концептуальные модели ОВ*** – осесимметричные и несимметричные КЯ одноячейковых, многоячейковых, суперячейковых и переходного типа градовых облаков с правосторонним и левосторонним развитием.

11.7.2.1 Независимо от типа ГП АВ с целью прерывания и предотвращения градобитий проводится в областях нового роста на зону формирования условий градообразования (I) и зону зарождения (II), т.е. во всех случаях на объемы с идентичной микрофизикой. АВ на зону роста (III) и зону выпадения града (IV) не проводится ввиду неэффективности.

11.7.2.2 В одноячейковых ГП область нового роста расположена во вновь развивающихся КЯ. В суперячейковых ГП обновление происходит в виде квазинепрерывного распространения фронтальной части навеса радиоэха, а в многоячейковых – в виде квазинепрерывного распространения фронтальной части навеса радиоэха градообразующих КЯ и развития новых КЯ на наветренном фланге.

11.7.3 *Схемы засева ОВ* дифференцируются в соответствии со стадией развития и типом ГП:

а) с учетом структуры и динамики развития ГП;

б) характера распространения процесса градообразования в пространстве (дискретное, непрерывное, дискретно-непрерывное);

в) пространственного и взаимного положения зон зарождения, роста, выпадения града и зоны восходящих потоков с учетом вариантов ГП с правосторонним и левосторонним развитием.

11.7.3.1 Прерывание дискретного распространения процесса градообразования при одноячейковых ГП осуществляется путем своевременного обнаружения и предотвращения развития высоко зарождающихся новых КЯ на стадии их первого радиоэха и в ближайшие 2 – 4 мин после его зарождения.

11.7.3.2 Прерывание дискретно-непрерывного распространения процесса градообразования при многоячейковых ГП осуществляется путем засева, в первую очередь, вновь зарождающихся КЯ, и последующее прерывание выпадения града из зрелой градообразующей КЯ. Это обусловлено тем, что новая КЯ через несколько мин после зарождения ее первого радиоэха может достигнуть градовой стадии, и породит следующую КЯ, и это будет периодически повторяться в течение всего периода эволюции многоячейкового ГП.

11.7.3.3 Прерывание процесса непрерывного распространения градообразования в суперячейковых ГП осуществляется путем засева обновляющейся фронтальной части их навеса радиоэха и ближайших к ней фидерных облаков. Засев следует проводить с учетом пространственной ориентации навеса радиоэха:

– на правом наветренном фланге в случае КЯ с правосторонним развитием;

– на левом наветренном фланге в случае суперячеек с левосторонним развитием.

11.7.3.4 В случае неупорядоченных многоячейковых ГП с направлениями навеса радиоэха КЯ влево и вправо от ведущего потока (в зависимости от их местоположения в облачной системе) место засева определяется реальным направлением навеса радиоэха каждой КЯ.

11.7.4 ***Методы распознавания градовых и градоопасных облаков*** – одноволновый, двухволновый и поляризационный радиолокационные методы, основанные на измерениях одномерных, двумерных и трехмерных параметров облаков.

11.7.5 ***ОВ*** – независимо от типа ГП делятся на 4 категории [11]:

– ОВ I категории – потенциально градоопасная КЯ, первое радиоэхо (или максимум радиоэха) которой зарождается в слое от 0 до 5 км над уровнем изотермы 0°С, имеющая тенденцию развития;

– ОВ II категории – градоопасная КЯ, имеющая тенденцию развития;

– ОВ III категории – градовая КЯ, из которой по радиолокационным данным выпадает град;

– ОВ IV категории – сверхмощная градовая КЯ, из которой по радиолокационным данным, выпадает крупный интенсивный град.

11.7.6 ***Критерии засева*** – основаны на измерении одномерных, двумерных и трехмерных параметров облаков (табл. 16.1).

11.7.7 ***Место засева***:

а) высоко зарождающееся первое радиоэхо потенциально-градоопасных КЯ (ОВ I категории);

б) фронтальная часть градоопасных КЯ (ОВ II категории);

в) фронтальная часть навеса радиоэха и его наветренный фланг зрелых градовых облаков (ОВ III и IV категорий).

Засев осуществляется по всей площади горизонтального сечения области будущего градообразования (области нового роста), которая в зависимости от типа ГП и стадии его развития может достигать от 10 до 200 км^2.

11.7.8 ***Схемы засева ОВ*** – дифференцированы с учетом стадии развития и особенностей структуры ГП различных типов применительно к Северному и Южному полушариям.

11.7.9 ***Высота засева*** – облачный слой между уровнями изотерм -6 и -10 °С, благоприятный для роста, агрегации и размножения кристаллов и соответствующий порогу кристаллизующей эффективности применяемых реагентов. В случае зарождения первого радиоэха новых градоопасных КЯ и навеса радиоэха зрелых градовых штормов выше этого слоя засев осуществляется на уровне нижней границы первого радиоэха и навеса радиоэха, ограниченном изолинией Z = 15 dBZ для ОВ I категории, Z = 25 dBZ для ОВ II категории и Z = 35 dBZ для ОВ III и IV категорий.

11.7.10 ***Время засева –*** засев ОВ должен осуществляться после их идентификации ОВ: ОВ I категории в течение 1 мин; ОВ II категории – от 1 до 2 мин; ОВ III и IV категорий от 2 до 3 мин.

11.7.11 ***Дозировка реагента*** – начальная концентрация кристаллов должна быть не менее 10^{11} м$^{-3}$. Расстояние между точечными и линейными источниками засева не более 0,5 – 1,0 км друг от друга, чтобы обеспечить слияние объемов засева за счет турбулентной диффузии за время не более 1 минуты.

В течение первых 5 минут после засева происходит серьезная трансформация всех микрофизических параметров облачной среды (полей температуры, плотности водяного пара, размера облачных капель, жидкокапельной водности и т.д.), формирование и конденсационный рост ледяных кристаллов до размеров, когда начинается их коагуляционный рост (60 – 80 мкм), увеличение ледности за счет обеднения капельной водности облака и т.д. [37].

Влияние засева на ход микрофизических процессов снижается по мере увеличения турбулентности в объеме засева, и эффекты засева исчезают тем быстрее, чем больше коэффициент турбулентной диффузии (т.е. облако быстрее «забывает» засев).

Увеличение начальной концентрации льдообразующих частиц до $5{\cdot}10^{11}$ м$^{-3}$ по данным теоретического моделирования приводит к резкому

повышению реакции облака на засев. При наблюдающейся в реальных условиях водности и турбулентности начальная концентрация льдообразующих ядер $n_0 \geq 10^{11}$ м$^{-3}$ является ключевой для повышения эффективности предотвращения града [37].

Для повышения эффективности предотвращения града при мощных и быстротечных ГП рекомендуется осуществлять массированный засев за счет более частого внесения ПГИ или повышения льдообразующей эффективности ПГИ.

11.7.12 ***Кратность засева*** **–** ОВ I категории следует засевать однократно, ОВ II категории – двукратно, ОВ III категории – трехкратно, ОВ IV категории – четырехкратно.

11.7.13 ***Периодичность засева*** – 3,5 или 7 мин в зависимости от категории и мощности ОВ (см. раздел 14).

11.7.14 ***Средства засева*** **–** ракетный противоградовый комплекс «Алазань» и вновь создаваемые малогабаритные комплексы.

11.7.15 ***Управление засевом*** осуществляется с помощью АСУ, обеспечивающей обнаружение конвективной облачности, измерение комплекса одномерных, двумерных и трехмерных параметров облаков, распознавание ОВ, выработку команд на ракетный засев и контроль физической эффективности засева.

Порядок организации и проведения противоградовых работ с применением российской автоматизированной ракетной технологии изложен в 9 основных РД, перечисленных в разделе 2, и регламентируется основными нормативными документами, перечисленными в Библиографии к разделу 4.

11.8 Ограничения российской технологии ПГЗ

11.8.1 Российская автоматизированная технология ПГЗ имеет более высокую эффективность, чем альтернативные технологии с применением авиации, артиллерии и наземных генераторов, но на практике ее широкомасштабного применения отмечаются случаи, когда не удается предотвратить выпадение града за ЗТ. Основные причины этого заключаются в следующем:

А) ***Объективные факторы*****:**

1) *Недостаточная изученность механизма образования града*, обусловленная сложностью взаимосвязанных термодинамических, микрофизических и электрических процессов в облаках различной структуры, влиянием на эти процессы глобальной циркуляции атмосферы,

пространственной структуры ветра, орографии, трудностью прямых экспериментальных исследований внутриоблачных процессов и отсутствием адекватных теоретических моделей.

2) *Длительное время последействия кристаллизующего реагента* от момента внесения до стимулирования осадков (от 6 до 8 минут).

3) *Трудность точного выбора места засева* вследствие того, что применяемые МРЛ не обнаруживают фидерные облака, области конвергенции и восходящих потоков.

4) *Острый дефицит времени* (особенно при быстротечных ГП), когда на выполнение всех противоградовых операций имеется не более 3 мин.

5) *Малый путь таяния* при низкой высоте изотермы 0°С (весной, осенью и в высокогорных районах), когда мелкий град и крупа выпадают почти из каждого кучево-дождевого облака;

6) Несоответствие характеристик применяемых типов АСУ и технических средств засева требованиям технологии.

7) Запреты органов авиации на проведение противоградовых стрельб;

Б) *Организационные проблемы*, ограничивающие реализацию физических принципов АВ в полном объеме:

– неоптимальное размещение ПВ, обуславливающее наличие запретных секторов и непростреливаемых участков на ЗТ, недостаточную протяженность зоны предварительной обработки, при которой невозможно засеять вторгающиеся на ЗТ мощные градовые облака с правосторонним и левосторонним развитием, так как ПВ не достают до требуемого места засева (рис. 11.8).

– низкая скорострельность ПВ, связанная с несовершенством применяемых ПУ и отсутствием дублирующей ПУ;

– нехватка ПГИ для засева ОВ из-за недостаточного объема или несвоевременного финансирования;

– неудовлетворительная организация взаимодействия КП с ПВ и соседними противоградовыми подразделениями.

В) *Субъективные факторы при подготовке и проведении АВ*:

– ошибки в градуировке, калибровке, горизонтировании и ориентировании МРЛ, приводящие к ошибкам в измерении параметров облаков и распознавании ОВ;

– ошибки в определении координат, горизонтировании и ориентировании ПУ, снижающие точность засева ОВ;

– ошибки при выполнении цепи противоградовых операций: опоздание с началом засева; недозасев ОВ, не точный засев и т.д.

В результате совокупного влияния всех этих факторов эффективность российской автоматизированной технологии ПГЗ может варьировать от 60 до 90% и более.

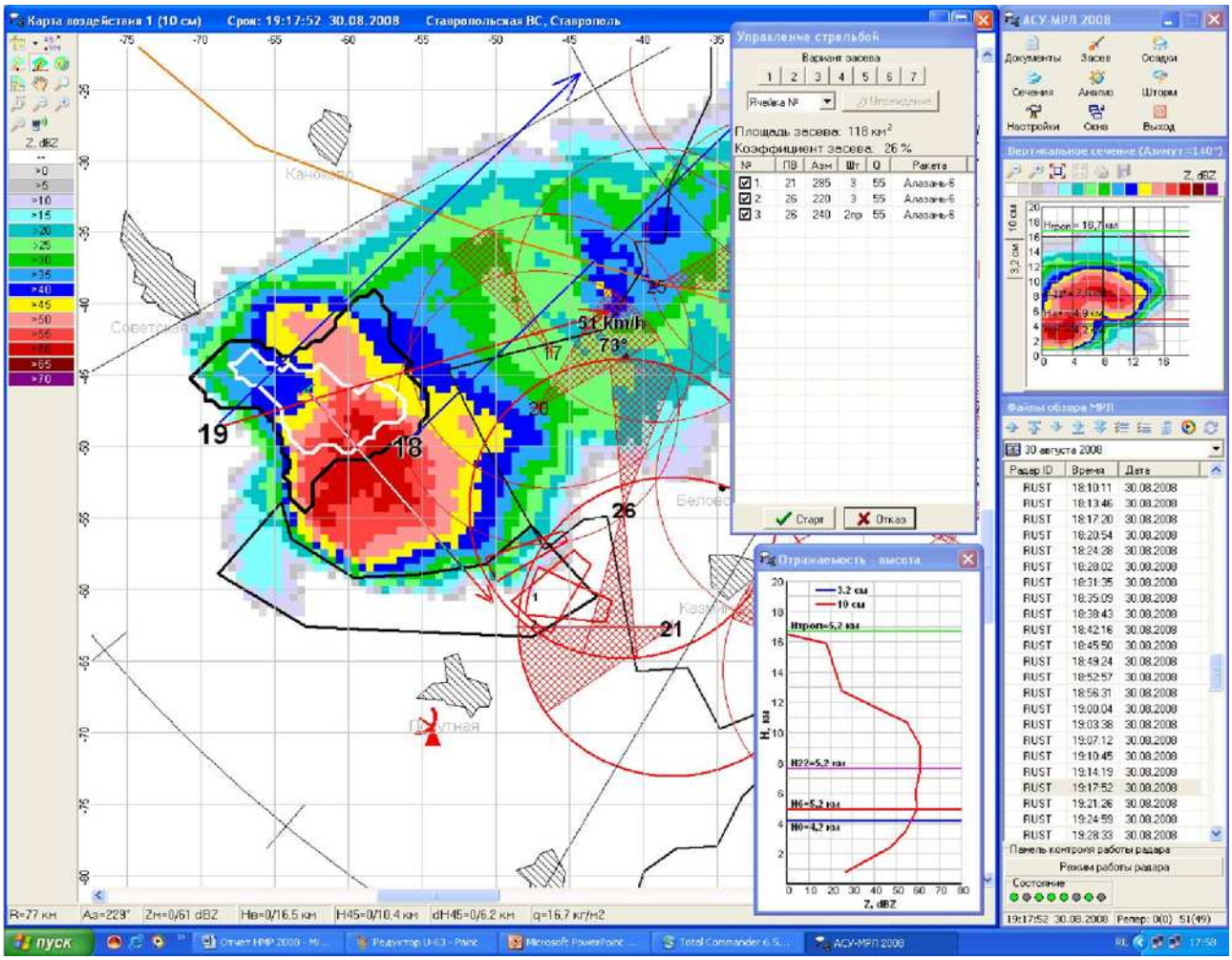


Рис. 11.8 – Пример недозасева ОВ, когда основная часть площади засева за пределами радиуса действия ПВ, а градовые осадки выпадают на границе ЗТ

11.8.2 Таким образом, успешность ПГЗ зависит от двух факторов:

– научной обоснованности и совершенства технологии;

– качества реализации технологии (ее физических принципов).

Физические основы воздействия на градовые процессы и качество технических средств совершенствуются по мере исследований механизма образования града, совершенствования эмпирических и численных моделей градовых облаков, изучения механизма взаимодействия реагентов с облачной средой, повышения эффективности реагентов и ракетных комплексов, а также совершенствования автоматизированных систем управления противоградовыми операциями.

Однако даже при полном совершенстве технологии эффективность ПГЗ зависит от точности, оперативности и качества реализации

многозвенной цепи противоградовых операций. Вероятность успешного предотвращения града P можно представить [62] выражением:

$$P = \prod_{i=1}^{n} P_i < 1, \qquad (11.1)$$

где P_i – вероятность правильного выполнения i-й операции по воздействию: P_1 – вероятность своевременного обнаружения и точного распознавания ОВ; P_2 – вероятность точного выделения объема засева в облаках различной структуры и стадии развития; P_3 – вероятность точной и своевременной выработки и передачи команд на ракетные пункты; P_4 – вероятность точного исполнения команд на засев; P_5 – надежность функционирования применяемых ПГИ (их безотказность и точность засева в требуемом облачном слое); P_6 – вероятность того, что ПГИ создадут требуемую начальную концентрацию кристаллизующих частиц.

Все эти вероятности, как правило, стремятся быть меньше единицы. Даже, если все перечисленные операции будут выполнены с надежностью 0,98, то вероятность достижения желаемого результата составит $P \approx 0{,}85$.

Поэтому крайне важно не только совершенство физических и методических основ технологии ПГЗ, но и качество ее реализации, обеспечиваемое совершенством применяемых технических средств, качеством организации противоградовых работ и квалификацией персонала. Недооценка этих обстоятельств и недостатки в организации и техническом обеспечении ПГЗ приводят к тому, что физические принципы воздействия во многих проектах реализуются неудовлетворительно. Это приводит к снижению эффективности защиты, многократному повтору засева и перерасходу ПГИ, приводят к неудачам, которые, зачастую, приписываются незнанию физики процесса и несовершенству технологии.

11.8.3 Для минимизации субъективных и объективных ошибок при выполнении противоградовых операций, реализуемых в условиях острого дефицита времени, и повышения вероятностей P_i созданы автоматизированная система управления противоградовыми операциями «АСУ-МРЛ» и автоматизированные ракетные противоградовые комплексы. Их применение повышает точность и оперативность распознавания градовых и градоопасных облаков, выделения места засева, выработки, передачи и исполнения команд на засев.

12 РАДИОЛОКАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПГЗ

12.1 Основные характеристики применяемых радиолокаторов

Автоматизированные МРЛ являются основным техническим средством, обеспечивающим при проведении противоградовых работ:

– обнаружение радиоэха облаков, распознавание их типов (кучево-дождевые, слоисто-дождевые и др.);

– получение пространственного строения и ячейковой структуры облаков и закономерностей их развития;

– измерение координат и комплекса параметров облачных ячеек, направления и скорости перемещения;

– распознавания градовых облаков и градоопасных облаков;

– управление противоградовыми операциями в том числе: распознавание, категорий ОВ, определение тенденции их развития; выделение областей засева, выработка команд на ракетный засев, оценка физической эффективности засева и т.д.

На заре противоградовых работ для этих целей использовались корабельные и авиационные радиолокаторы («Лоза», «Роз-1», «ПСБН» и др.), «МРЛ-1» и «МРЛ-2» (с λ = 3,2 см), а также станции орудийной наводки «СОН-4» (с λ = 10 см), адаптированные для обнаружения и ручного измерения параметров облаков. С 1964 года применялись «Град-1», «Град-2», «Град-3», представляющие собой «СОН-4», спаренный с одним из указанных РЛС 3,2 см диапазона и обеспечивающие синхронное вращение антенн с управлением от пульта «СОН-4» [1]. В 1967 г. на базе радиолокатора «МРЛ-1» в ВГИ был создан прототип «МРЛ-5» – трехволновый экспериментальный радиолокатор с двухволновыми вращпереходами и облучателем [2 – 3] и показана возможность создания двухволнового радиолокатора с одной излучающей антенной.

В 1970 – 72 гг. в соответствии с решением совещания, проведенного Руководителем Госкомгидромета СССР академиком Федоровым Е.К., под научным руководством ВГИ во ВНИИРА был создан двухволновый радиолокатор «МРЛ-5» (Абшаев М.Т., Шевела Г.Ф., 1972 [4]), которым были оснащены противоградовые службы и службы штормооповещения в СССР и многих других странах.

12.1.1 Двухволновый радиолокатор «МРЛ-5»

«МРЛ-5» (рис. 12.1) был создан для радиолокационного обеспечения противоградовых работ и штормооповещения. В его состав входит:

– антенно-волноводная система;

– два унифицированных между собой приемо-передающих устройства, работающих на длинах волн λ_1 = 3,2 и λ_2 = 10 см;

– шкаф угловой информации и управления приводом антенны;

– пульт метеоролога с индикаторными устройствами;

– системы вентиляции, кондиционирования и электропитания.

Программа штормооповещения может осуществляться на любом из каналов, а программа ПГЗ – при работе обоих каналов или на 10 см канале, обеспечивая возможность реализации двухволнового и одноволнового методов обнаружения града.

Для реализации двухволнового метода обнаружения града предусмотрена возможность измерения радиолокационной отражаемости на двух длинах волн из одного и того же облачного объема за счет синхронности работы приемо-передающих устройств [4, 5], одинаковой ширины (1,5^{o}) и пространственного совмещения диаграмм направленности излучения по обоим каналам с помощью двухзеркальной антенной системы с общим фокусом, в котором располагается двухволновый рупорный облучатель. Для развязки каналов в 10 см канале используется вертикальная поляризация, в 3 см канале – горизонтальная.

Антенна состоит из большого и малого зеркала, представляющих собой параболоиды вращения диаметром 4,5 и 1,4 м и фокусными расстояниями 1,9 и 0,59 м. Поверхность большого зеркала выполнена из сплошного металлического листа, а малого – из двух слоев поляризованной ткани, между которыми имеется металлизированная сетка параллельных проводников. Благодаря такой конструкции, малое зеркало прозрачно для 10 см излучения, поляризация которого ортогональна проводникам сетки и отражает 3,2 см излучение с поляризацией, параллельной проводникам. В режиме штормооповещения на 3,2 см канале малый отражатель может сниматься, при этом по обоим каналам облучается вся поверхность большого зеркала. В результате этого диаграмма излучения на 3,2 см канале сужается до 0,5^{o}, повышается коэффициент усиления антенны и метеорологический потенциал МРЛ.

Антенно-волноводная система, датчики углового положения и электропривод антенны размещены под шарообразным радиопрозрачным укрытием (Radom), обеспечивающим защиту этих устройств от ветровых нагрузок и влаги. В целях повышения электрической прочности волноводных трактов по обоим каналам предусмотрены системы наддува до заданного избыточного давления.

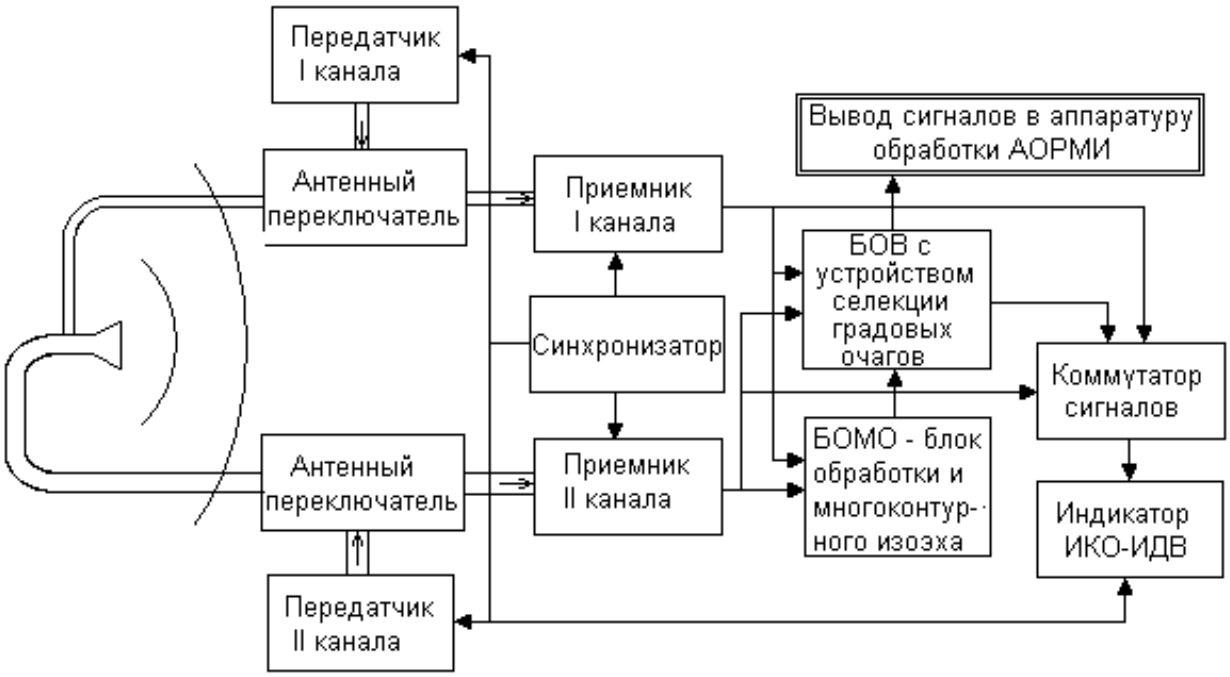


Рис. 12.1 – Блок-схема радиолокатора «МРЛ-5»

В целях повышения точности количественных измерений предусмотрены системы автоматической стабилизации усиления (АСУ) и автоматической подстройки частоты (АПЧ) приемных устройств, устройства контроля чувствительности приемных устройств P_0, мощности передатчика P_τ и метеорологического потенциала МРЛ (C_λ, см^3), а также PIN-диодные СВЧ аттенюаторы и система коррекции сигналов на квадрат расстояния (R^2). Для определения координат целей предусмотрены цифровые датчики углового положения антенны, аппаратура преобразования угловой информации и сопряжения с аппаратурой автоматической обработки информации.

Отображение информации по обоим каналам осуществляется поочередно на совмещенных индикаторах ИКО/ИДВ и индикаторе типа А. Для выделения градовых очагов, оценки размера града и селекции облачных систем с подавлением отражений от местных предметов предусмотрено устройство обработки видео и отображения на индикаторах ИКО, ИДВ и измерителе отношений значения $lg\,\overline{P}_{3,2}\,/\,\overline{P}_{10}$, а также блок обработки и многоконтурного отображения структуры радиоэха облаков (БОМО) с выделением градового очага [6].

Технические характеристики «МРЛ-5» (табл. 12.1) позволяют реализовать одноволновые и двухволновые методы обнаружения града, выделение градовых очагов, распознавание ОВ, измерение их координат и проведение воздействия на ГП в радиусе 100 ÷ 120 км [5].

В настоящее время физический износ «МРЛ-5», эксплуатируемых в

течение 25 ÷ 35 лет, привел к необходимости их глубокой модернизации и продления срока службы с последующей заменой на МРЛ нового поколения «ДМРЛ-10». До создания и внедрения «ДМРЛ-10» для проведения противоградовых работ могут быть адаптированы радиолокаторы «ДМРЛ-С» и ТРЛК «12А6».

12.1.2 Доплеровский радиолокатор «ДМРЛ-С»

В 2008 – 2010 гг. концерном «Алмаз-Антей» по инициативе ВГИ и техническому заданию Росгидромета создан радиолокатор «ДМРЛ-С» (с λ = 5,3 см) с доплеровской и поляризационной обработкой сигналов, предназначенный для создания радиолокационной сети геофизического мониторинга, штормооповещения и метеообеспечения авиации [7].

Параболическая антенна «ДМРЛ-С» с круглым рупором, размещенная под радиопрозрачным укрытием, обеспечивает получение игольчатой диаграммы направленности излучения. Конструкция облучателя и волноводного тракта позволяет работать в режимах:

– излучение горизонтальной поляризации и одновременный прием горизонтально и вертикально и поляризованных компонент радиоэха;

– одновременное излучение горизонтально и вертикально поляризованных волн с одновременным приемом вертикально и горизонтально поляризованных компонент радиоэха.

В качестве электропривода антенны используется высоконадежный транзисторный статический преобразователь. Данные об угловом положении антенны «ДМРЛ-С» поступают с плат формирования кода (ПФК) по углу наклона и азимуту, выполненных на базе АЦП. На основе сравнения текущего углового положения антенны и задаваемого от персонального компьютера в ПФК вырабатывается сигнал управления электроприводом, в котором сигналы, подаваемые на исполнительные механизмы электропривода, усиливаются по мощности транзисторами.

Волноводный тракт предназначен для передачи сверхвысокочастотной (СВЧ) мощности от передатчика к антенне и трансляции принятых антенной отраженных от цели сигналов к приемнику.

Передающее устройство «ДМРЛ-С» построено по принципу внутренней когерентности на базе высокостабильного клистронного усилителя мощности с твердотельным модулятором, резонансным стабилизатором анодного напряжения 10 кВ и воздушным охлаждением. На выходе формирователя сигналов формируется зондирующий сигнал длительностью от 1 мкс (короткий импульс) до 60 мкс (НЧМ-импульс) с минимальной скважностью 20, усиливаемый в передатчике до 15 кВт. Такое построение обеспечивает необходимый уровень средней мощности

и обеспечивает радиус обзора от 1 до 250 км. На выходе передатчика устанавливается делитель на 2 для обеспечения излучения на двух ортогональных поляризациях.

Использование НЧМ-сигналов позволяет измерять отражаемость и скорость движения гидрометеоров без изменения частоты повторения импульсов, увеличить динамический диапазон, а также устранить неоднозначную дальность за счет применения ортогональных сигналов (при использовании разного наклона при модуляции частоты).

Четырехканальный приемник осуществляет оптимальную режекцию, усиление, преобразование и детектирование принятых эхо-сигналов. Вход малошумящего СВЧ усилителя приемника защищен ограничителями от просачивания энергии собственного передатчика и сигналов других радиотехнических средств. Два канала приемника являются основными каналами горизонтальной и вертикальной поляризации, а два – дополнительными, ослабленными на 30 дБ с целью увеличения линейного динамического диапазона до 100 дБ. При работе в режиме одной поляризации используется два приемника: основной и дополнительный для горизонтальной поляризации. Каждый канал приемника выполнен по супергетеродинной схеме с однократным преобразованием частоты. Промежуточная частота – 60 МГц.

В состав «ДМРЛ-С» входит центральный управляющий вычислительный комплекс (ЦУВК) обеспечивающий автоматизированное управления и контроль параметров радиолокатора, первичную и вторичную обработку отраженных сигналов.

В системе первичной обработки информации (ПОИ) сигнал промежуточной частоты с выхода приемного устройства поступает на 14-ти разрядный АЦП и далее на вход цифрового фазового детектора, формирующего квадратурные составляющие эхо-сигнала. При дальнейшей обработке сигналов в ПОИ осуществляется фильтрация несинхронных импульсных помех, сжатие НЧМ сигнала, спектральная обработка принятого сигнала и вычисление поляризационных характеристик. Оценка отражаемости и спектральных характеристик радиоэха реализована на специальном сигнальном процессоре.

Система вторичной обработки информации (ВОИ) после каждого цикла обзора пространства обеспечивает представление информации об отражаемости, радиальной скорости и среднеквадратичной ширине спектра скоростей гидрометеоров в виде карт горизонтальных и вертикальных сечений, карт опасных явлений погоды, видимости в осадках, карт высоты облачности, интенсивности и количества осадков за любой промежуток времени наблюдений.

Автоматизированная система контроля и управления обеспечивает контроль функционирования и основных параметров «ДМРЛ-С» (выходной мощности, чувствительности приемника и т.д.), а также управление режимами работы по команде оператора.

Удаленный управляющий вычислительный комплекс (УУВК) служит для дистанционного управления режимами радиолокационных наблюдений, включая:

– автоматический обзор пространства;

– получение объемных файлов от ЦУВК по локальной вычислительной сети, их идентификацию и дальнейшую обработку;

– получение трехмерной картины облачности, измерение характеристик облаков и осадков, распознавание явлений погоды связанных с ними;

– определение направления, скорости ветра и турбулентности в облаках и связанных с ними шквалах и смерчах;

– подготовку, кодирование в коды FM-94 BUFR и RADOP и передачу в сеть штормооповещения и метеообеспечения авиации пакетов информации, содержащих карты явлений погоды, верхней границы облачности, горизонтальных сечений на 11 уровнях и количестве осадков за 1,3, 6, 12 и 24 часа.

«ДМРЛ-С» может использоваться для проведения противоградовых работ с помощью программы «АСУ-МРЛ», обеспечивающей импорт и обработку файлов обзора «ДМРЛ-С» и управление противоградовыми операциями. Однако нельзя забывать, что длительность цикла обзора, принятая на сети «ДМРЛ-С» (10 мин), слишком велика для этих целей.

12.1.3 Метеоканал радиолокатора «12А6»

Трассовый радиолокационный комплекс (ТРЛК) «12А6», созданный в ОАО «НПО «ЛЭМЗ» в 2008 – 2010 гг., имеет:

– твердотельное передающее устройство 10 см диапазона;

– антенную систему с фазированной решеткой, обеспечивающую быстрый обзор пространства за счет электронного сканирования по 32 углам места и вращения по азимуту со скоростью 6 об/мин;

– приемное устройство с метеорологическим каналом, обеспечивающим получение трехмерных полей отражаемости и радиальной скорости гидрометеоров [8].

Достоинством метеорологического канала ТРЛК «12А6» является возможность получения трехмерной структуры облаков за 10 секунд. Это достигается благодаря электронному сканированию по углу места и вращению антенной фазированной решетки по азимуту со скоростью 6 об/мин. Такое высокое временное разрешение позволяет получить детальную информацию о скоротечных опасных явлениях как град, гроза,

смерч, ураган, эволюции пространственного строения КЯ и структуры воздушных потоков в них [9].

Преимуществами ТРЛК перед аналогами является также применение сложных сигналов и технологии сжатия импульсов с уровнем боковых лепестков ниже 50 дБ, достигнутое за счет синтеза специальных сигналов с нелинейной частотной модуляцией. Это позволило понизить излучаемую импульсную мощность с сотен до десятков киловатт, повысить метеорологический потенциал РЛС за счет увеличения длительности импульсов, исключить систему наддува волноводного тракта, а также высоковольтные блоки с напряжениями выше 12 кВ, что позволило повысить эксплуатационные характеристики ТРЛК.

Метеорологический канал ТРЛК «12А6» содержит программно-технические комплексы (ПТК) первичной и вторичной обработки радиолокационных сигналов в режимах «Отражаемость» и «Доплер» с выдачей тех же выходных продуктов, что и современные ДМРЛ:

– пространственной структуры полей облачности и радиальных скоростей движения гидрометеоров в облаках;

– распознавания явлений погоды, определения градо–грозоопасности облаков и их тенденции развития;

– измерение интенсивности и количества осадков;

– выдачу метеоинформации потребителям, в том числе и в сеть штормооповещения и метеообеспечения авиации.

ПТК первичной обработки метеоинформации («ПОИ-М») обеспечивает ввод в ПТК вторичной обработки метеоинформации («ВОИ-М») значений средней мощности радиоэха, средней доплеровской скорости и ширины спектра в 360 секторах азимута по 400 элементам дальности и 32 коническим сечениям.

Программное обеспечение «ВОИ-М», включает в себя «Компилятор файлов обзора» и программу «Метеосервер», служащую для обработки и визуализации метеорологической радиолокационной информации и формирования выходных данных:

– цифровых карт явлений погоды, контуров опасных явлений погоды, бланк-карты, карт интенсивности и количества осадков, верхней и нижней границы радиоэха облачности, горизонтальных сечений, карт размера и кинетической энергии града, карты VIL, карт средней радиальной скорости V_r на любой высоте и в вертикальном сечении;

– направления и скорости перемещения облаков и опасных явлений погоды, сверхкраткосрочного инерциального прогноза их местоположения;

– вертикального профиля ветра по методу VAD);

– карты распределения вектора скорости ветра в горизонтальной плоскости, восстановленного по методу UWT и т.д. (около 30 различных карт метеорологической информации).

Программное обеспечение «ВОИ-М» обеспечивает измерение и запись значений более 60 параметров облаков, автоматическое построение графиков их временного хода, распознавание категорий ОВ и управления противоградовыми операциями [9].

Предусмотрена автоматическая подготовка, кодирование в коды FM-94 BUFR, RADOB и передача пакетов информации в сеть штормооповещения и метеообеспечения авиации, выдача информации на пульт авиадиспетчера в форматах систем «ASTERIX» и «Строка-Ц».

Применение информации ТРЛК «12А6» в противоградовых работах может повысить их эффективность за счет новых возможностей:

– раннее обнаружение потенциально-градоопасных облаков, что не удается на «МРЛ-5» и «ДМРЛ-С» с циклами обзора 3,5 и 10 минут;

– уточнение места засева градовых и градоопасных облаков по данным о структуре воздушных потоков;

– раннее обнаружение и оценка эффекта засева облаков благодаря высокому разрешению во времени.

Быстрое сканирование пространства позволит также повысить точность измерения количества осадков, из конвективных облаков, имеющих большую пространственно-временную изменчивость.

Таблица 12.1 – Параметры «МРЛ-5», «ДМРЛ-С» и ТРЛК «12А6»

Параметр МРЛ	«МРЛ-5»		«ДМРЛ-С»	ТРЛК «12А6»
	1 канал	2 канал		
Значение параметров в единицах СИ				
Длина волны λ, см	3,13	10,15	5,33	10,5 – 11,07
Мощность передатчика $P\tau$, кВт	180	600	15	40
Чувствительность приемника P_0, Вт	$2{,}5\cdot10^{-14}$	$1{,}6\cdot10^{-14}$	$8{,}0\cdot10^{-15}$	$5{,}0\cdot10^{-15}$
Длительность импульса τ, с	$(1 \text{ и } 2)\cdot10^{-6}$		60	84
Частота повторения импульсов F, Гц	250 и 500		300 и 1500	300 и 600
Диаметр антенны D, м	4,5		4,2	
Коэффициент усиления антенны G, dB	$1{,}29\cdot10^{5}$	$1{,}44\cdot10^{4}$	$3{,}16\cdot10^{4}$	$1{,}26\cdot10^{4}$
Ширина луча θ / ψ, град	0,5 / 0,5	1,5 / 1,5	1,0 / 1,0	1,15 / 2,05
C_λ, см^3	$6{,}5\cdot10^{25}$	$7{,}9\cdot10^{26}$	$4{,}1\cdot10^{27}$	$2{,}5\cdot10^{27}$
Значение параметров в dB				
$20lg\lambda$	9,91	20,13	14,53	20,68
$10lgP\tau$	51,80	57,00	41,76	46
$10lgP_0$	-136,00	-138,00	-141,0	-143
$10lg\tau$	-57,00	-57,00	-42,21	-40,8
$20lgG$	102,25	83,16	90,0	41
$20lg\theta$	-41,13	-31,6	-35,2	-14,4 / -17
Потери на прием и передачу ζ, dB	6	5	6	3,5
$10lgC_\lambda$*	258,1	269,0	276,1	274,0

*Потенциал обоих каналов «МРЛ-5» приведен для случая работы при τ = 2 мкс, без малого зеркала антенны и замене ЛБВ на малошумящие СВЧ усилители.

12.2 Автоматизированные системы обработки информации МРЛ

12.2.1 В настоящее время радиолокационные метеорологические наблюдения осуществляются с применением автоматизированных систем обработки радиолокационной информации типа «TITAN», «WDSS-II», «Метеоячейка», «IRIS-Sigmet», «АКСОПРИ», АСУ «Антиград», «Мерком», «АСУ-МРЛ» и др., обеспечивающих повышение информативности МРЛ, достоверности получаемой информации, качества ее документирования, архивирования, оптимизацию передачи и хранения информации, создание радиолокационных сетей штормооповещения и измерения осадков, а также управление АВ на облачные процессы.

Все перечисленные системы обработки радиолокационной информации, несмотря на серьезные различия в аппаратных и программных средствах, решают один и тот же круг задач:

– компьютерное дистанционное управление включением и выключением МРЛ и режимами радиолокационных наблюдений;

– автоматический программный обзор пространства, получение, аналого-цифровое преобразование радиолокационных сигналов и их ввод в компьютер;

– вторичную обработку радиолокационной информации с целью формирования трехмерной картины облачности, распознавание явлений погоды, измерения интенсивности и количества осадков, получение полей ветра и турбулентности, распознавания явлений погоды для целей штормооповещения населенных пунктов, метеообеспечения авиации, управления операциями по модификации погоды и др.

Системы «TITAN», «АКСОПРИ», «WDSS-II», «Метеоячейка» не содержат программ управления АВ на облачные процессы, аппаратные и программные средства систем АСУ «Антиград» и «Мерком» устарели.

12.2.2 Наиболее приемлемой для реализации российской ракетной технологии ПГЗ является система «АСУ-МРЛ» [9], которая обеспечивает:

⇒ дистанционное управление МРЛ и режимами его работы;

⇒ обзор трехмерного пространства с периодичностью 3,5 ± 0,2 мин;

⇒ аналого-цифровое преобразование, осреднение и ввод радиолокационных сигналов в персональный компьютер по 360 секторам азимута, 400 ячейкам дальности (протяженностью 0,5 или 1 км) и 18 или 24 углам места с подавлением и без подавления радиоэха местных предметов, с фильтрацией и без фильтрации «аномального радиоэха»;

⇒ расчет радиолокационной отражаемости на двух длинах волн в каждой ячейке дальности с коррекцией на ослабление в газах атмосферы, облаках, осадках и ветрозащитном укрытии;

⇒ формирование и отображение около 30 карт метеоинформации:

– карты воздействия на градовые процессы;
– карты явлений погоды (дождь, ливень, гроза, град, смерч и т.д.);
– карты контуров опасных явлений погоды и штормовой таблицы;
– горизонтального сечения облачности на любой высоте;
– конических сечений облачности на любом угле сканирования;
– вертикального сечения облаков в любом направлении;
– карты максимальной отражаемости (Z_{max});
– карты высот повышенной отражаемости (H_{Zi});
– карт верхней и нижней границ радиоэха;
– карт интенсивности и количества осадков;
– карт размера и кинетической энергии града;
– карт степени повреждения и ущерба сельхозкультур от града;
– карты вертикально интегрированной водности (VIL);
– карт поля ветра и турбулентности в горизонтальной плоскости и их вертикальный профиль (V и *W*);
– карт поляризационных характеристик (Z_{DR}, L_{DR}, K_{DP}, $|\rho_{HV}|$).

Программное обеспечение (ПО) «АСУ-МРЛ» обеспечивает:

– анимацию всех перечисленных карт в виде мультфильмов;
– измерение более 60 различных параметров облаков, построение графиков их временного хода и определение тенденции развития;

⇒ управление противоградовыми операциями, включая распознавание ОВ различных категорий, выделение места засева, расчет координат пуска ракет и вывод на печать;

⇒ документирование результатов наблюдений, включая архивацию первичной и выходной информации и вывод на печать любой карты;

⇒ архивацию и вывод на печать материалов воздействия на облачные процессы, включая: фрагменты засева на фоне двухуровневого сечения облаков; таблицу стрельб; таблицу взаимодействия с органами авиации; суммированную карту засева с трассами ракет на фоне кинетической энергии града; карты степени повреждений основных сельхозкультур; таблицы и графики параметров засеянных ОВ и др.

12.2.3 ***Аппаратная часть*** «АСУ-МРЛ» включает: блок управления и контроля МРЛ (БУК) с платой первичной обработки и ввода радиолокационных сигналов в компьютер; блок управления приводом антенны (БУП); блоки цифровых датчиков углового положения антенны по азимуту и углу места (БДА и БДУ); соединительные кабели и персональный компьютер [9, 10].

В составе АРМК создается автоматизированное рабочее место (АРМ) руководителя воздействия на градовые процессы. Могут быть созданы также АРМ удаленных потребителей (например, АРМ аэролога, АРМ синоптика АМСГ, АРМ инженера по обслуживанию).

12.2.4 ***Программное обеспечение*** «АСУ-МРЛ» включает в себя:

Программное обеспечение аппаратной части включает в себя микропрограммы контролеров блоков БУК, БУП, БДА и БДУ, которые разрабатываются с учетом *устройства применяемого МРЛ* и устанавливаются при инсталляции «АСУ-МРЛ» [9 – 11].

Программа управления МРЛ «RADAR.EXE» [9]**,** предназначенная для идентификации МРЛ, управления МРЛ, контроля технических параметров МРЛ, установки режимов обзора, градуировки и автокалибровки измерительной системы, фильтрации «аномального радиоэха» и т.д. Программа содержит панель «Управление МРЛ», активную только при работе с МРЛ, и служит для формирования объемных файлов обзора из пакетов информации, поступающих из БУК по заданной сетке углов обзора, фильтрации отражений от местных предметов, несинхронных помех и аномального радиоэха.

Программа *«ASU-MRL»*, предназначенная для вторичной обработки радиолокационной информации и формирование выходных продуктов, перечисленных выше, управление противоградовыми операциями, документирования информации об облаках, осадках и противоградовых операциях и т.д.

Программа «MapEditor» служит для подготовки цифровой карты местности, авиатрасс, позиций МРЛ, ракетных пунктов, метеостанций и других объектов, на фоне которой отображаются карты метеоинформации.

Программа «RocketEditor» служит для конфигурирования ракетных пунктов (ввод их координат, запретных секторов стрельбы, количества и типа ракет, залпности, ввода траекторных характеристик ракет).

Программа «BUFRDecoder.exe» служит для декодирования и визуального графического представления телеграмм в международном коде WMO FM-94 BUFR, содержащих карты явлений погоды, карты верхней границы облачности, горизонтальные сечения на 11 уровнях высот и карты сумм осадков за 1, 3, 6, 12 и 24 часа.

Программа «DataManager» служит для приема и передачи файлов обзора, различных телеграмм и других файлов по локальной сети и Интернету удаленным потребителям.

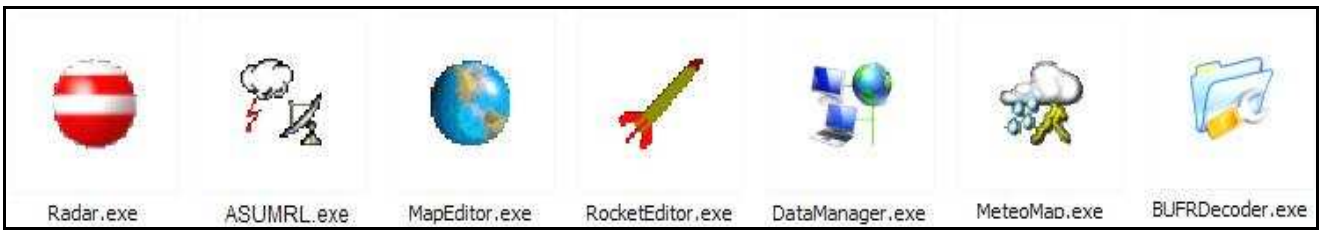


Рис. 12.2 – Иконки программных средств «АСУ-МРЛ»

12.2.5 ***Эксплуатационная документация*** «АСУ-МРЛ» содержит Формуляр АСУ.001.010 ФО, Руководство по эксплуатации АСУ.001.010 РЭ и Программу-методику испытаний на позиции АСУ.001.010 ПМ.

Программное обеспечение «АСУ-МРЛ» обеспечивает импорт и обработку файлов обзора различных МРЛ и ДМРЛ (рис. 12.3) для управления противоградовыми операциями и параллельного решения задач штормооповещения и метеообеспечения авиации.

Рис. 12.3 – Радиолокаторы «МРЛ-5», «WSR-74», ТРЛК «12А6», «ДМРЛ-С» и «WRM-200», информация которых может обрабатываться программным обеспечением «АСУ-МРЛ» [9]

12.2.6 Технические характеристики «АСУ-МРЛ» приведены в таблице 12.2, а оптимальная сетка углов обзора в таблице 12.3.

Таблица 12.2 – Технические характеристики «АСУ-МРЛ»

№№ пп	Наименование параметра	Единицы измерения	Значение
1	2	3	4
1	**Радиолокационный обзор пространства**		
	Продолжительность цикла обзора	мин	3,5 ± 0,5
	Скорость вращения антенны МРЛ	об/мин	6 ± 0,5
	Число углов обзора в цикле		18 или 24
	Точность установки вертикального угла	градус	± 0,05
	Автоматическое включение и выключение МРЛ в режиме «Дежурство»	да / нет	да
2	**Преобразование радиолокационных сигналов**		
	Уровень видеосигнала на входе АЦП	В	0,2 ÷6,4
	Число разрядов АЦП		12
	Амплитуда импульса синхронизации	В	15 ± 3
	Протяженность элементарных ячеек дальности	м	125 ± 5
	Число элементарных ячеек дальности	шт.	1600
	Число каналов дальности	шт.	400
	Шаг интегрирования по дальности	м	520 и 1040
	Число усредняемых импульсов	шт.	7 – 9
	Число дискретов азимута	шт.	360
	Радиус обработки информации	км	208 или 416
3	**Точность отображения параметров облаков**		
	Радиолокационной отражаемости	dB	± 1
	Дальности до метеорологических целей	м	± 250
	Высот радиоэха H_1, H_2, … H_B (на R ≤ 100 км)	км	± 0,5
	Количество измеряемых параметров	шт.	100
	Время измерения комплекса параметров	сек	1
4	**Отображение горизонтальных сечений по слоям**		
	Число слоев	шт.	40
	Шаг по высоте	км	0,5
	Число основных цветовых градаций	шт.	16
	Масштаб изображения		Любой
	Время вывода	сек	1
	Получение сечений на каналах 3,2 и 10 см	да / нет	да
5	**Отображение вертикальных сечений**		
	Направление сечения и шаг по азимуту		любой
	Число цветовых градаций		16
	Время вывода	сек	1
	Масштаб изображения		любой
	Время перехода от сечения к сечению	сек	1
	Получение сечений на каналах 3,2 и 10 см	да / нет	+

Продолжение таблицы 12.2

1	2	3	4
6	**Распознавание явлений погоды**		
	Число явлений погоды		6
	Число категорий		14
	Время отображения карты явлений погоды	сек	1
	Точность распознавания явлений погоды	%	92 ± 5
7	**Отображение различных карт метеорологической информации**		
	Нижней и верхней границ радиоэха облаков;	да / нет	да
	Бланк-карты явлений погоды 60 х 60 км	да / нет	да
	Каты явлений погоды	да / нет	да
	Карты контуров явления погоды	да / нет	да
	Приведенной водности по всей высоте, а также выше изотерм 0 ^{0}C и -6 ^{0}C	да / нет	да
	Размера и кинетической энергии града	да / нет	да
	Интенсивности и количества осадков	да / нет	да
	Степени повреждения и ущерба от града	да / нет	да
8	**Построение графиков временной эволюции параметров облаков**		
	По всем группам измеряемых параметров	да / нет	да
	На длинах волн 3,2 и 10 см	да / нет	да
	По каждой выбранной ячейке облачности	да / нет	да
	Интегральных значений параметров всей облачности	да / нет	да
9	**Передача радиолокационной информации потребителям по сети Меком**		
	Цикличность передачи объемных файлов обзора удаленному потребителю	мин	3,5 ± 0,5
	Длительность передачи файлов, не более	сек	10
	Формирование, кодирование в коды FM-94 BUFR и RADOB информации в сеть штормооповещения	да / нет	да
	Цикличность передачи информации в сеть штормооповещения	мин	В соответ. с регламентом
	Время передачи информации	сек	5
10	**Ввод данных в коде FM-94 BUFR в МАРС и в коде RADOB в ГИС Метео**		
	Карт явлений погоды	да / нет	да
	Карт горизонтальных сечений по слоям согласно регламенту ВМО	да / нет	да
	Карт верхней границы радиоэха	да / нет	да
	Карт сумм осадков за 1, 3 , 6, 12 и 24 часа	да / нет	да
11	**Оценка градоопасности облаков**		
	Число категорий объектов воздействия		4
	Время отображения градоопасности	сек	2 ± 1
	Точность распознавания категорий ОВ	%	95 ± 5
12	**Управление операциями по воздействию на градовые процессы**		
	Время селекции зон засева облаков	сек	10 ± 5
	Время расчета координат стрельб	сек	1
	Время передачи команд на засев	сек	1
	Обеспечение безопасности противогр. стрельб: - учет разрешения авиации - учет запретных секторов	 да / нет да / нет	 да да

Продолжение таблицы 12.2

1	2	3	4
	Обеспечение экономичности засева ОВ: - учет коэффициента засева; - учет типа ракет и их КПД - учет специфики ПУ - оптимальный выбор ПВ	 да / нет да / нет да / нет да / нет	 да да да да
	Возможность ввода параметров разных ракет	да / нет	да
13	**Документирование и архивирование информации**		
	Ведение журнала наблюдений (включений, выключений, количества файлов обзора)	Автоматич.	да
	Архивация объемных файлов обзора	да / нет	да
	Запись карт метеорологической информации	да / нет	да
	Запись таблиц параметров облаков	да / нет	да
	Запись анимационных фильмов и их просмотр	да / нет	да
	Формирование отчетной документации по штормооповещению (таблицы сравнения и т.д.)	да / нет	да
	Формирование отчетной документации по воздействию на градовые процессы: – отчета о воздействии; – таблицы взаимодействия с авиацией; – таблицы стрельб; – карты стрельб; – фрагментов засева.	 да / нет да / нет да / нет да / нет да / нет	 да да да да да
	Возможность вывода на печать карт метеоинформации, таблиц и графиков	да / нет	да
	Возможность работы с архивом файлов обзора	да / нет	да

Таблица 12.3 – Оптимальная сетка углов обзоров пространства

№ угла	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Угол α^o	0	0,32	0,7	1,2	1,7	2,3	3	3,8	5	6,4	8,2	11	15	21	29	38	52	84

12.3 Алгоритмы обработки радиолокационной информации

12.3.1 ***Расчет радиолокационной отражаемости*** (Z, dBZ) в АСУ должен осуществляться автоматически по формулам [12.1 и 12.2]:

$$Z_{3,2n} = 115{,}3 + N_{3,2n} + \Delta N_{3,2ак} + k_R + 2\sum_{i=1}^{n-1}(k_Г + k_o + k_{oc})\Delta R + 20lgR_n - 10lgC_{3,2}; \qquad (12.1)$$

$$Z_{10n} = 135{,}7 + N_{10n} + \Delta N_{10ак} + k_R + 2\sum_{i=1}^{n-1}(k_Г + k_o + k_{oc})\Delta R + 20lgR_n - 10lgC_{10}, \qquad (12.2)$$

где $Z_{3,2n}$ и Z_{10n} – радиолокационная отражаемость на длинах волн 3,2 и 10 см в n-м канале дальности, dBZ; $N_{3,2n}$ и N_{10n} – мощность радиоэха на этих же длинах волн, dB; $\Delta N_{3,2ак}$ и $\Delta N_{10ак}$ – поправки на изменение потенциала

МРЛ по данным автокалибровки (или измерениям на репер), dB; k_R – ослабление в ветрозащитном укрытии антенны на двойном пути, dB; $k_г$, $k_о$ и $k_{ос}$ – коэффициенты ослабления в газах атмосферы, облаках и осадках, соответственно, dB/км.

12.3.1.1 ***Ослабление в ветрозащитном укрытии*** *(Radom)* зависит от толщины пленки воды на его поверхности, являющейся функцией интенсивности осадков *J* над ним. По данным Государственных испытаний МРЛ-5:

– на λ = 10 см ослабление в Radom не превышает 0,4 dB даже в осадках интенсивностью *J* более 50 мм/ч и может не учитываться;

– на λ = 3,2 см расчет ослабления в Radom рассчитывается по формуле

$$k_R = 0{,}042J + 0{,}74. \qquad (12.3)$$

12.3.1.2 ***Ослабление в газах атмосферы*** $k_г$ рассчитывается путем его суммирования на пути распространения радиолуча с учетом угла зондирования α и дальности *R.* Для углов обзора $\alpha \le 18°$ и $R \le 200$ км расчет может осуществляться [14] с ошибкой не более 0,2 dB на λ = 3,2 см и 10 см соответственно по формулам:

$$k_{3,2Г} = 1{,}722\left\{\left(0{,}4 + 3{,}45e^{-\alpha/1{,}8}\right)\left(1 - e^{-R/[27{,}8+154e^{-\alpha/2{,}2}]}\right)\right\}; \qquad (12.4)$$

$$k_{10Г} = \left(0{,}4 + 3{,}45e^{-\alpha/1{,}8}\right)\left(1 - e^{-R/[27{,}8+154e^{-\alpha/2{,}2}]}\right). \qquad (12.5)$$

12.3.1.3 ***Ослабление в облаках и осадках*** $k_{ос}$:

– на λ = 10 см может не учитываться, так как даже в осадках интенсивностью 60 мм/ч протяженностью 40 км оно не превышает 1 dB;

– на λ = 3,2 см рассчитывается [12, 13] по радиальному распределению значений Z_{10n}, либо $Z_{3,2n}$:

$$k_{3,2n} = 10^{0{,}063\ Z10n - 3{,}32}\ \text{dB/км}; \qquad (12.6)$$

$$k_{3,2n} = 10^{0{,}062Z3{,}2n - 3{,}32}\ \text{dB/км}; \qquad (12.7)$$

12.3.1.4 При расчете отражаемости облаков следует также вводить поправку $\Delta Z_{ДНА}$, которая компенсирует занижение значения *Z* за счет превышения ширины диаграммы направленности антенны (ДНА) размеров локальных максимумов отражаемости. Без учета этого фактора получается недооценка градоопасности облаков с использованием критериальных значений Z_m. Полагая, что поперечный размер максимума отражаемости градового очага равен *L* и спадает к периферии по закону $e^{-\alpha L}$, значение $\Delta Z_{ДНА}$ (dB) можно рассчитать согласно [15] по формуле:

$$\Delta Z_{\text{ДНА}} = 20\,lg\frac{R\theta}{L} + 10\,lg\frac{1-e^{-\alpha L}}{1-e^{-\alpha L\cdot 0{,}042R}}, \qquad (12.8)$$

где α – согласно экспериментальным данным в градовых облаках может варьировать в пределах от 1 до 2 dB/км.

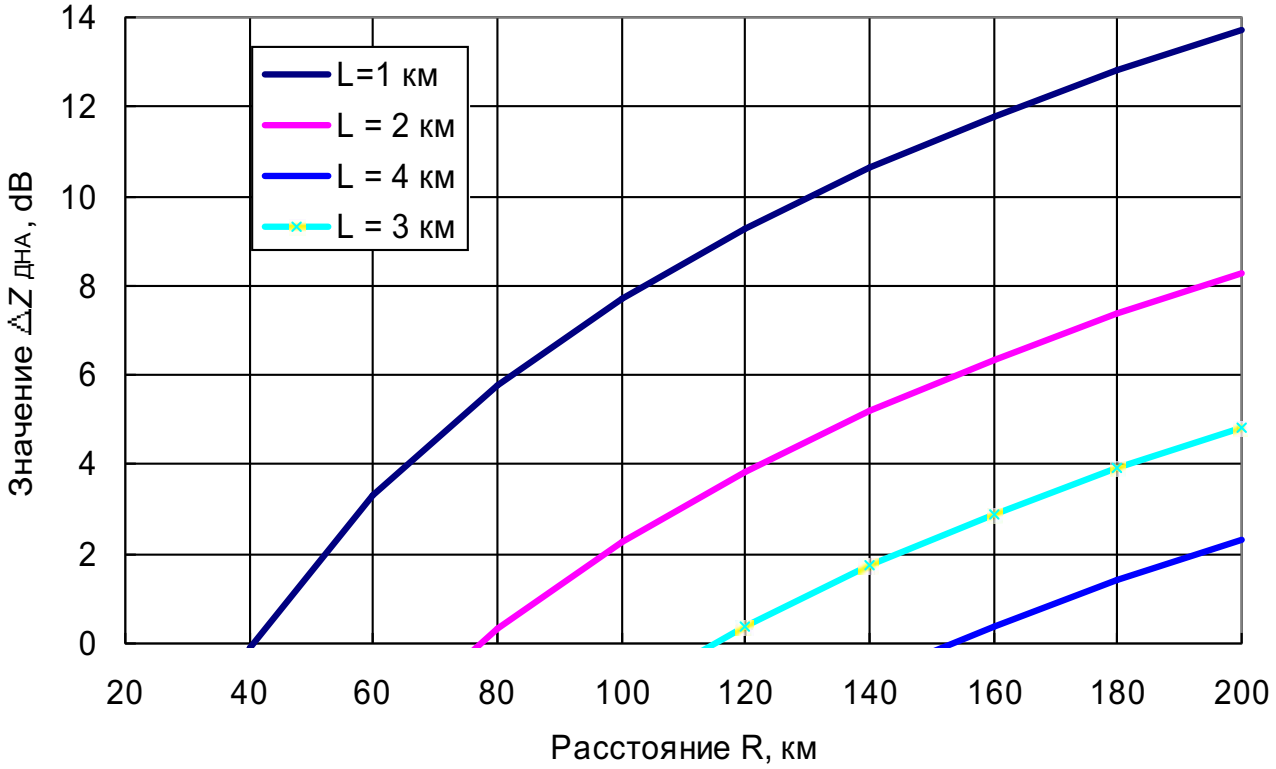


Рис. 12.4 – Зависимость поправки $\Delta Z_{\text{ДНА}}$ от расстояния для 10 см канала МРЛ-5 для градовых облаков при α = 1,5 dB/км и указанном размере максимума отражаемости L

Из рисунка 12.4 следует, что чем меньше поперечник локального максимума те больше его значение может занижаться значение Z_m без введения поправки $\Delta Z_{\text{ДНА}}$. При наиболее вероятном поперечнике Z_m в градовых облаках, равном L = 2 км, такую поправку следует вводить, начиная с расстояния 80 км.

12.3.2 ***Расчет высот радиоэха метеоцелей*** следует осуществлять с учетом «кривизны радиолуча» при нормальной рефракции, полуширины диаграммы направленности излучения, а также высоты стояния МРЛ над уровнем моря $H_{\text{МРЛ}}$, км:

– высота над уровнем моря: $H = R\sin\alpha + 5{,}8\cdot10^{-5}R^2 + H_{\text{МРЛ}}$; (12.9)

– высота верхней границы: $H_B = R\sin\alpha + 5{,}8\cdot10^{-5}R^2 - R\sin(\theta/2) + H_{\text{МРЛ}}$; (12.10)

– высота нижней границы: $H_H = R\sin\alpha + 5{,}8\cdot10^{-5}R^2 + R\sin(\theta/2) + H_{\text{МРЛ}}$, (12.11)

где R – расстояние от МРЛ, км; α – вертикальный угол зондирования; $\theta/2$ – полуширина диаграммы направленности излучения антенны на уровне половинной мощности, град.

Приемлем 2-й вариант расчета высоты радиолуча с учетом его кривизны относительно поверхности земли по модели, согласно которой радиус Земли $r_З$ равен 6371,032 км, а эффективный радиус кривизны радиолуча $r_{ЭЗ} = 4/3 r_З = 8500$ км [14];

$$H = [R^2 + 7{,}225 \cdot 10^7 + 2R \cdot 8500 \cdot \sin\alpha]^{0,5} - 8500 + H_{МРЛ}; \quad (12.12)$$

$$H_B = [R^2 + 7{,}225 \cdot 10^7 + 2R \cdot 8500 \cdot \sin\alpha]^{0,5} - 8500 - R\sin\theta/2 + H_{МРЛ}; \quad (12.13)$$

$$H_H = [R^2 + 7{,}225 \cdot 10^7 + 2R \cdot 8500 \cdot \sin\alpha]^{0,5} - 8500 + R\sin\theta/2 + H_{МРЛ}, \quad (12.14)$$

Расхождения в значениях высот, рассчитанных по обоим методам, не превышают 30 м в диапазоне H до 20 км и R до 200 км при всех углах зондирования α.

12.3.3 ***Расчет горизонтальной дальности метеоцелей*** R_G, км в стандартной атмосфере может выполняться также по двум вариантам:

– без учета кривизны радиолуча: $H_G = R \cdot \cos\alpha$; (12.15)

– с учетом кривизны радиолуча: $H_G^* = r_{ЭЗ} \sin^{-1}\left(\frac{R\cos\theta}{r_э + H}\right)$. (12.15')

Учитывая, что разность $H_G - H^*_G$ в радиусе до 200 км и в слое высот от 0 до 20 км не превышает 300 м, в целях упрощения расчет R_G осуществляют по формуле (12.15).

12.3.4 ***Измерения параметров облаков*** осуществляют с помощью АСУ в точке курсора или в выделенном оператором объеме.

12.3.4.1 Для распознавания градовых облаков и ОВ, проведения противоградовых операций и последующего анализа их результатов следует измерять следующие параметры:

– координаты максимума радиоэха: A_m и R_m, км;

– максимальную отражаемость: Z_m, dBZ;

– высоты в км: максимальной отражаемости H_{Zm}, верхней границы радиоэха $H_В$, верхней границы изолиний отражаемости H_{25}, H_{35}, H_{45} … H_{65};

– превышения высот над уровнем 0°С в км: ΔH_{Zm}, ΔH_{25}, ΔH_{35}, ΔH_{45}, ΔH_{55}, ΔH_{65} (рис. 12.5);

– направление A^o и скорость перемещения V, км/ч;

– объемы выделенной части облака с Z_{10} > 25, 35, 45, 55, 65 dBZ выше уровня изотермы 0°С ΔV_{25}, ΔV_{35}, ΔV_{45}, ΔV_{55}, ΔV_{65}, км^3;

– максимальное значение приведенной водности облака q_m, кг/м^2;

– максимальное значение приведенной водности облачного слоя выше уровня изотермы 0°С Δq_m, кг/м^2;

– интегральные водности облачного слоя выше уровня 0°С с Z_{10} > 25, 35, 45 … 65 dBZ: ΔM_{25}; ΔM_{35}; ΔM_{45} … ΔM_{65}, т;

– площадь радиоэха $S_{рад}$, площадь выпадения дождя $S_{дож}$ и площадь выпадения града $S_{град}$, км^2.

12.3.4.2 Значения Z_m и ее координат A_m и R_m измеряются в точке абсолютного максимума радиоэха.

12.3.4.3 Все высоты (H_{Zm}, $H_В$, H_{35}, H_{45} … H_{65}), а также превышения высот над уровнем 0°С (ΔH_{Zm}, $\Delta H_В$, ΔH_{35}, ΔH_{45} … ΔH_{65} измеряются в области максимума их значений.

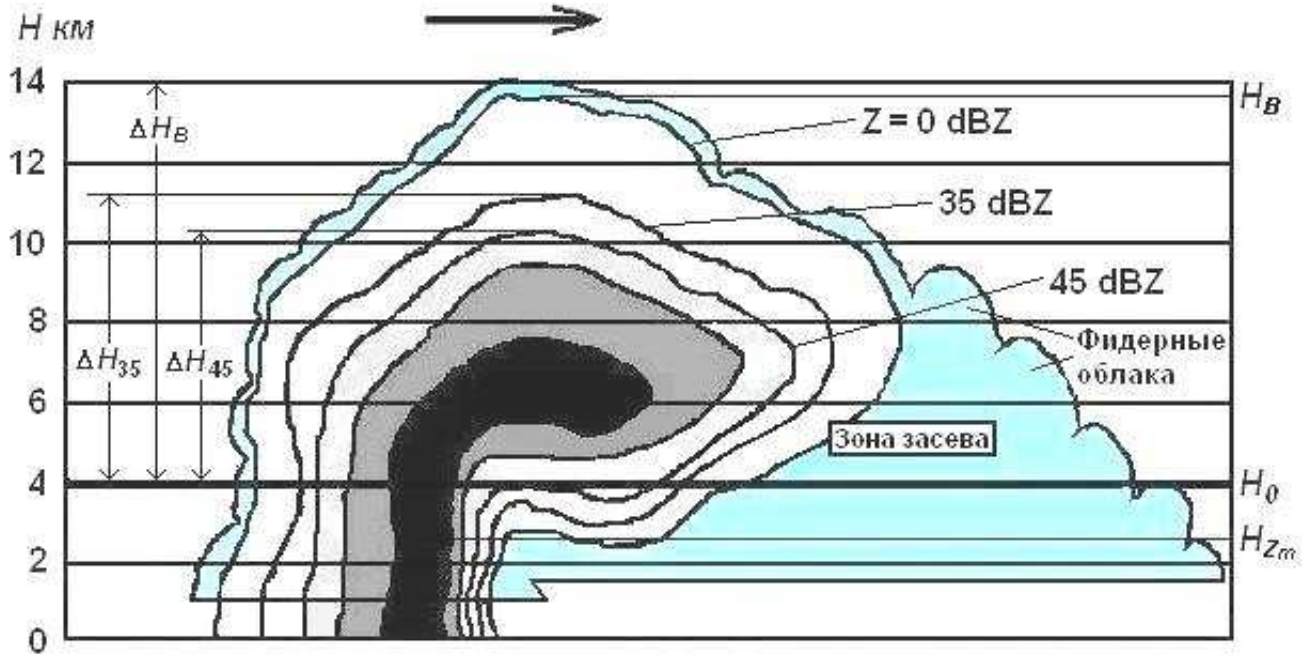


Рис. 12.5 – Схема измерения высот на вертикальном сечении градового облака

12.3.4.4 Расчет мгновенной скорости и направления перемещения ОВ осуществляется по смещению центра масс слоя облачности выше уровня 3 км в период между последовательными циклами обзора по формулам:

$$V = \frac{\sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2}}{\Delta t}, \qquad (12.16)$$

$$A = arctg\frac{\Delta X}{\Delta Y}, \qquad (12.17)$$

где ΔX и ΔY – смещение центра масс по осям X и Y; Δt – время между двумя последовательными циклами обзора.

С*редняя скорость и направление перемещения ОВ* рассчитываются за период от начала его обнаружения до последнего цикла обзора.

12.3.4.5 ***Измерение объемов*** ΔV_{35}, ΔV_{45}, ΔV_{55}, ΔV_{65}, а также приведенной q_m, Δq_m и интегральной водности ΔM_{35}; ΔM_{45}; ΔM_{55} и ΔM_{65}

осуществляется путем выделения ОВ в рамку таким образом, чтобы внутри ее помещался изоконтур с Z_{10} = 25 dBZ.

12.3.4.6 Площадь радиоэха ($S_{рад}$, км^2) рассчитывается по карте максимальной отражаемости, а площади дождевых ($S_{дож}$, км^2) и градовых осадков ($S_{град}$, км^2) по карте максимальной отражаемости и кинетической энергии града в слое 1 км над уровнем нижней границы радиоэха.

12.3.5 ***Оценка тенденции развития облаков*** осуществляется по приращению (убыванию) максимальной отражаемости (Z_{max}), высоты верхней границы (H_B), приведенной водности (Δq_{0max}) и интегральной водности слоя облачности выше изотермы 0 ^{o}C (ΔM) в последующем цикле обзора по сравнению с предыдущим. При этом определение тенденции развития осуществляется по условию:

– $\frac{\Delta q_{0m}}{\Delta t} = \left|\frac{\Delta q_{0m}(n) - \Delta q_{0m}(n-1)}{\Delta q_{0m}(n)}\right| < 0{,}2$ считается, что «Развития нет»;

– $\frac{\Delta q_{0m}}{\Delta t} = \frac{\Delta q_{0m}(n) - \Delta q_{0m}(n-1)}{\Delta q_{0m}(n)} > 0{,}2$, $dM_{Zi}/dt > 0$ – тенденция «Усиление»;

– $\frac{\Delta q_{0m}}{\Delta t} = \frac{\Delta q_{0m}(n) - \Delta q_{0m}(n-1)}{\Delta q_{0m}(n)} < 0{,}2$, $dM_{Zi}/dt < 0$ – тенденция «Ослабление».

12.3.6 ***Расчет интенсивности и количества осадков*** осуществляется в каждой ячейке площади обзора, ограниченной протяженностью канала дальности, равной 0,5 км и шириной шага по азимуту, равной 1 градус.

Интенсивность осадков I (мм/ч) теплого периода года в *n*-м канале дальности рассчитывается, согласно [12, 13], по алгоритму

$$I_n = \begin{cases} I_{nД} & при\ Z_n < 55\ dBZ; \\ (1-k)\cdot I_{nД} + k\cdot I_{nГ} & при\ Z_n \geq 55\ dBZ, \end{cases}, \qquad (12.18)$$

где эмпирический коэффициент k = (0,04·Z_n - 2,2) учитывает увеличение доли градовой фракции в смешанных осадках при Z > 45 dBZ; $I_{nД}$ и $I_{nГ}$ – дождевая и градовая составляющие смешанных осадков в *n*-ом канале дальности, рассчитываемые по формулам:

$$I_{nД} = 10^{0{,}0624\cdot Zn-1{,}432}, \qquad (12.19)$$

$$I_{nГ} = 10^{0{,}065Zn-2{,}28}. \qquad (12.20)$$

Количества осадков Q_{nj} (мм) в *n*-м канале дальности и *j*-м секторе азимута осуществляется по формуле

$$Q_n = \sum_{m=1}^{\infty} I_{njm}\Delta t_m, \qquad (12.21)$$

где I_{njm} – интенсивность осадков в n-м канале дальности j-м секторе азимута и m-м цикле обзора, рассчитанная по формулам (12.19 – 12.20); m – число циклов обзора с осадками в n-м канале дальности и j-м секторе азимута; Δt – период времени между циклами обзора.

12.3.7 Характеристики градовых осадков рассчитываются одноволновым и двухволновым методами [4, 12] по формулам:

Максимальный размер града d_m, см:

– по одноволновому методу на λ = 10 см:

$$d_{mn} = (0{,}2 \cdot Z_{10} - 10); \tag{12.22}$$

– по двухволновому методу:

$$d_m = 1{,}2 \cdot 10^{0{,}027\,(Z_{10} - Z_{3,2})}. \tag{12.23}$$

Плотность потока кинетической энергии града $\dot{E}$, Дж/м^{2}с:

– по одноволновому методу на λ = 10 см:

$$lg\,\dot{E}_n = 0{,}086\,Z_{10\,n} - 5{,}25; \tag{12.24}$$

– по двухволновому методу:

$$lg\,\dot{E}_n = 0{,}025\,Z_{3,2n} + 0{,}075\,Z_{10n} - 5{,}87. \tag{12.25}$$

Значения $\dot{E}$ следует рассчитывать:

– при H_0 < 2,0 км в области Z_n > 45 dBZ;
– при 2,0 $\le H_0 \le$ 3,5 км в области Z_n > 50 dBZ;
– при H_0 > 3,5 км в области Z_n > 55 dBZ.

Кинетическая энергия града E, Дж/м^2:

– по одноволновому методу на λ = 10 см:

$$E_n = \sum_{m=1}^{\infty} 10^{(0{,}086\,Z_{10\,n} - 5{,}25)} \Delta t_m; \tag{12.26}$$

– по двухволновому методу:

$$E_n = \sum_{m=1}^{\infty} 10^{(0{,}025\,Z_{3,2\,n} + 0{,}075\,Z_{10\,n} - 5{,}87)} \Delta t_m. \tag{12.27}$$

Степень повреждения сельхозкультур от градобитий *К,* % рассчитывается по корреляционным связям между кинетической энергией града и повреждаемостью i-й сельхозкультуры [12] в виде:

$$K_i = A_i\,lgE - B_i. \tag{12.28}$$

Таблица 12.4 – Значения коэффициентов A_j и B_j в формуле (17.28)

Вид сельскохозяйственной культуры	A_j	B_j	Пределы применения формулы (12.28)
Виноград	100	145	Z_{10} > 50 dBZ
Пшеница	56	58	
Кукуруза	66	90	

12.3.8 ***Приведенная водность*** всей толщи облака (q_Σ, кг/м^2) и его переохлажденного слоя (Δq_Σ, кг/м^2), представляющие суммарное водосодержание вертикального столба с площадью основания 1 м^2 (VIL), рассчитывается путем суммирования водности единичного объема по всем слоям облака и слоям выше изотермы 0°С [12, 13]:

$$q_{\Sigma nj} = \sum_{i=1}^{\infty} q_{nj} \cdot \Delta H_i \qquad (12.29)$$

где ΔH_i – вертикальная протяженность *i*-го слоя облака;
q_{ni} – водность единичного объема облака, г/м^3, рассчитываемая по алгоритму:

$$q_{nj} = \begin{cases} q_{njД} & \text{при } Z_{nj} < 45; \\ (1-k)\cdot q_{njД} + k \cdot q_{njГ} & \text{при } Z_{nj} \geq 45 \end{cases} \qquad (12.30)$$

где k = (0,0285Z_{nj} - 1,28) – константа, зависящая от содержания дождевой $q_{njД}$ и градовой $q_{njГ}$ фракций в *n*-ом канале дальности и *j*-ом секторе азимута.

Значения $q_{njД}$ и $q_{njГ}$ рассчитываются согласно [12] по формулам:

$$\left.\begin{aligned} q_{njД} &= 10^{0,057 Z_{nj} - 2,44} \\ q_{njГ} &= 10^{0,058 Z_{ni} - 2,75} \end{aligned}\right\}. \qquad (12.31)$$

12.3.9 ***Интегральное водосодержание*** всего объема облака (M_{Zi}, т) и его переохлажденной слоя (ΔM_{Zi}, т) оценивается [12] путем суммирования водности q_{nj} по всей площади радиоэха, ограниченной Z_i, и всем слоям от основания радиоэха до вершины или от уровня изотерм 0°С до вершины:

$$\left.\begin{aligned} M_{Zi} &= \sum_{i=1}^{m} q_{nj}(Z_i)\cdot S_{Z_i} \\ \Delta M_{Zi} &= \sum_{i=1}^{m} \Delta q_{nj}(Z_i)\cdot S_{Z_i} \end{aligned}\right\}, \qquad (12.32)$$

где $q_{nj}(Z_i)$ – значение водности в *n*-ом канале дальности и *j*-ом секторе азимута внутри изоконтуров с Z_i, равных 15, 25, 35 … 65 dBZ; S_{Zi} – площадь внутри изоконтура Z_i.

12.3.10 *Критерии обнаружения смерчей*

На основе анализа механизма формирования и структуры смерчей в основу их радиолокационного обнаружения положены [14] следующие признаки:

– наличие на средних высотах замкнутой ячейки циркуляции или близко расположенных пар векторов ветра противоположного направления, указывающих на наличие в средней тропосфере мезоциклона диаметром 4 – 8 км, сужающегося книзу;

– большая ширина доплеровского спектра бимодальной формы;

– радиолокационная отражаемость облака Z_{max} > 50 dBZ;

– приведенная водность приземного 1 км слоя $\Delta q_{\max}$ > 2 кг/м^2;

– приведенная водность всей толщи облака $q_{\max}$ > 8 кг/м^2;

– наличие крюкообразного радиоэха в горизонтальном сечении на высоте 1 – 2 км над уровнем моря и навеса радиоэха над ним.

Наиболее вероятное местоположение смерчей – правый наветренный фланг, расположенный под навесом радиоэха перед фронтом порыва (Gust фронтом), совпадающий с областью круговой циркуляции и пары векторов ветра противоположного направления.

12.4 Порядок подготовки МРЛ и АСУ

12.4.1 Размещение МРЛ осуществляется на открытых возвышенных местах с учетом:

а) возможности радиолокационного обзора ЗТ и ПТ в радиусе не менее 100 км при углах закрытия не более 1,0°;

б) исключения возможности облучения жилых и служебных помещений на КП;

в) обеспечения электромагнитной совместимости МРЛ с близко расположенными радиотехническими средствами;

г) минимизации затрат на строительство подъездных путей, линий электропередачи, связи и водоснабжения.

12.4.2 Горизонтирование и ориентирование МРЛ проводится в соответствии с [5] путем наведения антенны МРЛ на точечную цель с известными координатами, либо на Солнце.

Современные АСУ обеспечивают наведение антенны МРЛ на максимум радиотеплового излучения Солнца, расчет его угловых координат для заданной позиции и в заданное время. После наведения антенны МРЛ на Солнце его азимут и угол возвышения устанавливается путем разворота соответствующих датчиков. Для этого следует ослабить

крепление корпуса датчика, развернуть его до требуемого угла и вновь затянуть крепление корпуса датчика.

12.4.3 Градуировка измерительной системы МРЛ

Градуировка измерительной системы МРЛ предусматривает установку сквозной амплитудной характеристики измерительного тракта, включая приемные устройства МРЛ и аппаратуру первичной обработки радиолокационных сигналов. Она осуществляются после регулировки и настройки приемо-передающих устройств МРЛ в соответствии с инструкцией по эксплуатации применяемой АСУ с помощью генератора стандартных сигналов (ГСС). Например, для градуировки «АСУ-МРЛ» необходимо:

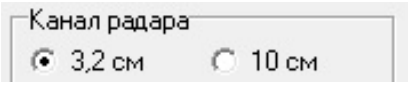
– собрать измерительную схему, представленную на рисунке12.6, подключив ГСС к входам приемных устройств МРЛ;

– включить МРЛ в ручном режиме, нажав кнопку «Ручной»;

– включить программу «Radar.exe» и на пульте «Управление МРЛ» выбрать программу «Настройка\Калибровка»;

– в появившемся окне ввести пароль доступа;

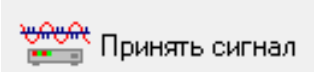
– выбрать градуируемый канал (3,2 или 10 см);



– измерить уровень шумов (чувствительность) приемника P_0 и потом подать на вход приемника сигнал, превышающий уровень шумов на 85 dB;

– нажать кнопку «Развертка» и установить канал дальности записи сигнала в середину импульса от ГСС;

– установить на аттенюаторе ГСС амплитуду сигнала соответствующую уровню шумов приемника (0 dB) и нажать кнопку «Принять сигнал». При этом начинается автоматическое вращение антенны МРЛ по азимуту и запись амплитуды сигнала ГСС в течение одного оборота антенны в течение 10 сек.



– после остановки антенны нажать кнопку «Сохранить»;

– подавая от ГСС сигналы амплитудой 0, 5, 10, 15 … 85 над уровнем шумов приемника, провести сквозную градуировку во всем динамическом диапазоне приемного устройства первого канала;

– по аналогии провести градуировку по 2-му каналу и «Сохранить»;

– нажать кнопку «Кривые» и вывести на печать градуировочные кривые обоих измерительных трактов «АСУ-МРЛ» (рис. 12.7).

После нажатия кнопки «Сохранить» обеспечивается автоматическое формирование файлов калибровочных кривых измерительных трактов на обеих длинах волн, их ввод в программу «АСУ-МРЛ» и построение графика калибровочной кривой с указанием даты и времени.

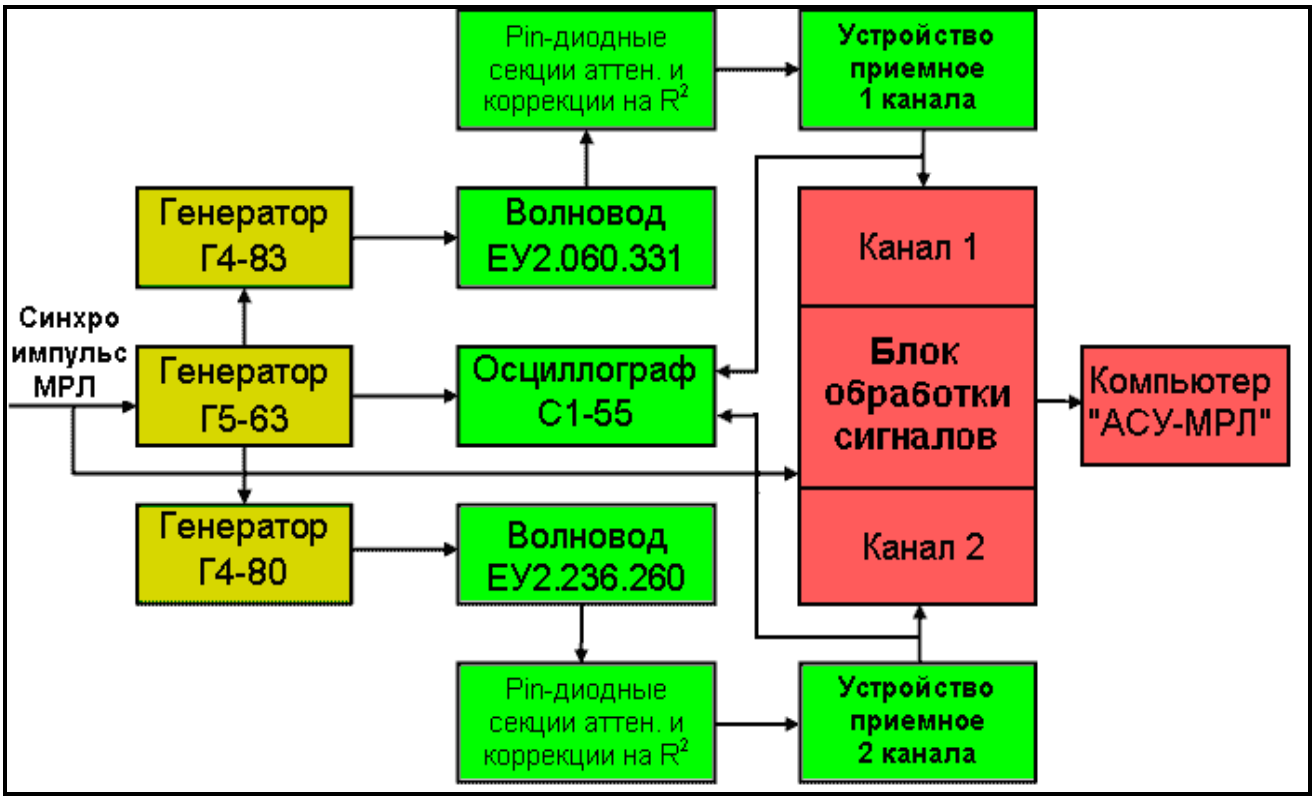
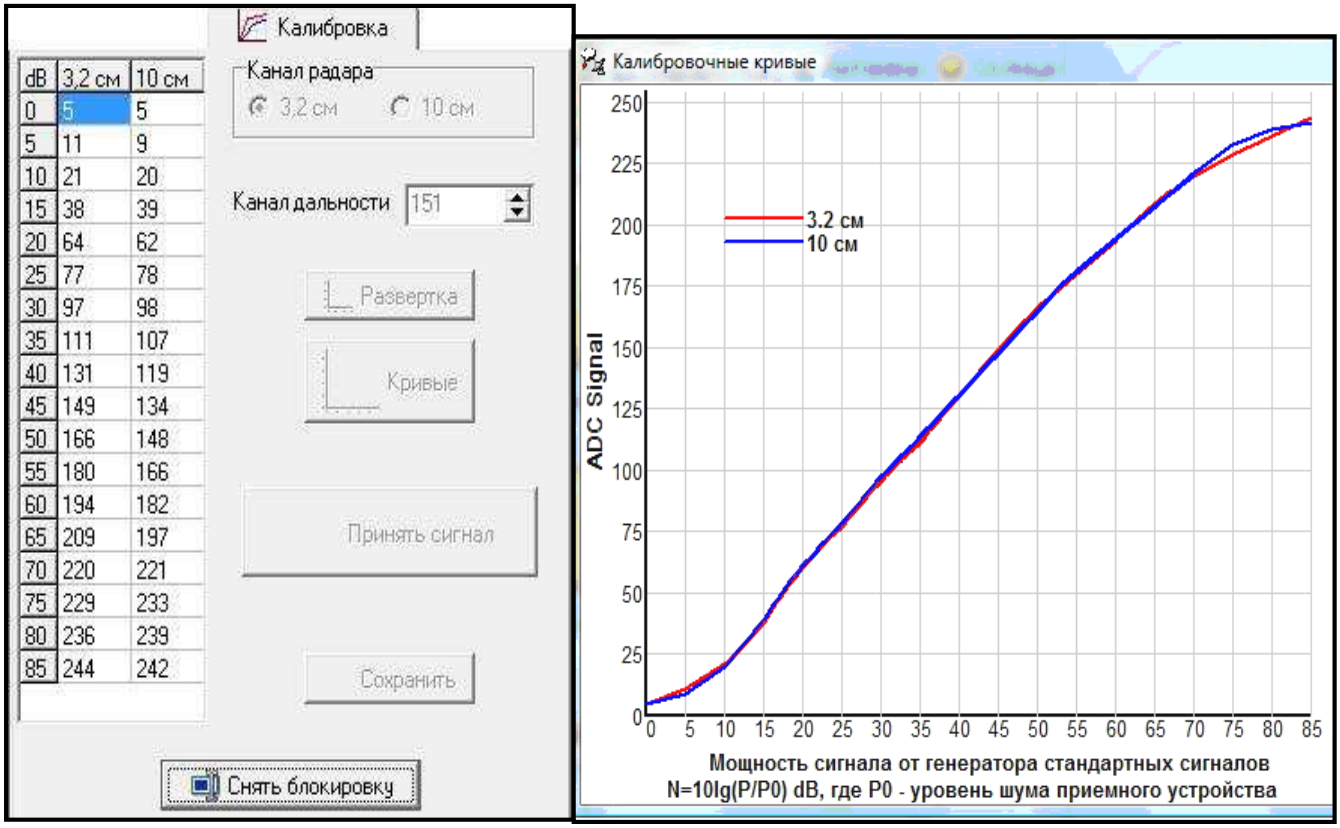


Рис. 12.6 – Блок-схема системы градуировки.
измерительного тракта «АСУ-МРЛ»



dB	3,2 см	10 см
0	5	5
5	11	9
10	21	20
15	38	39
20	64	62
25	77	78
30	97	98
35	111	107
40	131	119
45	149	134
50	166	148
55	180	166
60	194	182
65	209	197
70	220	221
75	229	233
80	236	239
85	244	242

Рис. 12.7 – Панель градуировки измерительного тракта «АСУ-МРЛ» (слева) и градуировочные кривые измерительных трактов обоих каналов МРЛ-5 (справа)

12.4.4. Калибровка МРЛ предусматривает определение значения его константы (часто называемой «метеорологическим потенциалом»). Калибровка МРЛ (ДМРЛ) может осуществляться следующими методами:

12.4.4.1 ***Инструментальный метод***

Наиболее простым методом является расчет константы МРЛ по данным инструментальных измерений его параметров (табл. 12.5) по формуле:

$$C_\lambda = \frac{P_\tau G^2 \lambda^2 c \tau \theta^2}{P_0 \cdot 4^5 \pi^2 \ln 2 \cdot 10^{0,1\zeta}}, \text{ см}^3 \qquad (12.33)$$

или

$$10lgC_\lambda = 10lgP\tau - 10lgP_0 + 20lgG + 20lg\lambda + 10lg\tau + 20lg\theta - \zeta + 66{,}32, \text{ dB} \qquad (12.34)$$

где C_λ – константа МРЛ на длине волны λ_i, см^3; $P\tau$ – импульсная мощность передатчика, Вт; G – коэффициент усиления антенны; λ – длина волны, см; c – скорость света, см/с; τ – длительность импульса, с; θ – ширина диаграммы направленности излучения антенны на уровне половинной мощности, радиан; ζ – суммарные потери в волноводном тракте на прием и передачу, dB; P_0 – чувствительность приемника, Вт.

Недостатком инструментального метода определения константы МРЛ является возможность ошибок, связанных с потерями в волноводном тракте, размещением облучателя не в фокусе зеркала, не согласованностью СВЧ элементов приемо-передающего тракта, которые в полевых условиях трудно контролировать.

Таблица 12.5 – Параметры МРЛ-5 при τ = 2 мкс, F = 250 Гц, без малого зеркала антенны и замене ЛБВ на малошумящие СВЧ усилители

Обозначение и размерность параметра	Значение для канала		Параметр	Значение параметра в dB	
	1-го	2-го		для 1-го канала	для 2-го канала
λ, см	3,13	10,15	$20lg\lambda$	9,91	20,13
$P\tau$, кВт	150	500	$10lgP\tau$	51,80	57,00
P_0, Вт	$2{,}5\cdot10^{-14}$	$1{,}6\cdot10^{-14}$	$10lgP_0$	-136,00	-139,00
τ, сек	$2\cdot10^{-6}$	$2\cdot10^{-6}$	$10lg\tau$	-57,00	-57,00
G, dB	$1{,}1\cdot10^{5}$	$1{,}01\cdot10^{4}$	$20lgG$	100,2	80,1
θ, градус	0,5	1,5	$20lg\theta$	-41,13	-31,6
ζ, dB	6,0	5,0	ζ	6,0	5,0
C_λ, см^3	$1{,}02\cdot10^{26}$	$8{,}0\cdot10^{26}$	$10lgC_\lambda$	260,1	269,0
Если в приемниках МРЛ-5 используются штатные СВЧ усилители на ЛБВ, то константы обычно не более: $10lgC_{10} \approx 267$ dB; $10lgC_{3,2} \approx 257$ dB.					

12.4.4.2 *Метод стандартной мишени*

Наиболее точное определение константы МРЛ достигается при его калибровке по внешней цели – *стандартной мишени,* отражательная способность которой известна, а мощность радиоэха зависит от технических характеристик передатчика, приемника и антенно-волноводной системы. Такая калибровка осуществляется путем измерения наклонной дальности и мощности радиоэха мишени, поднимаемой на удалении от 2 до 5 км от МРЛ до высоты от 0,5 до 1,0 км на шаре-пилоте, наполненном водородом или гелием [4].

В качестве стандартной мишени обычно используется полый алюминиевый шар радиусом r = 15,25 см, имеющийся в комплекте ЗИП МРЛ-5. Может использоваться также матерчатый надувной шар радиусом не менее 15,25 см, обклеенный алюминиевой фольгой. Расчет константы МРЛ по данным измерений радиоэха стандартной мишени осуществляется по формуле:

$$C_{\lambda i} = \frac{10^{0,1N} R^4 c \tau \theta^2}{3,54\sigma}, \text{ см}^3 \qquad (12.35)$$

$$\text{или } 10lgC_{\lambda i} = N + 40lgR + 10lg\tau + 20lg\theta - 10lg\sigma + 99,3, \text{ dB} \qquad (12.36)$$

где N – мощность радиоэха мишени, усредненная по множеству измерений, dB; R – наклонная дальность мишени, см; $\sigma = \pi r^2$ – поперечное сечение обратного рассеяния сферической мишени радиуса r, см^2.

В случае калибровки по мишени, отпущенной в свободный полет, осуществляются непрерывные измерения R *и* N в режиме сопровождения мишени до исчезновения ее радиоэха на уровне шумов. Строится кривая зависимости мощности радиоэха N от расстояния R, которая уменьшается пропорционально R^4, и значение C_λ рассчитывается по формуле

$$10lgC_{10} = N + 40lgR - const, \text{ dB} \qquad (12.37)$$

где значение N может быть взято на расстоянии, например, $R = 10^6$ см и $const$ = 17,92 (при r = 15,25 см, θ = 1,5° и длительности импульса τ = 2 мкс).

Этот метод калибровки охватывает все параметры приемо-передающего тракта и антенной системы МРЛ и является наиболее точным. Однако, несмотря на его преимущества, он не всегда применяется из-за проблем организации такой калибровки с приобретением мишени, шара-пилота, лебедки и средств связи.

12.4.4.3 *Калибровка МРЛ по осадкам*

Одной из важнейших задач МРЛ является измерение интенсивности и количества осадков, распознавание их видов и сопровождающих явлений

погоды. Поэтому в качестве внешней цели для калибровки МРЛ могут служить атмосферные осадки.

Для калибровки МРЛ по осадкам в рамках программного обеспечения «АСУ-МРЛ» разработана программа автоматического сопоставления количества осадков, измеренных МРЛ, с количеством осадков, измеренных на сети метеостанций. Такие измерения следует проводить в радиусе не более 50 км, чтобы исключить влияние уширения и перелета луча, искажений вносимых линией таяния под уровнем изотермы 0°С, а также затуханием радиоволн в облаках, осадках и газах атмосферы. По данным этих измерений строится график (рис. 12.8), на котором проводится линия тренда экспериментальных данных (сплошная линия), и линия биссектрисы (пунктир), обеспечивающей совпадение данных радиолокационных и наземных измерений.

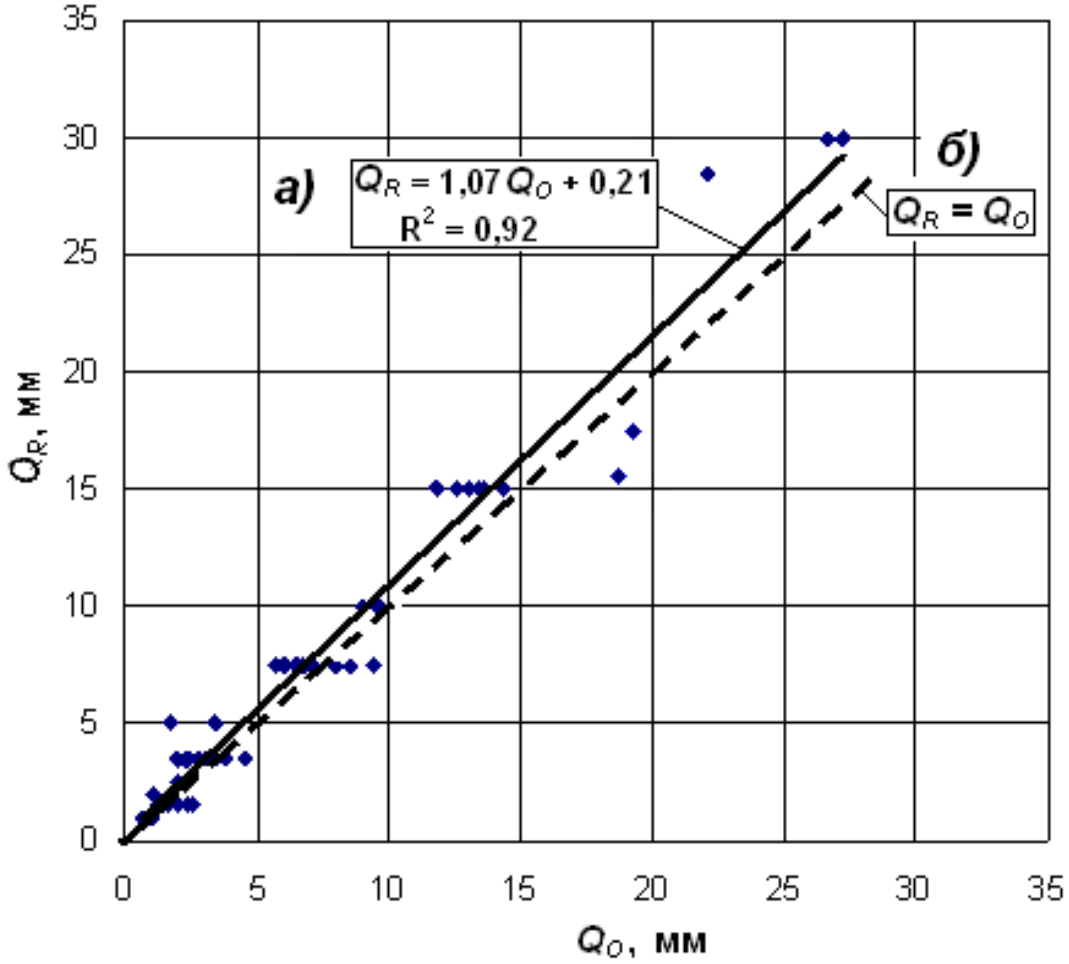


Рис. 12.8 – Количество осадков по данным «АСУ-МРЛ» Q_R и плювиографа Q_O:
а) сплошная линия – линия тренда экспериментальных данных; б) линия согласования данных «АСУ-МРЛ» и плювиографов

Поправка на константу МРЛ рассчитывается по отклонению линии тренда от линии совпадения данных об осадках по формуле:

$$\Delta(10\,lg\,C_\lambda) = \Delta Z = 16\,(lg\,Q_R - lg\,Q_O)\,, \qquad (12.38)$$

где $\Delta(10lgC_\lambda)$ и ΔZ – величина поправки на значения константы МРЛ, необходимая для согласования количества осадков, полученных по радиолокационным и наземным измерениям, усредненным по достаточно большому количеству измерений в дождях разной интенсивности.

По данным рисунка 12.8 поправка на константу МРЛ будет равна примерно 0,5 dB. Достоинством калибровки МРЛ по реальным осадкам является ее достоверность и точность, но это требует длительного набора статистических данных.

12.4.4.4 *Калибровка МРЛ по Солнцу*

А) Удобным для практического применения является новый метод калибровки МРЛ [20] по радиотепловому излучению Солнца, которое является мощным источником излучения в широком диапазоне радиоволн.

Полное радиотепловое излучение Солнца в сантиметровом диапазоне волн состоит из постоянной компоненты радиоизлучения диска спокойного Солнца и медленно меняющейся в зависимости от солнечной активности S-компоненты, связанной с излучением хромосферных пятен и факелов. Кроме того, отмечаются кратковременные вспышки (длительностью от миллисекунд до 1 часа), связанные с излучением электронов высокой энергии в солнечной короне, которые могут многократно превышать постоянную и S-компоненту излучения Солнца.

Б) Поток радиоизлучения *спокойного Солнца* ($F_\oplus$) зависит от частоты. В сантиметровом диапазоне волн (f > 6000 МГц) излучение исходит в основном из хромосферы и значение $F_\oplus$ приблизительно пропорционально f^2, как у абсолютно чёрного тела с температурой от 6000 до 10000 ^{o}K. Плотность потока радиоизлучения спокойного Солнца в этом диапазоне частот может быть представлена согласно [16] выражением:

$$F_\oplus = 2{,}79 f^{1{,}748} \quad \text{при } 6000 < f < 400000 \text{ МГц},$$

где $F_\oplus$ измеряется в единицах sfu = 10^{-22}Вт/(м^{2}Гц), а частота f в МГц.

Многолетние наблюдения показывают, что полное радиоизлучение солнца на λ = 10,7 см варьирует в пределах 69 < $F_{10,7}$ < 230 sfu в зависимости от солнечной активности, имеющей 10 – 13 летний цикл, и имеет небольшие флуктуации, связанные с более кратковременными вариациями вращения солнца с периодом приблизительно 30 дней. Плотность потока излучения Солнца зависит от числа солнечных пятен N_S. Согласно [16] зависимость $F_{10,7}$ от N_S может быть представлена в виде:

$$F_{10,7} = 67 + 0{,}572\, N_S + (0{,}0575\, N_S)^2 - (0{,}0209\, N_S)^3 \text{ sfu}.$$

В) В Канаде Доминионская Радиоастрофизическая обсерватория (ДРАО) ведет ежедневный мониторинг потока солнечного излучения на частоте 2800 МГц (λ = 10,7 см) с 1947 г., данные которого выкладываются на сайте ftp://ftp.geolab.nrcan.gc.ca/data/solar_flux/daily_flux_values/fluxtable.txt.

На других длинах волн согласно [17] поток излучения можно оценить по значениям $F_{10,7}$ по формуле:

$$F_f = (0{,}0002 F_{10,7} - 0{,}01)(f - 2800) + F_{10,7}, \qquad (12.39)$$

а на λ = 53 см значение $F_{5,3}$ можно рассчитать по более точной формуле:

$$F_{5,3} = 0{,}71(F_{10,7} - 64) + 126. \qquad (12.40)$$

С уменьшением длины волны плотность потока радиоизлучения повышается, но сокращаются пределы его вариации (табл. 12.6) в зависимости от солнечной активности [17, 18].

По данным ДРАО следует, что значений $F_{10,7}$ в течение многолетнего периода варьирует относительно среднего в пределах ± 2,5 dB (рис. 12.9).

В течение более короткого периода (1 – 2 года) пределы вариации становятся еще меньше. Так из рисунка 12.10 следует, что значения $F_{10,7}$ в течение 2012 – 2013 гг. изменялись в пределах не более ± 1,0 dB, но высокое разрешение во времени обнаруживает кратковременные выбросы значений $F_{10,7}$, связанные со вспышками солнечной активности, когда нельзя проводить калибровку МРЛ.

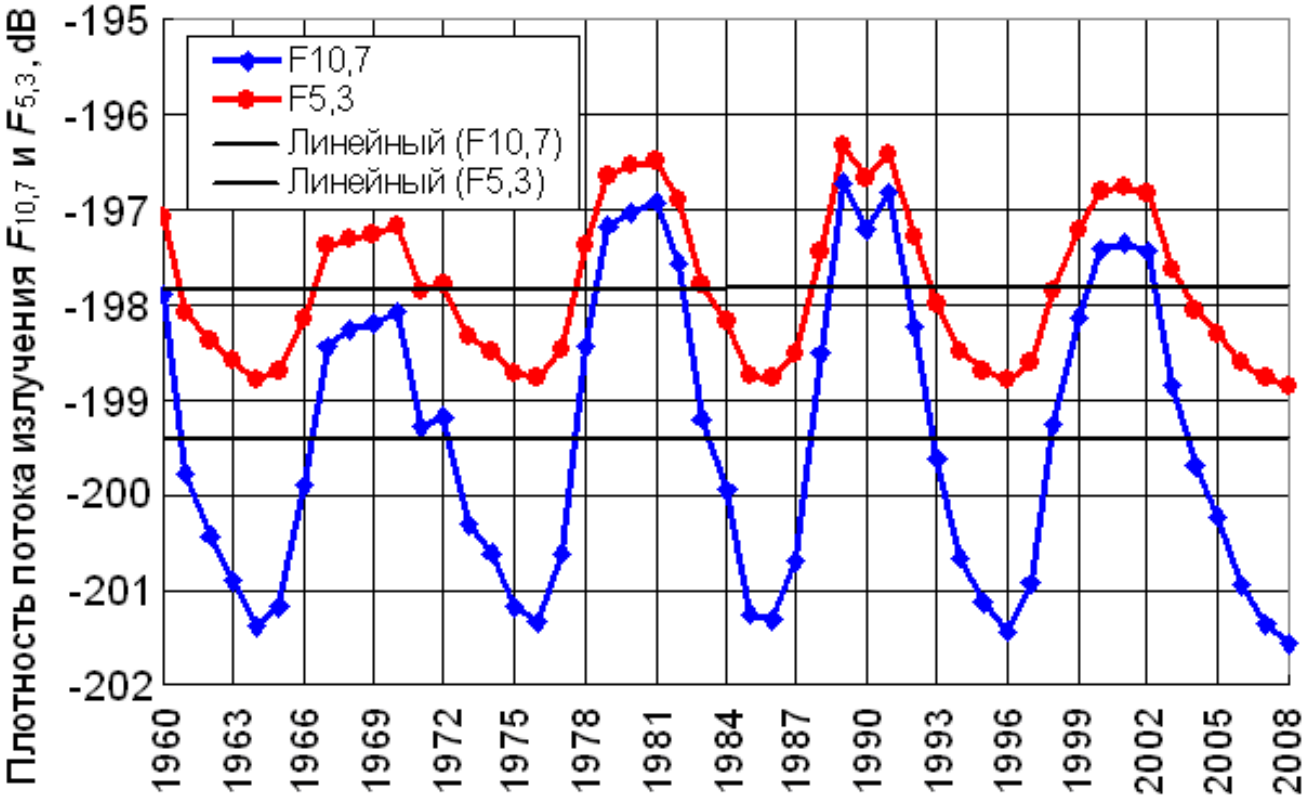


Рис. 12.9 – Временной ход значения $F_{10,7}$ и $F_{5,3}$ в dB в период с 1960 по 2008 г.

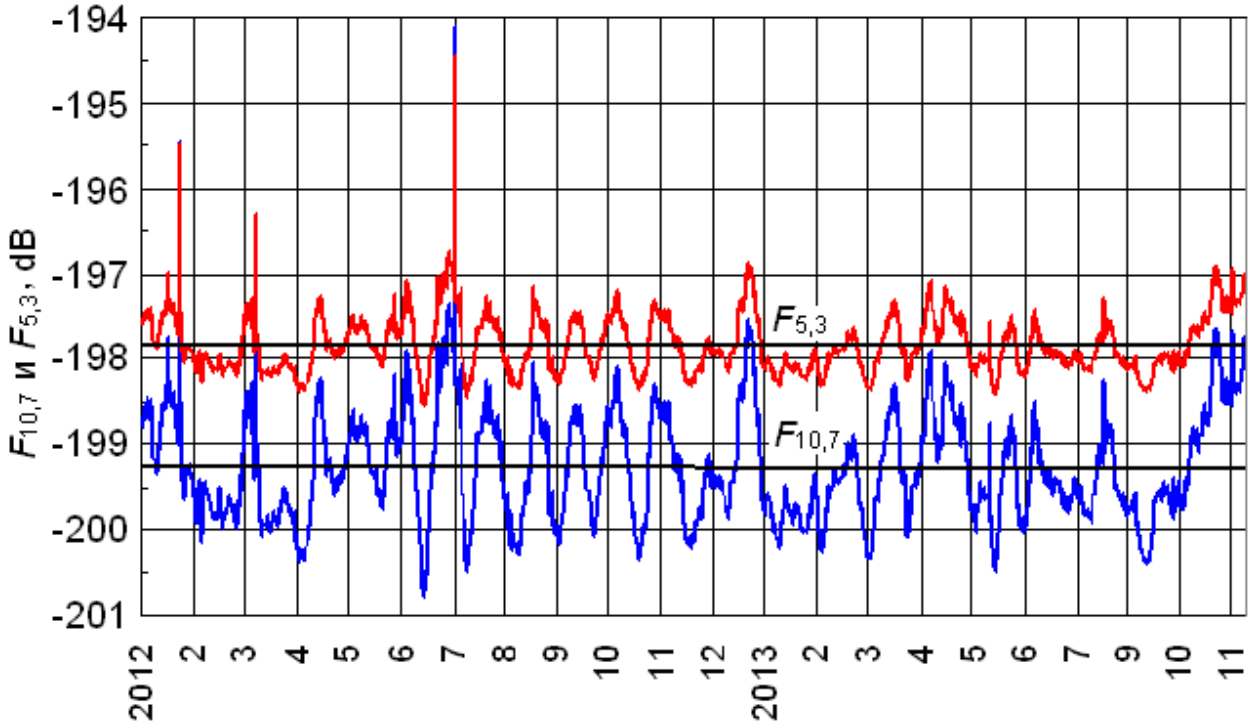


Рис. 12.10 – Временной ход значения $F_{10,7}$ (синий цвет) и $F_{5,3}$ (красный цвет) в dB в 2012 – 2013 гг. с выбросами, связанными с кратковременными вспышками солнечного излучения

Таблица 12.6 – Пределы вариации и средние значения потока излучения на разных длинах волн

Длина волны, λ, см	Тип МРЛ	Пределы вариации поток радиоизлучения солнца по многолетним данным		
		F, sfu	*10lgF*, dB	$10lg\overline{F}$, dB
3,12	«МРЛ-5» 1-й канал	253 ÷ 377	-196,0 ÷ -194,2	-195,2
5,3	«ДМРЛ-С»	138 ÷ 290	-198,6 ÷ -195,4	-196,8
10,17	«МРЛ-5» 2-й канал,	79 ÷ 257	-201,0 ÷ -195,9	-198,8
10,7	ТРЛК «12А6»	69 ÷ 230	-201,6 ÷ -196,4	-199,4

Г) На основе этих закономерностей предложены методы определения коэффициента усиления антенны ДМРЛ [19], а в работе [20] метод калибровки МРЛ (определения его метеорологического потенциала). В основу метода такой калибровки положено измерение радиолокационной отражаемости метеообъектов относительно известного значения потока солнечного радиоизлучения, как и в случае стандартной мишени.

При отсутствии облаков и углах визирования Солнца более 20^0 потери на ослабление в газах атмосферы на длинах волн более 5,3 см не превышают 0,1 dB и мощность радиоизлучения солнца, принятая приемником ($\hat{P}_S$, Вт) может быть представлена выражением:

$$\hat{P}_S = F_{10,7} \cdot \Delta f \cdot A_e \cdot 10^{-0,1\xi} \cdot 10^{-0,1(k_г + k_{об} + k_{ос})}, \qquad (12.41)$$

где $F_{10,7}$ – поток солнечного излучения на частоте 2800 МГц (Вт/м^{2}Гц);

Δf – ширина полосы пропускания приемника МРЛ (Гц); A_e – эффективная площадь антенны (м^2); ξ – потери в волноводном тракте на прием в dB; где $k_г$, k_o и k_{oc} – коэффициенты ослабления в газах атмосферы, облаках и осадках (dB).

Поток солнечного радиотеплового радиоизлучения согласно (12.41) с учетом $A_e = G\lambda^2/4\pi$ равен:

$$F_S = \frac{4\pi \hat{P}_S}{\Delta f \cdot G\lambda^2 \cdot 10^{-0,1\xi}}. \qquad (12.42)$$

Значение $\hat{P}_S$ измеряется относительно уровня шумов приемника МРЛ:

$$\hat{P}_S = P_0 10^{0,1N_S}, \qquad (12.43)$$

где N_S – превышение уровня шумового излучения солнца над уровнем шумов приемника P_0 в dB.

С учетом (12.43) выражение (12.42) перепишется в виде:

$$F_S = \frac{4\pi}{\lambda^2} \frac{P_0 \cdot 10^{0,1N_S}}{G \cdot \Delta f \cdot 10^{-0,1\xi}} \qquad (12.44),$$

где значение P_0 выражается в Вт; N_S – в dB; λ – в м; $F_{10,7}$ – в Вт/м^{2}Гц; Δf в Гц; ζ – в dB.

Радиолокационная отражаемость метеообъектов (при условии полного заполнения луча) в соответствии с формулой (7.17) может быть представлена в виде:

$$\eta = \frac{\overline{P}_r\, 4^5 \pi^2 \ln 2 \cdot R^2}{P_\tau\, G^2 \lambda^2 c \tau \theta^2 10^{-0,1\xi} 10^{-0,1\zeta}}. \qquad (12.45)$$

Принимая во внимание, что средняя мощность радиоэха метеообъектов также измеряется относительно уровня шумов приемника МРЛ в dB (т.е. $\overline{P}_r = P_o 10^{0,1N}$) и, выражая отражаемость метеообъектов через поток мощность радиоизлучения солнца, получим:

$$\frac{\eta}{F_S} = \frac{4^5 \pi^2 \ln 2 \cdot P_0 \cdot \lambda^2 \cdot G \cdot \Delta f \cdot 10^{-0,1\xi}}{P_\tau\, G^2 \lambda^2 c \tau \theta^2 10^{-0,1\xi} 10^{-0,1\zeta} 4\pi \cdot P_0 10^{0,1N_S}} 10^{0,1N} R^2. \qquad (12.46)$$

После очевидных преобразований имеем:

$$\eta = \frac{F_S 4^4 \pi \ln 2 \cdot \Delta f}{P_\tau\, G \cdot c \cdot \tau \cdot \theta^2 \cdot 10^{-0,1\zeta} \cdot 10^{0,1N_S}} 10^{0,1N} R^2 \qquad (13.47)$$

или $\eta = \dfrac{10^{0,1N} R^2}{C_S}$, где константа МРЛ по радиоизлучению солнца равна:

$$C_S = \frac{P_\tau\, G \cdot c \cdot \tau \cdot \theta^2 \cdot 10^{-0,1\zeta} \cdot 10^{0,1N_S}}{F_S 4^4 \pi \ln 2 \cdot \Delta f} \text{ см}^3 \qquad (12.48)$$

или

$$10\lg C_S = 10\lg P_\tau + 10\lg G + 20\lg\theta - \zeta + N_S - 10\lg F_S - 10\lg\Delta f + 77{,}31 \text{ dB} \qquad (12.49)$$

Исходя из выражения (12.49) для калибровки МРЛ по солнцу помимо измеряемых значений N_S и F_S необходимо знать значения штатных параметров МРЛ: $P\tau$, G, τ, θ, Δf и ζ.

Д) *Пример калибровки радиолокатора «МРЛ-5»:*

На «МРЛ-5» Ардонского отряда Северо-Кавказской ВС при юстировке на Солнце 04.09.2013 г. получено, что значение N_S = 6,5 dB при значениях параметров МРЛ: P_τ = 400 кВт ($4\cdot10^5$ Вт); G = 41 dB; $\tau = 2\cdot10^{-6}$ с; $\theta = 1{,}5^0$ (0,02857 радиан); $\Delta f = 3\cdot10^7$ Гц; потери в волноводном тракте на передачу ζ = 2 dB. По данным DRAO в этот день $F_{10,7}$ = 109,3 sfu (или -199,6 dB/Вт). Пересчет этого значения на длину волны λ = 10,17 см по формуле (12.39) показал, что F_S = 111,1 sfu или -199,54 dB/Вт.

Подставив в формулу (12.49) экспериментальные значения N_C = 6,5 dB, F_S = -199,54 dB и других параметров, получим, что константа Ардонского «МРЛ-5» равна:

$$10lgC_S = 57 + 41 - 31{,}6 - 2 + 6{,}5 + 199{,}54 - 77{,}77 + 77{,}31 \approx 270 \text{ dB}.$$

Е) Для проведения калибровки МРЛ по солнцу в системе управления противоградовыми операциями «АСУ-МРЛ» предусмотрено:

– вычисление координат солнца с помощью встроенной астрономической программы;

– автоматическое наведение антенны МРЛ на солнце;

– расчет ошибок ориентирования и горизонтирования МРЛ;

– измерение уровня шумов приемного устройства P_0 (dB), сигнала от солнца P_S (dB) и его превышения над уровнем шумов $N_S = F_S - P_o$ (dB).

Значение F_S для нужной длины волны пересчитывается по формуле (12.39) по значениям $F_{10,7}$, полученным на сайте ДРАО.

Ж) На рисунке 12.11 представлены результаты такой калибровки сети «ДМРЛ-С», установленных на различных позициях. Из этого рисунка следует, что уровень излучения солнца превышает уровень собственных шумов приемника «ДМРЛ-С» на N_C = 8,6 ± 0,6 dB, а константа «ДМРЛ-С», размещенных на разных позициях, равна $10lgC_M$ **=** 275,6 ± 0,6 dB.

И) Калибровку МРЛ (ДМРЛ) по солнцу *нельзя проводить в период всплеска радиоизлучения*, которое для 10 см МРЛ определяется по значению N_S > 12 dB. Рекомендуется переждать период таких всплесков, так как их длительность редко превышает 1 час [20].

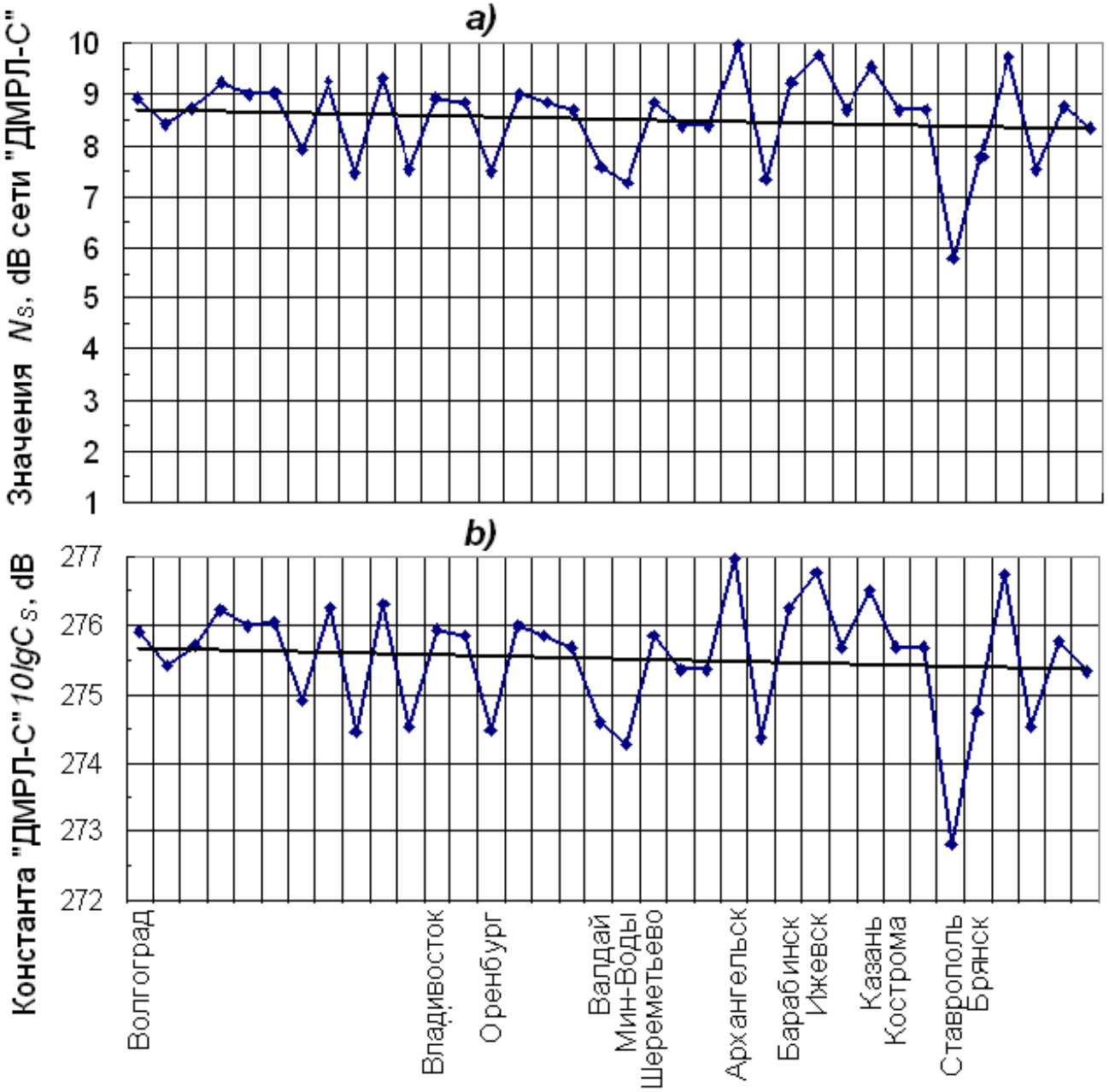


Рис. 12.11 – Значения N_C (**а**) и констант «ДМРЛ-С» на сети Росгидромета (***b***) по данным калибровки по солнечному радиоизлучению

к) Калибровка МРЛ по солнцу позволяет одновременно провести проверку его ориентирования и горизонтирования. Этот метод калибровки МРЛ имеет неоспоримые преимущества так как солнце – единая цель для МРЛ и (ДМРЛ), имеющая известные координаты и известный сигнал, одинаковый для всех позиций независимо от того, где они расположены.

Благодаря этому калибровка МРЛ и ДМРЛ по солнцу может быть стандартной процедурой, обеспечивающей сравнимость радиолокационных данных о количестве осадков и явлениях погоды, исключающей их нестыковки.

12.4.4.5 ***Контроль стабильности потенциала МРЛ***

В процессе эксплуатации МРЛ «ДМРЛ» его потенциал может изменяться из-за изменения уровня шумов приемника, мощности передатчика, потерь в волноводном тракте, расстройства системы автоподстройки частоты и др.

Поэтому для контроля стабильности показаний МРЛ в автоматизированной системе «АСУ-МРЛ» реализован метод автокалибровки МРЛ в каждом цикле обзора по внешним целям, в качестве которых используются несколько массивов местных предметов, имеющих наиболее мощное радиоэхо. В целях снижения влияния метеоцелей и рефракции радиоволн эти массивы местных предметов выбираются в разных секторах азимута на относительно небольших удалениях [10]. После градуировки и калибровки «АСУ-МРЛ» записывается файл местников и автоматически измеряется эталонное значение средней мощности радиоэха совокупности всех массивов местников на малых углах возвышения ($\overline{P}_{эт}$, dB). Это эталонное значение вносится в акт калибровки МРЛ и в систему автоматического введения поправок на изменение потенциала МРЛ в каждом цикле обзора.

При проведении метеонаблюдений осуществляется автоматическое измерение текущего значения в каждом цикле обзора ($\overline{P}_i$, dB). Значения $\overline{P}_{эт}$ и $\overline{P}_i$ вносятся в заголовок файла обзора, и отображаются внизу панели файлов обзора: в скобках – эталонное значение $\overline{P}_{эт}$, за скобками – значение $\overline{P}_i$ в данном цикле обзора. В случае расхождения эталонного $\overline{P}_{эт}$ и текущего значений $\overline{P}_i$ в программном обеспечении «АСУ-МРЛ» предусмотрен автоматический ввод поправок на изменение потенциала МРЛ в каждом цикле обзора на каждой длине волны.

При расхождении значений $\overline{P}_{эт}$ и $\overline{P}_i$ более чем на 5 dB значение $\overline{P}_i$ высвечивается красным цветом, указывая на необходимость профилактического ремонта МРЛ.

13 ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЗАСЕВА ОБЛАКОВ

Успешность предотвращения града определяется совершенством физических принципов воздействия на градовые процессы и качеством реализации этих принципов (концепций) с помощью применяемых технических средств, определяемой:

– эффективностью применяемой радиолокационной системы управления противоградовыми операциями;

– возможностями средств засева по обеспечению оперативного засева требуемого объема облака на требуемой высоте с требуемой концентрацией активных льдообразующих ядер. Это в свою очередь зависит от типа и технических характеристик средств воздействия, применяемых реагентов и способа их внесения.

Для засева градовых и градоопасных облаков используются:

– авиационные ракеты, пиропатроны, бортовые пиротехнические и ацетоновые генераторы кристаллизующих частиц, грануляторы сухого льда (CO_2), разбрызгиватели жидкого азота или пропана;

– наземные генераторы, обеспечивающие внесение кристаллизующих частиц в приземном слое атмосферы;

– фейерверочный комплекс, состоящий из мортиры и гранаты, обеспечивающий внесение кристаллизующих частиц в подоблачный слой

– артиллерийские комплексы, состоящие из зенитной пушки и противоградового снаряда, обеспечивающего возгонку взрывом кристаллизующих и гигроскопических реагентов;

– ракетные комплексы, состоящие из многоствольных ракетных установок и противоградовых ракет, обеспечивающих генерацию кристаллизующих частиц по траектории полета или в точке.

13.1 Авиационные средства засева облаков

13.1.1 Авиационные пиротехнические шашки (пиропатроны), применяемые в разных странах, обычно имеют калибр 26 и 50 мм.

В Канаде и США пиропатроны калибра 26 мм отстреливаются через 300 м с борта самолета, летящего над вершиной фидерных облаков на высоте 6000 – 7500 м. Эти пиропатроны содержат 20 г льдообразующего состава с AgI, имеющего порог кристаллизующего действия -3,8 ^{o}C, время горения 35 сек, вертикальная протяженность пути засева около 1000 м, выход активных льдообразующих ядер с одной шашки при температуре -10 ^{o}C составляет $\approx 1{,}4 \cdot 10^{14}$ шт.

Шашки калибра 50 мм имеют массу 197 г, вертикальную протяженность пути засева в пределах 2400 – 3000 м, надежность зажигания 92%, опасность от не зажженных шашек не более чем от крупных градин.

Для контроля точности внесения реагента в требуемую зону облака используются шашки – маркеры, которые содержат дипольные отражатели, выбрасываемые в начале и конце горения льдообразующего состава. Наблюдения за перемещением дипольных отражателей проводятся 10 см радаром, удаленным до 60 км.

13.1.2 Авиационные ракеты вертикального взлета

Применение пиротехнических шашек требует применения высотных самолетов и в ряде случаев, когда небо затемнено наковальнями градовых облаков (особенно ночью), месторасположение цели визуально определить становится невозможно. В связи с этим в США были сконструированы ракеты вертикального взлета, запускаемые с самолета, летящего под основанием конвективных облаков. Они достигают уровня изотермы -5 ^{o}C и имеют следующие характеристики [1]:

- габариты: калибр 42 мм, длина 210 мм;
- масса: общая 426 г, топлива 114 г, реагента с AgI 100 г;
- время работы двигателя: 0,62 сек;
- скорость на конце активного участка траектории: 330 м/с;
- стабилизация на траектории: вращением вокруг оси со скоростью от 5 до 10 об/мин;
- высота полета: 2,5 км над уровнем запуска;
- путь диспергирования реагента: 200 м.

13.1.3 Авиационные пиротехнические генераторы WMI содержат 100 г пиротехнического состава с AgI, обеспечивают выход активных льдообразующих частиц с 1 г состава при температуре -10 ^{0}C около 10^{13} частиц, и устанавливаются на закрылках самолета (рис. 13.1а). Засев ими осуществляется в области восходящих потоков с расходом AgI около 0,5 кг/час. Генераторы зажигаются пилотом по данным датчика восходящих потоков при полете ниже основания облака на 600 м [2].

13.1.4 Авиационные ацетоновые генераторы обеспечивают формирование льдообразующего аэрозоля при сжигании раствора AgI в ацетоне и используются для засева градовых облаков с подоблачного слоя так же, как и бортовые пиротехнические генераторы.

а) пиротехнический генератор; б) ацетоновый генератор

Рис. 13.1 – Авиационные генераторы льдообразующего аэрозоля AgI применяемые для засева градовых облаков с подоблачного слоя [2]

13.1.5 Авиационные грануляторы твердой углекислоты (CO_2) и распылители жидкого пропана или азота (рис. 13.3) используются в основном в научно-исследовательских проектах предотвращения града. Гранулы углекислоты сбрасываются с вершины фидерных облаков, а распылители пропана и азота при пролете через них. Их высокая льдообразующая эффективность обусловлена тем, что они приводят к глубокому переохлаждению и пересыщению водяного пара в объеме засева, которое приводит к замерзанию облачных капель и формированию ледяных кристаллов. Льдообразующая эффективность гранул при падении через облачную среду достигает 10^{12} с 1 г при температуре ниже -1,0 ^{o}C.

13.1.6 Самолеты для засева градовых облаков, используемые в США, Канаде, Германии, Греции и других странах представляют собой легкие одно или двухместные самолеты спортивного типа. Раньше использовались самолеты типа «Т-18», «Т-28», «Т-33», «С-45Н», имеющие потолок до 8 км. С целью защиты от повреждения градинами лобовая часть фюзеляжа и крыльев этих самолетов обычно бронировалась. Предусматривалось также увеличение мощности двигателя в 1,5 раза с учетом возможности обледенения при полете в переохлажденных облаках.

В настоящее время в проектах ПГЗ ряда стран применяются [2] легкие самолеты типа: турбореактивный самолет «LearJet», турбинные самолеты «Cessna 340», «Cheyenne-II» и «Ceneca-II» (рис. 13.2).

Турбореактивный самолет **«LearJet WMI 35A»** имеет потолок 14,6 км, позволяющий засевать градовые облака с вершины облаков. Оборудован системой глобальной спутниковой навигации (GPS), бортовым МРЛ, антиобледенительной системой и датчиками:

– температуры и давления воздуха, точки росы;
– спектра аэрозоля «PCASP»;
– спектра облачных капель «FSSP»;
– водности облака «LWC-100»;
– счетчиком концентрации кристаллов «CCN»;
– двумерным датчиком размера крупных капель «2D-C»;
– двумерным датчиком размера и формы крупных частиц «2D-P»;
мгновенной скорости вертикальных потоков, углов атаки и крена.

Рис. 13.2 – Самолеты, применяемые для авиационного засева облаков:
а) турбореактивный самолет «LearJet»; ***б)*** турбинный самолет «Cessna 340»; ***б)*** турбинный самолет «Cheyenne-II»; ***б)*** турбинный самолет «Ceneca-II»

Турбинный самолет «Cessna 340» имеет полетное время 6 часов, скорость 180 узлов, потолок до 9,6 км, герметичный, имеет также антиобледенительные системы, 3 рабочих места (для пилота и двух борт наблюдателей), кислородные маски на случай разгерметизации, DME и GPS, две VHF средства связи и радионавигации, а также бортовой радар 3,2 см диапазона. Двигатель бензиновый турбинный мощностью 310 л.с., максимальный вес без загрузки 2,0 т, вес полезной нагрузки 0,86 т, максимальная скорость 450 км/час, крейсерская 420 км/час, скороподъемность до 0,5 км/мин, объем топливных баков до 2,0 тысяч литров. Габариты: длина 10,3 м, высота 3,66 м, размах крыльев 11,6 м.

Турбинный самолет «**Cheyenne-II»** имеет два турбинных двигателя по 620 л.с., потолок 9,6 км, полетное время до 6 часов, воздушную скорость более 210 км/час, скороподъемность до 0,8 км/мин. Кабина герметизируется и обогревается. Самолет оборудован антиобледенитель-

ными системами (тепловой, пневматической и электрической) фюзеляжа и ведущих поверхностей крыльев, ветрового стекла, и пропеллера. Имеет не менее 4 мест кроме пилота, кислородные маски, DME и GPS, двойную систему VHF связи между самолетом, центром управления, компьютеризированный радар, высотомер, датчики угла атаки и крена, компьютер навигации и приемник маяков и автопилот.

Габариты самолета: диаметр пропеллера 2,36 м, длина 10,6 м, высота 3,9 м, размах крыльев 13 м, вместимость топливных баков 1445 л, взлетный вес 4,08 т, вес полезной нагрузки 1,8 т.

Турбовинтовой самолет «Ceneca-II» имеет потолок 7,6 км, крейсерскую скорость 300 км/час, скороподъемность 0,6 км/мин, взлетный вес до 2,07 т, вес полезной нагрузки 0,62 т, длину 8,7 м; высоту 2,8 м, размах крыльев 11,8 м, мощность двигателя на высоте 3,6 км 215 л.с., вместимость топливных баков 560 л.

13.1.7 Российскими аналогами зарубежных авиационных средств воздействия на облачные процессы являются [3]:

– пиропатроны «ПВ-26» и «ПВ-50» (рис. 13.3), отстреливаемые с борта самолета вниз и в стороны с помощью кассет «АСО-24» и «КДС-155», монтируемых в нижней части фюзеляжа (рис. 13.3*в* и 13.3*е*);

– самолетные аэрозольные генераторы «САГ-2» и «САГ-26» (рис. 13.3*д* и 13.3*е*);

– распылитель жидкого азота – генератор мелкодисперсных частиц льда авиационный «ГМЧЛ-А» (рис. 13.3*и*);

– контейнеры для порционного сброса в вершину облака нейтральных грубодисперсных порошков «К-66» и «КМГУ», обеспечивающие инициирование нисходящих потоков.

Таблица 13.1 – Технические характеристики авиационных пиропатронов и генераторов

Характеристика генератора	ПВ-50-95	ПВ-26-95	ПВ-26-01	САГ-ПМ	САГ-26
Калибр, мм	50	26	26	50	26
Длина, мм	200	78	78	236	260
Масса, г	650	80	80	760	470
Масса заряда, г	210	40	40	150	150
Длина трассы аэрозоля, км	2,5	1,0	2,0	7,5	20
Тип кассетного устройства	КДС-155	АСО-2И	АСО-2И	КУСАГ	АСО-2И
Время работы, с	150	50	70	175	240
Выход активного аэрозоля:					
– при минус 3 °С			$2\cdot10^{13}$	$7{,}5\cdot10^{13}$	$7{,}5\cdot10^{13}$
– при минус 6 °С	$3{,}5\cdot10^{14}$	$6{,}6\cdot10^{13}$	$2\cdot10^{14}$	$7{,}5\cdot10^{14}$	$7{,}5\cdot10^{14}$
– при минус 10 °С	$1{,}2\cdot10^{15}$	$2{,}7\cdot10^{14}$	$8\cdot10^{14}$	$3\cdot10^{15}$	$3\cdot10^{15}$

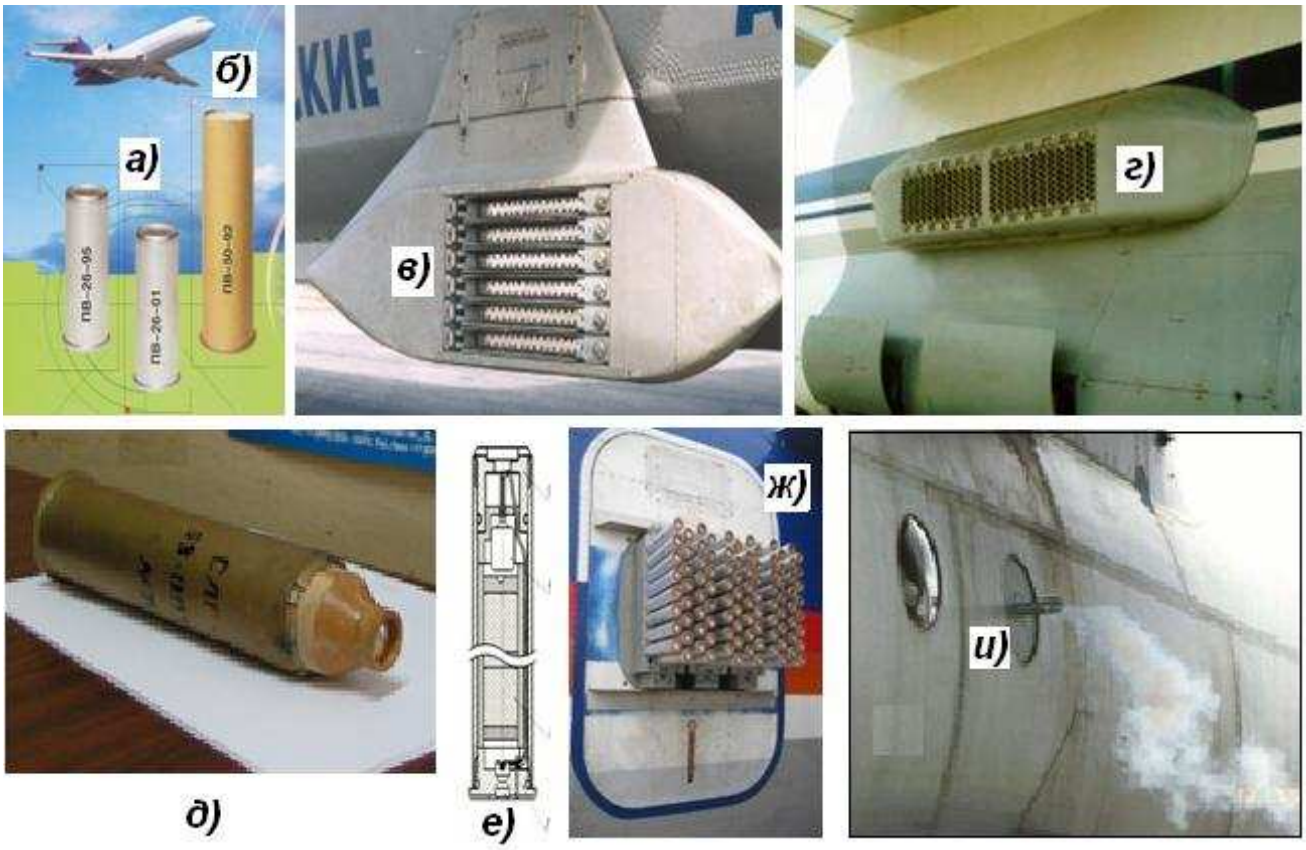


Рис. 13.3 – Российские авиационные средства засева облаков [3, 4]: ***а)*** и ***б)*** – пиропатроны «ПВ-26» и «ПВ-50»; ***в)*** и ***г)*** – кассеты для отстрела пиропатронов «АСО-24» и «КДС-155»; ***д)*** и ***е)*** – самолетные генераторы кристаллизующего аэрозоля «САГ-2» и «САГ-26»; ***ж)*** – кассета для «САГ-26»; ***и)*** – выход азотного «ГМЧЛ-А»

Из таблицы 13.1 следует, что пиропатрон и самолетные генераторы нового поколения («ПВ-26-01», «САГ-ПМ» и «САГ-26») имеют повышенный выход активных льдообразующих частиц в сравнении с аналогами, созданными ранее («ПВ-50-95» и «ПВ-26-95»). Это достигнуто за счет их снаряжения льдообразующим составом «АД-1», имеющим порог кристаллизующей эффективности -3 ^{o}С.

В России и странах СНГ авиационные пиропатроны и генераторы применяются только в работах по искусственному увеличению осадков и улучшению погодных условий над мегаполисами в дни массовых торжеств и спортивных мероприятий (в Москве, Санкт-Петербурге, Ташкенте, Казани и др.). Для этих целей применяются крупнотоннажные самолеты «Ил-18», «Ан-12», «Ан-24», «Ан-28», «Ан-30», «Ан-32», «Ан-72», имеющие высокий потолок и большой вес полезной нагрузки (рис. 13.4). В последние годы освоено применение легкого самолета «М-101» (Гжель), и сверхзвукового самолета «Су-30» [5], оснащенного:

– средствами измерения параметров облаков: датчик температуры «RT105», спектрометр облачных капель «FSSP-100», измеритель

облачных частиц «WMI-2D-C», датчик водности облака «LWC-100», измеритель частиц осадков «2D2-P» и др.;

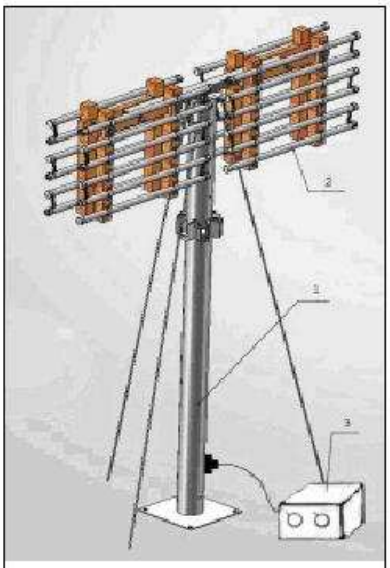
– средствами засева облаков: пиропатроны «ПВ-50», упаковки грубодисперсных порошков; упаковки с сухим льдом и др.

Рис. 13.4 – Самолеты, применяемые для засева облаков в России [3]

13.2 Наземные генераторы льдообразующего аэрозоля

Помимо авиационных, ракетных и артиллерийских средств засева облаков в мировой практике для целей ПГЗ, искусственного увеличения осадков и рассеяния туманов используются наземные генераторы льдообразующего аэрозоля, обеспечивающие внесение льдообразующего аэрозоля в приземном слое атмосферы.

Наиболее современными российскими аналогами являются дистанционно управляемые наземные генераторы «НАГ-05», «НАГ-07», «НАГ-11» (рис. 13.5), разработанные кооперацией ФГУП «НИИПХ», ОАО «ЧПО им. Чапаева» и АНО «Агентство АТТЕХ» [4]. Эти генераторы содержат от 6 до 64 пиротехнических элементов, снаряженных льдообразующими составами «АД-1» и «АДК», обеспечивающими высокий выход кристаллизующих частиц, начиная с температуры -3 ^{o}С. Время их работы варьирует от получаса до 4,5 часов (табл. 13.2) в зависимости от количества пироэлементов, которое может меняться при сборке.



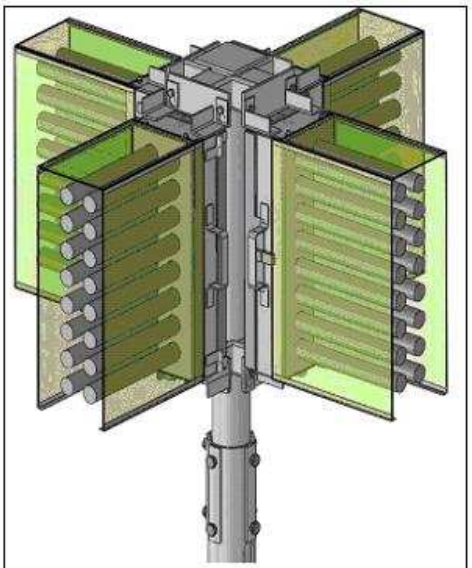


Рис. 13.5 – Наземные аэрозольные генераторы «НАГ-05» и «НАГ-11» [4]

Таблица 13.2 – Основные технические характеристики российских наземных пиротехнических генераторов льдообразующего аэрозоля

Характеристика	НАГ-05	НАГ-07	НАГ-11
Число элементов	6	12	64
Время работы одного элемента, минут	12	6	4
Общее время работы генератора, мин	72 (36)	72 (36)	256 (128, 64, 32…4)
Расход реагента, г/с	3(6)	3(6)	3 (6, 12, 24…196)

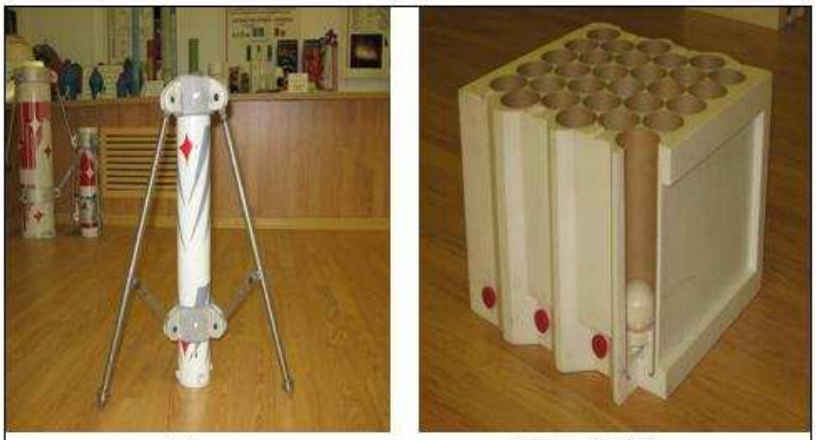
Серьезным недостатком наземных генераторов является то, что вокруг наземных генераторов образуются повышенные концентрации AgI, которые могут привести к вредным экологическим последствиям – гибели полезных и вредных микробов, мутации насекомых, растительного и животного мира. Во избежание этого наземные генераторы следует устанавливать на мачтах, снабженных вентилятором, поднимающим аэрозоль вверх.

13.3 Фейерверочные средства засева облаков

Созданный ФГУП «НИИПХ» фейерверочный комплекс «ГЛА-105» [4], предназначен для АВ на облака путем засева восходящих потоков в подоблачном слое атмосферы льдообразующим аэрозолем с помощью пиротехнических генераторов, разбрасываемых при подрыве изделия.

В состав комплекса входит изделие «ГЛА-105», цилиндрической формы, и пусковая установка (мортира), которая может быть одноствольной и многоствольной (рис. 13.6).

Изделие "ГЛА-105": в сборе и в разрезе



Мортиры для отстрела "ГЛА-105"

Рис. 13.6 – Изделие «ГЛА-105» и мортиры для их отстрела [4]

Изделие «ГЛА-105» состоит из корпуса, электровоспламенителя, вышибного и разрывного зарядов, шара, снаряженного генераторами льдообразующего аэрозоля и замедлителя, инициирующего разрывной заряд через 3,5 с после отстрела. «ГЛА-105» имеет

Технические характеристики «ГЛА-105»:

⇒ высота корпуса 60 мм;

⇒ диаметр корпуса 05 мм;

⇒ полная снаряженная масса 0,8 кг;

⇒ масса льдообразующего состава 0,11 кг;

⇒ время работы изделия 7 ÷ 9 сек;

⇒ система запуска электрическая;

⇒ ток срабатывания не менее 0,5 А;

⇒ выход активных льдообразующих частиц с изделия:

– при температуре -6 °С $2{,}4 \cdot 10^{14}$;

– при температуре -10 °С $1{,}1 \cdot 10^{15}$;

⇒ начальный диаметр аэрозольного облака 50 м;
⇒ начальный объем аэрозольного облака $6{,}5 \cdot 10^4$ м^3;
⇒ начальная концентрация аэрозоля $1{,}7 \cdot 10^{10}$ м^3;
⇒ высота разрыва при угле возвышения 90° не менее 200 м.

Изделие эксплуатируется в интервале температуры от -10 до +45°С, при скорости приземного ветра до 15 м/с.

Отстрел изделий «ГЛА-105» осуществляется из вертикально установленной одноствольной или многоствольной (30 стволов) мортиры с длиной направляющих стальных труб 420 мм, толщиной 3 мм.

Для втягивания льдообразующего аэрозоля в градовое облако изделие «ГЛА-105» необходимо вносить в область конвергенции, где формируется восходящий поток, питающий облако. При этом время достижения основания облака может быть порядка 10 ÷ 12 мин, а время достижения высоты уровня изотерм -3 ÷ -6 ^{o}С – около 15 ÷ 20 мин.

Точечное внесение реагента требует создания многочисленных стационарных пунктов отстрела «ГЛА-105» или применение передвижных пунктов, как это осуществляется в Крыму и Херсонской области Украины в 2008 – 2013 гг.

13.4 Артиллерийские противоградовые комплексы

Артиллерийские противоградовые комплексы (табл. 13.3) состоят из зенитной пушки и противоградового снаряда, обеспечивающего возгонку взрывом кристаллизующих и гигроскопических реагентов.

13.4.1 Артиллерийский противоградовый комплекс «Эльбрус-4» калибра 100 мм (рис. 13.7*а*) в составе зенитной пушки «КС-19» и противоградового снаряда «Эльбрус-4» обеспечивает точное внесение реагента в градовые облака в радиусе 14 км. Благодаря этому комплекс широко применялся с 1963 по 1990 г. в Российской Федерации, Азербайджане, Армении, Грузии, Таджикистане и Узбекистане.

Снаряд «Эльбрус-4» состоит из корпуса, ведущих железомедных поясков для закручивания снаряда по нарезам ствола пушки, заряда взрывчатого вещества (ВВ), содержащего 80 г AgI, дистанционного взрывателя «ДВЭ-3», обеспечивающего подрыв снаряда на заданной дистанции и гильзы с порохом для отстрела снаряда.

В целях хорошего дробления корпуса на безопасные осколки корпус снаряда «Эльбрус-4» выполнен из чугунистой стали. Для этой же цели используется заряд из бризантного ВВ.

Зенитная пушка «КС-19» обеспечивает возможность одиночной стрельбы в режиме ручного наведения, а также режим автоматического заряжания, установки взрывателя и стрельбы под управлением станции

орудийной наводки «СОН-4», «ПУАЗО». Однако в целях безопасности в практике ПГЗ использовался только режим ручного наведения с производством выстрела из укрытия. При этом скорострельность комплекса составляла 1 – 2 снаряда в мин. Такая скорострельность при точечном внесении реагента (в точке взрыва) не позволяет засеять весь объем будущего градообразования в крупномасштабных градовых облаках. Поэтому обычно использовались по две пушки, а в Армении батареи из 4 пушек [20].

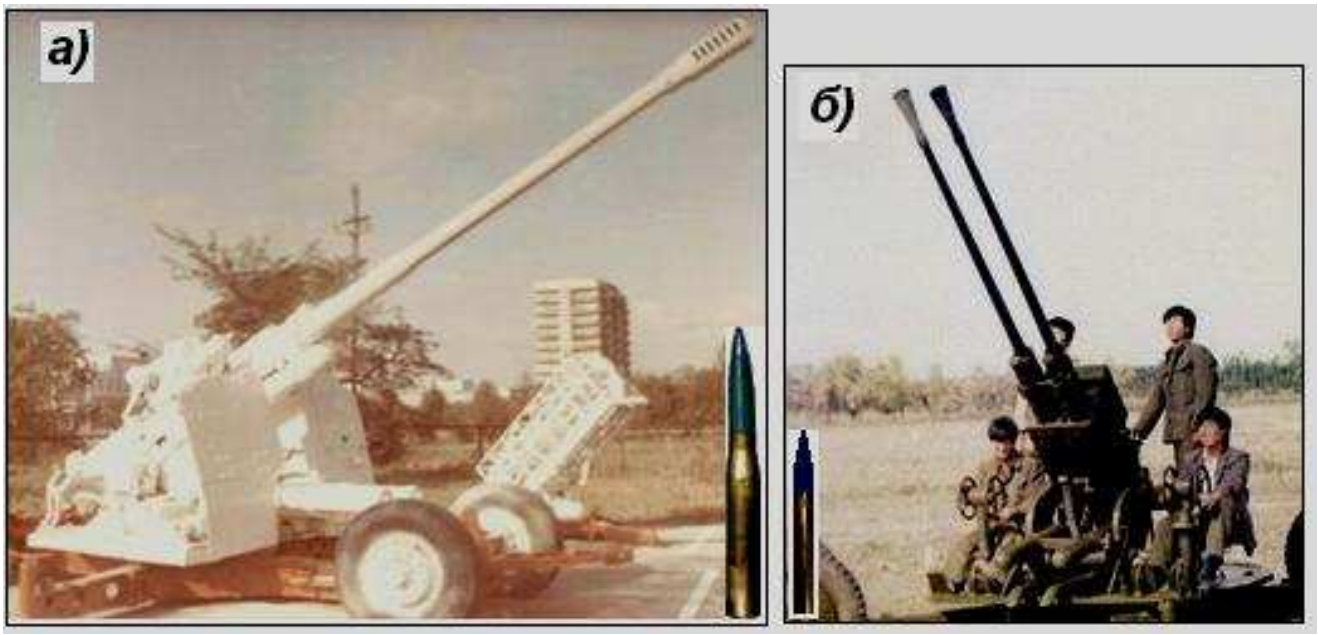


Рис. 13.7 – Артиллерийские комплексы калибра 100 и 37 мм: ***а)*** – российский комплекс «Эльбрус-4»; ***б)*** – комплекс китайского производства

12.4.2 Артиллерийский снаряд «Эльбрус-4М» [13] калибра 100 мм обеспечивал диспергирование в облаке 235 г гигроскопического реагента и создавал в объеме взрыва около 10^{10} частиц NaCl. Он и использовался совместно со снарядом «Эльбрус-4» для реализации комбинированного метода ПГЗ в Грузии.

13.4.3 Артиллерийский комплекс «Эльбрус-3» калибра 130 мм [13] в составе снаряда «Эльбрус-3» и корабельной зенитной пушки «КС-30» обеспечивал засев градовых облаков в радиусе 18 км. Это позволяло значительно сократить число пунктов воздействия. Однако массивность снаряда и пушки в режиме ручной стрельбы ограничивала оперативность засева и требовала увеличения штата обслуживающего персонала до 6 человек. Поэтому широкого применения это комплекс не получил.

13.4.4 Артиллерийский противоградовый комплекс калибра 37 мм (рис. 13.7*б*) в составе снаряда и одноствольной или двуствольной зенитной пушки имеет массовое применение в Китае и Монголии [6]. Разные модификации снаряда содержат от 1 до 3 г AgI. Выход активных

льдообразующих частиц с 1 снаряда составляет около 10^{10} шт.

При диспергировании AgI методом взрыва в облаке взрывных газов формируется полидисперсная коллоидная система, в которой согласно данным теоретического моделирования [8] выход кристаллизующих частиц зависит лишь от массы ВВ и температуры возгонки реагента. Чем больше ВВ содержится в снаряде, тем больше объем облака взрывных газов и, соответственно, больше общее количество формирующихся частиц.

Расчеты показывают, что снаряд «Эльбрус-4» калибра 100 мм, содержащий 82,5 г AgI в льдообразующем составе взрывного действия массой 1610 г, обеспечивает общий выход частиц реагента порядка $3 \cdot 10^{15}$ с максимальным размером около 0,1 мкм. Снаряд калибра 37 мм, содержащий 1 г AgI в виде брикета внутри ВВ массой 110 г, обеспечивает общий выход частиц реагента порядка $2 \cdot 10^{14}$ с размером наибольших из них 0,058 мкм. Однако мелкие частицы проявляют льдообразующую активность при очень низких температурах, а в требуемом температурном интервале от -6 до -10 ^{o}C у снаряда «Эльбрус-4» активными являются около 13% всех сформировавшихся частиц, а у снаряда калибра 37 мм менее 0,005% [7].

По экспериментальным данным [5] один снаряд «Эльбрус-4» дает $4 \cdot 10^{14}$ активных льдообразующих частиц, а снаряд калибра 37 мм всего 10^{10} частиц (табл. 13.3). То есть снаряд «Эльбрус-4», имеющий массу заряда ВВ и реагента примерно в 15 и 80 раз больше, обеспечивает выход активных льдообразующих частиц в $4 \cdot 10^{4}$ раз больше, чем снаряд калибра 37 мм. Таким образом, для повышения выхода активных льдообразующих частиц следует использовать артиллерийские снаряды достаточно большого калибра с большой массой ВВ и реагента.

Таблица 13.3 – Технические характеристики артиллерийских противоградовых комплексов

Характеристика	Эльбрус-4	Эльбрус-4М	Эльбрус-3	Китайский комплекс
Калибр, мм	100	100	130	37
Масса выстрела, кг	26	26	42	1,6
Масса снаряда, кг	12,25	12,25	24	0,8
Масса ВВ, кг	1,61	1,6	3,2	0,11
Тип реагента	AgI	NaCl	AgI	AgI
Масса реагента, г	80	235	160	1 – 3
Радиус действия, км	14	14	19	5
Выход льдообразующих частиц при температуре минус 10 ^{o}C, шт.	$3 \cdot 10^{14}$	10^{10}	$6 \cdot 10^{14}$	$\approx 10^{10}$

13.4.5 При артиллерийском засеве конвективных облаков на их микрофизику и динамику могут действовать в комплексе три разных физических фактора [8]:

– *ударная волна*, может стимулировать импульсы нисходящего потока и при удачном выборе высоты и места взрыва снаряда оказывать динамические эффекты подавления восходящего потока, усиливающиеся в неустойчивой атмосфере;

– *продукты ликвидации*, включая большое количество осколков корпуса, разлетающихся в значительном объеме, могут центрами коагуляции облачной воды и стимулирования осадков за счет трансформации мелкокапельной фракции в крупнокапельную;

– *кристаллизующий реагент*, инициирующий появление ледяной фазы и образование частиц осадков за счет реализации фазовой неустойчивости переохлажденных облаков.

13.5 Ракетные противоградовые комплексы

Ракетные противоградовые комплексы в составе ракетных пусковых установок (ПУ) и ракет обеспечивают оперативную доставку реагента в требуемую часть облака и генерацию кристаллизующих частиц вдоль траектории полета. Во многих странах созданы свои конструкции ПГИ и ПУ, отличающихся по габаритам и техническим характеристикам.

13.5.1 В Аргентине в 1980 – 1982 гг. были созданы противоградовые ракеты калибра 70 и 126 мм «CLAG-1» и «CLAG-2», радиусом действия 5 и 8 км, содержащие 3 и 5 кг кристаллизующего реагента, соответственно. Их пуск осуществлялся из 4 ствольных установок «CL-4» и «CL-4». Они имели низкую надежность функционирования и с 1986 года в Аргентине использовались ракетные комплексы «Алазань» и «Кристалл». В 1986 – 1993 гг. были созданы их аналоги «Аэропаг-1», «Аэропаг-2», однако они не получили практического применения из-за низкой надежности.

13.5.2 В Бразилии были разработаны малогабаритные ракеты калибра 56 мм AG-3000 и SAGA-4000, достигавшие высоты 3000 и 4000 м, соответственно, а также ракета BRITAGRAN калибра 60 мм, которые запускались с вертикально закрепленной направляющей.

13.5.3 В Югославии был создан широкий ассортимент ПГИ [9]:

– малые ракеты «Р-1», «М-59», «М-86» и др., содержащие около 10 г льдообразующего состава с AgI и достигавшие высоты 1000 м;

– с 1969 по 1971 г. ракеты «САКО-1» калибра 80 мм, содержавшие 200 г состава с AgI и достигавшие высоты 3500 м;

– с 1972 до 1974 год применялись ракеты «САКО-2» калибра 80 мм, содержавшие от 400 до 600 г AgI и достигавшие высоты 4200 м;

– с 1974 до 1984 г. применялись «САКО-3» калибра 78 мм, содержавшие от 400 г состава с AgI и достигавшие высоты 3500 м;

– с 1980 г. применялись ракеты «TG-10» и «TG-5» (рис. 13.8*a*) с двигателем калибра 72 мм и отделяющейся головной частью калибра 40 мм, содержащей 400 г льдообразующего состава с AgI. Эффективный радиус засева облаков у ракет «TG-10» и «TG-5» достигает 10 км и 5 км;

– в 1980 годы были созданы ракеты «САКО-6» калибра 78 мм и радиусом действия 7 км, «РР-6» и «РР-8» калибра 72 мм и радиусом действия 6 и 8 км, «МТТ-8» и «МТТ-10» калибра 81 мм и радиусом действия 8 и 10 км, содержащие от 0,4 до 2 кг льдообразующего состава.

Ликвидация отработавших корпусов всех этих ракет осуществляется взрывом шашки ВВ. Их совершенствование проводилось в направлении увеличения радиуса действия, массы льдообразующего состава и повышения льдообразующей эффективности реагентов. В первых вариантах ракет использовался реагент «Т-0» с 50% содержанием AgI. Потом были созданы пиротехнические составы с 10 и 20% содержанием AgI, а также состав «R-32» с 25% содержанием AgI, обеспечивший выход активных льдообразующих частиц $2{,}5 \cdot 10^{12}$ с 1 г состава (при -10 ^{o}C), что на порядок выше, чем у реагента «Т-0». Реагенты «VTG-12», «VTG-8» и «VTG-8A» имеют выход активных частиц с 1 г состава $2{,}5 \cdot 10^{12}$, $4{,}6 \cdot 10^{12}$ и $5 \cdot 10^{12}$, соответственно, а реагент «МТТ» – $4{,}2 \cdot 10^{12}$.

В настоящее время производство противоградовых ракет осуществляют Сербия, Македония, Хорватия. Сербские ракеты типа «Trajal» (TD-6 и TD-6B) и македонская ракета «МТТ-9» калибра 55 мм имеют радиус действия около 5,5 км, содержат 400 г реагента «R2» с выходом активных кристаллизующих частиц около $1{,}7 \cdot 10^{15}$ с 1 ракеты.

Для пуска ПГИ разных типов созданы ракетные установки с ручным наведением, имеющие 3, 4 или 6 направляющих («SAKO», «UUL», «TGL», «TGL», «UIKL-94»), а также установки с ручным наведением по углу возвышения и автоматизированным наведением по азимуту «SAVIKO UL», имеющие 6 и 12 направляющих. Для защиты ПГИ от влаги и механических повреждений практикуется применение транспортно-пусковых контейнеров, которые заменяют направляющие ПУ.

13.5.3 В Швейцарии и Австрии применялись небольшие пороховые ракеты (рис. 13.8*b*).

13.5.5 В Китае для защиты около 42 млн га производится и применяется огромное количество ПГИ нескольких типов [7]:

– с моноблочным снаряжением головных частей;
– с кассетным снаряжением головных частей (как в ПГИ «Кристалл»);
– с отделяемой (как у ПГИ «TG-10») головной частью.

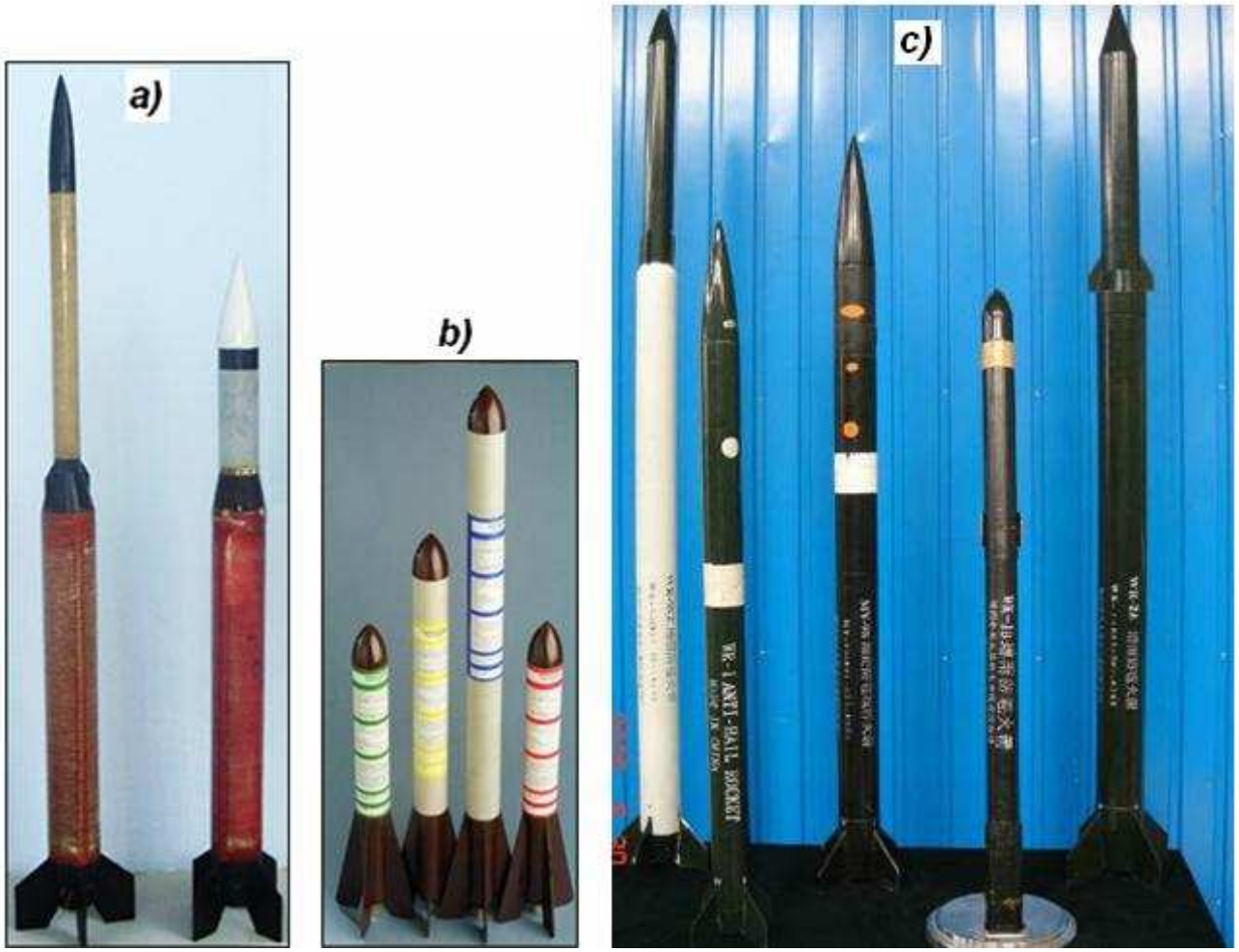


Рис. 13.8 – Противоградовые ракеты сербского (*a*), швейцарского (*b*) и китайского (*c*) производства

Основные технические характеристики ПГИ китайского производства (рис. 13.8*c*) приведены в таблице 13.4. Для их пуска используются стационарные, автомобильные и даже корабельные ракетные установки (рис. 13.9), имеющие 3, 4 или 8 направляющих, в том числе и установки с дистанционным управлением.

Таблица 13.4 – Основные технические характеристик китайских ПГИ

Техническая характеристика	WR-18	WR-98	WR-98Z	WR-1D
Калибр, мм	82	82	82	57
Длина, мм	1440	1450	1580	1060
Масса, кг	8,5	8,3	9,0	4,3
Максимальная высота полета, км	8,0	8,5	9,0	6,0
Масса реагента на основе AgI, г	725	725	630*	220
Выход активных частиц с ПГИ при -10 °С, шт.	$1{,}8 \cdot 10^{15}$			
Время диспергирования реагента, с	45	≤ 35	30	≤ 25
Система обеспечения безопасности	парашют	парашют		
Надежность функционирования, %	99	99		
Скорость опускания на парашюте, м/с	≤ 8	≤ 8		
Температура эксплуатации, °С	-30 до 45			

*15 пироэлементов, отстреливаемых на траектории полета.

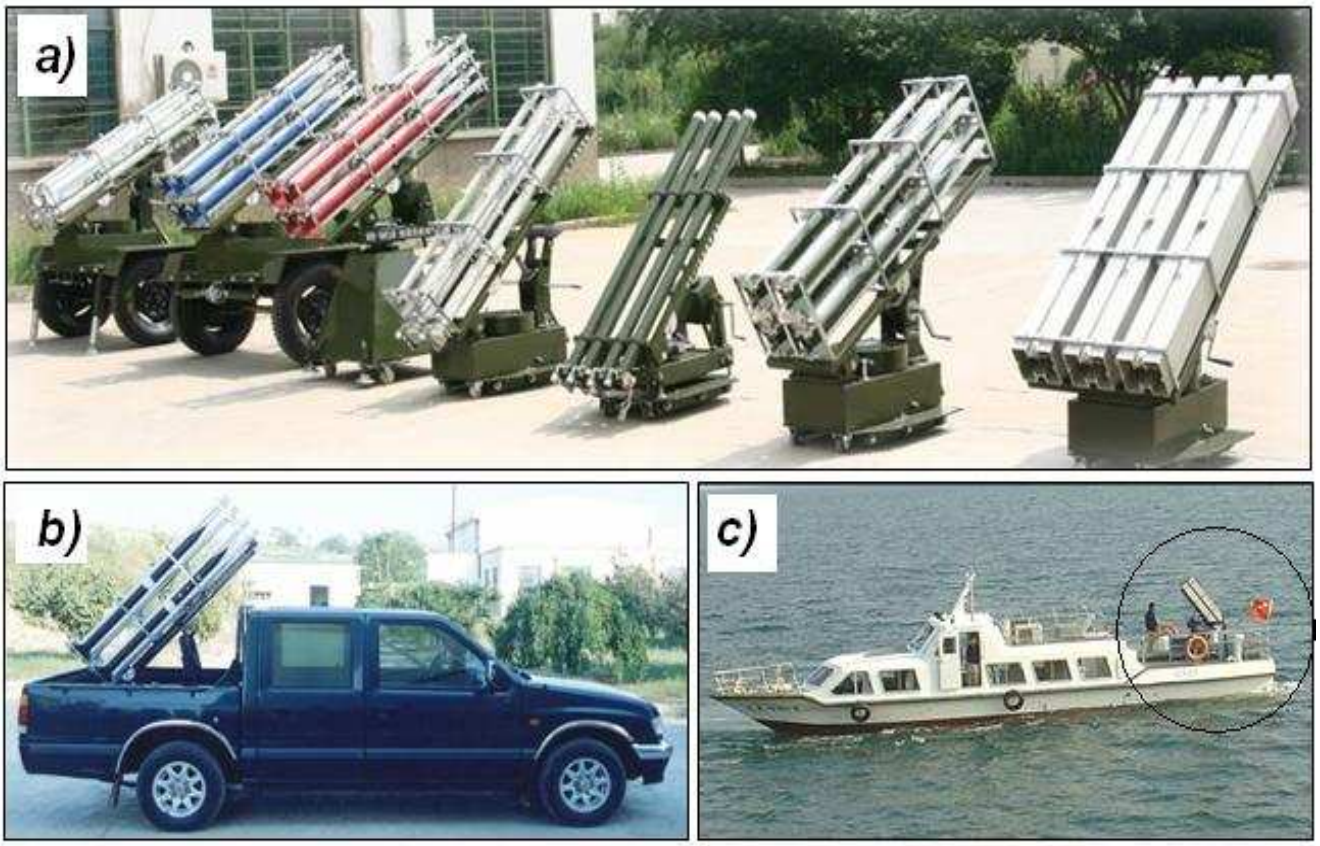


Рис. 13.9 – Ракетные установки китайского производства:
a) – передвижные и стационарные; *b*) – автомобильная; *c*) – корабельная

13.5.6 В Болгарии ранее широко использовался ракетный комплекс «Алазань». В настоящее время для защиты 1,5 млн га применяются малогабаритные противоградовые ракеты «Loza» калибра 55 мм со складывающимся оперением (рис. 13.10*a*) и ее модификации «Loza-2», «Loza-3» и («Loza-6»), которые созданы ООО **«**Stroyproekt» на основе модернизации македонской ракеты «МТТ-9М» [10].

Кроме того, фирмой «Arsenal 2000 JSCo» создано ПГИ «Lazur» калибра 82 мм (рис. 13.10*b*).

Технические характеристики этих ПГИ представлены в таблице 13.5, а внешний вид комбинированной ПУ – на рисунке 13.10*c*.

Рис. 13.10 – Болгарские ПГИ «Loza-6» с пусковым контейнером (***a***), ПГИ «Lazur» (***b***) и комбинированная ракетная установка для пуска этих ПГИ (***c***)

Таблица 13.5 – Технические характеристики ПГИ производства Болгарии

Техническая характеристика	Loza	Loza -2	Loza -3	Loza -6	Lazur
Длина контейнера, мм	1045	1045	1410	-	-
Наружный диаметр контейнера, мм	60	60	60	-	-
Калибр ракеты, мм	55	55	55	60	83
Масса ракеты, кг	2,8	3,25	5,0	3,2	10,5
Общая масса ракеты и контейнера, кг	3,85	3,65	6,4	-	-
Радиус засева облаков	7,0	7,5	7,5	10	8,5
Масса льдообразующего состава, кг	0,4	0,4	0,4	0,9	0,4
Содержание AgJ в % / в г	12,5 / 50	12,5 / 50	12,5 / 50	8 / 72	8 / 32
Выход активных частиц при -10 ^{o}C:					
– с 1 г состава	$1{,}2\cdot10^{13}$	$1{,}2\cdot10^{13}$	$1{,}2\cdot10^{13}$	$4{,}0\cdot10^{13}$	$2{,}4\cdot10^{13}$
– с 1 ракеты	$4{,}8\cdot10^{15}$	$4{,}8\cdot10^{15}$	$4{,}8\cdot10^{15}$	$3{,}6\cdot10^{16}$	$9{,}5\cdot10^{15}$
Время диспергирования реагента, с	30	30	32	900	33 ± 1,5
Время самоликвидации, с	38	38	42		42

13.6 Российские ракетные противоградовые комплексы

Многолетний опыт противоградовых работ в различных регионах мира и сотрудничество специалистов в области модификации погоды, пиротехники и ракетной техники позволили создать в России экологически чистые пиротехнические кристаллизующие составы и противоградовые комплексы трех поколений, превышающие аналоги по радиусу действия, точности, целевой нагрузке, надежности и безопасности применения.

13.6.1 Ракетные комплексы «ПГИ-М», «Облако-М», «Алазань-2М»

Ракетные комплексы ***первого поколения*** «ПГИ-М» и «Облако-М» были созданы в СССР в НИИ «Точмаш» в 1962 – 1968 гг. и снаряжены лучшими по тому времени кристаллизующими реагентами на основе AgI и PbI_2 [11]. Комплексы «ПГИ-М» и «Облако-М» применялись в Алазанской долине Грузии, Молдавии и Крымской области Украины и Узбекистане.

Комплекс «ПГИ-М» (рис. 13.11) состоит из ракеты калибра 60 мм и одноствольной «ТКБ-01» или четырехствольной ПУ «ТКБ-04». Ракета «ПГИ-М» обеспечивает возгонку 60 г пиротехнического состава с 2% содержанием AgI в радиус 5 км на высоте до 4 км, после чего корпус ПГИ дробится на мелкие осколки взрывом 300 г ВВ.

Комплекс «Облако» (рис. 13.11) состоит из одноименной ракеты радиусом действия 8 км, ПУ «ТКБ-06» и взрывмашинки, служащей для ввода в действие электрокапсюльной втулки, воспламеняющей пиротехническую шашку двигателя. Ракета «Облако» состоит из головного дистанционного взрывателя «ТА-5», головной части с шашкой активного дыма (ШАД), ракетного двигателя, работающего в течение 6,5 с, парашютного отсека и донного механизма «МДД-1», который вводит в действие вытяжной и основной парашюты, предназначенные для спуска стеклопластикового корпуса ракеты со скоростью (6 ÷ 8 м/с). Первоначально ШАД содержала 5,47 кг кристаллизующего реагента на основе PbI_2, который впоследствии для обеспечения экологической безопасности изделия был заменен на реагент «П-50-04-11» с 2% содержанием AgI [11]. ПУ «ТКБ-06» имеет четырехствольный пакет направляющих, механизмы качания по углу места и вращения по азимуту. Наведение пакета направляющих по угловым координатам осуществляется вручную по соответствующим шкалам, а пуск ПГИ с помощью конденсаторной взрывмашинки.

Малый радиус действия ракеты «ПГИ-М», громоздкость ракеты «Облако» (калибр 125 мм, длина 2163 мм, масса 35 кг) совместно с ручными ПУ, имеющими малое количество стволов не обеспечивали требуемой оперативности засева мощных градовых облаков. Поэтому

применение комплексов «ПГИ-М» и «Облако» было прекращено по мере перехода на более скорострельный комплекс «Алазань», разработанный «НИИ прикладной химии» (г. Сергиев Посад) по техническому заданию противоградовой службы министерства сельского хозяйства Грузии [12].

Комплекс «Алазань» сначала применялся в Грузии, а после серьезной модернизации, переименованный в комплекс «Алазань-2М», применяется в Молдавии и Украине, на Северном Кавказе, в Закавказье, Средней Азии, Болгарии, Аргентине, Бразилии и Венгрии.

Комплекс «Алазань» (рис. 13.11) состоит из 12-ствольной ПУ «ТКБ-040», одноступенчатой и двухступенчатой ракет «Алазань-1Ст» и «Алазань-2», корпус которых ликвидируется на безопасные для населения и объектов осколки взрывом шашки ВВ с кумулятивной выемкой. Комплекс непрерывно совершенствовался в плане повышения технологичности конструкции ПГИ и ПУ, радиуса действия ПГИ, его льдообразующей эффективности, надежности функционирования и безопасности применения [12]. В течение ряда лет (1988 – 2006 гг.) НИИП «Дарг» под научным руководством НПЦ «Антиград» были созданы ракеты «Алазань-3», «Алазань-ЧМ-15», «Алазань-5» и «Алазань-6». «Алазань-6» широко применяется в настоящее время [13].

Рис. 13.11 – Ракетные противоградовые комплексы первого поколения

Ракета «Алазань-6» [13] представляет собой оперенный неуправляемый реактивный снаряд калибра 82,5 мм (рис. 13.12). Она имеет двухрежимный двигатель (с временной паузой между режимами 6 секунд), головную часть, а также ленточный ликвидатор корпуса отработавшего изделия. Наличие двух режимов работы двигателя обеспечивает

повышенную дальность и пологие траектории полета для внесения реагента в заданный облачный слой в радиусе от 8,4 до 12,2 км в зависимости от высоты пусковой позиции и высоты засева облаков. «Алазань-6» транспортирует 660 г высокоэффективного льдообразующего состава «АД-1» с 8% содержанием AgI. Одна ракета вносит по траектории полета на пути около 6 ÷ 7 км $6{,}7 \cdot 10^{15}$ активных льдообразующих частиц. Безопасность применения ракеты в густонаселенных районах обеспечивается дроблением бумажно-бакелитового корпуса на безопасные осколки после завершения работы ШАД.

Замена сосредоточенного заряда ВВ массой 400 г, применяемого в ПГИ «Алазань-2», на ленточный заряд позволил сократить массу ВВ в ПГИ «Алазань-6» до 236 г и сократить радиус поражения осколками с 25 до 6 м.

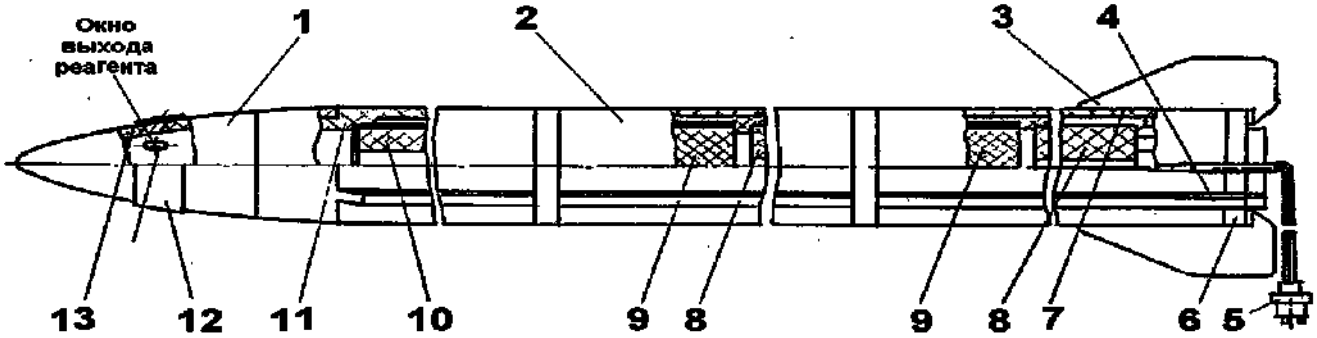


Рис. 13.12 – Устройство ПГИ «Алазань-6»: 1 – ГЧ; 2 – двигатель; 3 – перо стабилизатора; 4 – лента ВВ для дробления корпуса; 5 – вилка с проводами; 6 – блок сопловой; 7 – камера двигателя; 8 – шашка пороховая; 9 – пиротехнический замедлитель; 10 – шашка активного дыма; 11 – корпус ГЧ; 12 – защитная лента; 13 – обтекатель

Для пуска ПГИ «Алазань-6» применяются различные модификации ПУ «ТКБ-040» и «Элия-МР», имеющие ручное управление, а также ПУ «Элия» и «Элия-2», имеющие автоматизированное управление.

13.6.2 Ракетные противоградовые комплексы второго поколения

В 1981 – 1986 гг. НПО «Сплав» и НИИПХ по техническим заданиям НПЦ ПГЗ ВГИ были созданы *ракетные противоградовые комплексы второго поколения «Небо» и «Кристалл»*, унифицированные по калибру, составам снаряжения головных частей, идеологии построения ПУ (многоствольность, дистанционное наведение, скорострельность), но отличающихся системами обеспечения безопасности ПГИ [14].

13.6.2.1 ***Ракетный комплекс «Небо»*** (рис. 13.13) состоит из ракеты калибра 83 мм, имеющей эффективный радиус действия 13 км, 18-ствольной ПУ «МС-280Н» с электромеханическими приводами и пультом дистанционного управления (ПДУ). Ракета «Небо» состоит из двигателя с

сопловым блоком и складывающимся в калибр оперением, парашютного контейнера, головной части, содержащей 1,12 кг кристаллизующего реагента и головного дистанционного взрывателя «ДГВ-Н», служащего для поджига ШАД через 3,5 с после старта. Заряд двигателя на основе пастообразного топлива обеспечивает мощный разгон ракеты до скорости 950 м/с и повышенную дальность полета. В конце работы ШАД выдается форс огня, который приводит в действие вышибной заряд, приводящий к разделению корпуса ракеты на две половины и выбросу парашютов, на которых опускаются обе части [14].

ПУ "МС-280Н" и ракета "Небо" ПУ "ТКБ-0183" и ракета "Кристалл" ПУ "ТКБ-040" и ракета "Алазань-6"

Рис. 13.13 – Ракетные противоградовые комплексы второго поколения

13.6.2.2 ***Ракетный комплекс «Кристалл»*** (рис. 13.13) состоит из ракет «Кристалл-1» и «Кристалл-2», применяемых в горных и равнинных районах, соответственно, 12-ствольной ПУ «ТКБ-0183» с электромеханическими приводами и ПДУ. Ракеты «Кристалл-1» и «Кристалл-2» содержат двухрежимный двигатель с сопловым блоком и жестким оперением, кассетную головную часть с 28 пиротехническими элементами, головной дистанционный взрыватель «ТК-1» или «ТК-2» для ввода в действие головной части, а также систему самоликвидации на основе заряда ВВ с кумулятивной выемкой для дробления бумажно-бакелитового корпуса по всей длине. Каждый из 28 пиротехнических элементов с массой реагента 11,5 г, отстреливаемых через 0,25 ÷ 0,3 км траектории полета, может создавать $1{,}3 \cdot 10^{14}$ льдообразующих частиц и засевать около 0,5 км по вертикали [14]. Сочетание засева по вертикали с пуском серии ракет по азимуту обеспечивает объемный засев облаков.

Повышенный до 12 – 13 км радиус действия ПГИ «Небо» и «Кристалл», пологие траектории полета ракет обеспечивают сокращение требуемого числа ПВ и успешный засев крупномасштабных ОВ с перекрытием ошибок при локализации места засева. Применение многоствольных (18 и 12 стволов) ПУ «МС-280Н» и «ТКБ-0183» с

дистанционным электромеханическим наведением, как видно из таблицы 13.7, обеспечивает требуемый темп засева ОВ любой категории, включая сверхмощные крупномасштабные градовые облака. Применение комплексов «Небо» и «Кристалл» обеспечило повышение эффективности ПГЗ, однако высокая стоимость ПГИ и ПУ ограничила масштабы и продолжительность их применения.

13.6.3 Ракетные противоградовые комплексы третьего поколения

В целях дальнейшего повышения эффективности и удешевления технических средств ПГЗ были разработаны малогабаритные ракетные противоградовые комплексы ***третьего поколения*** [15 – 17]. В основу их создания положены следующие концепции:

– автоматизация противоградовых операций с целью исключения источников объективных и субъективных ошибок;

– повышение льдообразующей эффективности пиротехнических составов и генераторов кристаллизующих частиц;

– повышение радиуса действия ракет и точности их внесения;

– повышение безопасности и экологической чистоты ракет;

– снижение себестоимости ПГИ, ПУ и системы ПГЗ за счет сокращения расхода ПГИ, числа ракетных пунктов и персонала.

Для реализации этих концепций были созданы противоградовые комплексы, состоящие из малогабаритных ракет с повышенным радиусом действия «Алан-2», «Алазань-9», «Ас» и автоматизированных ПУ с автоматизированным управлением «Элия-2».

13.6.3.1 *Ракетный противоградовый комплекс «Алан»*

Кооперацией ОАО НПО «Искра», ОАО «НИИПМ» и ОАО «Мотовилихинские заводы» (г. Пермь) под научным руководством НПЦ «Антиград» в 1999 – 2001 г. был создан ***противоградовый комплекс «Алан»*** [15] в составе ПГИ «Алан-2» калибра 69 мм и ПУ «Алан-МЗ» с дистанционным управлением (рис. 13.14).

ПГИ «Алан-2» состоит из двигателя, соплового блока, стабилизатора со складывающимся в калибр оперением, парашютной системы, порохового аккумулятора давления (ПАД) и устройства воспламенения двигателя ПДО-3. Для снаряжения двигателя ПГИ впервые использовано льдообразующе топливо, обеспечивающее реактивную тягу и засев облаков льдообразующими частицами на всей траектории полета. Применение льдообразующего топлива, созданного в ОАО «НИИПМ», позволило сократить габаритно-массовые характеристики ПГИ «Алан-2» в несколько раз по сравнению с ПГИ «Алазань-6», «Кристалл» и «Небо», увеличить массу полезной нагрузки (реагента) до 2,2 кг, что в 3,3 раза

больше, чем у ПГИ «Алазань-6». Испытания в НПО «Тайфун» показали, что выход активных быстродействующих льдообразующих ядер с 1 г льдообразующего топлива составляет не менее $5 \cdot 10^{12}$ при температуре -10 ^{o}С, а с одной ракеты $1{,}1 \cdot 10^{16}$.

Применение ПАД обеспечило высокую скорость старта ПГИ (не менее 90 м/с), что уменьшило влияния приземного ветра на направление полета.

Парашютная система служит для опускания алюминиевого корпуса отработавшей ракеты с безопасной скоростью.

Складывающееся оперение дало возможность осуществлять пуск ПГИ «Алан-2» из гладкоствольной трубы и создать ПУ «Алан-М3» с 36 стволами при относительно малых габаритах (рис. 13.14).

ПУ "МС-280Н" и ПГИ "Алан-2"

ПУ "Элия" и "Элия-МР" и ПГИ "Алазань-5" и "Алазань-6"

ПУ "Элия-2" для пуска ПГИ семейства "Алазань"

ПГИ "Ас", "Алан-3" и "Алазань9"

ПУ "Элия-2" для пуска ПГИ "Ас" и "Алан-3" с минометным стартом

Рис. 13.14 – Ракетные противоградовые комплексы третьего поколения

Пуск ПГИ «Алан-2» осуществляется при углах от 65 до 75°, при которых быстро достигается требуемая высота засева и сокращается радиус «мертвой» зоны (без засева облаков) до 2 км. Радиус действия

11,5 км и пологие траектории протяженностью более 9 км в 1 км слое обеспечивают удобство засева малых и крупномасштабных ОВ.

Однако, несмотря на очевидные достоинства этого комплекса высокая стоимость ПГИ «Алан-2» и ПУ «Алан-М3» ограничили масштабы и продолжительность его применения на практике ПГЗ.

Следует отметить, что ОАО НПО «Искра» и ОАО «НИИПМ» по ТЗ НПЦ «Антиград» разработано и находится в стадии испытаний более дешевое малогабаритное ПГИ «Алан-3», являющееся аналогом ПГИ «Алан-2» с уменьшенными габаритно-массовыми характеристиками.

13.6.3.2 Противоградовый комплекс «Алазань-Элия»

Кооперацией ВНИИП «Дарг», ФГУП «НИИПХ», НПЦ «Антиград», ЧПО им. Чапаева и АНО «Агентство АТТЕХ» в 2004 ÷ 2011 гг. разработан ракетный противоградовый комплекс в составе ПГИ «Алазань-9» и автоматизированной ПУ «Элия».

ПГИ «Алазань-9» (рис. 13.15) представляет собой – оперенный неуправляемый реактивный снаряд калибра 60 мм [16], обеспечивающий эффективный засев облаков в радиусе от 9,2 до 11,4 км в зависимости от высоты засева и стартовой позиции (табл. 13.6).

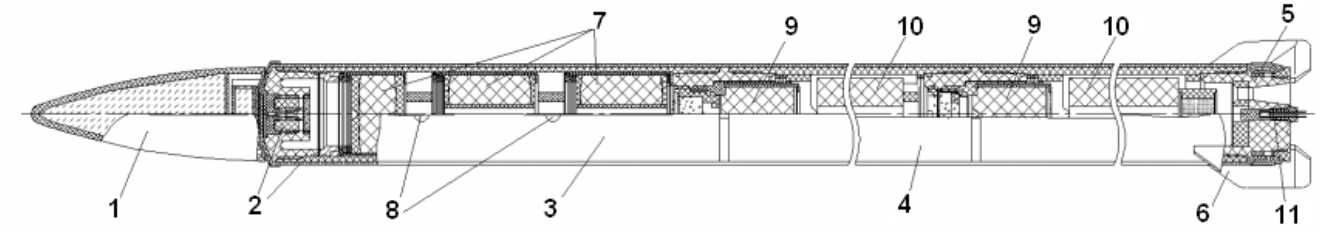


Рис. 13.15 – Малогабаритное ПГИ «Алазань-9» [16]: 1 – обтекатель; 2 – система обеспечения безопасности; 3 – головная часть; 4 – двигатель; 5 – сопловой блок; 6 – перо стабилизатора; 7 – шашка активного дыма; 8 – газовыходные отверстия; 9 – пиротехнический замедлитель; 10 – баллистический порох; 11 – электровоспламенитель

ПГИ содержит стартовой и маршевый реактивные двигатели, сопловой блок с жестким оперением, головной обтекатель, внутри которого размещается шашка кристаллизующего реагента и систему самоликвидации корпуса отработавшего ПГИ. Стартовый двигатель обеспечивает повышенную до 50 м/с скорость схода с направляющей, что снижает влияние приземного ветра на траекторию полета ПГИ.

Генератором льдообразующего аэрозоля является маршевый двигатель, генерирующий активные быстродействующие ядра кристаллизации, вносимые в облако через газовыходные отверстия в головной части. Для снаряжения ракеты используется новый

высокоэффективный пиротехнический состав АД-1 с 8% содержанием AgI, разработанный ФГУП «НИИПХ» совместно с АНО «Агентство АТТЕХ».

Применение двухступенчатого двигателя позволяет повысить эффективный радиус действия и пологие траектории. Ликвидация корпуса отработавшего ПГИ осуществляется взрывом лент ВВ, проложенных вдоль корпуса с двух сторон.

Для пуска ПГИ «Алазань-9» НПЦ «Антиград» была разработана автоматизированная ПУ «Элия». Она может запускаться также с ПУ «Элия-МР» и «Элия-2», снаряженных пакетом направляющих калибра 60 мм.

13.6.3.3 П*ротивоградовый* комплекс *«Ас-Элия»*

Кооперацией ОАО «НИИПМ», НПП «ИРВИЗ» и НПЦ «Антиград» в 2007 – 2014 гг. создан автоматизированный ракетный комплекс ***«Ас-Элия»*** в составе малогабаритной ПГИ «Ас» и автоматизированной ПУ «Элия-2»***.***

ПГИ «АС» (рис. 13.16) представляет собой реактивный снаряд калибра 57 мм, состоящий из двигателя с сопловым блоком, складывающимся в калибр оперением и стартовым ускорителем [17].

Двигатель снаряжен льдообразующим топливом с 2% содержанием AgI, генерирующим активные быстродействующие ядра кристаллизации по всей трассе полета. Применение стартового газогенераторного ускорителя обеспечивает скорость схода ПГИ из пусковой трубы около 90 ± 10 м/с, благодаря чему влияние приземного ветра на направление полета ПГИ сведено к минимуму.

Рис. 13.16 – Малогабаритное ПГИ «Ас»: 1 – обтекатель; 2 – передняя часть корпуса; 3 – задняя часть корпуса; 4 – сопловой блок; 5 – складывающееся в калибр оперение стабилизатора; 6 – газогенераторный стартовый ускоритель; 7 – провода для подключения к ПУ

ПГИ «Ас» имеет минимальные по сравнению с аналогами габаритно-массовые характеристики: длина изделия составляет 613 мм, стартовая масса 1,22 кг, из которых 0,83 кг составляет масса реагента (табл. 13.6). Эффективный радиус засева облаков достигает 10,5 ± 0,7 км, а выход льдообразующих частиц с 1 ПГИ ($2{,}4 \cdot 10^{16}$) выше, чем у аналогов.

Пуск ПГИ «Ас» осуществляется из гладкоствольной трубы при углах возвышения от 60 до 80°. При этом обеспечиваются пологие траектории с радиусом «мертвой» зоны 1,5 ÷ 2,0 км (рис. 13.17).

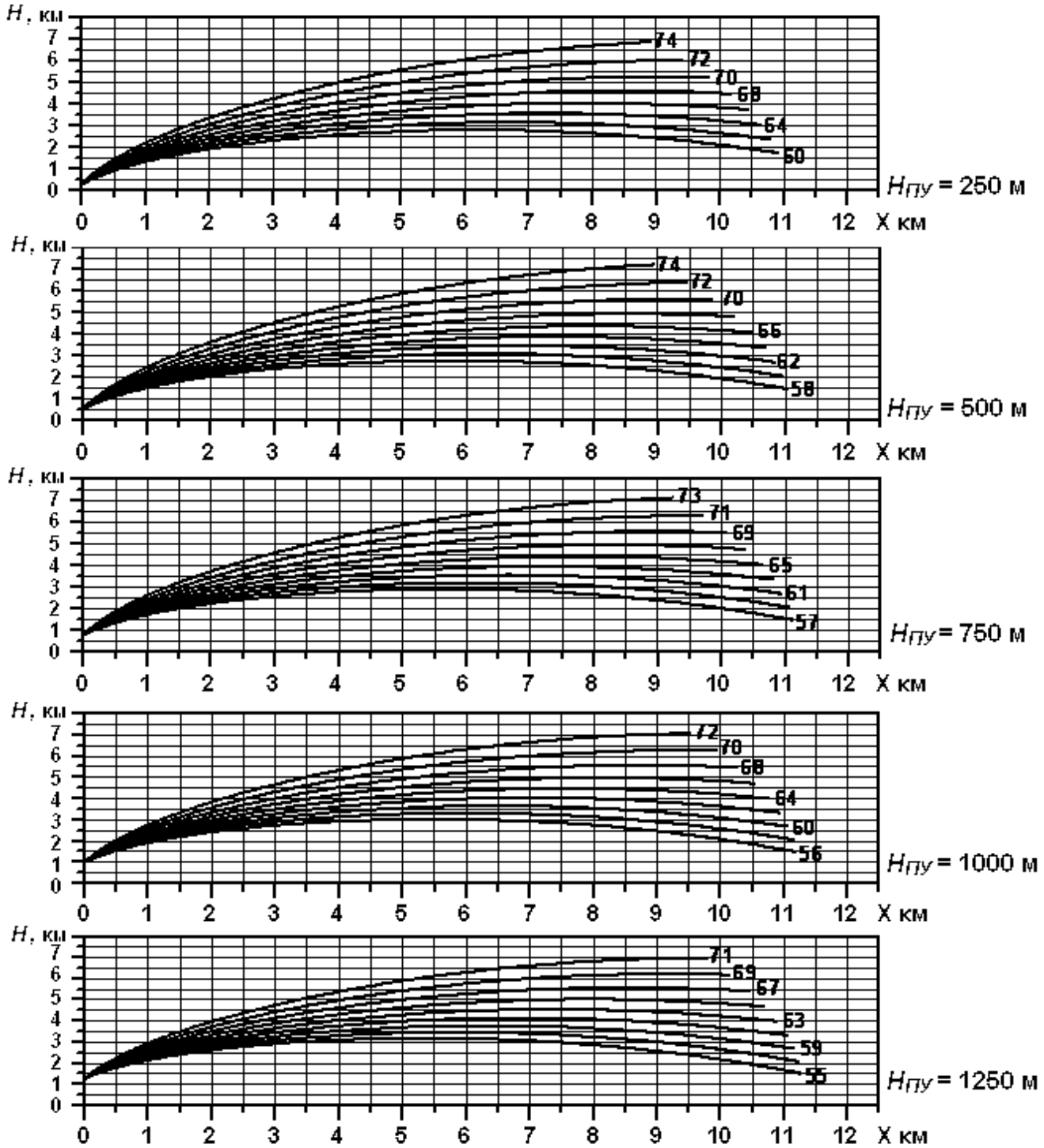


Рис. 13.17 – Траектории ПГИ «Ас» при разных углах пуска с указанной высоты над уровнем моря

Из таблицы 13.6 следует, что малогабаритные ПГИ третьего поколения по сравнению с приведенными аналогами имеют более приемлемые для практического применения радиус действия, эффективность снаряжения, высокую стартовую скорость. Особенно это относится к ПГИ «Ас», который имеет более высокий выход ЛОЯ, минимальные габариты и массу, более низкую себестоимость и дробление корпуса на безопасные осколки без применения ВВ, что облегчит его применение в густонаселенных районах.

Таблица 13.6 – Основные технические характеристики ПГИ разных поколений

Технические характеристики	Комплексы первого поколения			Комплексы второго поколения					Комплексы третьего поколения			
	ПГИ-М	Облако-М	Алазань-2М	Небо	Кристалл	ТГ-10	WR-18	Алазань-6	Лоза	Алан-2	Алазань-9	Ас
Калибр, мм	82,5	125	82,5	82,5	82,5	75/40	82	82,5	55	69	60	57
Длина изделия, мм	421	2163	1456	2130	1956	1050	1440	1602	910	920	1342	613
Стартовая масса, кг	3,1	35	8,6	15	12	4,3	8,5	8,8 ± 0,2	2,8	4,4	4,4± 0,1	1,22
Эффективный радиус засева облаков, км	4,5	8,0	8,0	13,0	12,0	10,0	8,0	10,2±1,3	7,5	11,5±1,0	9,2 ± 1,2	10,5± 0,7
Длина пути засева на требуемой высоте, км	1,5	5,0	5	8,0	8,0	6,0	5,0	7,0	2	10,0	8,0	9,0
Масса реагента, г	225	5000	630	1200	320	400	725	660	400	2200	700	830
Количество AgI, г	1,2	100,0	12,6	24,0	6,4	10,9	10,1	26,4		44,0	56,0	16,6
Выход ЛОЯ с одного ПГИ: – при темпер. -10 ^{0}C; – при темпер. -6 ^{0}C.	 $5\cdot10^{14}$ $5\cdot10^{13}$	 $2\cdot10^{16}$ $2\cdot10^{15}$	 $3\cdot10^{15}$ $3\cdot10^{14}$	 $1\cdot10^{16}$ $1\cdot10^{15}$	 $3{,}5\cdot10^{15}$ $1{,}5\cdot10^{15}$	 $4\cdot10^{14}$ $4\cdot10^{13}$	 $2\cdot10^{15}$ $2\cdot10^{14}$	 $6.6\cdot10^{15}$ $2\cdot10^{15}$	$1{,}2\cdot10^{16}$	 10^{16} 10^{16}	 $6{,}6\cdot10^{15}$ $2{,}0\cdot10^{15}$	 $2{,}2\cdot10^{16}$ $5{,}6\cdot10^{15}$
Продолжительность засева облаков, с	20	43 ± 4	35 ± 4	52 ± 4	55 ± 4	40 ± 4	45 ± 4	30 ± 3	30	52 ± 4	35 ± 4	48 ± 4
Система обеспечения безопасности*	1	2	1	2	1	1	2	1	1	2	1	3
Масса ВВ, кг	0,3	0,0	0,48	0,0	0,36	0,02	0,0	0,24	-	0,0	0,02	0,0
Скорость схода с ПУ, м/с	30	18	23	60	25	-	-	24 ± 2	-	120 ± 5	50 ± 5	90 ± 10
Безопасность для населения	0,999	0,998	0,9997	0,995	0,9995	0,995	-	0,99999	0,99	0,9995	0,99999	0,99999
Количество направляющих ПУ	4	4	12	18	12	12	8	6	4	36	20	36
Скорострельность с перенаведением, мин$^{-1}$	2	1	6	12	12	3	6	6	4	15	15	15

*Система обеспечения безопасности: 1 – дробление корпуса ПГИ взрывом; 2 – опускание корпуса ПГИ на парашюте; 3 – дробление корпуса ПГИ без применения ВВ.

13.6.4 Ракетные пусковые установки

Для пуска ПГИ «Алазань-6» используются различные модификации ПУ «ТКБ-040», которые постепенно заменяются на ПУ «Элия», «Элия-МР» и «Элия-2». Общий вид этих установок приведен на рисунках 13.11, 13.13 и 13.14, технические характеристики – в таблице 13.7, технические описания – в [15, 17], а порядок применения – в РД 52.37.710.

13.6.4.1 ***ПУ «ТКБ-040»*** (рис. 13.11) было разработано в КБ «Скиф» (г. Тула), а на заводе серийного производства (Кишиневский электромеханический завод) выполнено несколько модификаций направляющих, адаптированных для пуска ПГИ семейств «Алазань» и «Кристалл». ПУ имеет 2 этажерки, на которых крепятся по 6 направляющих, механизмы ручного наведения этажерок по азимуту и углу возвышения, опорное устройство, шкалы азимута и угла возвышения и выносной пульт для пуска ПГИ. Конструкция этажерок допускает крепление направляющих для пуска ПГИ веером $\pm$ 5° и позволяет осуществлять веерный пуск трех ПГИ при одном наведении по азимуту и углу возвышения, что обеспечивает повышение ее скорострельности.

13.6.4.2 ***Автоматизированная ПУ «Элия»*** разработана НПЦ «Антиград» и ОАО «Телемеханика» (г. Нальчик). ПУ «Элия» (рис. 13.14) состоит из основания, карусели, электромеханических приводов и датчиков азимута и угла возвышения, сменного пакета направляющих, ПДУ и обеспечивает пуск ПГИ разных типов в режимах ручного и полуавтоматического наведения. Сменный пакет направляющих ПУ «Элия», предназначенный для пуска ракет семейства «Алазань», содержит 16 параллельных друг другу направляющих калибра 82,5 мм. Направляющие сформированы двумя W – образными профилями, скрепленными между собой и содержащими окна для оперения ПГИ [15].

13.6.4.3 ***ПУ «Элия-МР»*** (рис. 13.14) состоит из четырех блоков направляющих, станины, механизмов ручного наведения по азимуту и углу возвышения с соответствующими шкалами и ПДУ для пуска ПГИ [15].

Для повышения скорострельности ПУ верхние два блока, содержащие по четыре направляющих, установлены веером $\pm$ 5° относительно нижнего пакета, содержащего также четыре направляющие. Это позволяет осуществлять пуск троек ПГИ в трех азимутах при одном и том же угле возвышения, также как и в случае ПУ «ТКБ-040». Для регистрации времени и координат пуска ПГИ ПУ имеет электронный блок со съемной карточкой.

13.6.4.4 ***Автоматизированная ПУ «Элия-2»*** (рис. 13.14) разработана НПЦ «Антиград» и предназначена для пуска ПГИ типа «Алазань-6»,

«Алазань-9», «Ас» и «Алан-3» в режиме автоматического управления с компьютера «АСУ-Элия» посредством встроенной системы беспроводной связи, а также в режиме беспроводного полуавтоматического управления по командам с ПДУ [17, 18]. Кроме того, предусмотрена возможность ручного наведения ПУ по азимуту и углу возвышения с помощью съемных маховиков.

В состав ПУ «Элия-2» входят:

– сменный пакет направляющих для пуска ПГИ разных типов;

– станина, на которой устанавливается пакет направляющих с электроприводом угла возвышения;

– поворотное устройство азимута, на валу которого устанавливается корзина с электроприводом азимута;

– опора, которая крепится к фундаменту закладными элементами;

– датчики азимута и угла возвышения;

– контейнер с системой связи и управления;

– антенны радиомодемов связи с ПДУ и «АСУ-Элия»;

– ПДУ с радиомодемом;

– система электропитания, включая две аккумуляторные батареи на 12 В, зарядное устройство на солнечной батарее, контроллер зарядки.

Сменные пакеты направляющих для пуска ПГИ разного типа унифицированы по габаритам, посадочным местам и содержат:

⇒ 16 направляющих (4 х 4) для пуска ПГИ «Алазань-6» калибра 83 мм;

⇒ 20 направляющих (4 х 5) для пуска ПГИ «Алазань-9» калибра 60 мм;

⇒ 36 труб (6 х 6) для пуска ПГИ «Ас» и «Алан-3» калибра 57 мм.

Для пуска ПГИ «Ас» и «Алан-3», имеющих минометный старт, сопровождаемый отдачей, электромеханические приводы азимута и угла возвышения снабжены тормозными устройствами, включаемыми перед пуском ПГИ и выдерживающими удар до 800 Нм.

13.6.4.5 Сравнение технических характеристик рассмотренных ПУ (табл. 13.7) показывает, что ПУ «Элия-2» превосходит аналоги по количеству направляющих, точности и скорости наведения, имеет встроенные средства беспроводной связи и управления, автономную систему электропитания и минимальную массу, обеспечивающие удобство монтажа и эксплуатации в труднодоступных позициях. Системы полуавтоматического и автоматического управления ПУ позволяют регистрировать дату, время и координаты пусков ПГИ, что крайне важно для обеспечения безопасности противоградовых стрельб.

Таблица 13.7 – Технические характеристики ПУ

Наименование характеристик	ТКБ-040	Алан-М3	Элия	Элия-МР	Элия-2
Калибр направляющих, мм	83	70	57, 61,83	61, 83	57, 61,83
Количество направляющих, шт.	12	36	49, 25, 16	12	36, 20, 16
Габаритные размеры, мм: - длина - ширина - высота	 2350 2320 1980	 2900 1655 1420	 2010 850 1350	 2005 1450 1200	 1850 1050 1350
Масса ПУ с ПДУ, кг	670	1300	680	340	215
Углы наведения, градус: - по азимуту - по углу возвышения	 0 ± 360 20 ± 85	 0 ÷ 360 0 ÷ 85	 0 ÷ 360 0 ÷ 80	 0 ÷ 360 0 ÷ 80	 0 ÷ 360 0 ÷ 80
Скорость наведения, градус/с: - по азимуту - по углу возвышения	 ручное	 10 ± 0,5 3,7± 0,5	 10 ± 0,5 10 ± 0,5	 ручное	 20 ± 1 15 ± 1
Точность наведения по азимуту и углу возвышения, градус	5	2	2	2	1
Скорострельность, шт./мин	6	12	12	6	15
Напряжение питания, В	24	24	24	24	24
Система управления	ручная	полуавт.	полуавт.	ручная	автомат.

13.7 Сравнительный анализ противоградовых комплексов

Успех противоградовых работ в значительной степени зависит от соответствия применяемых технических средств засева требованиям технологии воздействия и качества реализации концепции воздействия.

13.7.1 В соответствии с основными положениями автоматизированной ракетной технологии ПГЗ технические средства засева должны обеспечивать оперативный засев градовых, градоопасных и потенциально градоопасных облаков, характеристики которых в зависимости от категории ОВ, сезона и физико-географических особенностей региона могут варьировать в следующих пределах:

– площадь засева от S_i = 4 до 200 км^2 (табл. 16.2);
– кратность засева от 1 до 4 и более (табл. 16.2);
– высота засева от 3 до 7 км;
– вертикальная протяженность слоя засева $\Delta h = \pm$ 0,5 км.

С учетом этого основные требования к техническим средствам засева могут быть сформулированы следующим образом:

– время разового засева площади 2 < S_i < 200 км^2 не более 1 минуты;
– время готовности к повторному засеву не более $\tau_З \leq$ 3,5 минут;
– радиус действия не менее 10 ÷ 11 км;

– погрешность доставки реагента по высоте ΔH, дальности ΔR и азимуту ΔL не более ± 0,5 км;

– начальная концентрация льдообразующих ядер в зоне засева не менее $5 \cdot 10^{10} \div 10^{11}$ м$^{-3}$;

– расстояние между линиями и точками засева не более 1 км;

– безопасность и экологическая чистота средств засева.

13.7.2 Исходя из этих требований, проведена оценка эффективности противоградовых комплексов при засеве ОВ разных категорий (табл. 13.8), под которой понимается отношение площади засева, охваченной данным комплексом за заданное время (1 мин) и на заданной высоте, к требуемой, согласно таблице 16.2 площади разового засева. Оценка эффективности артиллерийского ($Э_A$) и ракетного ($Э_P$) комплексов проведена [19] по формулам:

$$Э_A = \frac{N\sigma_1}{K_i S_i}, \tag{13.1}$$

$$Э_P = \frac{N\sigma_j \gamma_j}{K_i\left(S_i + 2\sigma_j \gamma_j\right)}, \tag{13.2}$$

где N – максимально допустимая скорострельность пусковой установки с наведением на ОВ; S_i и K_i - требуемая площадь и кратность засева ОВ i-й категории; σ_j – площадь, засеваемая одним ПГИ j-го типа; γ_j – коэффициент полезного использования трасс реагента ПГИ, принятый равным 1 для артиллерийского снаряда и 0,7 для ракет;

Слагаемое $2\sigma_j\ \gamma_j$ в выражении (13.2) учитывает необходимость пуска по 1 ПГИ слева и справа площади засева для компенсации изменения направления полета ПГИ под воздействием приземного ветра

13.7.3 Согласно результатам оценок по формулам (13.1) и (13.2), приведенным в таблице 13.8, *артиллерийский комплекс «Эльбрус-4»* соответствует требованиям технологии воздействия по радиусу действия, точности доставки реагента и готовности к повторному засеву, но не обеспечивает требуемого темпа засева ОВ даже I категории. Частично этот недостаток устранялся более частым размещением ПВ и применением на каждом ПВ двух или батарей [20] пушек «КС-19», но в случае крупномасштабных градовых процессов и в этом случае отмечался недозасев ОВ. Эту проблему можно было бы устранить при снаряжении снаряда модулями с реагентом, выбрасываемым по траектории полета, и введением системы автоматической стрельбы, однако такой комплекс («Эльбрус-4МА») не был доведен до применения.

Таблица 13.8 – Эффективность различных противоградовых комплексов при воздействии на ОВ разных категорий

Наименование противоградового комплекса	Эффективность КСВ при засеве ОВ I – IV категорий				Радиус действия, км	Площадь защиты одним ПУ, тыс. га		Минимальная потребность на защиту 1 млн. га, шт.	
	I	II	III	IV		без учета перекрытий	с учетом перекрытий	ПВ	ПУ
Эльбрус-4	0,25*/0,07	0,13/0,06	0,09/0,04	0,02/0,01	13	53	26,5	38	76
Эльбрус-4 (батарея)	1,00/0,32	0,53/0,33	0,36/0,16	0,10/0,04	13	53	26,5	38	76
Облако-М	0,42/0,20	0,32/0,17	0,24/0,12	0,07/0,03	8	20	10,0	100	200
Алазань-2М, WR-18	5,1/2,4	3,8/2,0	2,9/1,4	0,9/0,4	8	20	10,0	100	200
Титоград-10	3,1/1,5	2,2/1,3	1,7/0,9	0,5/0,2	10	31	15,5	65	130
Небо	9,5/9,5	7,3/4,8	5,8/3,3	1,9/0,9	13	53	26,5	38	76
Кристалл	7,6/4,5	5,8/3,8	4,7/2,7	1,1/0,8	12	45	22,5	45	90
Алазань-5, Алазань-6	6,3/2,9	4,2/2,5	3,2/1,7	1,0/0,5	10,2	32	16,0	62	124
Алазань-9	7,7/7,7	6,3/3,6	3,6/2,9	1,5/0,8	9,2	26	13,0	59	154
Ас	11,0/11,0	8,1/5,2	6,2/4,1	2,1/1,1	10,5	34	22,0	45	90
Алан-2	11,0/11,0	8,1/5,2	6,2/4,1	2,1/1,1	11	37	25	40	80

* В числителе приведены данные для ОВ среднего масштаба, в знаменателе – максимального масштаба

13.7.4 *Ракетный комплекс «Облако-М»,* как видно из таблицы 13.8, не обеспечивает требуемый темп засева ОВ всех категорий. Ракетные комплексы *«Алазань-2М», «WR-18»,* «Титоград-10», имеющие более высокую скорострельность за счет веерного пуска ПГИ без перенаведения ПУ по азимуту, обеспечивают более оперативный засев требуемого объема, но не обеспечивают требуемый темп засева ОВ IV категории.

13.7.5 *Ракетные комплексы второго поколения «Небо» и «Кристалл»*, за счет повышенного радиуса действия и высокой скорострельности ПУ «МС-280Н» и «ТКБ-0183» обеспечивают успешный засев даже крупномасштабных градовых облаков.

13.7.6 *Ракетные комплексы третьего поколения «Алазань-9» и «Ас»* также отвечают требованию оперативности засева ОВ любой категории и масштаба за счет достаточно большого радиуса действия и высокой скорострельности автоматизированных ПУ «Элия-2». Эти комплексы более перспективны для применения еще и потому, что позволяют реализовать малолюдную автоматизированную технологию ПГЗ с регистрацией даты, времени и координат пуска ПГИ.

13.7.7 ***При выборе противоградовых комплексов*** следует учесть следующие важные обстоятельства:

- радиус действия, крутизна траектории и требуемое количество ПВ;
- влияние скорости полета (обдува) на выход активных льдообразующих частиц;
- влияние внешних факторов (приземного ветра и температуры);
- радиус «мертвой» зоны засева;
- скорострельность ПУ и количество ее направляющих;
- стоимость ПГИ и ПУ;

численность обслуживающего персонала и др.

13.7.7.1 ***Малый эффективный радиус действия ПГИ*** приводит к увеличению числа ПВ, требуемых для защиты заданной площади, к повышению затрат на создание инфраструктуры сети ПВ, увеличению численности обслуживающего персонала, и следовательно, повышает стоимость ПГЗ и осложняет организацию работ.

Крутая траектория ракет приводит к сокращению эффективной длины трассы засева, определяемой длиной трассы, проходящей в слое засева ($H_З \pm 1$ км). Чем меньше радиус действия ПГИ, тем больше крутизна траектории их полета. Большая крутизна траектории приводит к тому, что в начале и конце трассы засева реагент вносится ниже, а в средней части трассы – выше слоя засева.

По этим параметрам предпочтительно применение ракетных комплексов второго и третьего поколений.

13.7.7.2 ***Большие скорости полета ПГИ*** при *моноблочном снаряжении* их головных частей приводят к снижению выхода активных льдообразующих частиц [14]. Это обусловлено тем, что интенсивное перемешивание продуктов возгонки реагента, вносимых в облака при скоростях полета ПГИ около 200 м/с, спектр льдообразующего аэрозоля смещается в сторону мелких частиц, проявляющих свою активность при более низких температурах [21]. Анализ проб льдообразующего аэрозоля, полученных ВГИ при полете самолета «Як-40» в аэрозольном шлейфе ПГИ «Облако-М» и «Алазань-2М», показал [22], что выход активных льдообразующих частиц в 10 ÷ 100 раз ниже, чем при скорости обдува 40 ÷ 50 м/с, полученных НПО «Тайфун» [14] при испытании этих ПГИ в аэродинамической трубе.

В целях устранения этого фактора для ПГИ «Кристалл» была разработана кассетная головная часть [14], которая обеспечивает отстрел 28 пиротехнических элементов через каждые 250 ÷ 300 м траектории полета. Эти пиротехнические элементы быстро тормозятся в атмосфере и опускаются со скоростью около 40 м/с, при которой формируется оптимальный спектр аэрозоля с максимальным выходом активных льдообразующих частиц. Общее количество реагента в головной ПГИ было сокращено до 320 г. Ожидалось, что кассетное снаряжение ПГИ, обеспечит резкое повышение эффективности АВ на градовые процессы. Однако это не подтвердилось на практике ПГЗ, так как концентрация льдообразующего аэрозоля в шлейфе пиротехнических элементов, слишком мала для стимулирования процессов агрегации образующихся кристаллов и ускорения осадкообразования.

Поэтому при разработке новых ПГИ («Алан-2», «Ас») вместо моноблочного и сложного кассетного снаряжения головных частей было отдано предпочтение использованию льдообразующего топлива и внесению продуктов возгонки кристаллизующих реагентов через сопло ПГИ. При этом массированное истечение продуктов возгонки реагента в узкой струе реактивных газов обеспечивает повышение их объемной концентрации, способствует формированию оптимального спектра льдообразующего аэрозоля.

13.7.7.3 ***Влияние приземного ветра*** приводит к снижению кучности и неудовлетворительной точности доставки реагента и в конечном итоге к снижению эффективности воздействия, что устраняется на практике за счет перерасхода ракет. Теоретическое моделирование и натурные измерения, проведенные на Кызбурунском полигоне ВГИ, показали, что

приземный ветер оказывает значительное влияние на направление полета ПГИ, имеющих малую стартовую скорость.

ПГИ «Облако-М», «Алазань-6», «Кристалл» имеют скорость выхода из направляющих около 23 ÷ 26 м/с. При скорости бокового ветра на пусковой позиции, равной 5 ÷ 10 м/с, отклонение направления полета этих ПГИ по азимуту достигает 6 ÷ 12 градусов. Это означает, что в конце трассы засева место внесения отклоняется от заданного на ± (1 ÷ 2) км в зависимости от направления ветра. Встречный ветер и попутный ветер приводят к опасному отклонению высоты траектории. Встречный ветер может привести к такому понижению траектории полета, что система обеспечения безопасности ПГИ (самоликвидация) может сработать на поверхности земли. А попутный ветер повысит высоту трассы засева на столько, что резко снизит эффективность засева.

Даже у ПГИ «Алазань-9», имеющей скорость схода 60 м/с, при скорости попутного или встречного ветра, равного 20 м/с, разброс высоты засева достигает ± 2,2 км (табл. 13.9). При скорости встречного ветра, равной 20 м/с, засев будет проведен на 2 км ниже уровня изотермы -6 ^{o}C. Это означает, что при скорости восходящего потока 5 м/с кристаллизующий аэрозоль попадет на требуемый уровень через 6 ÷ 7 минут, т.е. через время, сравнимое со временем градообразования. При таком же попутном ветре засев будет выполнен на уровне изотермы -22 ^{o}C, оставив слой градообразования не засеянным. Кроме того, встречный ветер может привести к такому снижению траектории полета, что ликвидации ПГИ может произойти на поверхности земли.

Таблица 13.9 – Влияние попутного и встречного ветра на высоту траектории «Алазань-9»

Скорость схода ракеты с направляющей, м/с	Скорость попутного (+) и встречного (-) ветра, м/с	Средняя высота траектории, м	Разброс по высоте траектории, м
40	± 10	3793	± 1311
40	± 20	3793	± 3542
50	± 10	3817	± 1073
50	± 20	3817	± 2204
60	± 10	4067	± 927
60	± 20	4067	± 1985
100	± 10	4483	± 530
100	± 20	4483	± 1180
120	± 10	4660	± 370
120	± 20	4660	± 681

Введение поправок на ветер перед пуском ПГИ крайне проблематично из-за изменчивости его направления и скорости около градовых облаков.

Более перспективной является концепция повышения скорости схода ПГИ с направляющих, принятая при создании ПГИ «Алан-2» и «Ас». Применение стартового ускорителя и ПАД позволило увеличить скорость схода этих ПГИ с направляющей до 100 и более м/с и резко сократило влияние приземного ветра на точность их полета. Использование льдообразующего топлива обеспечивает реактивную тягу, генерацию кристаллизующего аэрозоля, упрощение конструкции ПГИ, многократное уменьшение их габаритно-массовых характеристик, увеличение массы полезной нагрузки и получение пологих траекторий полета с повышенной до 9 – 10 км протяженностью пути эффективного засева облаков на требуемой высоте и в требуемом слое.

13.7.7.4 ***Влияние температуры воздуха***: В дни с градовыми процессами температура воздуха на стартовой позиции в зависимости от физико-географических условий и времени года может варьировать от 5 до 40 ^{o}C, а температура ПГИ на солнце может достигать 50 ^{o}C. Это серьезно влияет на время горения зарядов двигателей и пиротехнических составов реагента. С повышением их температуры скорость горения увеличивается, время горения сокращается, что приводит к значимому температурному разбросу скорости полета ПГИ, радиуса его действия и высоты траектории.

На рисунке 13.17 демонстрируется влияние температуры заряда на траекторию полета на примере ПГИ «Ас». Из этого рисунка следует, что конец траектории при температуре заряда двигателя, равной 5 ^{o}C, отмечается на высоте 1,3 км на дальности 11,3 км, а при температуре заряда, равной 50 ^{o}C на высоте 6,0 км на дальности 8,4 км. При наиболее часто встречающейся температуре воздуха в дни с градом 25 $\pm$ 10 ^{o}C высота точки ликвидации ПГИ равна 4,1 $\pm$ 0,9 км, а дальность 10 $\pm$ 0,7 км.

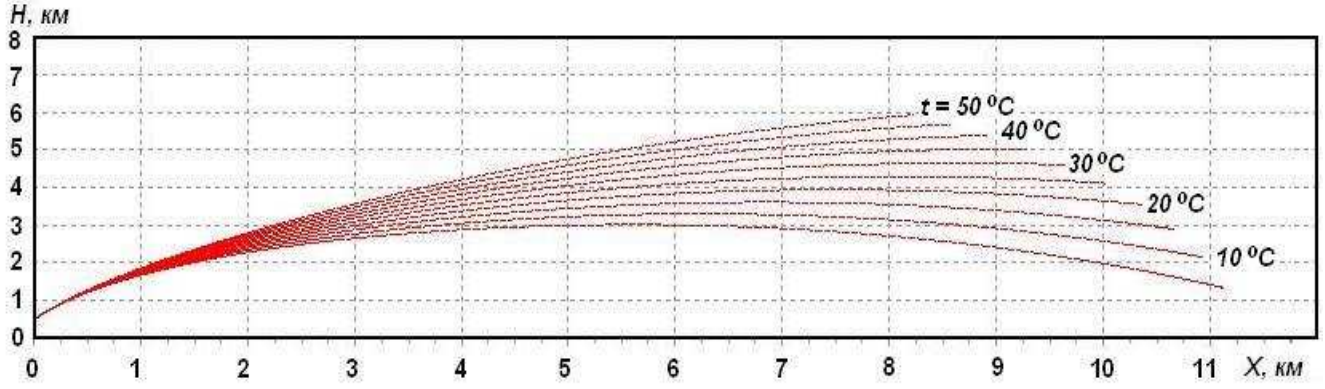


Рис. 13.17 – Траектории ПГИ «Ас» при температуре заряда от 5 до 50 ^{o}C

Такой температурный разброс характерен всем типам ПГИ. Для уменьшения этого разброса развиваются два подхода:

а) ведется разработка составов зарядов двигателя и реагентов с меньшей зависимостью от температуры;

б) учет температуры воздуха на стартовой позиции при пуске ПГИ. Для этого в ПУ «Элия-2» предусмотрена мини метеостанция, обеспечивающая оперативное измерение и передачу на КП давления, температуры и влажности воздуха, значения которых менее изменчивы, чем направление и скорость ветра.

13.7.7.5 Одной из важных характеристик ПГИ является ***радиус «мертвой зоны» засева*** вокруг пусковой позиции, определяемый задержкой времени включения генератора кристаллизующего аэрозоля и набором высоты слоя засева. У ПГИ «Алазань-6» и «Алазань-9» ШАД включается через 13 – 14 секунд полета, когда траектория ПГИ достигает нижней границы слоя засева вертикальной протяженностью около 1 км. Это приводит к тому, что в радиусе от 3,5 до 4,5 км (в зависимости от высоты засева) ОВ не могут быть засеяны. Исключение таких «мертвых зон» приводит к необходимости увеличения числа ракетных пунктов, чтобы один пункт мог осуществлять засев в «мертвой зоне» соседнего.

Пуск ПГИ «Ас», «Алан-2» и «Алан-3», имеющих высокую скорость старта, осуществляется при углах 60 – 75°. Это обеспечивает достижение высоты слоя засева на удалении от стартовой позиции 1 ÷ 2 км, и потом полет ПГИ по пологой траектории (рис. 13.17). Это в сочетании с непрерывным режимом работы двигателя с непрерывной генерацией кристаллизующего аэрозоля приводит к сокращению радиуса и площадей «мертвых зон» настолько, что перекрытие зон засева соседних пунктов уже не требуется, так как они меньше, чем поперечные размеры и площади ОВ (рис. 15.2).

13.7.7.5 При проведении АВ на сверхмощные крупномасштабные суперячейковые и многоячейковые градовые процессы требуется ***высокая скорострельность***, обеспечиваемая количеством ПУ на ракетных пунктах, количеством направляющих каждой ПУ, оперативностью перезарядки ПУ и оперативностью пуска ПГИ. На практике ПГЗ, зачастую, даже при наличии на каждом ракетном пункте двух ПУ типа 12 ствольных ПУ «ТКБ-040» требуемый темп засева не достигается. Перезарядка ПУ за время 6 ÷ 8 минут приводит к перерывам и недозасеву ОВ. В результате снижается эффективность АВ.

Для исключения этой часто повторяющейся причины неудачного предотвращения града рекомендуется применение многоствольных и скорострельных автоматизированных ПУ типа «Элия-2», могущих

обеспечить высокий темп засева (пуск 30 ПГИ 2 минуты) без перезарядки во время воздействия.

13.7.7.6 Немаловажным фактором при выборе противоградового комплекса является ***стоимость ПГИ и ПУ***. При этом следует иметь в виду, что от 45 до 55% ежегодных затрат на проведение противоградовых работ составляет приобретение ПГИ, в то время как приобретение ПУ осуществляется один раз в 15 ÷ 20 лет. Стоимость такой разовой закупки ПУ примерно в 4 – 5 раз ниже, чем стоимость ежегодного расхода ПГИ. Например, годовые затраты Краснодарской и Ставропольской ВС на приобретение ПГИ «Алазань-6» в 2013 г. составили 118,7 руб. на 1 га площади ЗТ. Одноразовые затраты на оснащение всех пунктов этих двух ВС на автоматизированные ПУ «Элия-2» требует 27 руб/га. С учетом многолетней эксплуатации ПУ затраты на их приобретение составляют около 2 руб/га в год, что в 60 раз меньше годовых затрат на закупку ПГИ.

Замена ПГИ «Алазань-6» на «Алазань-9» сократит годовые расходы на ПГИ до 92 руб./га, а замена «Алазань-6» на ПГИ «Ас» – до 60 руб./га.

13.7.7.7 ***Численность обслуживающего персонала ВС*** в значительной степени зависит от числа ракетных пунктов, так как на каждом ПВ в течение всего сезона ПГЗ осуществляется круглосуточное дежурство по 2 человека в две смены. Поэтому около 60 – 70% численности обслуживающего персонала противоградовых подразделений составляет персонал ПВ. Сокращение числа ПВ может обеспечить снижение себестоимости ПГЗ за счет сокращения расходов на создание их инфраструктуры и содержание персонала. Однако это может быть достигнуто только за счет повышения радиуса действия ПГИ, повышения скорострельности ПУ и сокращения радиуса «мертвых» зон вокруг ПВ. Например, у большинства применяемых в мире ПГИ, в том числе и ПГИ семейства «Алазань» диаметр «мертвой» зоны, где засев не осуществляется, составляет 8 – 9 км, а площадь – около 60 км^2. Это приводит к учащенному размещению ПВ таким образом, чтобы в «мертвой» зоне каждого ПВ засев осуществлял соседний ПВ. Без этого ОВ, зародившийся над ПВ, невозможно своевременно засеять. В случае применения ПГИ типа «Ас», у которого диаметр «мертвой» зоны составляет около 3 км, нет необходимости перекрытия зон засева соседних ПВ, так как поперечные размеры ОВ обычно больше 3 км, и обеспечивается возможность сокращения числа ПВ.

13.7.7.8 Из приведенного анализа следует, что из рассмотренных технических средств засева градовых облаков наиболее предпочтительны ракетные противоградовые комплексы, которые наилучшим образом могут обеспечить выполнение требований концепций засева по оперативной

доставке реагента в требуемый объем на требуемую высоту и в требуемой дозировке.

Наилучшим образом это обеспечивается малогабаритным ракетным комплексом нового поколения «Ас-Элия», который может обеспечить необходимые по технологии точность и темп засева градовых облаков любой мощности, в том числе и крупномасштабных, за счет следующих его преимуществ:

– снижение влияния приземного ветра на траекторию засева, за счет высокой стартовой скорости ПГИ «Ас»;

– снижение влияния температуры заряда ПГИ «Ас» на его траекторию за счет автоматизированного учета температуры на ПВ, измеряемой мини метеостанцией, встроенной в ПУ «Элия-2»;

– сокращение запретных секторов и повышение безопасности транспортировки и применения ПГИ «Ас» благодаря отсутствию в ней ВВ;

– сокращение числа ПВ и себестоимости ПГЗ за счет сокращения числа ПВ благодаря малому радиусу «мертвой» зоны вокруг ПВ;

– более низкая себестоимость ПГИ «Ас» по сравнению с аналогами;

– высокая точность наведения и скорострельность ПУ «Элия-2»;

– реализация малолюдной технологии ПГЗ благодаря автоматизированному управлению пуском ПГИ.

13.7.7.9 В заключение раздела следует отметить перспективность применения беспилотного авиационного комплекса [23] в составе:

– многоцелевой беспилотный летательный аппарат многократного применения, оснащенный средствами измерения параметров облаков, средствами широкозахватного засева облаков, средствами мониторинга состояния посевов, транспортных магистралей, газо– нефтепроводов;

– наземной станции управления и контроля;

– пускового устройства катапульты;

– автоматизированной радиолокационной системы управления АВ на облачные процессы «АСУ-МРЛ».

Преимуществами такого комплекса является:

– возможность создания мобильной крупномасштабной системы ПГЗ и искусственного увеличения осадков (ИУО) на больших площадях без разветвленной инфраструктуры ракетных ПВ (с одной позиции можно осуществлять защиту около 3 – 5 млн га);

– совмещение преимуществ ракетной и авиационной технологий (высокой оперативности и эффективности ракетной технологии и авиационного охвата больших территорий);

– низкая себестоимость ПГЗ и работ по ИУО;

– многоцелевое применение.

13.8 Автоматизированная ракетная система ПГЗ

Современное состояние средств обработки, передачи и архивирования информации позволяет создать средства автоматизации технологических операций. Например, программно-технический комплекс (ПТК) «АСУ-Град» [24], разработанный НПЦ «Антиград», может автоматизацию противоградовых операций, включая:

– обнаружение и распознавание категорий объектов воздействия;

– локализацию объема засева с учетом категории и структуры ОВ;

– выбор режима засева в зависимости от параметров ОВ;

– выработку команд на засев ОВ с учетом высоты засева и размещения ракетных пунктов, траекторных характеристик ПГИ и запретных секторов;

– передачу команд на ракетные пункты;

– дистанционное наведение ракетных ПУ и пуск ПГИ;

– документирование даты, времени, угловых координат и количество пусков ПГИ;

– документирование материалов АВ.

13.8.1 ***В состав ПТК «АСУ-Град»*** (рисунки 13.18 и 13.19) входят следующие составные программно-технические средства:

– *ПТК «АСУ-МРЛ»*, который выполняет функции ПТК «верхнего уровня» по управлению противоградовыми операциями, включая обнаружение и распознавание градовых и градоопасных облаков, принятие решения о проведении активного воздействия (АВ), выработку команд на ракетный засев, контроль и документирование результатов АВ.

– *ПТК «АСУ-Элия»*, который управляет сетью удаленных ПУ и выполняет функции ПТК «среднего уровня» по реализации обмена информацией между нижним и верхним уровнями системы, включая прием команд их «АСУ-МРЛ», установление связи и передачу команд на РП, контроль их исполнения и ввод сообщений в ПТК «верхнего уровня».

– *Сеть автоматизированных ПУ «Элия-2»* выполняет функции ПТК «нижнего уровня» по ракетному засеву ОВ по командам, поступающим из систем управления верхнего уровня.

– *Система связи и обмена информацией* между ПТК «АСУ-Град», «АСУ-Элия», «АСУ-МРЛ» и сетью удаленных ПУ «Элия-2».

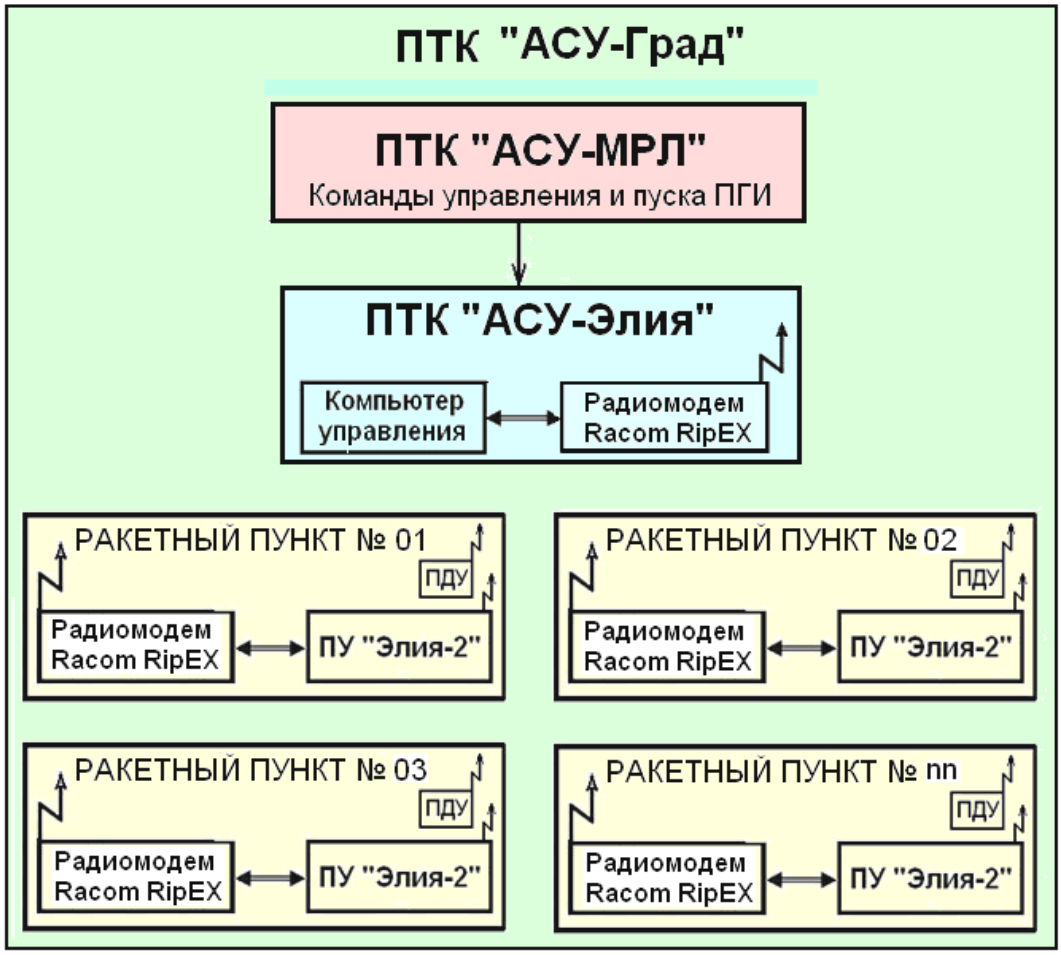


Рис. 13.18 – Блок-схема автоматизированной системы ПГЗ «АСУ-Град»

Рис. 13.19 – Автоматизированная система ПГЗ «АСУ-Град»

13.8.2 Действующий образец *ПТК «АСУ-Град»* создан на базе Северо-Кавказской ВС со следующим размещением составных частей:

– ПТК «АСУ-МРЛ» встроен в Куба-Табинский радиолокатор «МРЛ-5» и обеспечивает его работу в автоматическом режиме без присутствия обслуживающего персонала. Управление режимами работы МРЛ-5 и передача информации на сервер «АСУ-МРЛ» осуществляется по УКВ радиомосту, имеющему скорость передачи информации около 78 МБит/с.

– Серверы ПТК «АСУ-МРЛ» и «АСУ-Элия» размещены в Ситуационном Центре Северо-Кавказской ВС в г. Нальчик.

– Сеть из 27 ПУ «Элия-2» разбросана по территории Кабардино-Балкарии на удалениях до 80 км от МРЛ-5.

– Система связи включает три базовых радиомодема, установленных на мачтах высотой 30 м, и 24 радиомодема, встроенных непосредственно в ПУ «Элия-2».

Возможности, алгоритмы работы и характеристики автоматизированной системы «АСУ-МРЛ» и порядок подготовки ее к применению по АВ даны в разделах 12.2 – 12.3. Описание и характеристики ПУ «Элия-2» представлены в разделе 13.6.

13.8.3 Система связи и управления: Апробированы варианты системы связи и управления с применением спутниковой, сотовой и радиосвязи.

Применение спутниковой системы «VSAT DirecWay» показало, что она вполне соответствует требованиям по скорости передачи информации для любой позиции ракетного пункта, но в случае экранировки спутника интенсивными ливневыми и градовыми осадками могут быть перерывы связи. Ограничивает его применение и высокая стоимость трафика.

Испытание системы сотовой GSM/GPRS связи показало, что зачастую отмечаются случаи перерывов связи ПТК «АСУ-Элия» с некоторыми с ПУ, что недопустимо при проведении АВ. Попытки повышения надежности связи путем улучшения качества антенн, высоты их размещения и совершенствования программного обеспечения не исключила перерывы связи, так как цифровая связь функционирует на вторичной основе.

Для решения этой проблемы и исключения зависимости от провайдера GSM/GPRS связи были проанализированы возможности современных радиомодемов («DataRadio», «Guardian», «Viper-SC», «Integral», «Racom») и создана своя радиосеть обмена информацией с использованием радиомодемов «Racom RipEX». Выбран диапазон частот 160 – 175 МГц, на котором связь даже в горных и предгорных районах, более надежна, чем в диапазонах 400 или 800 МГц, и может быть

удовлетворительной в условиях отсутствия прямой видимости (за счет переотражений).

На рисунке 13.20 представлена функциональная схема, реализованной в экспериментальном образце «АСУ-Элия» системы связи и управления множеством территориально разнесенных ПУ «Элия-2». Создание такой собственной радиосети имеет следующие преимущества:

– возможность проектирования зоны покрытия с учетом размещения ПУ и «АСУ-Элия» с использованием при необходимости направленных антенн и ретрансляторов;

– высокая оперативность соединения – время установления соединения после запроса у современных радиомодемов составляет десятки миллисекунд;

– автономность системы связи и отсутствие непредвиденных задержек и отключений;

– немедленная адресная доставки информации;

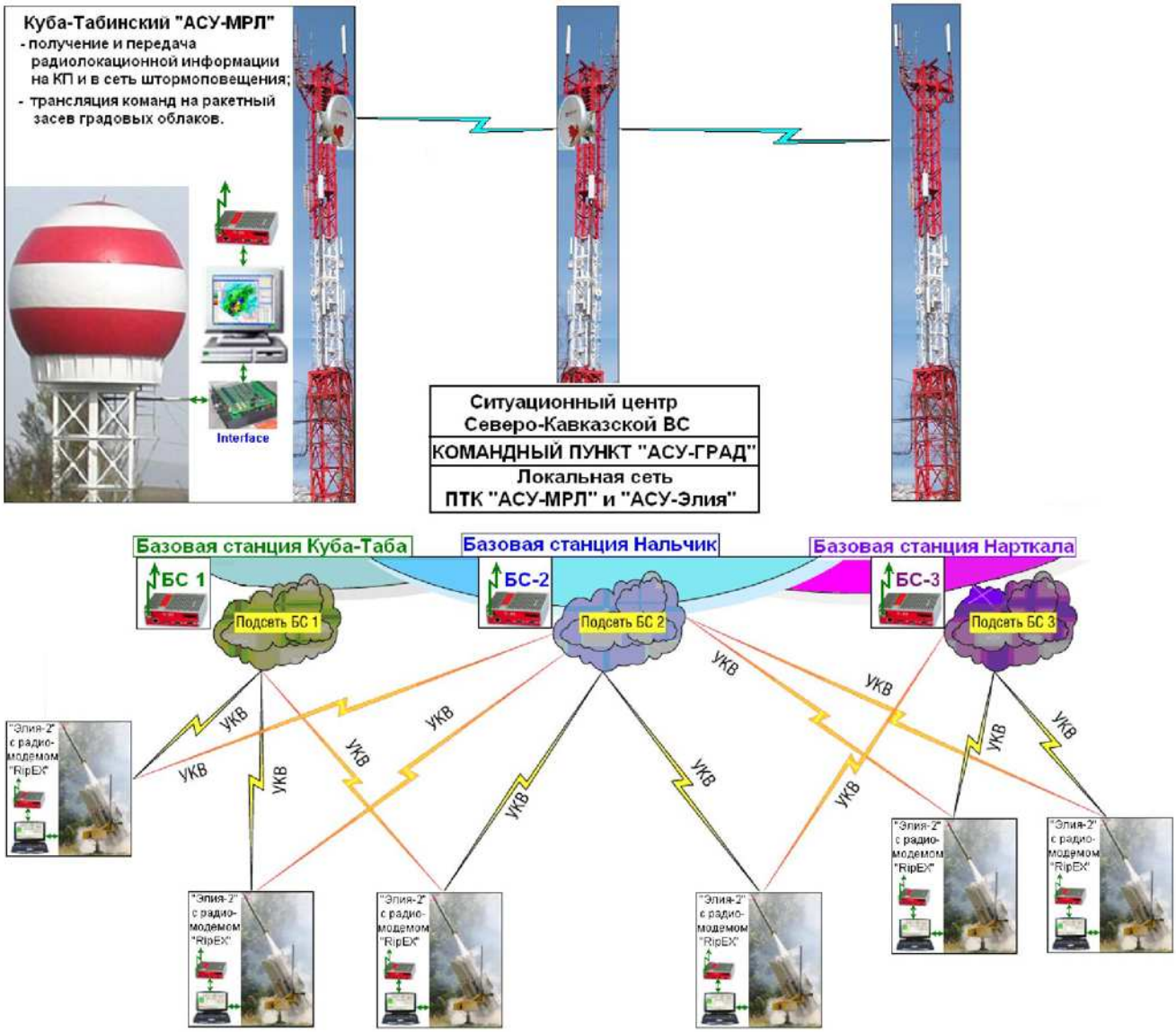


Рис. 13.20 – Блок-схема системы связи опытного образца «АСУ-Град»

– высокая надежность передачи информации при любой метеорологической (гроза, град, паводок) и общественной ситуации;

– круглосуточная готовность и отказоустойчивость системы связи.

Создание такой радиосети более затратно по сравнению с GSM/GPRS системой связи, но более экономично при эксплуатации (не требует абонентской платы, платы за трафик).

Скорость обмена информацией в радиосети составляет 19,2, 9,6 или 4,8 Кбит/с (в зависимости от профиля местности и метеоусловий). Этого вполне достаточно для обмена информацией в системе «АСУ-Град», так как объем передаваемых пакетов информации не превышает 50 байт. Использование мультиплексной (точка-многоточка) и топологии связи, в которой каждый радиомодем функционирует в режимах приемо-передачи и ретрансляции обеспечило повышение надежности радиообмена.

Работа радиосети организуется по опросу «АСУ-Элия», который направляет запрос в адрес контроллера удаленного ПУ «Элия-2». Этот запрос передается в эфир и принимается всеми базовыми станциями и находящимися в зоне электромагнитной доступности удаленными ПУ «Элия-2», однако ответ на данный запрос дает только та ПУ, которой этот запрос адресован. Ответ на запрос передается в обратном порядке: ПУ «Элия-2» – базовая станция – «АСУ-Элия». Все базовые станции, входящие в состав «АСУ-Элия» установлены на мачтах высотой 30 м и работают на одной частоте, поочередно. Взаимные помехи исключаются тем, что передача инициируется только по запросу «АСУ-Элия».

Для обеспечения надежности обмена информацией реализуется принцип «Облако» с автоматической ретрансляцией в случае отсутствия прямой видимости с удаленными ПУ. Обмен данными складывается из набора последовательных микроопераций «запрос – ответ»:

– генерация запроса «АСУ-Элия» и ввод в радиомодем;

– установление связи базовой станции с ПУ и передача запроса;

– обработка запроса в контроллере ПУ «Элия-2» и генерация ответа;

– установление связи между контроллером ПУ и радиомодемом и передача ответа от контроллера ПУ в радиомодем;

– передача ответа от радиомодема в «АСУ-Элия».

По данным натурных испытаний время выполнения этих микроопераций (следовательно, суммарная задержка обмена данными) на радиомодемах «RipEX» составляет около 0,1 – 0,2 секунды, а скорость передачи – 19,2 Кбит/с. В результате этого скорость обмена данными на радиомодемах «RipEX» позволяет обслуживать одной базовой станцией не менее 32 ПУ «Элия-2» в минуту даже при ухудшении условий приема и повторной передаче 100% сообщений.

13.8.4 Автоматизированная система управления «АСУ-Элия» служит для беспроводного управления сетью удаленных ракетных установок «Элия-2». В его состав входит:

– управляющий компьютер типа Pentium IV;

– автоматизированные ракетные ПУ «Элия-2», размещенные на защищаемой территории в радиусе до 80 км;

– аппаратура связи командного пункта, ретрансляторы и аппаратура связи, встроенная в ПУ «Элия-2»;

– специальное программное обеспечение «АСУ-Элия-2».

Компьютер ПТК «АСУ-Элия» работает в составе локальной сети с компьютером ПТК «АСУ-МРЛ», который осуществляет обнаружение градовых и градоопасных облаков, распознавание категорий ОВ и выработку команд на их засев. Эти команды с компьютера «АСУ-МРЛ» поступают в компьютер «АСУ-Элия», который обеспечивает контроль состояния и управление сетью удаленных ПУ «Элия-2», включая:

– отображение состояния сети ПУ (до 32 шт.) на едином мониторе;

– обмен данными между КП и ПУ в параллельном режиме;

– передачу команд на пуск ПГИ, контроль их выполнения и регистрацию даты, времени, количества и координат пуска ПГИ по типам;

– сбор данных автоматических метеостанций, встроенных в ПУ «Элия-2», и получение карт территориального распределения температуры, давления и влажности воздуха при прохождении градовых облаков и фронтальных разделов на фоне карты местности.

Координаты МРЛ и ПУ (долгота, широта, высота над уровнем моря) определены с помощью GPS с точностью до 0,001 минуты и введены в компьютеры «АСУ-МРЛ» и «АСУ-Элия». В «АСУ-МРЛ» введены также траекторные характеристики применяемых типов ПГИ и запретные сектора стрельб. На ракетном пункте размещены по 1 ПУ «Элия-2». Каждой ПУ присвоен свой идентификационный номер.

Программное обеспечение ПТК «АСУ-Элия» написано в ОС Windows XP и может работать в ОС Windows Vista, а также Windows-7.

На панели управления сетью удаленных ПУ «Элия-2» отбражаются:

– номера и наименования ракетных пунктов, на которых установлены управляемые ПУ;

– заводской номер ПУ «Элия-2»;

– состояние режима управления ПУ (автомат, полуавтомат);

– угловое положение ПУ по азимуту и вертикали;

– напраяжение аккумуляторов ПУ «Элия-2»: АКБ1 и АКБ2;

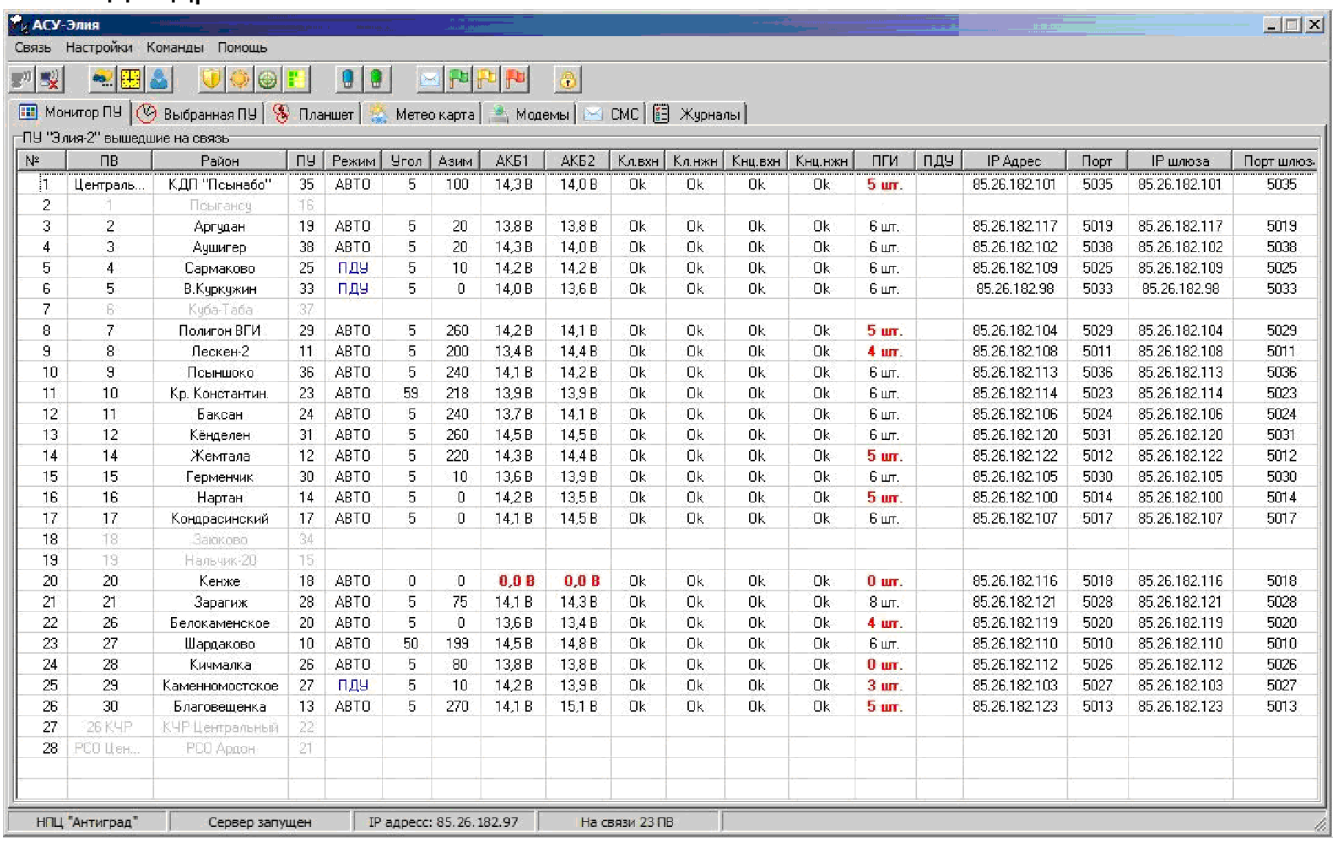
– состояние концевых выключателей и ключей пусковых цепей верхнего и нижнего уровней, количество заряженных направляющих;

– идентификационный номер Wireless ID и время контроля;

– IP адрес порта, номер порта, IP адрес шлюза и номер шлюза.

Эта панель позволяет следить за состоянием всех управляемых ПУ.

На рисунке 13.21 представлена панель пульта беспроводного дистанционного управления конкретной ПУ «Элия-2». Панель представлена в режиме передачи и контроля выполнения команд на пуск ПГИ, используемого в качестве аварийного. На панели отображаются номер ПУ, состояние ПУ (угловое положение, напряжение аккумуляторов, состояние концевых выключателей и ключей пусковых цепей, кодичество заряженных направляющих), наличие связи и готовность ПУ к выполнению команд и др.



№	ПВ	Район	ПУ	Режим	Угол	Азим	АКБ1	АКБ2	Кл.вхн	Кл.нжн	Кнц.вхн	Кнц.нжн	ПГИ	ПДУ	IP Адрес	Порт	IP шлюза	Порт шлюз.
1	Централь...	КДП "Псынабо"	35	АВТО	5	100	14,3 В	14,0 В	Ok	Ok	Ok	Ok	5 шт.		85.26.182.101	5035	85.26.182.101	5035
2	1	Псыгансу	16															
3	2	Аргудан	19	АВТО	5	20	13,8 В	13,8 В	Ok	Ok	Ok	Ok	6 шт.		85.26.182.117	5019	85.26.182.117	5019
4	3	Аушигер	38	АВТО	5	20	14,3 В	14,0 В	Ok	Ok	Ok	Ok	6 шт.		85.26.182.102	5038	85.26.182.102	5038
5	4	Сармаково	25	ПДУ	5	10	14,2 В	14,2 В	Ok	Ok	Ok	Ok	6 шт.		85.26.182.109	5025	85.26.182.109	5025
6	5	В.Куркужин	33	ПДУ	5	0	14,0 В	13,6 В	Ok	Ok	Ok	Ok	6 шт.		85.26.182.98	5033	85.26.182.98	5033
7	6	Куба-Таба	37															
8	7	Полигон ВГИ	29	АВТО	5	260	14,2 В	14,1 В	Ok	Ok	Ok	Ok	5 шт.		85.26.182.104	5029	85.26.182.104	5029
9	8	Лескен-2	11	АВТО	5	200	13,4 В	14,4 В	Ok	Ok	Ok	Ok	4 шт.		85.26.182.108	5011	85.26.182.108	5011
10	9	Псыншоко	36	АВТО	5	240	14,1 В	14,2 В	Ok	Ok	Ok	Ok	6 шт.		85.26.182.113	5036	85.26.182.113	5036
11	10	Кр. Константин	23	АВТО	59	218	13,9 В	13,9 В	Ok	Ok	Ok	Ok	6 шт.		85.26.182.114	5023	85.26.182.114	5023
12	11	Баксан	24	АВТО	5	240	13,7 В	14,1 В	Ok	Ok	Ok	Ok	6 шт.		85.26.182.106	5024	85.26.182.106	5024
13	12	Кенделен	31	АВТО	5	260	14,5 В	14,5 В	Ok	Ok	Ok	Ok	6 шт.		85.26.182.120	5031	85.26.182.120	5031
14	14	Жемтала	12	АВТО	5	220	14,3 В	14,4 В	Ok	Ok	Ok	Ok	5 шт.		85.26.182.122	5012	85.26.182.122	5012
15	15	Герменчик	30	АВТО	5	10	13,6 В	13,9 В	Ok	Ok	Ok	Ok	6 шт.		85.26.182.105	5030	85.26.182.105	5030
16	16	Нартан	14	АВТО	5	0	14,2 В	13,5 В	Ok	Ok	Ok	Ok	5 шт.		85.26.182.100	5014	85.26.182.100	5014
17	17	Кондрасинский	17	АВТО	5	0	14,1 В	14,5 В	Ok	Ok	Ok	Ok	6 шт.		85.26.182.107	5017	85.26.182.107	5017
18	18	Заюково	34															
19	19	Нальчик-20	15															
20	20	Кенже	18	АВТО	0	0	0,0 В	0,0 В	Ok	Ok	Ok	Ok	0 шт.		85.26.182.116	5018	85.26.182.116	5018
21	21	Зарагиж	28	АВТО	5	75	14,1 В	14,3 В	Ok	Ok	Ok	Ok	8 шт.		85.26.182.121	5028	85.26.182.121	5028
22	26	Белокаменское	20	АВТО	5	0	13,6 В	13,4 В	Ok	Ok	Ok	Ok	4 шт.		85.26.182.119	5020	85.26.182.119	5020
23	27	Шардаково	10	АВТО	50	199	14,5 В	14,8 В	Ok	Ok	Ok	Ok	6 шт.		85.26.182.110	5010	85.26.182.110	5010
24	28	Кичмалка	26	АВТО	5	80	13,8 В	13,8 В	Ok	Ok	Ok	Ok	0 шт.		85.26.182.112	5026	85.26.182.112	5026
25	29	Каменномостское	27	ПДУ	5	10	14,2 В	13,9 В	Ok	Ok	Ok	Ok	3 шт.		85.26.182.103	5027	85.26.182.103	5027
26	30	Благовещенка	13	АВТО	5	270	14,1 В	15,1 В	Ok	Ok	Ok	Ok	5 шт.		85.26.182.123	5013	85.26.182.123	5013
27	26 КЧР	КЧР Центральный	22															
28	РСО Цен...	РСО Ардон	21															

Рис. 13.21 – Фрагмент панели управления сетью удаленных установок «Элия-2»

13.8.5 Алгоритм работы ПТК «АСУ-Град» предусматривает:

– выработку команд на засев градовых и градоопасных облаков в ПТК «АСУ-МРЛ»;

– ввод команд на ракетный засев облаков в ПТК «АСУ-Элия», которая управляет наведением ПУ «Элия-2» по заданным азимутам и углам возвышения, пуск серии ПГИ;

– документирование даты, времени выполнения, азимута и углов пуска ракет на сервере ПТК «АСУ-Град».

Программное обеспечение ПТК «АСУ-Град» обеспечивает работу в режимах *«Дежурство» и «Воздействие»*.

В режиме «Дежурство»:

⇒ *ПТК «АСУ-МРЛ»* автоматически обеспечивает: периодический дежурный обзор пространства, оценку градоопасности облаков, архивирование файлов обзора и при обнаружении ОВ переходит в режим «Воздействие».

⇒ *ПТК «АСУ-Элия»* автоматически осуществляет:

– радиосвязь с каждым ПВ с заданной периодичностью и опрос состояния всех управляемых ПУ «Элия-2» по идентификационным кодам;

– документирование результатов контроля состояния всех ПУ и отображение на панели управления (рис. 13.21);

– ожидание команд от «АСУ-МРЛ».

⇒ *контроллер ПУ «Элия-2»* по каждому запросу ПТК «АСУ-Элия»:

– обеспечивает автоматический опрос датчиков углового положения, пусковых цепей и аккумуляторов;

– формирует и передает сообщение о состоянии ПУ;

– переходит в «спящий режим» с минимальным потреблением энергии.

В режиме «Воздействие»:

⇒ *«АСУ-МРЛ» обеспечивает:*

– программный обзор пространства с цикличностью 3,3 ± 0,2 минут;

– обнаружение и распознавание ОВ;

– выделение объемов засева ОВ разных категорий (объемов, где проходят начальные стадии образования града);

– выбор ПУ «Элия-2», могущих оптимально засеять выделенные объемы;

– выбор режима засева ОВ (массированный, нормальный, экономичный);

– расчет команд на пуск серии ПГИ, содержащих угол возвышения, азимут, шаг по азимуту, количество ПГИ и номера направляющих ПУ. Команда может предусматривать пуск серии ПГИ (от 1 до 18 шт.) в зависимости от масштаба и местоположения ОВ. Шаг по азимуту может быть любой (от 5 до 10 градусов) в зависимости от режима засева (массированный, экономичный, нормальный);

– ввод команды в «АСУ-Элия».

⇒ *«АСУ-Элия» обеспечивает:*

– установление связи и передачу команд «АСУ-МРЛ» на требуемую ПУ «Элия-2»;

– контроль наведения ПУ и пуска ПГИ в заданные координаты;

– документирование даты, времени и координат пусков ПГИ и отображение на панели управления (рис. 13.21);

– переход в режим ожидания следующей команды.

⇒ *контроллер ПУ «Элия-2»* по команде ПТК «АСУ-Элия»:

– обеспечивают автоматическое наведение ПУ на угол возвышения и азимут первого пуска (первый азимут в серии) и пуск ПГИ;

– наведение ПУ на второй азимут и пуск ПГИ и т.д. пока не будут выполнены все пуски ПГИ в серии;

– выдачу команды «Зарядить», если на ПУ осталось менее 6 ПГИ;

– формирует и передает сообщение о состоянии ПУ;

– переводит систему электропитания в «спящий режим».

13.8.6 Полевые испытания ПТК «АСУ-Град» проведены в Северо-Кавказской ВС на примере управления 27 ПУ «Элия-2», подтвердили ее работоспособность по заложенным в ней алгоритмам, включая:

– автоматический радиолокационный обзор пространства, обнаружение и распознавания ОВ;

– оперативную выработку команд на засев ОВ в «АСУ-МРЛ», их ввод в «АСУ-Элия» и передачу на управляемые ПУ;

– обеспечение автоматической связи и обмена информацией между «АСУ-Элия» и РП по заданному оператором временному циклу;

– оперативный контроль состояния всех управляемых ПУ «Элия-2»;

– дистанционное беспроводное наведение ПУ «Элия-2» по угловым координатам с точностью ± 0,5 градуса и пуск серии ПГИ;

– документирование даты, времени и координат пусков ПГИ.

«АСУ-Град» обеспечивает повышение оперативности выработки, передачи и контроля исполнения команд на засев градовых и градоопасных облаков, устранение субъективных ошибок персонала, повышение темп засева градовых облаков и реализацию малолюдной автоматизированной технологии ПГЗ.

14 РЕАГЕНТЫ ДЛЯ ЗАСЕВА ГРАДОВЫХ ОБЛАКОВ

Для засева градовых облаков применяются кристаллизующие и гигроскопические реагенты, а также хладореагенты, которые вносятся с целью ускорения укрупнения облачных частиц за счет реализации фазовой, коллоидальной и конвективной неустойчивости облачной среды.

Известно, что гомогенная кристаллизация чистых облачных капель происходит при температуре ниже -40 ^{o}C. Наличие в атмосфере естественного кристаллизующего аэрозоля повышает температуру их замерзания до -22 ^{o}C, а крупных (дождевых) капель до -10 ^{o}C. Гигроскопические ядра конденсации ускоряют процесс формирования и укрупнения облачных капель за счет конденсации водяного пара.

Активное воздействие на облака предусматривает повышение концентрации ядер кристаллизации и конденсации на несколько порядков с целью интенсификации ускорения осадкообразования.

Основным способом воздействия на облака, содержащие переохлажденные капли воды, является искусственное создание или введение в них ледяных кристаллов, способствующих ускорению и интенсификации процесса осадкообразования.

14.1 Хладоагенты

14.1.1 В качестве хладореагентов для АВ на облака используются сжиженный воздух, жидкая углекислота (CO_2), жидкий азот, пропан и твердая углекислота (сухой лед).

Чаще всего для АВ на облака применяются гранулы сухого льда. Принцип их действия состоит в том, что при падении в облачной среде гранулы CO_2 испаряются при температуре -78,9 ^{o}C и охлаждают воздух в непосредственной близости от траектории своего движения до температуры ниже -40°C, при которой обычно происходит спонтанное замерзание переохлажденных капель воды [1, 2]. При пролете каждой гранулы в облаке за счет замерзания капель и кристаллизации конденсирующегося водяного пара образуется большое количество ледяных частиц. Свойством замораживать облачные капли обладают указанные сжиженные газы и любые вещества, например, гранулы льда, песок, которые доведены до глубокого охлаждения.

Засев облаков гранулами CO_2 (размером от 0,2 до 2,0 см) осуществляется путем дозированного их сброса при пролете самолета над верхней границей облака через отверстия в корпусе самолета в виде шахт. Температурный порог кристаллизующей активности сухого льда

составляет -2 °С. Гранула диаметром 1 см испаряется на пути около 4300 м и приводит к охлаждению объема порядка 0,018 $м^3$ до -40 °С. Один грамм сухого льда на всем пути испарения создает до $10^{12} \div 10^{13}$ ледяных кристаллов.

Дозировка может регулироваться в зависимости от типа засеваемых облаков в пределах от 0,1 до 10,0 кг/мин. Гранулы углекислоты получаются непосредственно на борту самолета путем дробления в дозаторе промышленных брикетов массой 80 кг, загруженных перед полетом, или вырабатываются наземными углекислотными грануляторами из промышленной жидкой углекислоты и хранятся на борту самолета в термоизолированных контейнерах.

14.1.2 Жидкий азот и другие сжиженные газы обычно используются при авиационном засеве облаков и в отличие от засева гранулами твердой углекислоты, генерация ледяных частиц происходит вдоль трассы полета самолета, на котором установлено устройство их разбрызгивания. Достоинством жидкого азота являются его наиболее высокий среди всех реагентов температурный порог эффективности около -0,5°С и экологическая чистота.

Для засева облаков жидким азотом в ЦАО разработан авиационный генератор ГМЧЛ-А, который путем создания избыточного давления в емкостях с жидким азотом обеспечивает его подачу по трубопроводам в установленный за бортом самолета распылитель, через который он в виде факела охлажденного до температуры ниже -90°С воздуха вводится в атмосферу. Облачная влага, попадающая в этот факел, мгновенно кристаллизуется за счет сильного охлаждения. Масса заливаемого в емкости генератора жидкого азота составляет 96 кг, при необходимости на борт самолета может быть загружено нескольких контейнеров типа СК-40 с азотом. Один грамм жидкого азота может создавать $2 \cdot 10^{13}$ активных ядер кристаллизации.

Хладореагенты относительно редко используются на практике противоградовых работ.

14.2 Кристаллизующие реагенты

14.2.1 ***Физической основой применения*** кристаллизующих реагентов является способность их аэрозолей создавать в переохлажденной облачной среде ледяные кристаллы, которые быстро растут за счет перегонки водяного пара с окружающих капель, что способствует разрешению фазовой неустойчивости переохлажденной облачной среды.

Таким свойством обладают аэрозоли многих неорганических и

органических веществ, но наиболее эффективной кристаллизующей способностью обладает аэрозоль иодидов серебра (AgI) и свинца (PbI_2). Применение PbI_2 повсеместно прекращено из-за его токсичности, меньшей активности и более низкого порога кристаллизующего действия.

Следует отметить, что кристаллизующую способность могут приобретать частицы любых веществ, если они искусственно доведены до глубокого охлаждения (например, частицы льда, кварцевого песка, пыли).

Наиболее широко применяется для засева облаков аэрозоль AgI, который представляет собой желтый нерастворимый порошок, быстро темнеющий на свету, благодаря чему используется в фотографии. Иодид серебра — одно из наименее растворимых соединений серебра.

Многие [3, 4 и др.] считают, что высокая льдообразующая активность AgI обусловлена тем, что структура его кристаллической решетки подобна кристаллической решетке льда. Действительно в условиях земной атмосферы лед имеет гексагональную кристаллическую структуру (I_h), в которой каждая молекула H_2O окружена четырьмя ближайшими к ней молекулами, находящимися на одинаковых расстояниях от неё, равных 2,76 ангстрем и размещённых в вершинах правильного тетраэдра, как и у AgI (рис. 14.1).

Льдоподобная структура частицы AgI способствует адсорбции на ее поверхности молекул H_2O, образованию нескольких слоев молекул на ее поверхности и формированию поверхностной пленки воды с последующим ее замерзанием при достижении критической толщины. В такой пленке образуются микрообъемы с ориентированными молекулами H_2O, приобретающие по мере переохлаждения льдоподобное строение. При достаточном размере эти микрообъемы могут стать зародышами ледяных кристаллов [4, 5, 6].

Однако высокой кристаллизующей способностью обладает большой класс органических соединений (пыльца растений и цветов в составе смол, стероидов и эфирных масел), не имеющих такой кристаллической структуры. Например, бактерии Pseudomonas siringae и Ervinia herbicola, которые размножающихся на листьях растений, являются активными центрами кристаллизации льда, начиная с температуры -2°C.

Основой, на которой укладываются молекулы воды, образуя кристаллы льда, служит особый фосфолипидный белок, имеющийся на поверхности бактериальных клеток. Молекула фосфолипида состоит из полярной гидрофильной (растворимой) головы фосфатной группы и двух неполярных гидрофобных (не растворимых в воде) углеводородных хвостов (рис. 14.2). Растворимая поверхность фосфолипидного белка благоприятствует осаждению молекул H_2O и формированию кристаллоподобной поверхностной пленки воды.

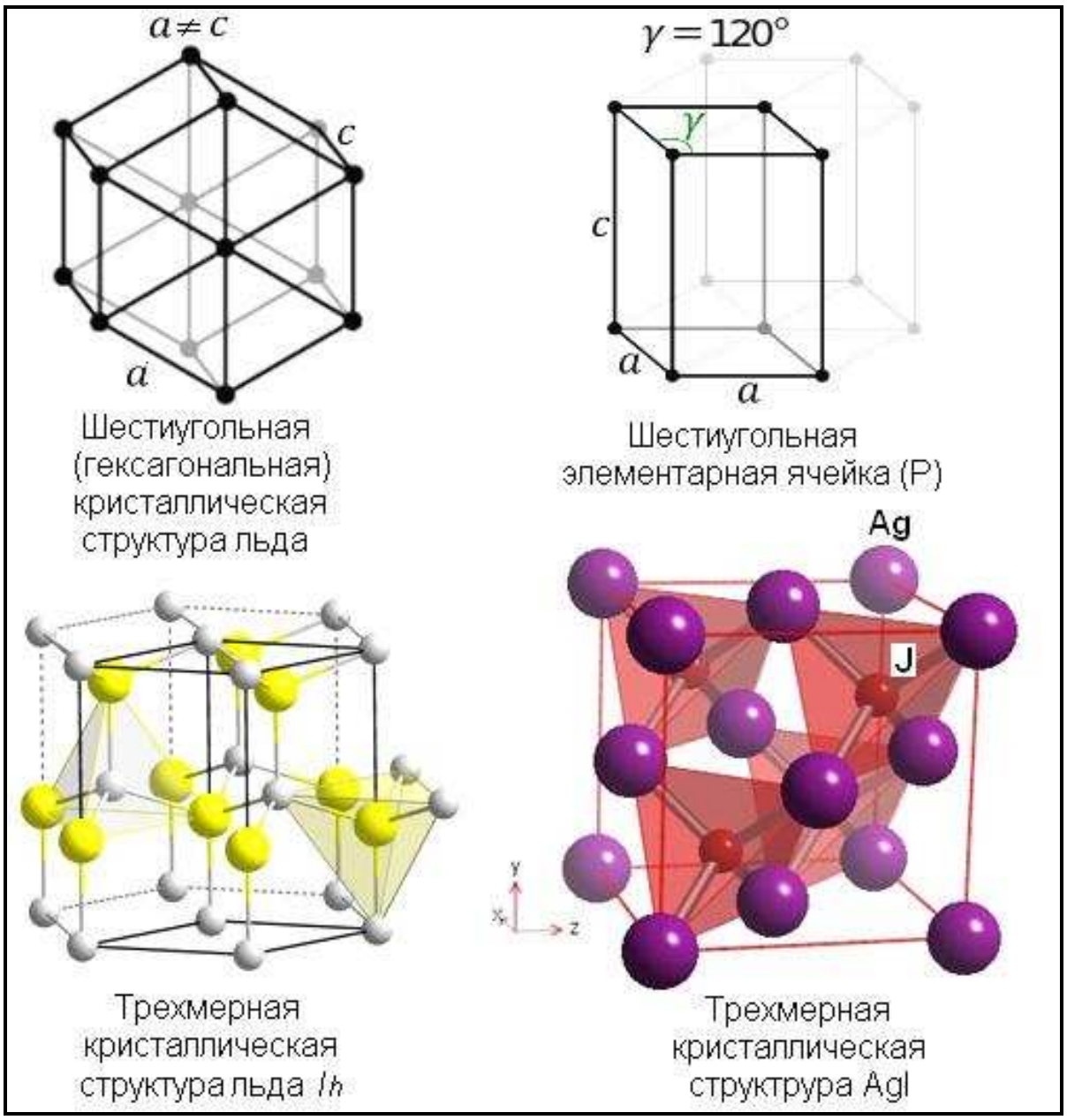


Рис. 14.1 – Кристаллическая структура льда и AgI

Иодид серебра и фосфолипидные белки относятся к совершенно разным классам веществ, но их частицы проявляют высокую кристаллизующую способность. Это, по-видимому, обусловлено двумя общими свойствами – слабая растворимость частиц и гидрофильность (смачиваемость) их поверхности, которая способствует адсорбции молекул воды, образованию нескольких (до 20 и более) монослоев молекул и формированию пленки воды, замерзающей при отрицательных температурах. То есть, основным механизмом кристаллообразования на частицах AgI и фосфолипидных молекулах является конденсация-замерзание.

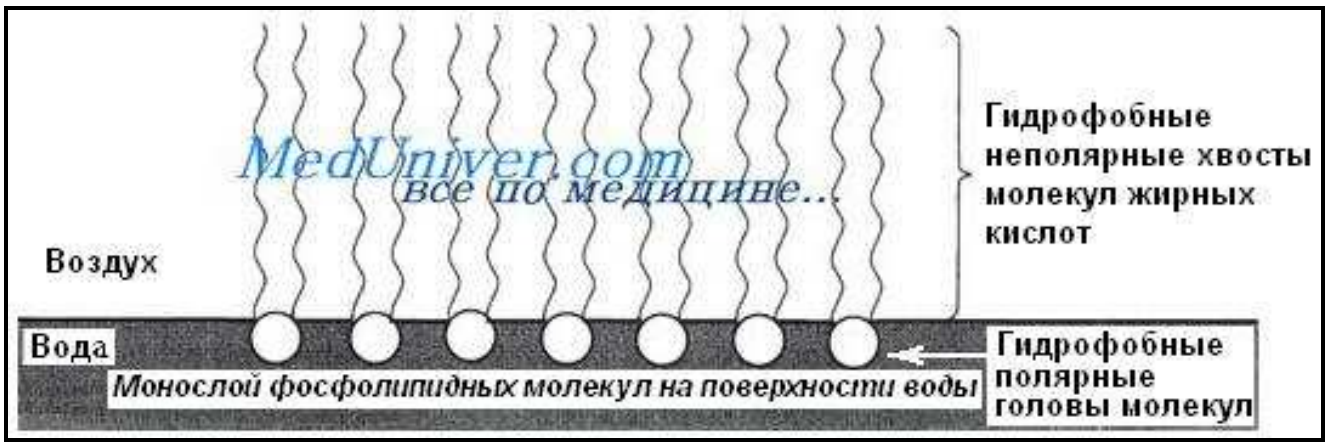


Рис. 14.2 – Строение фосфолипидных молекул, поясняющее формирование пленки воды на их поверхности [http://meduniver.com/Medical/Biology/125.html]

14.2.2 Пиротехнические составы

Для генерации льдообразующих аэрозолей при АВ на облака используются пиротехнические составы, содержащие активный реагент (AgJ, PbI_2, CuS) и йодирующие компоненты (KI, NH_4J, NH_4JO_3, $C_7O_2H_5J$), способствующие повышению льдообразующей эффективности составов.

Для снаряжения ПГИ обычно используются пиротехнические составы на основе оксида серебра и перхлората или нитрата аммония с содержанием AgI от 2 до 40%, а также льдообразующее твердое топливо ЛТТ смесевого или баллиститного типа с 2% содержанием AgI.

Генерация льдообразующего аэрозоля осуществляется путем высокотемпературной (от 700 до 1400°C) возгонки AgI до атомарного состояния с последующей конденсацией ионов Ag и I на подложке из продуктов горения пиротехнического состава при резком расширении и адиабатическом охлаждении объема возгонки. Поэтому образующийся аэрозоль часто называют термоконденсационным аэрозолем.

В противоградовых снарядах диспергирование реагента осуществляется *методом взрыва*, который сопровождается следующими физическими эффектами:

– возникновение ударной волны, формирование облака взрывных газов (ОВГ) и диспергирование кристаллизующего реагента, содержащегося в заряде ВВ;

– догорание ОВГ, приводящее к повышению температуры;

– увеличение объема ОВГ и формирование кристаллизующих частиц;

– турбулентная диффузия кристаллизующих частиц; образование облака ледяных кристаллов;

– взаимодействие ледяных кристаллов с облачной средой.

При ракетном засеве градовых облаков, например, с помощью ПГИ «Алан-2» или «Ас» происходят следующие физические процессы:

– истечение из сопла ракеты струи перегретых (до 1100 – 1200 ^{o}C) реактивных газов, содержащих AgI;

– догорание струи реактивных газов и диспергирование AgI до атомарного состояния;

– температурное расширение струи ракетных газов, их охлаждение до температуры окружающей облачной среды;

– конденсация молекул и их конгломератов, включающих частицы Ag, I и продуктов горения топлива, с образованием частиц кристаллизующего аэрозоля размером от 0,01 до 1 мкм;

– формирование искусственных ледяных кристаллов;

– турбулентная диффузия кристаллизующих частиц;

– трансформация микрофизических характеристик объема засева в зависимости от концентрации кристаллизующих частиц, водности и турбулентности облачной среды.

Другим способом получения термоконденсационного аэрозоля является сжигание раствора AgI в ацетоновых горелках. Этот способ применяется при самолетном засеве слоистых облаков. Для улучшения растворимости йодида серебра и повышения его льдообразующей активности в раствор добавлялся йодид аммония.

14.2.3 Эффективность кристаллизующих реагентов обычно характеризуется следующими параметрами:

– выход активных льдообразующих ядер (ЛОЯ) с 1 грамма состава;

– порог кристаллизующего действия;

– быстродействие, оцениваемое по количеству активных ЛОЯ в течение 2 минут после возгонки реагента;

– экологическая чистота реагента.

Выход активных ЛОЯ зависит от многих факторов:

– рецептуры состава – содержания AgI, активирующих компонент и их физико-химических свойств;

– конструктивных особенностей генератора аэрозоля;

– условий диспергирования реагента – степени диафрагмирования, влажности воздуха; скорости обдува генератора;

– длительности хранения и др.

Эти факторы (кроме последнего) определяют дисперсность формирующегося аэрозоля, от которого зависит его структура и льдообразующая активность. Повышение дисперсности ведет к росту числа частиц с единицы массы реагента, однако мелкие частицы

льдообразующую активность проявляют при очень низкой температуре или в условиях значительного перенасыщения водяного пара, которого нет в облаках. Формирование крупного аэрозоля, ведет к получению аэрозоля, активного в требуемом интервале температуры (от -5 до -10 ^{o}C) без пересыщения водяного пара, но по мере укрупнения частиц снижается выход с 1 грамма состава. Для компенсации этого рецептура кристаллизующих реагентов предусматривает формирование льдообразующего аэрозоля, содержащего ядро из продуктов горения, на поверхности которого имеются вкрапления AgI. За счет этого обеспечивается получение достаточно крупных частиц при минимальном расходе AgI, осаждающегося на их поверхности.

Составы с ультра малым содержанием AgI (≤ 0,5%) дают спектр мелких частиц, льдообразующая эффективность которых подвержена влиянию условий диспергирования. Повышение содержания AgI приводит к повышению выхода активных ЛОЯ и повышению устойчивости их льдообразующей эффективности, но это не означает, что выход активных ЛОЯ растет пропорционально содержанию AgI.

Конструкция генератора и условия диспергирования реагента выбираются таким образом, чтобы получить оптимальный спектр аэрозоля, который содержит максимальное количество ЛОЯ, активных в заданном интервале температуры. В зависимости от условий генерации аэрозоля возможно образование частиц сложного состава, способствующее активации высокодисперсных частиц реагента.

Большое влияние на выход активных ЛОЯ оказывает *скорость движения генератора*, с увеличением которой спектр аэрозоля сдвигается в сторону меньших размеров, а доля крупных и составных частиц падает. При уменьшении скорости происходит перекачка массы реагента в область более крупного и более активного аэрозоля.

При длительном хранении льдообразующая активность пиросоставов снижается за счет старения составов и химических процессов в них.

Известен также факт снижения активности аэрозоля под действием света (солнечной радиации). Это может приводить к снижению эффективности авиационного засева облаков с подоблачного слоя и с помощью наземных генераторов, когда аэрозоль до вовлечения в облако длительное время находится под воздействием света. Снижается активность ЛОЯ и при ее попадании в облачные капли при положительной температуре.

14.2.4 Методы и результаты испытаний льдообразующей эффективности снаряжения ПГИ

Для получения данных о льдообразующей эффективности снаряжения противоградовых ракет в России используются в основном два метода:

14.2.4.1 ***Лабораторный метод*** ФГБУ «ЦАО», который в соответствии с РД 52.11.639 предусматривает:

– сжигание навесок пиросостава массой от 10 до 300 мг в аэрозольной камере объемом 0,82 м^3;

– взятие из аэрозольной камеры проб аэрозоля шприцом известного объема (от 50 до 200 см^3);

– введение проб аэрозоля в облачную камеру объемом 0,3 м^3, заполненную переохлажденным туманом, формируемым путем подачи горячего водяного пара от парогенератора;

– подсчет кристаллов, оседающих на дне облачной камеры, с помощью оптического микроскопа.

Измерения при разных температурах в облачной камере позволяют получить температурную зависимость выхода ЛОЯ.

Выход ЛОЯ при лабораторном сжигании таблеток пиросостава зависит от массы навески, режима ее горения (с пламенем, без пламени), степени диафрагмирования и влажности воздуха:

– большая масса навески может привести к чрезмерно высокой концентрации аэрозоля, его укрупнению за счет коагуляции и снижению выхода ЛОЯ. Поэтому массу сжигаемой навески подбирают с учетом объема аэрозольной камеры;

– сжигание навески без диафрагмирования понижает выход ЛОЯ в несколько раз [5], поэтому отверстие в диафрагме подбирается таким образом, чтобы обеспечить горение при давлении в реальном генераторе;

– горение с открытым пламенем понижает выход ЛОЯ за счет снижения доли AgI, расходуемой на формирование льдообразующего аэрозоля;

– высокая влажность в аэрозольной камере может снизить активность составов, содержащих растворимые соединения йода (например, KI) на несколько порядков, за счет укрупнения частиц [7], особенно при влажности воздуха более 60% (рис. 14.3).

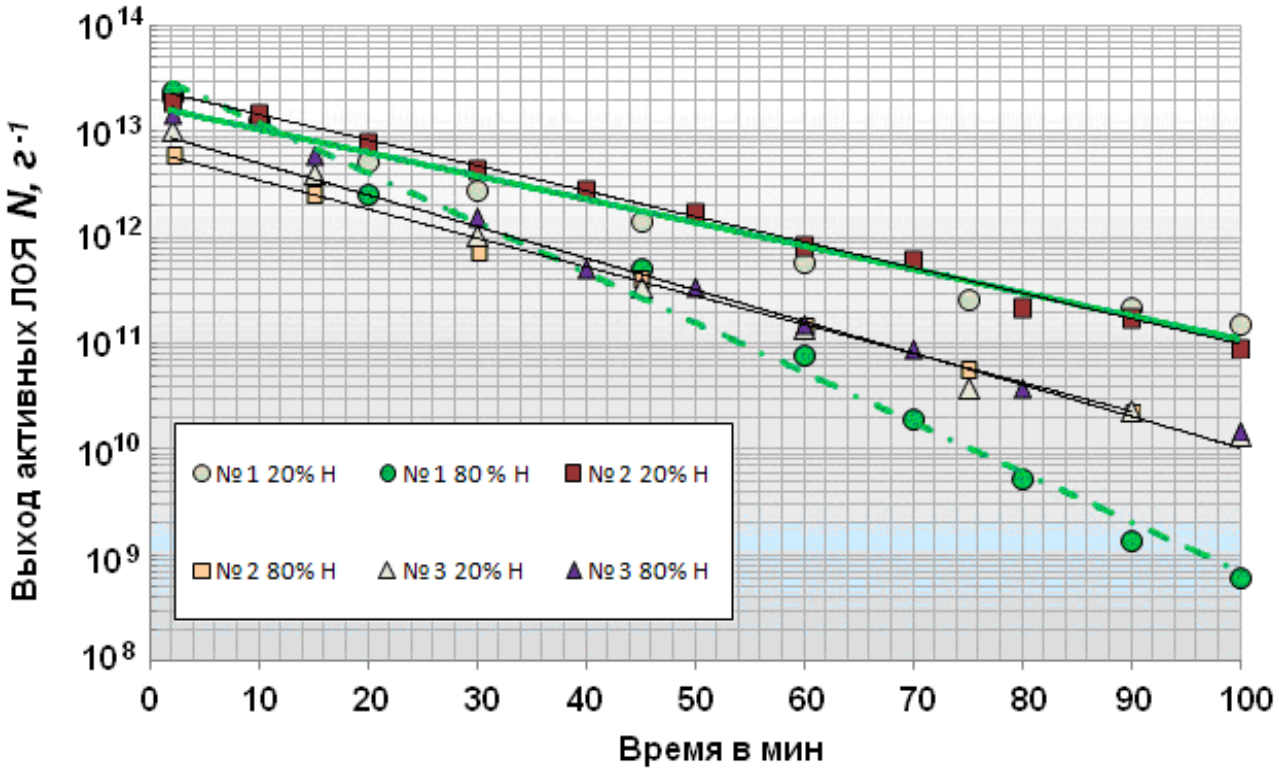


Рис. 14.3 – Временной ход изменения льдообразующей активности аэрозоля, получаемого при сжигании 200 мг пиросоставов с 8 и 9,64% содержанием AgI и йодирующих добавок KJ (№ 1), NH_4JO_3 (№ 2) и $C_7O_2H_5J$ (№ 3) при влажности воздуха 20 и 80% [7]

Результаты измерения выхода ЛОЯ методом ЦАО состава «АД-1», применяемого для снаряжения ПГИ «Алазань-6», а также разработанных НИИПХ совместно с ЧПО им. Чапаева и АНО «Агентство АТТЕХ» новых составов повышенной эффективности представлены на рисунке 14.4. Из рисунка следует, что наиболее высокой активностью обладает состав «СК-1-10», в котором в качестве льдообразующего реагента вместо AgI используется серебро-медь йодат в соотношении 3:1 (3AgI-CuI) с содержанием йодата 10%. Высокой активностью обладает также состав «СК-1» с содержанием 10% AgI и 15% йодистого аммония NH_4I, в качестве йодирующей добавки.

Отличительной особенностью составов «СК-1» и «СК-1-10» является высокая скорость горения, вследствие чего они могут быть рекомендованы для снаряжения ПГИ, имеющих повышенные скорости движения, в качестве льдообразующего твердого топлива.

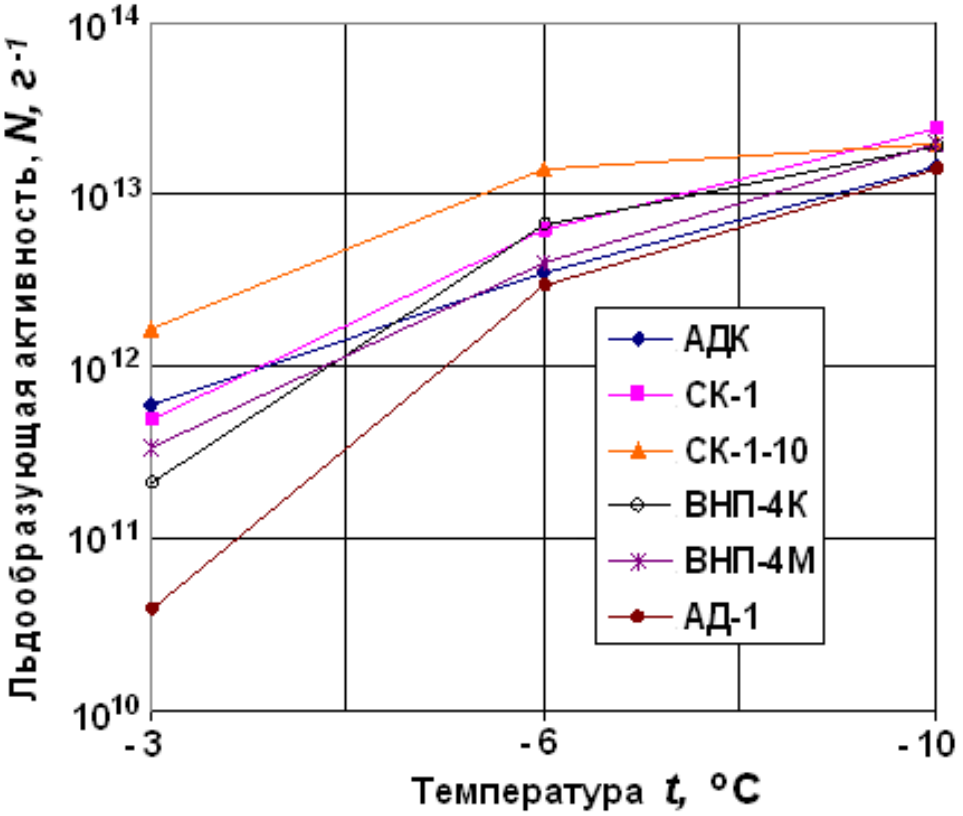


Рис. 14.4 – Результаты испытаний льдообразующей эффективности состава «АД-1» в сравнении с эффективностью новых пиросоставов [8]

14.2.4.2 ***Метод испытания в аэродинамических трубах*** [9] предусматривает:

– сжигание полноразмерных моделей ПГИ или их головных частей в потоке при скоростях обдува от 25 до 100 м/с (рис. 14.5);

– взятие шприцом объема 2 л проб аэрозоля в заборной петле, расположенной за турбулизатором потока;

– введение проб аэрозоля в облачную камеру с переохлажденным туманом и подсчет кристаллов, оседающих на дне облачной камеры, с помощью оптического микроскопа.

Т.е. забор проб аэрозоля и подсчет количества активного аэрозоля такой же, как и при лабораторном сжигании навесок реагента.

Преимуществом этого метода является то, что испытываются реальные генераторы с реальным процессом возгонки реагента при реальной температуре и давлении в генераторе аэрозоля. Однако генерация аэрозоля в облаках в условиях 100% влажности и разреженной атмосферы (на высоте 3 – 6 км) существенно отличаются от наземных условий генерации, поэтому какое количество ЛОЯ вносится при реальном засеве облаков остается, к сожалению, не известным.

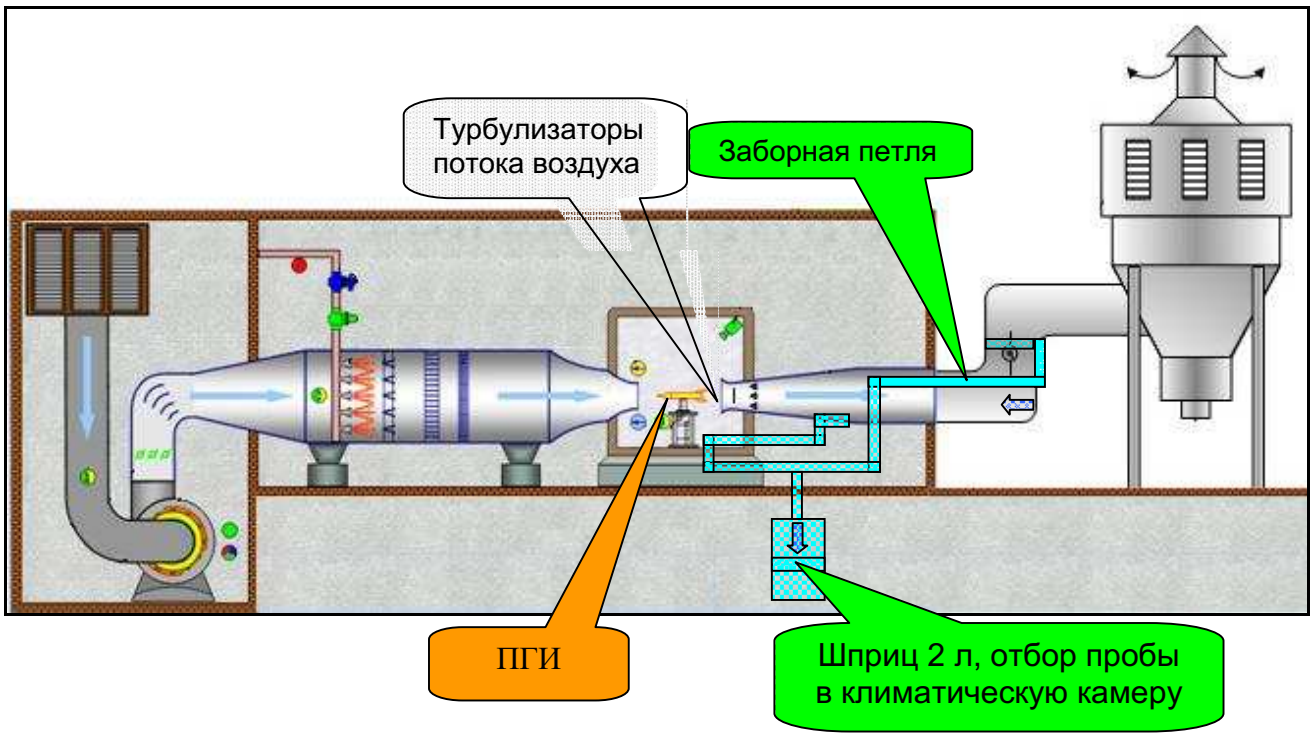


Рис. 14.5 – Схема испытаний льдообразующей эффективности ПГИ в аэродинамической трубе «НПО «Тайфун» при скоростях обдува 90 ± 10 м/с [9]

Испытания льдообразующей эффективности полноразмерных моделей ПГИ «Ас», проведенные в аэродинамической трубе «НПО «Тайфун», показали, что при скорости обдува 80 м/с выход ЛОЯ с 1 грамма льдообразующего твердого топлива (ЛТТ) ПЛС-2-214 в течение 2 минут достигает $1{,}9 \cdot 10^{13}$, а с одного ПГИ «Ас», содержащего 830 г ЛТТ, 1,6 10^{16} ЛОЯ, активных при -10 ^{o}C (рис. 14.6).

Аналогичные испытания выхода ЛОЯ из головных частей ПГИ «Алазань-6», проведенные в аэродинамических трубах «НПО «Тайфун» и малогабаритном аэродинамическом стенде [10] института Электронной инженерии и нанотехнологий АН Молдавии и в лаборатории ЦАО показали согласующиеся в пределах ошибок измерений результаты (рис. 14.7).

Результаты испытаний российских и зарубежных льдообразующих составов, применяемых для снаряжения ПГИ, представлены в таблице 14.1. Из этой таблицы следует, что в аэродинамической трубе при скоростях обдува 80 ÷ 100 м/с выход ЛОЯ ниже, чем в лабораторных условиях (без обдува). При реальных скоростях полета ПГИ (180 – 230 м/с) такое снижение может быть более значимым. Поэтому для получения адекватных данных о количестве вносимых в градовые облака в при активном воздействии на них необходим поиск новых методов испытания льдообразующей эффективности ПГИ в более приближенных к реальным облачным условиям.

Таблица 14.1 – Выход ЛОЯ из одного грамма льдообразующих составов и с одного ПГИ

Дата испытаний и заключения	Место и условия испытаний	Выход ЛОЯ с 1 грамма состава в первые 2 мин		Выход активных ЛОЯ с одного ПГИ при минус 10°С за первые 2 минуты
		При минус 6°С	при минус 10°С	
Льдообразующий состав П50-04-11 для снаряжения ПГИ «Алазань-2М» с 2% содержанием AgI				Дата изготовления и выход ЛОЯ с ПГИ «Алазань-2М»
03.1995	ФГБУ «ЦАО», лабораторная камера сжигания таблеток состава «П50-04-11» с диафрагмированием (диаметр отверстия 1 мм)	$4{,}0\cdot10^{11}$	$9{,}0\cdot10^{12}$	1987 г., $5{,}7\cdot10^{15}$
		$5{,}6\cdot10^{11}$	$7{,}2\cdot10^{12}$	1988 г., $4{,}5\cdot10^{15}$
		$5{,}0\cdot10^{11}$	$8{,}0\cdot10^{12}$	1989 г., $5{,}0\cdot10^{15}$
		$6{,}5\cdot10^{11}$	$6{,}0\cdot10^{12}$	1990 г., $3{,}8\cdot10^{15}$
Льдообразующий состав «АД-1» для снаряжения ПГИ «Алазань-6» с 8% содержанием AgI				С 1-го ПГИ «Алазань-6»
Протокол от 11.01.2001 г.	Аэродинамическая труба НПО «Тайфун», скорость обдува 80 ± 2 м/с	$3{,}7\cdot10^{12}$	$7{,}3\cdot10^{12}$	$4{,}8\cdot10^{15}$
Протокол от 15.07.2014 г.		$2{,}7\cdot10^{12}$	$4{,}5\cdot10^{12}$	$3{,}0\cdot10^{15}$
2012	ФГБУ «ЦАО», лабораторная камера сжигания таблеток состава «АД-1»	$2{,}7\cdot10^{12}$	$9{,}5\cdot10^{12}$	$6{,}7\cdot10^{15}$
2013		$2{,}8\cdot10^{12}$	$1{,}2\cdot10^{13}$	$7{,}6\cdot10^{15}$
Льдообразующее твердое топливо (ЛТТ) ПЛС-2 и ПЛС-2-214 для снаряжения ПГИ «Ас»				С 1-го ПГИ «Ас»
09.06 - 11.06.2014, Акт от 18.06.2014	Аэродинамическая труба НПО «Тайфун», скорость обдува 80 ± 2 м/с	$7{,}2\cdot10^{12}$	$1{,}9\cdot10^{13}$	$1{,}3\cdot10^{16}$
		$5{,}7\cdot10^{12}$	$1{,}9\cdot10^{13}$	$1{,}6\cdot10^{16}$
Состав Австрийской фирмы SAM «AU»				С 1-го ПГИ «Алазань-2МБ»
Протокол от 06.04.1994 г.	Облачная камера Колорадского университета	$5{,}4\cdot10^{12}$	$3{,}0\cdot10^{13}$	$1{,}9\cdot10^{16}$
1993-1994 гг.	Аэродинамическая труба НИТИ (Болгария), скорость обдува 50 м/с		$3{,}6\cdot10^{13}$	$2{,}3\cdot10^{16}$
Льдообразующий состав болгарской фирмы «СтройПроект ЕООД» для снаряжения ПГИ «Лоза»				С 1-го ПГИ «Лоза»
Заключение от 27.12.1913 г.	ФГБУ «ЦАО», лабораторная камера сжигания таблеток состава «АД-1», шашка 1 и шашка 2	$1{,}3\cdot10^{12}$	$\approx 8{,}7\cdot10^{12}$	$3.5\cdot10^{15}$
		$7{,}2\cdot10^{12}$	$1{,}9\cdot10^{13}$	$7{,}6\cdot10^{15}$
29.07.2013	Аэродинамическая труба АН Молдовы, полноразмерный ШАД при скорости обдува 28 м/с, влажности 49% и диафрагме 1 мм	$7{,}0\cdot10^{12}$	$1{,}1\cdot10^{13}$	$4{,}4\cdot10^{15}$
Льдообразующий состав «R2» Македонской фирмы «ICEMAK»				С ПГИ «МТТ-9»
Заключение от 10.11.2009 г.	Облачная камера Хорватского института «DHMZ» (Загреб)	$4{,}2\cdot10^{12}$	$(2{,}07\pm0{,}48)\cdot10^{13}$	$8{,}2\cdot10^{15}$

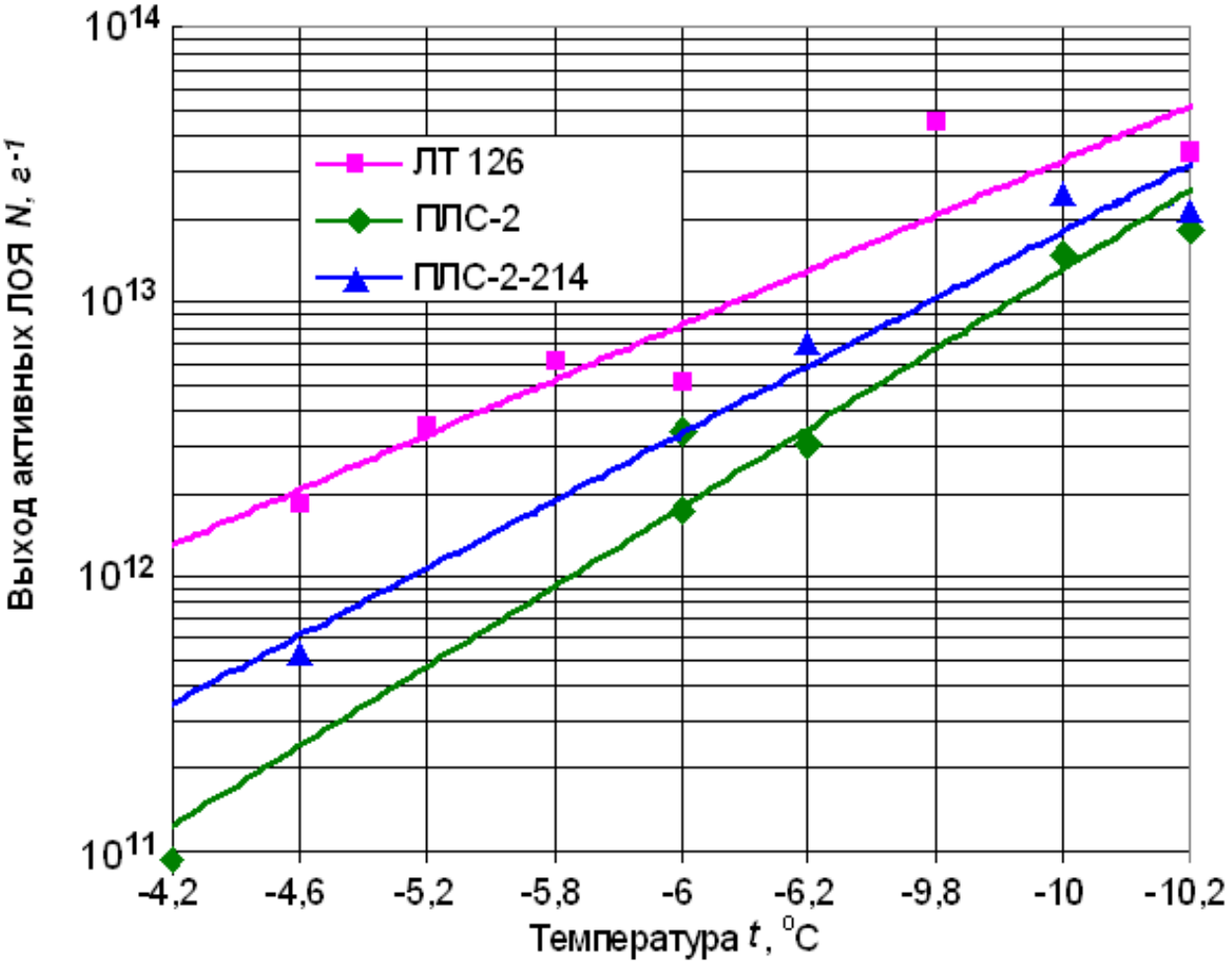


Рис. 14.6 – Выход активных ЛОЯ с 1 грамма различных составов льдообразующего топлива. Состав ЛТ-126 был испытан в январе 2005 г.

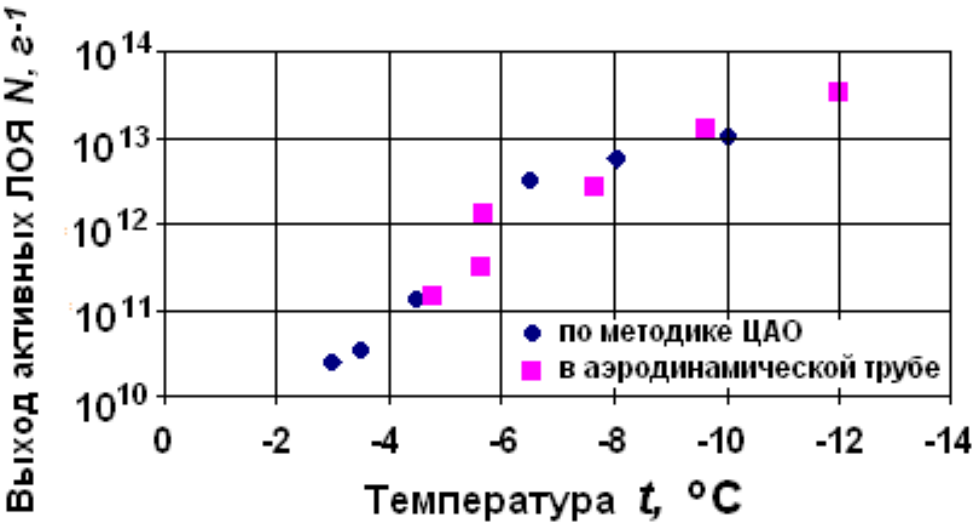


Рис. 14.7 – Выход активных ЛОЯ с 1 грамма состава «АД-1» при испытаниях по методике ЦАО и аэродинамической стенде АН Молдавии [10]

14.2.4.3 По данным теоретического моделирования АВ на градовые процессы влияние засева на микрофизические характеристики фидерных облаков, засеваемых для предотвращения града, тем выше, чем выше начальная концентрация льдообразующего аэрозоля [11]:

– при $n_{k0} = 10^{10}$ м$^{-3}$ начинается проявление эффекта;
– при $n_{k0} \geq 5 \cdot 10^{10}$ м$^{-3}$ отмечается значимое проявление эффекта;
– при $n_{k0} \geq 1 \cdot 10^{11}$ м$^{-3}$ отмечается значимое повышение эффекта;
– при $n_{k0} \geq 5 \cdot 10^{11}$ м$^{-3}$ следует ожидать резкое повышение эффекта.

Значения начальной концентрации кристаллизующих частиц, создаваемых реальными ПГИ, представлены в таблице 14.2, из которой следует, что применяемая в настоящее время противоградовая ракета «Алазань-6» обеспечивает $n_{k0} \approx 4{,}1 \cdot 10^{10}$ м$^{-3}$. Это несколько больше, чем у ранее применявшихся ракет «Алазань-2М», но намного меньше, чем у артиллерийского снаряда «Эльбрус-4». Новая ракета «Алазань-9» может повысить начальную концентрацию ЛОЯ почти в 2 раза по сравнению с «Алазань-6». Более приемлемую начальную концентрацию ЛОЯ ($1{,}5 \cdot 10^{11}$ м$^{-3}$) может обеспечить новая малогабаритная ракета «Ас».

Недостаточная льдообразующая эффективность применяемых ПГИ приводит к снижению эффективности засева градовых облаков и повышению расхода ПГИ, который в значительной степени зависит от типа и льдообразующей эффективности ПГИ.

Таблица 14.2 – Выход активных ЛОЯ из ПГИ различных типов и начальная концентрация, создаваемая ими в объеме засева

Наименование ПГИ	Длина пути засева, м	Диаметр трубы засева, м	Начальный объем засева м^3	Выход активных ЛОЯ, шт.	Начальная концентрация ЛОЯ, м$^{-3}$
Эльбрус-4	в точке	≈ 25	660	$4 \cdot 10^{14}$	$\approx 6{,}0 \cdot 10^{11}$
Алазань-2М	6000	≈ 5	$\approx 1{,}2 \cdot 10^5$	3,0 x 10^{15}	$2{,}5 \cdot 10^{10}$
Алазань-6	8000	≈ 5	$\approx 1{,}6 \cdot 10^5$	$6{,}6 \cdot 10^{15}$	$4{,}1 \cdot 10^{10}$
Алазань-9	7000	≈ 4	$\approx 8{,}8 \cdot 10^4$	$6{,}6 \cdot 10^{15}$	$7{,}5 \cdot 10^{10}$
Алан-2	12000	≈ 4	$\approx 1{,}5 \cdot 10^5$	$1{,}0 \cdot 10^{16}$	$6{,}7 \cdot 10^{10}$
Ас	10000	≈ 4	$\approx 1{,}3 \cdot 10^5$	$2{,}0 \cdot 10^{16}$	$1{,}5 \cdot 10^{11}$

Подтверждением этого является то, что средний расход ПГИ на 100 тыс. га ЗТ в период с 1967 по 1988 г. составлял 1107 шт., а с переходом на применение ПГИ «Алазань-5» и «Алазань-6», снаряженных более эффективными составами расход ПГИ сократился до 531 шт. (рис. 17.12). Четырехкратное сокращение расхода ПГИ отмечается и в Болгарии (рис. 17.13) после замены ПГИ «Алазань-«2М» на «Алазань-«2МБ», в которой головная часть была снаряжена австрийским льдообразующим составом «AU» с выходом ЛОЯ $1{,}9 \div 2{,}3 \cdot 10^{16}$ с 1-го ПГИ.

Но следует отметить, что такое сокращение расхода ПГИ связано не только с повышением их льдообразующей эффективности, но и с серьезным улучшением технологии ПГЗ, ее автоматизацией, а также

повышением качества организации противоградовых работ.

Вместе с тем проблема создания более эффективных пиросоставов, в повышение КПД использования AgI, которое в применяемых составах достигает лишь 5 ÷ 9%, остается актуальной. Другой актуальной проблемой является определение льдообразующей эффективности ПГИ в реальных облачных условиях при 100% влажности и разреженной атмосфере и реальных скоростях полета ПГИ, достигающих 180 ÷ 230 м/с.

14.3 Гигроскопические реагенты

В качестве гигроскопических реагентов для АВ на облака применяются:

– мелкодисперсные порошки NaCl и других гидрофильных веществ и соединений, получаемых в результате сжигания гигроскопических пиросоставов в виде сухих частиц;
– крупнодисперсные порошки (цемент, доломит);
– крупнодисперсные растворы гигроскопических веществ или воды.

14.3.1 Применения мелкодисперсных гигроскопических порошков предусматривает создание капель солевых растворов, над которыми упругость насыщения водяного пара меньше, и они могут расти за счет перегонки водяного пара с окружающих облачных капель, не содержащих соли. По данным лабораторных и теоретических исследований наиболее эффективными являются частицы диаметром более 2 – 5 мкм.

В ЮАР был проведен успешный проект по искусственному увеличению осадков с применением гигроскопических шашек с достаточно широким спектром аэрозоля [12]. Испытания этих шашек в НПО «Тайфун» показали, что эффект обеспечивают наиболее крупные частицы аэрозоля.

С учетом этого в НПО «Тайфун» создан новый полидисперсный солевой порошок для стимулирования осадков из конвективных облаков, который представляет собой порошок NaCl в смеси с аэросилом (SiO_2), используемым в качестве антислеживающей добавки [13]. По данным исследований в большой облачной камере частицы радиусом более 6 мкм, представляющие собой конгломераты из крупных частиц соли с прилипшими к ним более мелкими частицами соли или аэросила, способствуют укрупнению облачных капель и могут стимулировать гравитационную коагуляцию и образование осадков в облаках [14].

14.3.2 Сброс с самолета упаковок цемента (доломита) с вершины мощных конвективных облаков успешно используются для их разрушения и предотвращения осадков в работах по улучшению погодных условий над мегаполисами в дни массовых праздничных мероприятий [15, 16]. Эти

порошки после сброса на вершины мощно-кучевых облаков обеспечивают вымывание облачных капель в объеме их распыления, формирование искусственных осадков и создание импульса нисходящих потоков, приводящих к разрушению засеянных облаков.

14.3.3 Высокую эффективность обеспечивает засев облаков готовыми центрами коагуляции, представляющими собой крупнодисперсную аэрозоль растворов гигроскопических веществ или воды. Теоретическое моделирование такого засева мощно-кучевых облаков при массе грубодисперсного аэрозоля 100 – 1000 кг обеспечивает вымывание облачной воды за 2 – 5 мин, и стимулирует выпадение осадков в 10^4 – 10^5 раз больше массы вносимого аэрозоля [17, 18]. Выпадение искусственных осадков способствует подавлению восходящих потоков и может привести к быстрому разрушению мощных конвективных облаков. Эффект воздействия повышается по мере увеличения общей массы вводимых центров коагуляции. Оптимальным является засев центрами коагуляции размером 30 – 40 мкм [18], выход которых с единицы разбрызгиваемой массы больше, чем более крупных частиц. Такой засев фидерных облаков в градовых процессах позволит реализовать эффективный динамический метод предотвращения града (раздел 10.6).

14.4. Закономерности распространения реагентов в облаках

14.4.1 Эффективность АВ на облака в значительной степени зависит от особенностей распространения аэрозоля в облаках, происходящего за счет следующих основных факторов:

– турбулентная диффузия;
– вертикальный и горизонтальный перенос воздушными потоками;
– вымывание гидрометеорами;
– гравитационное осаждение.

При этом наиболее значимыми факторами, влияющими на распространение аэрозоля, являются турбулентная диффузия и перенос воздушными потоками, которые в свою очередь зависят от места и способа внесения реагента.

Внесение реагента наземными и авиационными генераторами приводит к тому, что реагент попадает в требуемую зону с большим запозданием и в низкой концентрации, а значительная его часть попадает в неблагоприятные для кристаллизации облачные объемы.

Более приемлемы ракетный и артиллерийский способы засева градовых облаков, которые обеспечивают прямое внесение реагента в требуемый облачный объем, на требуемой высоте и в требуемой

концентрации. При этом ракетный засев более предпочтителен благодаря более высокой оперативности засева всего требуемого облачного объема.

Исследования закономерностей распространения аэрозоля в градовых облаках из-за сложности натурных измерений осуществляются в основном методами теоретического моделирования. Недостаток знаний о параметрах облаков и их окружения вынуждает использовать идеализированные модели с параметризованной облачной динамикой.

14.4.2 ***Аналитические модели распространения.*** Наиболее простая модель эволюции концентрации реагента основывается на допущении схожести пространственного распространения частиц реагента с увеличивающимся со временем пространственным масштабом растекания аэрозоля. Учитывая, что реальная адвекция и турбулентность обладают пространственной и временной неоднородностью, модели могут дать лишь некую осредненную картину реального процесса распространения аэрозоля. Выделяют две различных модели растекания: *модель «Top Hat»* предполагающую, что концентрация равномерна в сечении эллипса, определяемого по коэффициентам рассеяния и геометрии засева, и *модель «Гаусса»*, предполагающую, что концентрация убывает от места внесения реагента экспоненциально с квадратом расстояния.

Концентрация частиц реагента, вносимых мгновенным линейным источником (например, при ракетном засеве или засеве бортовыми генераторами), параллельным оси *y*, может быть рассчитана по формулам:

по модели *«Top Hat»*:

$$n(x,y,z,t)=\begin{cases}\dfrac{N}{\pi\,\sigma_x\sigma_z}, & \text{внутри эллипса}\\ 0, & \text{вне эллипса}\end{cases} \qquad (14.1)$$

по модели *«Гаусса»*:

$$n(x,y,z,t)=\frac{N}{2\pi\sigma_x\sigma_z}\exp\left\{-\frac{x^2}{2\sigma_x{}^2}-\frac{z^2}{2\sigma_z{}^2}\right\} \qquad (14.2)$$

где $n(x, y, z, t)$ – концентрация частиц реагента в момент времени t; N – общее число частиц, выделяемых источником; $\sigma_x=\sigma_x(t)$ и $\sigma_z=\sigma_z(t)$ – стандартные отклонения концентраций частиц за счет крупномасштабных флуктуаций скорости ветра по осям *x* и *z.*

В работах [19, 20, 21] на основе модели «Гаусса» распространения концентрация частиц от *мгновенного точечного источника*, расположенного высоко над землей, рассчитывается по формуле:

$$n(x,y,z,\tau)=\frac{N}{2\sqrt{2}\pi^{3/2}\sigma_x\sigma_y\sigma_z}\exp\left\{-\left[\frac{(x-\overline{u}_0\tau)^2}{2\sigma_x{}^2}+\frac{y^2}{2\sigma_y{}^2}+\frac{z^2}{2\sigma_z{}^2}\right]\right\}, \quad (14.3)$$

где $\overline{u}_0$ – средняя скорость ветра, направленная по оси *x* в рассматриваемом слое атмосферы; τ – время диффузии, отсчитываемое от момента срабатывания источника, расположенного в начале координат.

Концентрации частиц от *мгновенного линейного источника*, ориентированного перпендикулярно к ветру, рассчитывается по формуле

$$n(x,z)=\frac{N_{L_y}}{2\pi\sigma_x\sigma_z}\exp\left\{-\left[\frac{(x-\overline{u}_0\tau)^2}{2\sigma_x{}^2}+\frac{z^2}{2\sigma_z{}^2}\right]\right\}, \quad (14.4)$$

где N_{L_y} – число частиц, образуемое источником на единицу его длины.

В отчете экспертов ВМО принято считать удовлетворительной двухстадийную Гауссову модель описания диффузии аэрозоля в атмосфере. Первая стадия охватывает изменение размеров вихрей до сравнимых с Лагранжевым масштабом турбулентности, который определяется как интеграл автокорреляционной функции Лагранжа и составляет примерно 200 м. На этой стадии временной характер изменения параметров диффузии описывается соотношением:

$$\sigma_1^2=\sigma_x^2=\sigma_y^2=\sigma_z^2=\sigma_0+c^2\varepsilon t^3, \quad (14.5)$$

где σ_0 – начальное стандартное отклонение распределения концентраций, обусловленное механизмом генерации частиц, величиной которого для рассматриваемых времен диффузии будем пренебрегать; ε – скорость диссипации кинетической энергии турбулентности; *c* – константа (*c* ~ 0,25).

На второй стадии стандартное отклонение σ записывается в виде:

$$\sigma_2^2=\sigma_1^2+2k\tau', \quad (1.6)$$

где *k* – постоянный во времени коэффициент диффузии; σ_1 – стандартное отклонение к началу второй стадии; τ' – время диффузии, отсчитываемое от начала второй стадии, полагаемое равным $t=\sqrt{\frac{2k}{c^2\varepsilon}}$.

Расчетная формула стандартных отклонений σ_x и σ_z для этой модели диффузии может быть записана в виде:

$$\sigma_x^2=\sigma_z^2=\begin{cases}0{,}0625\cdot\varepsilon\cdot t^3, \text{ при } 0<t\le\sqrt{\frac{32k}{\varepsilon}},\\ 0{,}0625\cdot\varepsilon\cdot\left(\frac{32k}{\varepsilon}\right)^{3/2}+2k\left(t-\sqrt{\frac{32k}{\varepsilon}}\right), \text{ при } t>\sqrt{\frac{32k}{\varepsilon}}.\end{cases} \quad (14.7)$$

В работе [22] рассматриваются результаты экспериментального исследования распространения трассеров, а в [23] дипольных отражателей и инертного газа в конвективных облаках. В этих работах показано, что при имитации засева на уровне основания фидерных облаков, применяемого в авиационной технологии предотвращения града, трассеры и дипольные отражатели достигают уровня изотерм -6 °С через 6 – 12 минут, что сравнимо с продолжительностью градообразования в областях первого радиоэха.

Теоретическое моделирование диффузионного распространения реагента при ракетном засеве с применением известного уравнения $\sigma = \sigma_0 + C\varepsilon^{1/2}T^{1/2}$ показало, что время пребывания ракетного следа в области зарождения града (в слое между уровнями изотерм -8 и 12°С) при средней скорости восходящего потока 5 м/с, составляет около 100 с [24]. В течение этого времени диаметр трубы аэрозоля достигнет только 50 – 110 м, и при длине траектории засева 3 км объем засева составит всего 0,1 км^3 , что очень мало и для полного засева требуется 100 – 1000 ракет. Авторы делают вывод, что существующие ракеты не выполняют ни одну из концепций воздействия.

При малых временах $t < \tau_L$ (где τ_L – Лагранжев масштаб времени) диффузия аэрозоля определяется вихрями, масштаб которых меньше или порядка расстояния между ними. Со временем вклад таких высокочастотных пульсаций уменьшается, и включаются вихри более крупных масштабов, пока характерный масштаб неоднородностей градиента средней концентрации аэрозоля не превысит Лагранжев пространственный масштаб турбулентных движений L. При больших временах диффузии $t >> \tau_L$ процесс диффузионного рассеяния аэрозольного облака будет определяться, в основном, низкочастотными вихрями, обладающими максимальной энергией.

14.4.3 *Трех стадийная диффузия аэрозоля, вносимого ПГИ*

Для теоретического исследования турбулентной диффузии искусственного аэрозоля, вносимого реальными ПГИ в градовые облака, в работах [25, 26] предложено трех стадийное описание диффузионного процесса с определением функционального вида коэффициентов турбулентной диффузии в уравнении (14.8) на каждой стадии. Времена перехода от первой стадии ко второй t_{x1} и от второй к третьей t_{x2} найдены в виде:

а) *Для горизонтальной турбулентной диффузии:*

$$t_{x1} = \delta_0^{2/3}\varepsilon^{-1/3} \approx \begin{cases} 45\ \text{с} \div 100\ \text{с}, & \text{для слоистых облаков}, \\ 14\ \text{с} \div 33\ \text{с}, & \text{для Cu Cong}, \\ 7\ \text{с} \div 18\ \text{с}, & \text{для Cb}, \end{cases} \tag{14.9}$$

$$t_{x2} = \sqrt{\frac{2\sigma_U^2\tau_L}{3C'\varepsilon}} = \sigma_U\sqrt{\frac{2\tau_L}{3C'\varepsilon}} \approx \begin{cases} 160\ \text{с} \div 400\ \text{с}, & \text{для слоистых облаков}, \\ 48\ \text{с} \div 150\ \text{с}, & \text{для Cu Cong}, \\ 75\ \text{с} \div 113\ \text{с}, & \text{для Cb}, \end{cases} \tag{14.10}$$

б) *Для вертикальной турбулентной диффузии:* $t_{z1} = t_{x1}$,

$$t_{z2} = \sqrt{\frac{2}{3C'C''}} \cdot \frac{\sigma_w^2}{\varepsilon}(1-\beta_1 R_i^*)^{\beta_2/2} \approx \begin{cases} 45\ \text{с} \div 900\ \text{с} & \text{для Cu cong}, \\ 11\ \text{с} \div 2063\ \text{с} & \text{для Cb}, \end{cases} \tag{14.11}$$

где δ_0^2 – средний квадрат начальных расстояний между аэрозольными частицами, определяющийся начальными размерами аэрозольного облака; $C' \approx 0{,}3$ – константа из закона «2/3» Колмогорова; ε – скорость диссипации кинетической энергии турбулентности.

В случае размещения начала координат в точке выброса аэрозоля, направления оси OX вдоль средней скорости движения ПГИ, оси OZ – вертикально вверх, в предположении совпадения главных осей тензора коэффициентов турбулентной диффузии с осями координат, однородности и изотропности среды в горизонтальной плоскости, получено уравнение для распространения аэрозоля в виде:

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \alpha\left(u\frac{\partial n}{\partial x} + \widetilde{w}\frac{\partial n}{\partial z}\right) + \beta\left(\frac{\partial}{\partial x}(un) + \frac{\partial}{\partial z}(\widetilde{w}n)\right) = \mu\Delta_н n + \frac{\partial}{\partial z}\left(\nu\frac{\partial n}{\partial z}\right), \tag{14.12}$$

где $\Delta_H = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$ – горизонтальный оператор Лапласа; *u* – скорость движения среды в горизонтальном направлении; α и β – модельные параметры ($0 \le \alpha, \beta \le 1$, $\alpha + \beta = 1$), позволяющие представлять адвекцию в различных формах: консервативной ($\alpha = 0$, $\beta = 1$), неконсервативной ($\alpha = 1$, $\beta = 0$), симметризованной ($\alpha = \beta = 0{,}5$); $S_i = -\overline{u_i' n'}$ – турбулентные потоки аэрозоля, вызванные турбулентными пульсациями полей концентрации и скоростей; $\widetilde{w} = w$ для монодисперсного и мелкодисперсного аэрозоля, $\widetilde{w} = w - \overline{V}_g$ для полидисперсного грубодисперсного аэрозоля; *w* – скорость движения среды в вертикальном направлении; $\overline{V}_g$ – средняя скорость седиментации аэрозоля.

Уравнение (14.8) дополняется начальным условием вида $n\big|_{t=0} = n_0(x,y,z)$ и условием поглощения на границе $n\big|_{\Gamma} = 0$.

Расчеты процесса трехстадийной турбулентной диффузии и пространственного распределения концентрации аэрозоля осуществлялись применительно к Cu Cong, какими являются фидерные облака, засеваемые в соответствии с технологией ПГЗ. В этой модели была заданна структура полей турбулентности D_T и скорости восходящих потоков W, в которых максимумы D_T = 300 м^2/с *и* W = 7 м/с располагаются в центре облака, а значения D_T и W убывают к периферии, основанию и вершине облака.

Считалось, что артиллерийский снаряд обеспечивает точечное внесение ЛОЯ, а ракеты являются линейным источником ЛОЯ. Траекторий внесения реагента ракетами «Алан-2» и «Алазань-6» аппроксимированы выражениями: $H = -0{,}057X^2 + 0{,}788X + 1{,}466$ и $H = -0{,}072X^2 + 1{,}273X - 0{,}924$, где H и X – высота и дальность ракеты на траектории полета в км.

На рисунках 14.8 и 14.9 представлены результаты расчетов полей концентрации кристаллизующего аэрозоля через 1, 3 и 5 мин после внесения в Cu Cong серии ПГИ «Алазань-6» и артиллерийских снарядов «Эльбрус-4» с расстоянием друг от друга около 1 км. Из этих рисунков следует, что объемы распространения аэрозоля быстро увеличиваются со временем.

Особенно быстрая диффузия аэрозоля отмечается в центральной части Cu Cong, где турбулентность и восходящие потоки максимальны. Уже через 1 минуту после засева расстояние между объемами засева соседних источников сокращается от 1,0 км до 0,5 км. В дальнейшем объемы распространения аэрозоля быстро увеличиваются и через 3 мин сливаются объемы с концентрацией аэрозоля $n > 10^5$ м$^{-3}$. Вертикальная протяженность объема распространения аэрозоля в центральной части облака через 1 минуту составляет 0,7 км, через 3 минуты более 2,5 км.

Максимальная концентрация аэрозоля, составляющая в момент внесения ПГИ $n_0 \geq 10^{10}$ м$^{-3}$, в течение первой минуты распространения уменьшается более чем в 10^2 раз, за 3 минуты – более чем в 10^3 раз.

Концентрация аэрозоля более 10^7 м$^{-3}$, необходимая для реализации физического принципа предотвращения града (за счет стимулирования осадков до начала градообразования), отмечается в локальных объемах (около 10 – 20% объема градообразования) в короткие промежутки времени.

Поэтому на практике ПГЗ для прерывания выпадения града из мощных градовых облаков осуществляется многократный засев, приводящий к завышенному расходу ПГИ. Для устранения этой проблемы

в случае воздействия на сверхмощные и быстротечные градовые процессы необходимо осуществлять *массированный засев*, обеспечивающий создание начальной концентрации льдообразующих частиц не менее $n_0 \geq 10^{11}$ м$^{-3}$. Это может быть достигнуто за счет повышения выхода ЛОЯ в 4 ÷ 6 раз (до 2 ÷ 3·10^{16} с одного ПГИ), либо уменьшения дискретности засева во времени и в пространстве:

– сокращения интервала времени между засевами до 3 – 4 минут;
– сокращения расстояния между точками и линями засева до 0,5 км.

Это требует увеличения расхода ПГИ на каждый разовый засев, но может обеспечить сокращение суммарного расхода за счет уменьшения кратности засева и более быстрого достижения желаемого эффекта. Испытания этих рекомендаций подтвердили их эффективность и целесообразность применения в практике ПГЗ.

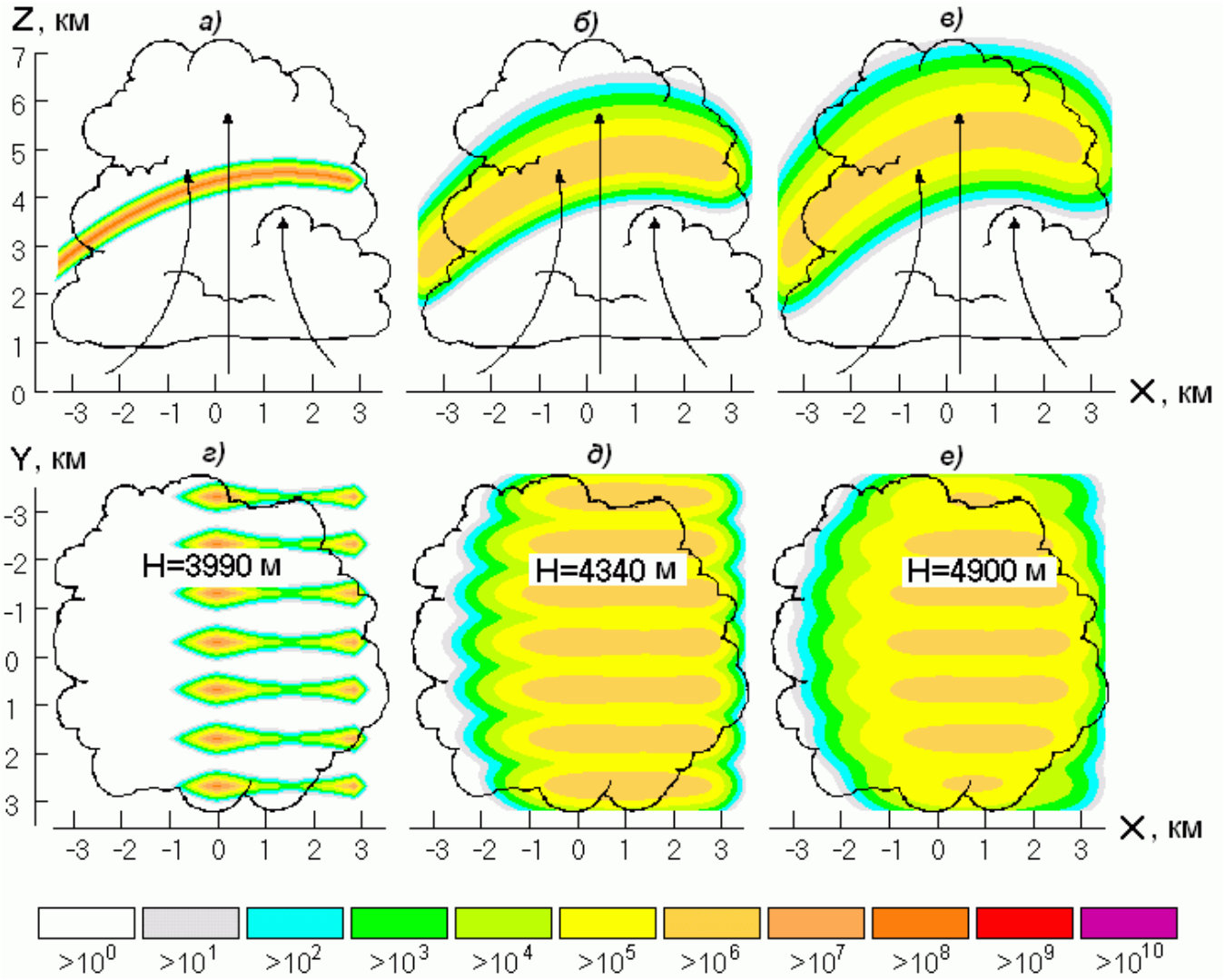


Рис. 14.8 – Вертикальные (*а* ÷ *в*) и горизонтальные (*г* ÷ *е*) сечения области распространения кристаллизующего аэрозоля в изолиниях концентрации частиц *n* (м$^{-3}$) через 1 (*а*, *г*), 3 (*б*, *д*) и 5 мин (*в*, *е*) после засева Cu Cong с помощью ПГИ «Алазань-6»

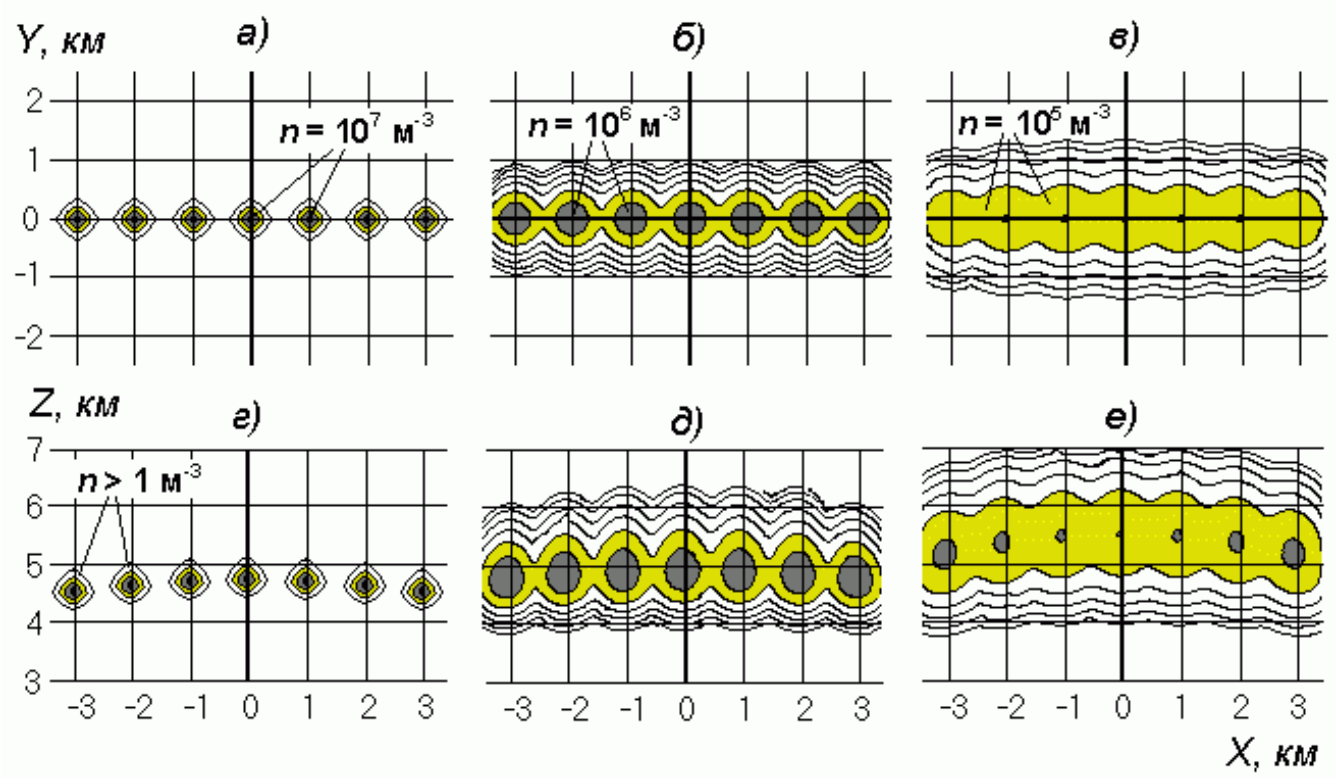


Рис. 14.9 – Горизонтальные (*а* – *в*) и вертикальные (*г* – *е*) сечения области распространения кристаллизующего аэрозоля в Cu Cong после засева артиллерийскими снарядами "Эльбрус-4" в изолиниях концентрации частиц *n* ($м^{-3}$) через 1 (*а*, *г*), 3 (*б*, *д*) и 5 мин (*в*, *е*)

15 ПОРЯДОК ОРГАНИЗАЦИИ ПРОТИВОГРАДОВЫХ РАБОТ

Организация ПГЗ предусматривает:

а) экономическое обоснование целесообразности ПГЗ, выбор территории и определение площади защищаемой территории;

б) разработку проекта системы ПГЗ с привязкой технологии к реальным климатическим и физико-географическим условиям региона и площади ПГЗ;

б) реализацию мероприятий по созданию системы ПГЗ, включая оформление лицензии, закупку необходимого оборудования, набор и подготовку персонала и необходимой документации;

в) подготовку инфраструктуры системы ПГЗ, включая строительство баз командных и ракетных пунктов, подготовку комплекса технических средств, организацию работы противоградовых подразделений и порядка их взаимодействия.

15.1 Экономическое обоснование ПГЗ

15.1.1. Защиту от градобитий целесообразно осуществлять в районах с интенсивным агропромышленным производством и повышенной частотой выпадения града, где ущерб от града значительно превышает затраты на организацию и проведение ПГЗ. В районах с частым выпадением крупного града экономически целесообразна защита некоторых объектов и сооружений типа:

– теплиц, в которых ущерб наносит не только и не столько гибель выращиваемых культур, сколько битое стекло, для удаления которого приходится удалять весь почвенный слой;

– автомашин, кузова которых из-за многочисленных вмятин и разбитых стекол приходят в негодность, приводя к разорению страховых агентств (например, в провинции Альберта Канады, где осуществляется защита автомагистралей и городов).

15.1.2 Для принятия решения о проведении ПГЗ необходимо провести экономическое обоснование на основе анализа многолетних данных о частоте выпадения града и ущербе от градобитий. Учитывая большую пространственно-временную изменчивость этих характеристик желательно охватить максимально длительный период (не менее 10 лет), чтобы получить статистически значимую оценку средних значений частоты градобитий и потерь от града, и пределов их вариации.

Основными источниками информации о частоте выпадения града являются таблицы «ТМС» (раздел атмосферные явления),

метеорологические книжки «КМ-1» и справочники по климату СССР, содержащие информацию за длительные периоды наблюдений.

Дополнительным источником информации могут быть данные сети МРЛ, которые фиксируют выпадение града между пунктами наблюдений, а также данные органов сельского хозяйства, страховых компаний и пострадавших от градобития хозяйств.

Данные о выпадении града следует внести в таблицу с четырьмя столбцами (название пункта наблюдений, координаты, год наблюдений и количество случаев выпадения града), рассчитать среднюю частоту выпадения града по каждому пункту наблюдения, построить региональную карту и провести районирование территории по частоте выпадения града в соответствии с РД 52.37.722.

15.1.3 Основным источником информации о площадях градобитий, степени повреждения и ущербе от града являются:

– акты обследования градобитий, имеющиеся в архивах региональных ЦГМС и ВС Росгидромета;
– акты о гибели посевов в архивах органов сельского хозяйства;
– ведомости страховых компаний о выплате возмещения;
– данные градомерной сети (при ее наличии).

Данные этих источников следует внести в таблицу 15.1 и рассчитать среднюю многолетнюю площадь градобитий в пересчёте на 100% повреждения, ущерб от градобитий и построить региональную карту распределения ущерба, которая служит для районирования территории по градоопасности и корректного выбора границ области защиты.

15.1.4 Оценку целесообразности организации ПГЗ на основе полученных данных следует осуществлять следующим образом:

15.1.4.1 Определить общую площадь S (га), на которой планируется проведение ПГЗ и площадь сельхозкультур на этой территории S_K (га).

15.1.4.2 По данным таблицы 15.1 рассчитать среднюю многолетнюю площадь градобитий в пересчете на 100% повреждения S_{100} (га), равную

$$S_{100} = \sum_{i=1}^{I} \frac{K_i S_{П_i}}{100}, \qquad (15.1)$$

15.1.4.3 Рассчитать среднегодовую долю потерь сельхозпродукции на планируемой площади ПГЗ $\overline{N}$, равную

$$\overline{N} = \boldsymbol{s}_{100} / S_K \qquad (15.2)$$

15.1.4.4 Оценить среднегодовой ущерб $У$ (млн руб.). Например, при S_K = 600 000 га, $\overline{N}$ = 0,07, средней стоимости урожая $\overline{\boldsymbol{c}}$ = 30 000 руб/га

$$У = \overline{N} \cdot S_К \cdot \overline{C} = 0{,}07 \cdot 600000 \cdot 30000 \approx 1260 \text{ млн руб.} \qquad (15.3)$$

Таблица 15.1 – Сведения о повреждениях посевов от градобития

Название пострадавшей от града сельхоз культуры	Площадь повреждения от града S_i, га	Степень повреждения K_i, %	Площадь градобития в пересчете на 100% повреждения S_{100}, га	Средняя стоимость урожая с 1 га $\overline{C}$, руб.	Размер ущерба **У**, руб.
Всего:		-			

15.1.4.5 Оценить *ожидаемый экономический эффект* ПГЗ:

$$E_e = \overline{E}_f \overline{N} S_k \overline{C}, \qquad (15.4)$$

где $\overline{E}_f$ – средняя физическая эффективность защиты, которую для автоматизированной ракетной технологии ПГЗ можно взять равной 0,85.

При S_K = 600 000 га, $\overline{N}$ = 0,07, $\overline{C}$ = 30 000 руб/га и $\overline{E}_f$ = 0,85 ожидаемый среднегодовой экономический эффект составит:

$$E_e = \overline{E}_f \overline{N} S_k \overline{C} = 0{,}85 \cdot 0{,}07 \cdot 600000 \cdot 30000 \approx 1070 \text{ млн руб.} \qquad (15.4')$$

15.1.4.6 Заполнить таблицу типа 15.2 и оценить затраты (*З*, млн руб.) на организацию и проведения ПГЗ. Из таблицы 15.2 следует, что в первом году ПГЗ с учетом затрат на закупку оборудования и капитальное строительство, стоимость защиты общей площади 800 тысяч га составит около 548 млн руб., а в последующие годы – около 152 млн руб.

Себестоимость защиты 1 га в первом году составит 685 руб./га, а в последующие годы – 190 руб./га.

15.1.4.7 Оценить ожидаемую окупаемость затрат на проведение ПГЗ:

– в первом году реализации проекта окупаемость затрат составит:

$$R = E_e/З = 1070000/548\,040 \approx 2 \text{ раза;}$$

– в последующие годы защиты окупаемость затрат составит:

$$R = E_e/З = 1070000/151\,680 \approx 7 \text{ раз.}$$

15.1.4.8 Сделать вывод о целесообразности организации ПГЗ. При заданной в рассмотренном примере градоопасности территории и стоимости урожая, присущей для зерновых районов Северного Кавказа, организация ПГЗ экономически целесообразна и рентабельна. Затраты во второй и последующие годы ПГЗ будут окупаться семикратно, не считая прибыли от переработки спасенной продукции.

Таблица 15.2 – Оценка примерной стоимости проекта ПГЗ на площади S = 800 000 га при S_K = 600 000 га

№ пп	Наименование статьи затрат	Требуемое количество, шт.	Цена 1 шт., тысяч, руб	Общая стоимость, тысяч руб	
				В первом году	В последующие годы
1	ОБОРУДОВАНИЕ:				
1.1	Радиолокатор «ДМРЛ-10»	1	58 000	58 000	–
1.2	ПТК автоматизированной системы «ASU-Град»	1	9 000	9 000	–
1.3	Автоматизированная ракетная установка «Elia-2»	52	450	23 400	–
1.4	Радиомодемы «Racom RipEX»	60	75	4 500	–
1.5	Автотранспорт (легковой и грузовой)	10	400	4 000	–
1.6	Противоградовые ракеты «Ас» или «Алазань-9»	5 500	≈ 10	55 000	55 000
1.7	Расходные материалы (кабеля, провода)	–	–	400	200
2	ОПЕРАЦИОННЫЕ РАСХОДЫ				
2.1	Зарплата персонала	≈ 280 человек	≈ 180 в год	50 400	50 400
2.2	Транспортные расходы и перевозки		-	3 000	2 000
2.3	Расходы на энергоносители, налоги	–	-	5 000	5 000
2.4	Непредвиденные расходы			5 000	3 000
3	КАПИТАЛЬНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО				
3.1	Строительство базы командного пункта	1	60 000	60 000	5 000
3.2	Строительство и оснащение 52 ракетных пунктов	52	4 000	208 000	20 800
			Всего:	485 700	141 400
			Накладные расходы 20%	97 140	28 280
			Итого:	582 840	169 680
			Стоимость защиты 1 га	0,728	0,212

Примечание: 1. Потребность в ПГИ приведена в соответствии со среднегодовым их расходом в ВС Росгидромета. В годы высокой (низкой) градовой активности расход ПГИ повышается (понижается) пропорционально значению коэффициента градоопасности ***G***.

2. В случае организации ПГЗ в горных районах с узкими долинами для защиты 800 000 га одного «ДМРЛ-10» может быть недостаточно из-за наличия углов закрытия и разброса площадей защиты на большие удаления.

Реальный эффект будет значительно больше, если учесть сокращение ущерба флоре и фауне, крышам и стеклам домов, кузовам автомобилей. Помимо многократного сокращения потерь от града обеспечивается также снижение интенсивности и продолжительности гроз, ливней, шквалов, ливневых паводков, эрозии почвы, разрушения дорожных покрытий, электролиний и других коммуникаций, ущерб от которых сопоставим, а иногда превышает ущерб от града.

Следует отметить, что экономическая эффективность ПГЗ тем выше, чем выше градоопасность защищаемой территории и ценность культивируемых культур. Например, окупаемость затрат на защиту табака, хлопка, виноградников, садов и овощей достигает 10 – 20 раз.

15.1.5 При принятии решения о целесообразности организации и проведения ПГЗ помимо экономической выгоды следует учесть *социальные и экологические аспекты:*

– предотвращение банкротства агропромышленных и фермерских хозяйств из-за градобитий;

– создание дополнительных рабочих мест;

– обеспечение метеорологической безопасности населения и объектов и создание благоприятных условий для флоры и фауны.

15.2 Подготовка проекта системы ПГЗ

15.2.1 ***Проект системы ПГЗ*** должен содержать:

А) Название и основные принципы рекомендуемой технологии ПГЗ;

Б) Перечень оборудования, рекомендуемого для создания технической системы ПГЗ, включая:

– типы, стоимость и требуемое количество МРЛ, автоматизированных систем управления противоградовыми операциями, ракетных установок, средств связи, автотранспорта и материалов (табл. 15.2);

– краткое описание и основные характеристики рекомендуемых технических средств с иллюстрациями;

– типы рекомендуемых ПГИ с оценкой их годового расхода;

В) Характеристика района ПГЗ, в том числе:

– географическое положение, рельеф;

– карта-схема защищаемой территории с четко очерченными границами и позициями командных и ракетных пунктов;

– краткая характеристика климата региона (режим осадков, влажности, температуры, основные климатообразующие факторы, направления вторжения холодных фронтов);

– результаты статистических исследований градоопасности региона: карта изолиний частоты выпадения града, сезонный и суточный ход выпадения града с таблицами исходных данных;
– результаты исследований ущерба от града
– специализация агропромышленного производства и риски.

Г) Организационная структура системы ПГЗ:
– состав службы, количество отрядов, КП и ПВ;
– штатное расписание персонала и затраты на его содержание;
– перечень служебных и жилых помещений на командных и ракетных пунктах, предоставляемых Заказчиком и требующих нового строительства;
– расшифровка и оценка затрат на создание КП и, ПВ, приобретение оргтехники и материалов;
– выбор проектов и оценка сроков строительства баз КП и ПВ.

Д) Экономическое обоснование целесообразности организации ПГЗ:
– оценка стоимости системы ПГЗ;
– оценка ожидаемой экономической эффективности ПГЗ;
– оценка социальных и экологических эффектов;
– оценка рисков и неопределенностей;
– обоснование целесообразности реализации проекта ПГЗ.

Е) Порядок реализации проекта ПГЗ, в том числе:
– календарный план создания системы ПГЗ;
– порядок подготовки персонала;
определение научно-методических, строительных и монтажных учреждений, поставщиков оборудования, материалов и услуг.

15.3 Создание системы ПГЗ

15.3.1 Организация противоградовых служб

Для проведения противоградовых работ создаются специализированные противоградовые службы. В Российской Федерации противоградовые работы осуществляются (рис. 15.1) Краснодарской, Ставропольской, Северо-Кавказской и Крымской ВС по активному воздействию на метеорологические и другие геофизические процессы, имеющими статус федеральных государственных бюджетных учреждений, которые в административном плане подчиняются Федеральной службе по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет).

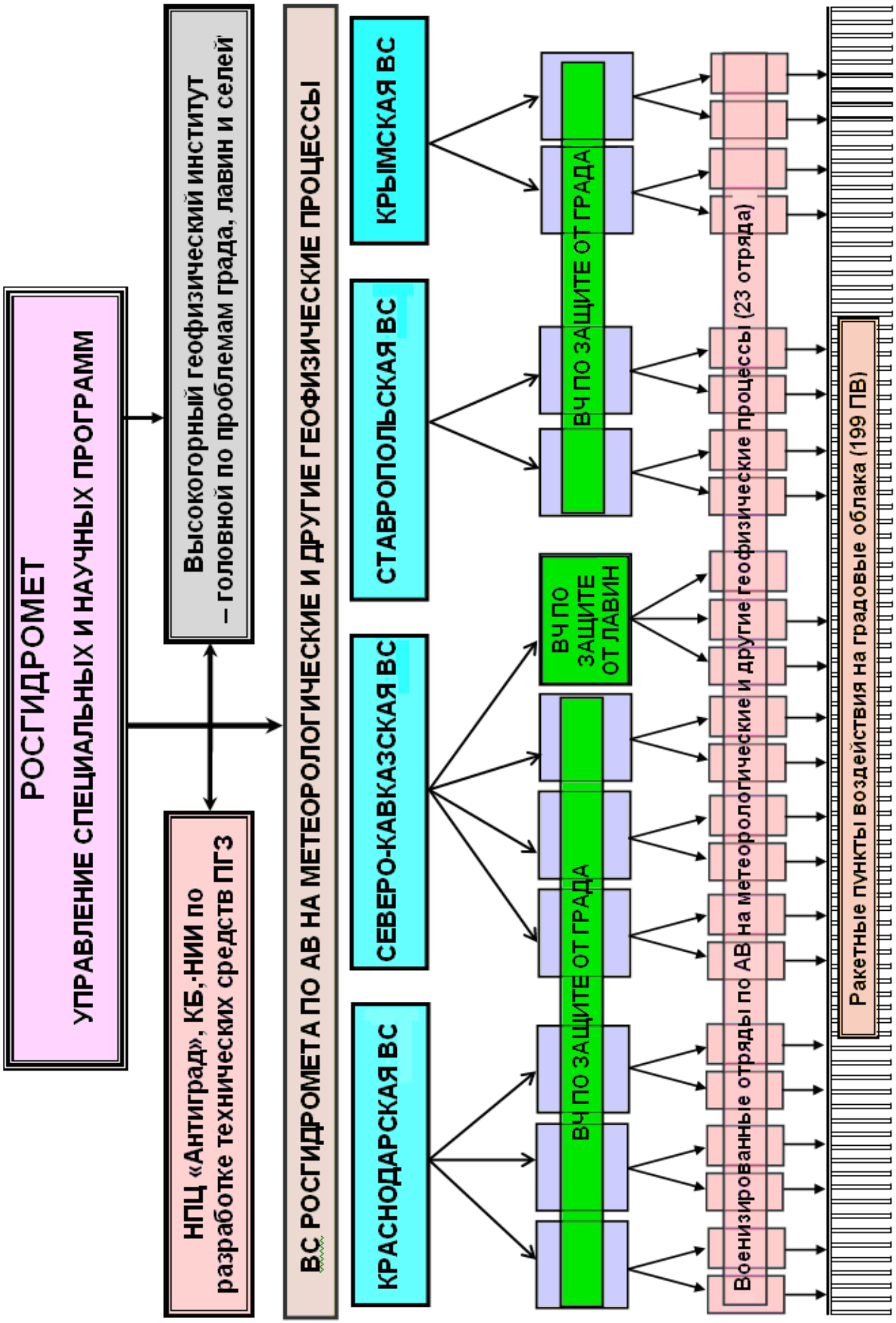


Рис. 15.1 – Структура системы ПГЗ в Российской Федерации

ВС Росгидромета работают под *научно-методическим руководством* ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», который ежегодно проводит курсы подготовки специалистов, инспекции ВС с анализом их оперативной деятельности и рекомендациями по совершенствованию их оперативной деятельности, анализ случаев пропуска градобитий и аномального функционирования технических средств, принимает меры по устранению их причин, разрабатывает методы и технические средства ПГЗ, разрабатывает и внедряет РД по их применению.

Каждая ВС Росгидромета состоит из 2 ÷ 3 Военизированных частей (ВЧ), состоящих из 2 – 4 военизированных противоградовых отрядов, имеющих свой командный пункт (КП) и ракетные пункты воздействия (ПВ), число которых зависит от площади ПГЗ, условий УКВ связи с КП и запретных секторов.

Основной производственной единицей ВС Росгидромета является противоградовый отряд. Раньше один отряд имел командный пункт (КП), размещенный у пульта МРЛ, и 6 ÷ 8 ПВ, которые обеспечивали защиту около 100 тысяч га.

Автоматизация противоградовых операций и применение современных средств связи позволили увеличить площадь защиты с одного КП до 500 тысяч га, увеличить число управляемых ПВ до 32 и более, вынести КП из МРЛ в удобное для работы помещение.

15.3.1 Выбор позиции командного пункта

Командный пункт обычно располагают в МРЛ, позицию которого следует выбирать на возвышенных открытых местах, где обеспечивается:

– беспрепятственный обзор облачности над ЗТ и прилежащих территориях (в радиусе 150 ÷ 200 км) при углах 0° и выше;

– прохождение УКВ связи с ПВ;

– наличие подъездных путей, линии электроснабжения;

– электромагнитная совместимость и СВЧ безопасность облучения людей, работающих и живущих вблизи позиции.

15.3.1.1 ***Качество обзора пространства***

Позиция МРЛ (ДМРЛ) должна обеспечивать беспрепятственный круговой радиолокационный обзор облачности с минимальными углами закрытия, приводящих к потере информации и искажению мощности радиоэха при малых углах сканирования (от 0 до 6 градусов). В радиусе 500 м от выбираемой позиции должны отсутствовать высокие местные предметы, здания и сооружения. При невозможности выбрать такую позицию необходимо антенну МРЛ устанавливать на мачту, высота

которой определяется с учетом высоты окружающих деревьев, леса, строений, чтобы исключить (минимизировать) углы и сектора закрытия.

Углы закрытия можно определить с помощью теодолита, который следует установить на высоте размещения антенны МРЛ. После тщательного горизонтирования теодолита следует измерить углы закрытия горизонта по всем азимутам через 1°, построить график углов закрытия, оценить наличие и высоту местников и высот зон радиотени. Поскольку установка теодолита на высоте размещения антенны до монтажа МРЛ затруднена, целесообразно использовать компьютерную программу, входящую в состав программного обеспечения «АСУ-МРЛ» и позволяющую получить профиль рельефа в любом направлении и значения углов закрытия при заданной высоте антенны и точных координатах позиции.

15.3.1.2 ***Электромагнитная совместимость***

Позиция МРЛ должна исключать возможность возникновения электромагнитных помех от близких по частоте источников излучения. Вблизи выбираемой позиции не должно быть МРЛ с близкой частотой передающих устройств. В случае, когда это неизбежно, следует синхронизировать работу передатчиков. Для оценки электромагнитной совместимости с работающими вблизи излучающими радиотехническими системами необходимо пройти экспертизу и получить разрешение Государственной комиссии по радиочастотам на использование частоты, которая оформляется на стадии выбора позиции.

15.3.1.3 ***Требования безопасности***

Позиция МРЛ должна отвечать требованиям СВЧ безопасности обслуживающего персонала, близко расположенных объектов и населенных пунктов, чтобы исключить возможности облучения людей. Выбор позиции и необходимые меры безопасности следует производить в соответствии с действующими санитарными правилами [1, 2, 3]. Антенну МРЛ располагать таким образом, чтобы исключить облучение основным лепестком диаграммы направленности жилых и рабочих помещений. Удаление МРЛ от них должно строго соответствовать границам санитарно-защитной зоны, определяемой расстоянием: $R_{pp} = (D^2_{Ант}/(1{,}22 \cdot 2\lambda)$, где $D_{Ант}$ – диаметр параболоида антенны, λ – длина волны. В случае невозможности выполнить эти требования следует принять меры защиты от воздействия СВЧ излучения: экранирование облучаемых объектов заземленными металлическими сетками, отключение передающих устройств в секторах облучения объектов, обозначение и ограждение зон с повышенным уровнем СВЧ излучения.

15.3.1.4 ***Требования к инфраструктуре и коммуникациям***

При выборе позиции МРЛ при прочих равных условиях необходимо руководствоваться возможностью минимизации затрат на создание инфраструктуры и коммуникаций, включая строительство подъездных путей, лини электроснабжения от промышленной сети, каналов связи (телефон, УКВ радиосвязь), водоснабжение и канализация.

После выбора позиции следует с помощью GPS измерить ее географические координаты (долгота, широта) до десятых долей угловой минуты и высоту над уровнем моря с ошибкой не более 50 м.

15.3.2 Размещение и выбор позиций ПВ

Успешность ПГЗ в значительной степени зависит от правильности размещения ПВ. Многолетний опыт ПГЗ показывает, что зачастую причиной пропуска градобитий является наличие запретных секторов, непростреливаемых участков, отсутствие или недостаточная ширина зоны предварительной обработки, где осуществляется прерывания выпадения града из вторгающихся на ЗТ зрелых градовых облаков.

Размещение и выбор позиций ПВ следует осуществлять *поэтапно* с учетом применяемых типов ПГИ, их радиуса действия и диаметра «мертвой» зоны так, чтобы обеспечить:

– покрытие зоной засева всей площади ЗТ, а также зоны предварительно обработки ОВ;

– минимум запретных секторов и не простреливаемых участков на ЗТ и зоне предварительной обработки ОВ;

– возможность засева градовых облаков с правосторонним и левосторонним развитием, для чего предусматривается зона предварительной обработки, окружающая ЗТ по периметру, шириной не менее 8 км, а в направлениях преимущественного вторжения градовых облаков до 10 км и более.

15.3.2.1 На первом этапе создается предварительная схема размещения ПВ на ЗТ и в зоне предварительной обработки, так чтобы круги засева соседних ПВ частично перекрывались. Степень перекрытия определяется с учетом радиуса действия и диаметра «мертвой» зоны ПГИ. Например, у ПГИ «Алазань-6» радиус действия равен 10 км, а диаметр «мертвой» зоны – 8 ÷ 9 км. При использовании ПГИ «Алазань-6» ПВ следует размещать *попарно* таким образом, чтобы зона засева одного ПВ перекрывала «мертвую» зону соседнего. При этом расстояние между этими двумя ПВ должно быть около 8 км. Две соседние пары ПВ могут располагаться на расстоянии от первой пары около 16 км (рис. 15.2а).

При использовании ПГИ «Ас» с радиусом действия 10 км и диаметром «мертвой» зоны 3 ÷ 4 км ПВ можно размещать *равномерно* с перекрытием зон засева всего 3 км, так как диаметр «мертвой» зоны меньше типичного размера ОВ. Расстояние между ПВ при этом составит около 17 км. Пример такого размещения ПВ представлен на рисунке 15.2*б*. Из этого рисунка следует, что для защиты 180 тысяч га с применением ПГИ «Алазань-6 (без учета запретных секторов) понадобится не менее 19 ПВ, а с применением ПГИ «Ас» – 13 ПВ.

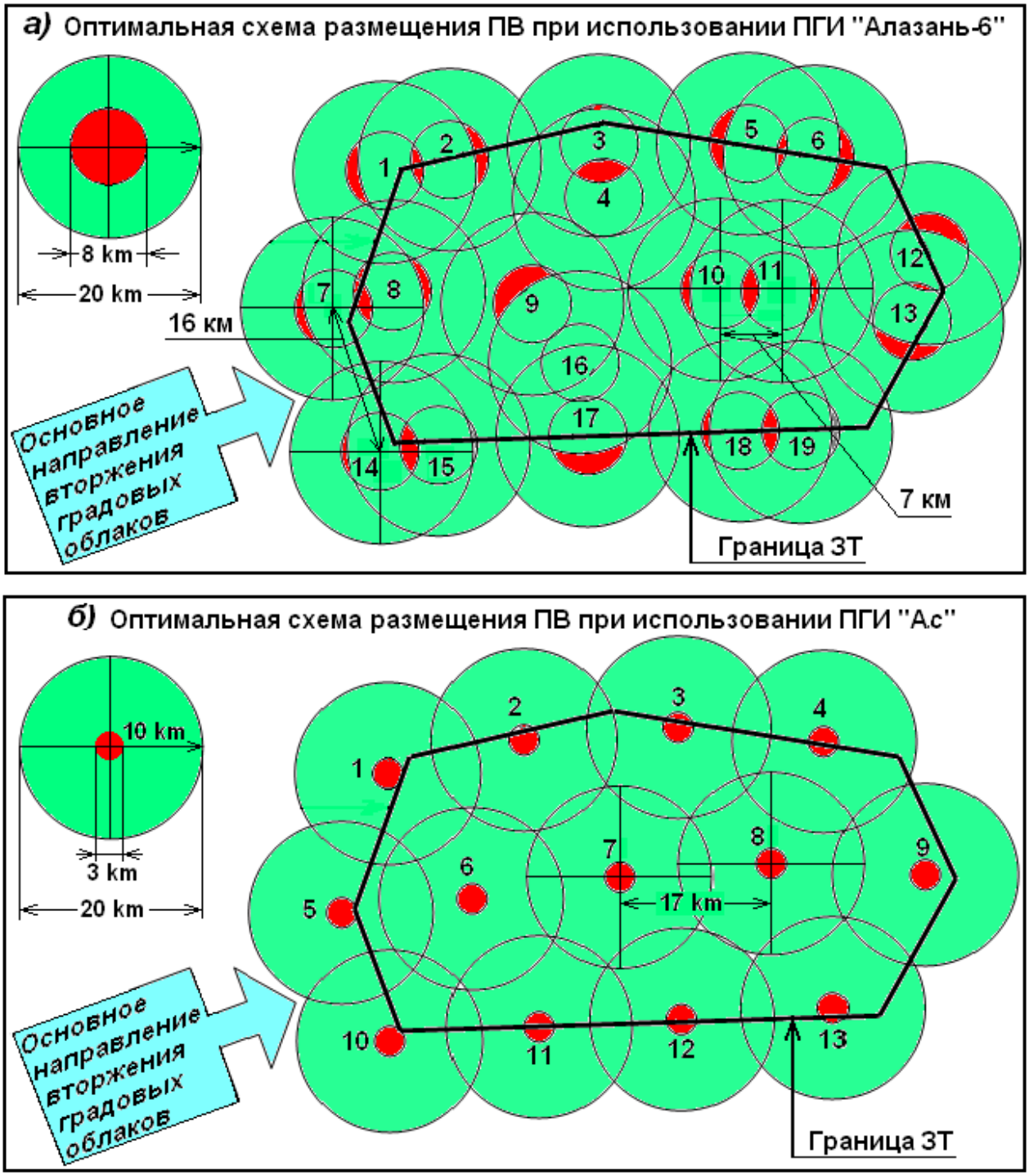


Рис. 15.2 – Оптимальная схема размещения ПВ с ПГИ «Алазань-6» и «Ас». Непростреливаемые участки выделены красным цветом

15.3.2.2 На втором этапе осуществляется оптимизация схемы размещения позиций ПВ так, чтобы минимизировать запретные сектора и расширить зону предварительной обработки в направлении преимущественного направления вторжения градовых облаков.

Исторически сложившиеся схемы размещения ПВ в ВС Росгидромета, как показано на рисунке 15.3, выполнены без попарного размещения ПВ с ПГИ «Алазань-6», содержат множество запретных секторов, непростреливаемых участков и недостаточную ширину зоны предварительной обработки. Для устранения этих недостатков требуется создание дополнительных ПВ, например, севернее г. Невинномысска, а также между ПВ, в «мертвых» зонах которых засев не возможен.

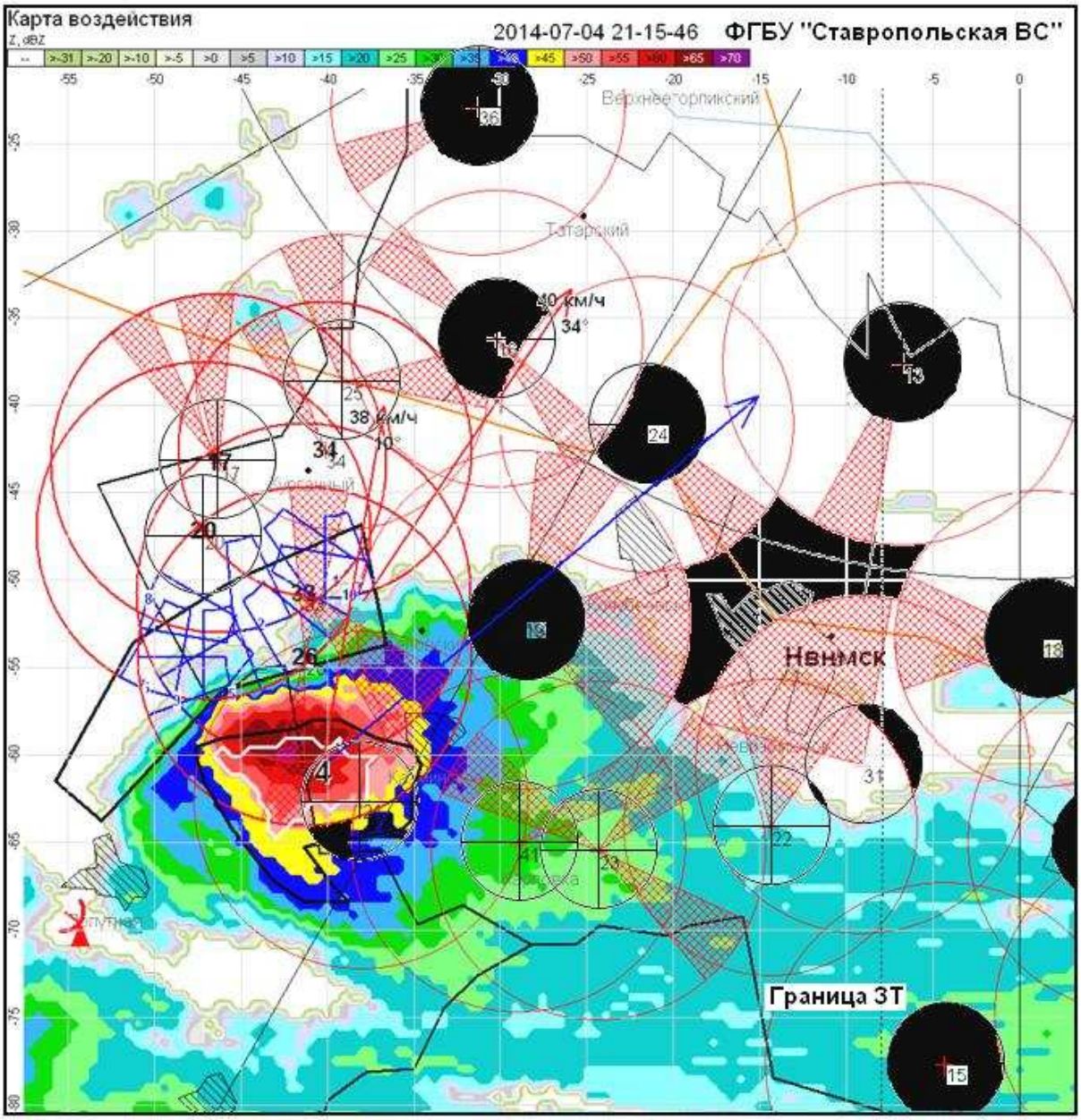


Рис. 15.3 – Фрагмент схемы размещения ПВ с запретными секторами, не простреливаемыми участками (выделены черным) и недостаточной шириной зоны предварительной обработки, приведшей к тому, что при выпадении града на ЗТ наветренный фланг суперячейкового облака остался не засеянным

15.3.2.3 На третьем этапе следует с помощью топографической карты и выезда на места выбрать позиции ПВ, которые должны размещаться в соответствии со следующими требованиями:

– по возможности на возвышенных местах в прямой видимости с КП для обеспечения надежной УКВ связи в грозовых условиях;

– на удаление от КП не более 80 ÷ 100 км;

– не ближе 100 м от границы населенных пунктов и объектов в целях обеспечения безопасности и шумового воздействия при пуске ПГИ;

– не ближе 30 м от автострады и высоковольтной электролинии;

– обеспечивается возможность проезда после ливневых дождей, возможность подключения к линии электроснабжения и водоснабжения; обеспечивается возможность отчуждения земельного участка (желательно не используемого или малопродуктивного в агропромышленном производстве) площадью около 0,3 га.

15.3.2.4 На четвертом этапе следует выделить непростреливаемые участки на ЗТ и в зоне предварительной обработки, как показано на рисунке 15.3, и с учетом их площадей выбрать позиции для дополнительных пунктов, обеспечивающих минимизацию непростреливаемых участков.

15.3.2.5 После окончания выбора позиций ПВ следует:

а) измерить с помощью GPS их географические координаты и высоту над уровнем моря;

б) определить запретные сектора для применяемых типов ПГИ;

в) подготовить и внести в программу автоматизированной системы управления противоградовыми операциями цифровую карту, которая служит для воздействия на градовые и градоопасные облака. Пример такой карты приведен на рисунке 15.3. Она выполняется на основе топографической карты местности масштаба 1:200000 в соответствии с руководством по применению АСУ и содержит:

– позиции МРЛ и ПВ с кругами их радиуса действия;

– границу защищаемой территории и запретные сектора;

– реки, озера, горы, основные дороги, ирригационные каналы, границы населенных пунктов, аэропорты, пожаро-взрывоопасные и другие объекты, служащие ориентирами при объезде ЗТ после АВ.

г) внести электронный планшет в программное обеспечение АСУ.

15.3.3 Подготовка позиций КП и ПВ

Проектирование и строительство полевых баз КП и ПВ должен осуществлять Заказчик противоградовых работ по техническому заданию их Исполнителя.

15.3.3.1 *База КП* должна иметь минимальный состав объектов, включающий:

– трехэтажное здание для размещения МРЛ, АСУ и средств связи, размерами порядка 12х18 м;

– склад для временного хранения ПГИ в период сезона ПГЗ размерами около 6х8х3 м;

– бокс для агрегата резервного электропитания МРЛ и базы;

– трансформаторная подстанция для основного электропитания МРЛ и базы трехфазным напряжением 380х3 мощностью не менее 40 кВт;

– гараж на 2 легковые и 1 грузовую автомашину;

– мачта связи высотой около 25 м;

– асфальтовая площадка для хранения в межсезонный период передвижных вагонов с имуществом ПВ размерами 10 х 30 м;

– проходная у въездных ворот;

– ограждение по периметру высотой около 2 м.

Основное рабочее здание должно иметь несущие стены для размещения на его крыше антенны МРЛ или «ДМРЛ-10» в сборе (в контейнере). На третьем этаже целесообразно поместить зал воздействия, оснащенный системой управления противоградовыми операциями и средствами связи, помещение для хранения ЗИП, инструмента и ремонта применяемой аппаратуры, рабочий кабинет командира отряда и комнату отдыха дежурного персонала, на втором этаже – жилые помещения на 15 – 20 человек, а на первом – кухню, столовую, ванну, санузел и другие подсобные помещения.

Помещение для зала воздействия (площадью около 40 м^2) следует оснастить компьютерными столами, книжными шкафами, столами для размещения УКВ радиостанций для связи с ПВ и другими отрядами.

Расходный склад для временного хранения ПГИ в период сезона ПГЗ должен иметь капитальные стены, бетонированные полы, металлические замыкаемые двери, пожаро-взрывобезопасное освещение.

Дизельная электростанция для резервного электропитания МРЛ мощностью не менее 12 –16 кВт и цистерна для дизтоплива емкостью не менее 1000 л встраиваются в отдельно стоящий бокс.

Для размещения перечисленных объектов с соблюдением правил безопасности территория базы КП должна быть около 1,0 ÷ 1,5 га.

15.3.3.2 *База ПВ* должна иметь:

⇒ рабочую комнату, спальню и кухню (по 6 – 10 м^2);

⇒ временный склад-хранилище ПГИ «Ас» (не менее 6 м^2);

⇒ бетонированные площадки для установки двух ракетных ПУ;

⇒ бетонную дорожку от ПУ до склада ракет;

⇒ мачту радиосвязи высотой 10 ÷ 12 м;

⇒ санузел (душевая, туалет);

⇒ ограждение по периметру (металлическая сетка или забор).

Примерная схема размещения этих объектов представлена на рисунке 15.4. При въезде и на ограждении ПВ следует установить таблички с запрещающими и указательными надписями: «Запретная зона», «Проезд запрещен», «Проход запрещен», «Обход слева (справа)».

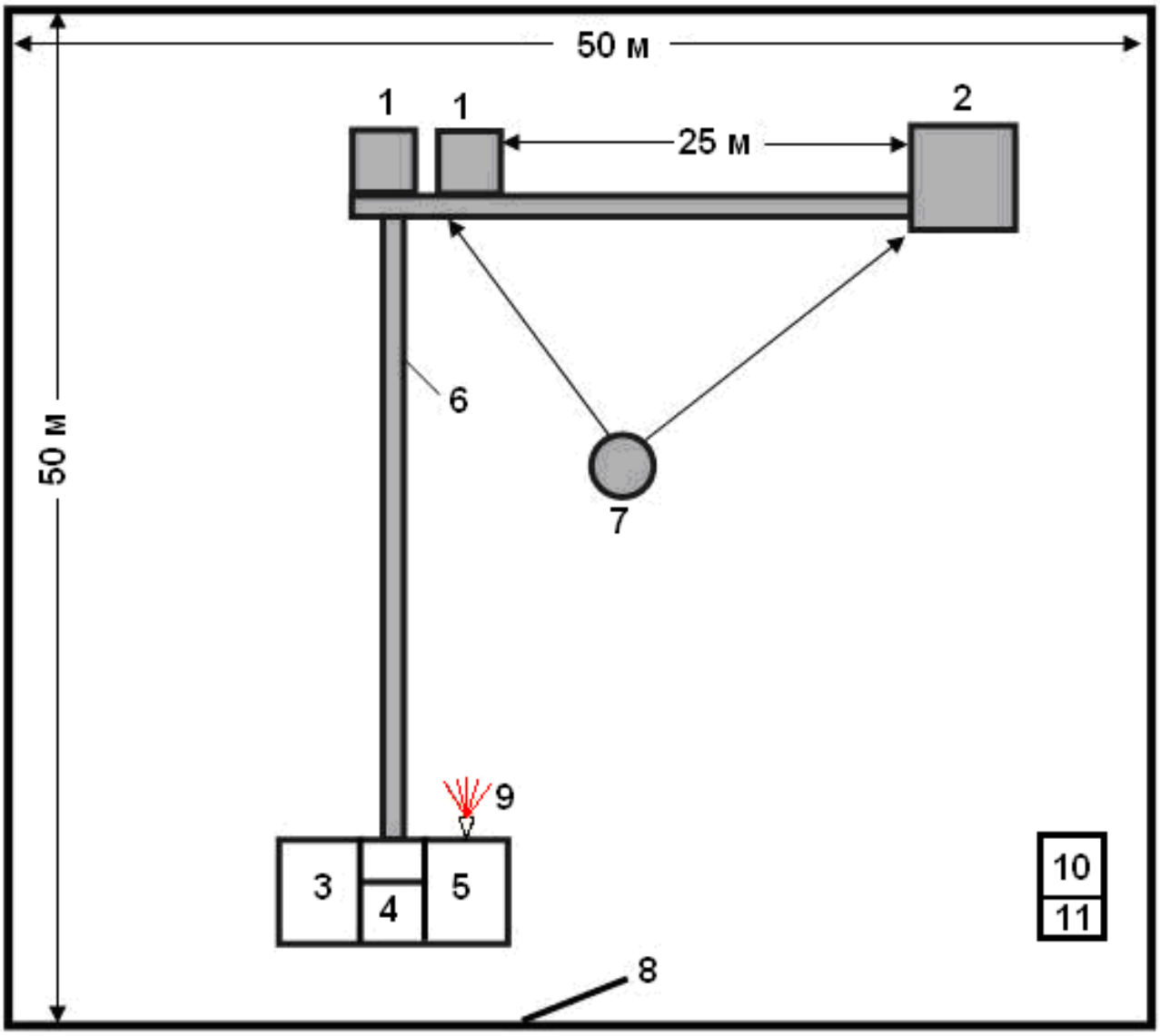


Рис. 15.4 – Примерная схема размещения объектов на ПВ: 1 – бетонированная площадка для ПУ; 2 – склад ПГИ; 3 – жилое помещение; 4 – кухня; 5 – рабочее помещение; 6 – бетонная дорожка; 7 – мачта радиосвязи; 8 – ворота; 9 – прожектор; 10 – душевая; 11 – санузел

База ПВ может быть *стационарная* с капитальными строениями и *временная*, развертываемая на период сезона ПГЗ. Для организации временной базы ПВ целесообразно использовать передвижной вагон с двумя комнатами и кухней. В одной комнате организуется рабочее место с размещением радиостанций и пультов управления ПУ, а вторая используется для жилья дежурного персонала ПВ.

Независимо от вида ПВ (стационарный или временный) площадки для ПУ размером 2,5 х 2,5 м должны иметь железобетонное покрытие толщиной не менее 14 мм, и уклон не более 3º. Для размещения ПУ «Элия-2» строится фундамент в соответствии с чертежом, приводимым в разделе 4.2 инструкции по эксплуатации ПУ.

Временный склад ПГИ на ПВ (стационарный или передвижной) должен иметь надежные двери с замком. Перед складом устанавливается противопожарный пост со щитом и необходимым инвентарем.

Техническое оснащение ПВ включает: две ракетные ПУ, две УКВ радиостанции (основная и резервная), аккумуляторы для питания радиостанций и пульта управления ПУ, зарядное устройство, мини электростанцию на 2 – 4 кВт для автономного электропитания ПВ.

Радиостанции и пульт управления ПУ размещаются в запираемом на замок помещении, в котором должно быть смотровое окно для наблюдения за сходом ПГР.

Бытовое оборудование ПВ включает: холодильник, телевизор, электрическую или газовую плиту, посуду, 2 стола, 2 кровати, 4 стула, книжный шкаф и медицинскую аптечку.

На ПВ следует оформить паспорт в соответствии с РД.52.37.601 (Приложение В).

15.3.3.3 В процессе подготовки позиций КП и ПВ следует подготовить штатное расписание и осуществлять комплектование и подготовку персонала КП и ПВ, включая специалистов по воздействию, радиолокации, средствам автоматизации, радиосвязи и ракетной технике.

15.3.3.4 Монтаж и ввод в строй оборудования КП и ПВ включает:

а) монтаж, горизонтирование и ориентирование МРЛ;

б) монтаж АСУ, инсталляцию программного обеспечения АСУ;

в) градуировку, калибровку АСУ в соответствии с разделом 12.4;

г) привязку АСУ к региональным условиям, включая: регистрацию маски местных предметов, создание цифровой карты местности с позициями КП и ПВ, конфигурирование ПВ, ввод их запретных секторов, ввод траекторных характеристик применяемых ПГИ, подготовку зон взаимодействия с органами авиации и т.д.;

д) монтаж, горизонтирование и ориентирование ПУ, калибровку усилия срыва ракет с направляющих;

е) развертывание аппаратуры радиосвязи между КП и ПВ.

15.3.4 Организация системы связи

15.3.4.1 Система связи ВС Росгидромета служит для обеспечения:

– управления противоградовыми отрядами, отделами;

– обмена информацией и оперативного взаимодействия между противоградовыми подразделениями;

– приема прогноза погоды, аэрологической, синоптической и спутниковой информации;

– взаимодействия с органами авиации для получения разрешения на проведение противоградовых стрельб;

– взаимодействия с Управлением специальных и научных программ (УСНП) Росгидромета и научно-методическим руководителем противоградовых работ (Высокогорный геофизический институт), органами власти, местного самоуправления и МВД.

15.3.4.2 В ВС Росгидромете в основном используются (рис. 15.5):

– *телефонные каналы* для связи с органами авиации, Росгидрометом, научно-методическим центром, соседними ВС, Заказчиком ПГЗ, органами власти, местного самоуправления и МВД, прогностическим центром, отделами и отрядами, для приема-передачи по факсу писем и отчетов о воздействии и входа в Интернет;

– *УКВ радиоканалы* для оперативной связи с отрядами и подразделениями ВС;

– *спутниковые каналы* (типа «VSAT DirecWay») для приема-передачи радиолокационной, спутниковой и грозопеленгационной информации.

В противоградовых отрядах для связи КП с ПВ, между отрядами и руководством ВС в основном используются радиостанции УКВ диапазона типа «Kenwood» («TK-760», «TK-860») или «Motorolla». Для улучшения качества связи с удаленными пунктами применяются ретрансляторы и направленные антенны «волновой канал».

15.3.4.3 Развертывание и эксплуатация средств связи в ВС осуществляется отделами связи, которые обычно состоят из группы, обслуживающей центральную радиостанцию (командно-диспетчерский пункт), групп связи противоградовых отрядов, группы взаимодействия с органами авиации и ремонтной группы.

Связь с органами гражданской и военной авиации с целью

обеспечения безопасности полетов в период проведения АВ Краснодарская, Ставропольская и Северо-Кавказская ВС осуществляют через совместную группу взаимодействия, базирующуюся в Ростовском Зональном центре единой системы организации воздушного движения (ЗЦ ЕС ОрВД). Для взаимодействия с ЗЦ ЕС УВД арендуются прямые телефонные каналы.

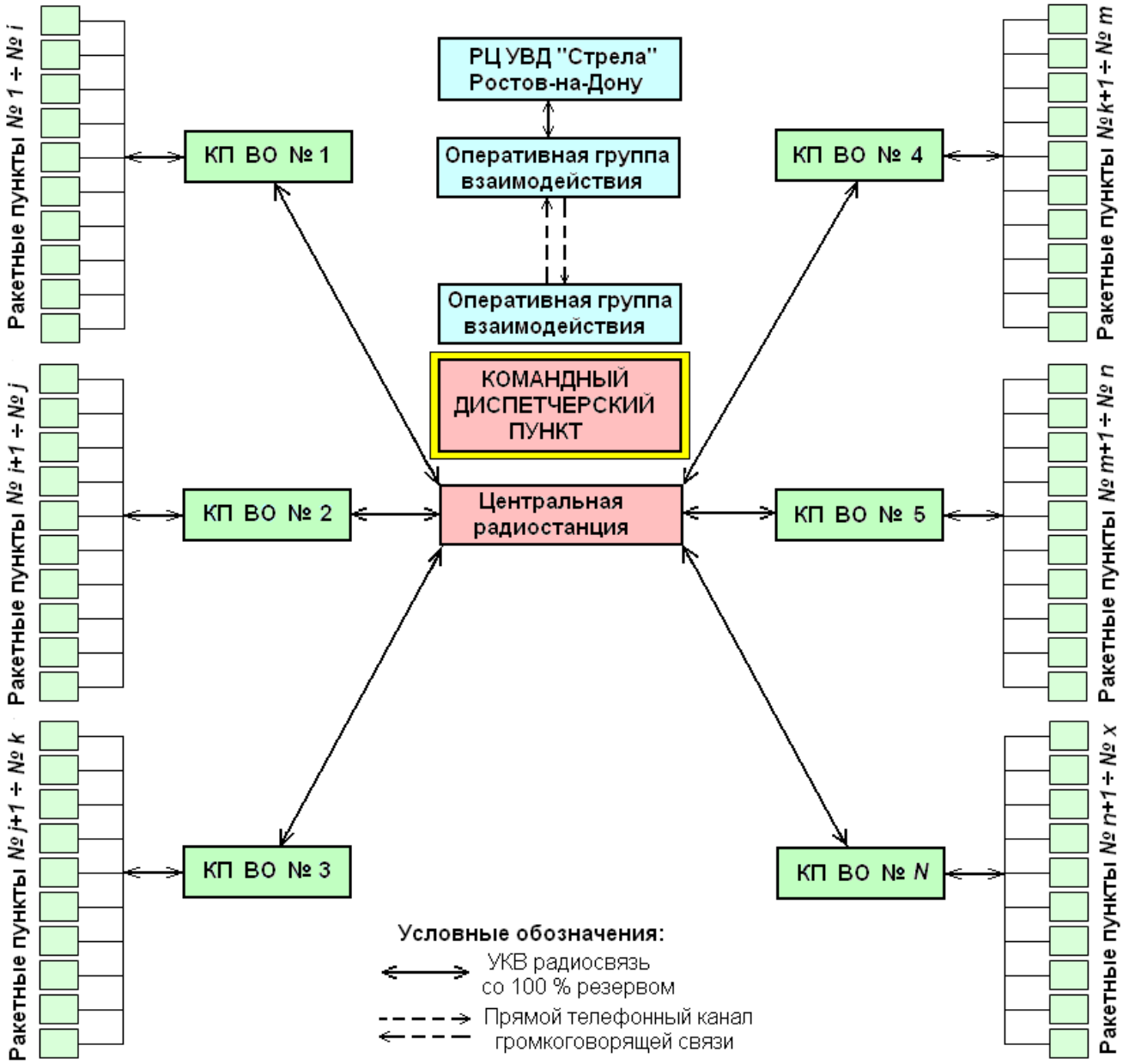


Рис. 15.5 – Примерная структура связи ВС Росгидромета

15.3.4.4 Одной из важных функцией отдела связи ВС является метеообеспечения ПГЗ, включая получение и передачу в отряды:

а) прогноза конвективной облачности, гроз и града;

б) данных радиозондирования атмосферы в стандартные сроки, содержащих сведения о высоте изотерм 0 °С (H_0) и -6 °С (H_{-6}), высоте тропопаузы, годографе ветра, направлении и скорости ведущего потока;

в) синоптической ситуации в районе проведения ПГЗ, содержащего информацию о типе атмосферных фронтов, обуславливающих погоду в регионе, и прогнозируемом времени их прохождения;

г) спутниковой картины облачности региона.

Эту информацию следует получать ежедневно по согласованному расписанию из ближайшего Гидрометцентра. При отсутствии такой возможности необходимо организовать радиозондирование атмосферы, прием спутниковой и синоптической информации в противоградовом подразделении по Интернет, установив соответствующее оборудование.

15.3.5 Порядок подготовки персонала КП и ПВ

К работе по АВ на градовые процессы допускаются лица, прошедшие соответствующее обучение и аттестацию, периодически подтверждающие свои теоретические знания, практический опыт и навыки.

Подготовка и аттестация специалистов отделов воздействия осуществляется на ежегодных курсах, проводимых ВГИ, в соответствии с учебно-тематическим планом, утвержденным Росгидрометом.

Программа курсов предусматривает теоретические занятия по физическим основам, методам и техническим средствам воздействия на градовые процессы, правилам безопасности, проводятся практические занятия на тренажерах, изучаются РД 52.37.731, РД 52.37.732, РД.52.37.672 и нормативно-технические документы, регламентирующие организацию и проведение ПГЗ. По окончанию курсов на основе экзамена по проверке теоретической подготовки и практических навыков проводится аттестация специалистов и выдается удостоверение с правом допуска к руководству воздействием на градовые процессы или с правом участия в проведении воздействия, оформлении материалов воздействия и отчетной документации.

Подготовка и аттестация бойцов ракетных пунктов осуществляется на ежегодных курсах, проводимых в каждой ВС перед началом сезона, по программе утвержденной Росгидрометом [4] и в соответствии с РД 52.37.601 и 52.37.710.

Обучение специалистов всех звеньев обязательно включает изучение правил охраны труда и техники безопасности в соответствии с РД 52.37.615.

15.3.6 Порядок приобретения и учета ПГИ и ПУ

15.3.6.1 *Право заказа и приобретения* технических средств активного воздействия (САВ) и проведение работ по АВ имеют учреждения, организации и предприятия, имеющие лицензию Росгидромета, и заключившие договор с поставщиком. Условиями получения лицензия являются наличие специалистов, опыта и технических средств ПГЗ.

15.3.6.2 *Порядок учета, хранения и передачи САВ*, противоградовых комплексов одной специализированной организацией другой осуществляется в соответствии с положениями [5] и распоряжением [6]. Персональная ответственность за их применение по прямому назначению и строгое соблюдение правил техники безопасности, обеспечение безопасности обслуживающего персонала, а также населения и объектов в районе проведения работ возлагается на руководителей ВС и НИУ, осуществляющих работы по АВ.

15.3.6.3 *Приемка противоградовых комплексов* осуществляется в соответствии с положениями [5] и [7]. Входной контроль количества полученных САВ должен проводиться комиссией, состоящей из специалистов заказчика путем обсчета упаковочных мест.

Входной контроль по качеству осуществляют в два этапа:

– Первый этап предусматривает визуальный осмотр полученных САВ, отобранных случайным образом, и всех полученных ПУ.

– Второй осуществляется в процессе эксплуатации и предусматривает контроль безотказности функционирования полученных САВ с выявлением скрытых дефектов.

О недостатках, выявленных при визуальном осмотре во время входного контроля, а также в процессе эксплуатации, должен быть составлен акт с указанием обнаруженных недостатков.

Осмотр САВ следует проводить вне хранилища САВ с проверкой:

– наличия формуляра на партию САВ;

– соответствия номеров партий и года изготовления формуляру;

– состояния упаковки, наличия на ней пломб и маркировки, качества закрепления САВ в упаковке;

– отсутствия механических повреждений корпуса, стабилизатора и контактных вилок ПГИ;

– наличия пробок в гнездах модулей головной части, пленки на ленте ВВ и отверстиях для выхода реагента на головной части ПГИ;

– наличия влаги на корпусах САВ и в упаковочных ящиках.

При *осмотре ракетных ПУ* следует проверить:

– наличие сопроводительных документов;
– состояние транспортировочной упаковки;
– комплектность ПУ, пульта управления и ЗИП;
– наличие механических повреждений ПУ;
– плавность работы механизмов наведения;
– состояние направляющих, прохождение макета-калибра;
– работу замков, стопорных устройств;
– исправность токопроводящих цепей;
– работу пульта управления и ПУ во всех режимах.

Результаты входного контроля необходимо записать в журнал с указанием даты поступления, наименования продукции, номера документа на поставку, предприятия-поставщика, номера партии, года изготовления, количества продукции в партии, количества проверенной продукции, вида испытаний, номера и дата протокола испытаний, количества забракованной продукции, номера и даты составления акта рекламации на забракованную продукцию, содержание рекламации, меры по удовлетворению претензии, штрафные санкции и меры поставщика по закрытию рекламации.

Претензии по качеству продукции следует предъявлять поставщику в соответствии с положением [8].

15.3.6.4 Противоградовые комплексы подлежат обязательному *номерному учету*, начиная с момента их поступления от поставщиков в соответствии с инструкцией [9] и дополнением к ней [10]. За организацию учета несет ответственность руководитель эксплуатирующего учреждения, за выполнение учета – начальники ракетного отдела ВС, ракетных групп отрядов, командиры ПВ, а учет – бухгалтерия ВС (НИУ).

15.3.6.5 *Передача САВ* из одной ВС (НИУ) в другую следует осуществлять в соответствии с инструкцией [9] и дополнением к ней [10].

Передачу технических средств из одного ВО в другой проводят по распоряжению руководителя ВС (НИУ) по накладной с указанием типа, количества, номеров партий, номеров изделий и года выпуска.

15.3.6.6 *Списание САВ* и снятие их с номерного учета осуществляют в соответствии с РД 52.37.615 (раздел 14.8).

Списание с учета ПУ, пришедших в негодность, если они не могут быть отремонтированы и использованы по прямому назначению, осуществляется по распоряжению Росгидромета на основании дефектной ведомости, представленной эксплуатирующим учреждением.

Акты на списание САВ и ПУ составляет комиссия, назначенная руководителем эксплуатирующего учреждения. В состав комиссии

обязательно должны включаться должностные лица, являющиеся специалистами по списываемым техническим средствам. Комиссия должна руководствоваться стандартами, описаниями, формулярами, техническими условиями и другими документами, гарантийными сроками применения САВ. Акты утверждает руководитель учреждения.

15.3.7 *Порядок хранения ПГИ*

15.3.7.1 ПГИ согласно [11] имеют код ОКП 727583. По степени потенциальной опасности согласно ГОСТ 19433-88 [12] ПГИ могут быть отнесены к классу I подклассу 1,2G, к которому относятся взрывчатые и пиротехнические вещества и изделия, не взрывающиеся массой, но имеющие при взрыве опасность разбрасывания и существенного повреждения окружающих предметов.

15.3.7.2 Хранение ПГИ должно производиться в оборудованных и допущенных к эксплуатации в установленном порядке складских помещениях, обеспечивающих безопасность, сохранность, учет и возможность проверки наличия ПГИ [11]. Допускается временное хранение ПГИ в местах использования по назначению [13].

15.3.7.3 Склады хранения ПГИ относятся к потенциально опасным объектам, аварии на которых могут являться источником возникновения местных чрезвычайных ситуаций [13]. Границы опасной зоны устанавливаются по периметру ограждения склада, вокруг которого должна быть очищенная от травы полоса шириной 1 м, и полоса шириной 20 м без горюче-смазочных материалов, валежника, хвороста и сухостоя.

15.3.7.4 Хранение ПГИ осуществляется в заводских упаковках в соответствии с требованиями эксплуатационной документации и правилами пожарной безопасности в помещениях, исключающих попадание прямых солнечных лучей и атмосферных осадков, в штабелях, размещенных на поддонах или деревянных настилах [13].

15.3.7.5 Склады хранения ПГИ делятся на следующие типы:

А) Расходный склад *временного хранения* ПГИ, поступивших на ракетный пункт для использования по прямому назначению в пределах технологического цикла проводимых работ [13], охраняемый бойцами ПВ.

Б) Расходный *склад временного хранения* партии ПГИ, поступившей в период сезона ПГЗ в военизированный отряд для распределения по ракетным пунктам и покрытия расхода на них.

В) Склад *временного межсезонного* хранения переходящего запаса ПГИ. Для складов типа Б) и В) рекомендуется использовать контейнеры

«СКП-12» типа 1АА по ГОСТ 18477-79, предназначенные для хранения и транспортирования ВВ и противоградовых ракет. Они имеют внешнюю металлическую обшивку толщиной 2 – 3 мм со стойкой антикоррозийной обработкой, внутренний каркас из доски 40 мм, заполненный минеральной ватой, и обшитый фанерой, пропитанный огнезащитным составом, металлические двухстворчатые двери и надежные запоры. Контейнеры оснащены системами вентиляции, автоматического пожаротушения, взрывобезопасного освещения и светозвуковой охранной сигнализацией, , которая должна быть выведена в караульное помещение дежурных бойцов и пульт местного органа МВД. Рекомендуется также установить камеры видеонаблюдения с дисплеями, размещенными в караульном помещение и на пульте органов МВД.

Г) Центральный склад длительного хранения, который на основании распоряжений [6] и [14] входит в Перечень объектов, подлежащих обязательной охране подразделениями вневедомственной охраны при органах МВД Российской Федерации на договорной основе. При отсутствии такого склада ПГИ для длительного хранения должны сдаваться в склады Министерства обороны Российской Федерации на договорной основе.

15.3.7.6 На склады постоянного и временного хранения ПГИ оформляются паспорта по формам, представленным в Приложении А.

15.3.8 Порядок расчета переходящего запаса ПГИ

15.3.8.1 Переходящий запас ПГИ – это количество ПГИ, которое должно быть в последний день сезона ПГЗ на каждом ПВ для обеспечения нормального засева ОВ любой категории и выполнения контрактных обязательств Исполнителя. Если это количество ПГИ не будет израсходовано в последний день ПГЗ, оно остается переходящим запасом на следующий сезон.

15.3.8.2 Переходящий запас противоградовых ракет не приводит к увеличению расхода ракет и стоимости противоградовой защиты, но необходим для обеспечения бесперебойной защиты от градобитий с первого до последнего дня сезона.

15.3.8.3 Расчет переходящего запаса осуществляется, исходя из норм их расхода на засев ОВ различных категорий (табл. 16.2) и технических характеристик ПГИ с учетом следующих обстоятельств:

– система ПГЗ в течение всего сезона должна быть способной предотвратить крупномасштабные градобития, которые могут наблюдаться в конце сезона (в ответственный период сбора урожая);

– мощные градовые процессы обычно засеваются 2 – 3 ПВ.

15.3.8.4 Согласно таблице 16.2 с учетом пункта 15.3.8.3 минимальное количество ПГИ на каждом ПВ в последний день сезона ПГЗ должно быть не менее:

– ПГИ «Алазань-6» или «Алазань-9» N_1 = 24 шт.;
– ПГИ «Ас» N_2 = 20 шт.

15.3.8.5 Все ПГИ, не израсходованные в последний день сезона ПГЗ, остаются в качестве переходящего запаса на следующий сезон. С учетом этого минимальная норма переходящего запаса ПГИ ($N_{ПЗ}$) равна:

$$N_{ПЗ} = n\ N_i\,, \qquad (15.1)$$

где n – число ПВ в ВС; N_i – минимальное число ПГИ i-го типа на ПВ.

Пример расчета минимальной нормы переходящего запаса ПГИ в ВС Росгидромета, исходя из площади защиты и числа ПВ в 2014 г., приведен в табл. 15.5.

Таблица 15.3 –- Минимальные нормы переходящего запаса ПГИ для в ВС Росгидромета в 2014 г.

Наименование ВС Росгидромета	Площадь ЗТ, тыс. га	Кол-во ПВ	Минимально-допустимое кол-во ПГИ на ПВ, шт.		Норма переходящего запаса ПГИ, шт.	
			Алазань-6 Алазань-9	Ас, Алан-2	Алазань-6 Алазань-9	Ас, Алан-2
Краснодарская	880	64	24	20	1536	1280
Ставропольская	839	44	24	20	1056	880
Северо-Кавказская	861	61	24	20	1464	1220
Всего:	2 144,6	121	-	-	4464	3380

15.3.8.4 Переходящий запас ПГИ подлежит первоочередному расходованию в начале нового сезона ПГЗ.

15.4 Подготовка контракта на проведение ПГЗ

15.4.1 Противоградовые работы проводятся по контрактам с Заказчиком, которым может быть любое физическое или юридическое лицо.

15.4.2 Статья 93 «Осуществление закупки у у единственного поставщика (подрядчика, исполнителя)» Федерального закона от 05.04.2013 г. № 44-ФЗ «О контрактной системе» (ред. от 21.07.2014) гласит, что «закупка работы или услуги, выполнение или оказание которых может осуществляться только органом исполнительной власти в соответствии с его полномочиями или подведомственными ему

государственным учреждением, государственным унитарным предприятием…».

Таким органом исполнительной власти является Росгидромет и подведомственные ему ВС Росгидромета в состав полномочий, которых входит «организация и проведение работ по АВ на метеорологические и другие геофизические процессы (защита сельскохозяйственных культур от градобитий, регулирование осадков, рассеивание туманов)».

Исходя из этого, ВС Росгидромета могут выступать в качестве единственного поставщика услуги по организации и проведению ПГЗ.

15.4.3 В контракте на проведение ПГЗ определяются площадь защиты, границы ЗТ, годы и календарные сроки защиты, минимальная ожидаемая эффективность, общая стоимость договора, порядок и методика контроля потерь от града, методы оценки физической и экономической эффективности. К договору должны быть приложены:

а) карта-схема ЗТ и ПТ с их границами, границами населенных пунктов и других объектов, в направлении которых должны быть введены запретные секторы, которые согласовываются Заказчиком ПГЗ. Подготовка карты карты-схемы, ее границ, определение общей площади ПГЗ и площади культивируемой территории может осуществляться Исполнителем по согласованию с Заказчиком. При этом территория крупных городов, над которыми не возможно проведение противоградовых стрельб (в целях безопасности), должна быть исключена из площади ЗТ;

б) таблица экспликации земель ЗТ с указанием профилирующих культур и занятых ими площадей;

в) имеющиеся статистические данные о потерях от града на ЗТ до ПГЗ для оценки эффективности ПГЗ;

г) используемые РД по проведению АВ и оценки эффективности ПГЗ (по требованию Заказчика).

15.4.4 Определение стоимости контракта осуществляется по ценам на защиту 1 га, утвержденным Росгидрометом, исходя из реальных расходов на проведение ПГЗ в предыдущие годы с учетом девальвации. При этом расходы на содержание персонала ВС и приобретение оборудования осуществляется за счет Росгидромета (федерального бюджета). В стоимость контракта с Заказчиком входят затраты на приобретение ПГИ, строительство баз КП и ПВ, затраты на энергоносители и коммунальные услуги.

15.4.5 В контракте должны быть четко оговорены обязательства и ответственность Заказчика и Исполнителя.

15.4.6 ***Обязательства Заказчика*** ПГЗ:

а) заключение контракта не позже 15 января года защиты;

б) своевременное финансирование контракта:

– аванс в объеме 30% контрактной суммы не позже 30 января года защиты для приобретения ПГИ и подготовки ВС к началу сезона защиты;

– 50% не позже 1 мая года защиты для закупки ПГИ;

– 20% по представлению годового отчета и акта выполненных работ для ремонта и консервации технических средств и приобретения переходящего запаса ПГИ;

Расширение площади ЗТ сверх указанной в контракте приведет к созданию новых ПВ и может быть выполнено при условиях:

– выделения существующих или строительство новых помещений и объектов для ПВ в соответствии с разделом 15.3.3.2;

– строительства электролинии и подъездной дороги к ПВ;

– выделения средств на приобретение оборудования ПВ: ракетных ПУ, УКВ радиостанции и инвентаря согласно разделу 15.3.3.2.

15.4.7 ***Обязательства и ответственность Исполнителя*** **ПГЗ:**

а) Согласование *границ ЗТ и сроков защиты* с Заказчиком и подготовку проекта контракта за 6 месяцев до начала защиты.

б) Обеспечение готовности всех подразделений к проведению ПГЗ *за пять дней* до начала защиты, оговоренного в контракте, включая:

– ремонт и регламентное обслуживание технических средств радиолокации, ракетной техники, связи, средств автоматизации и т.д.;

– обучение и аттестацию специалистов по воздействию, радиолокации и ракетной техники;

– развертывание оборудования КП и ПВ;

– горизонтирование, ориентирование, градуировку и калибровку ПУ, МРЛ и АСУ;

– своевременный заказ и приобретение ПГИ с доставкой на ПВ до начала защиты в количестве не менее их среднегодового расхода;

– разработка и согласование инструкции и схемы взаимодействия с органами авиации при проведении противоградовых стрельб;

– комплексные тренировки с целью отработки взаимодействия всех подразделений ВС и восстановления навыков практической работы;

– подготовка порядка обеспечения ВС прогнозом погоды.

в) Начать защиту *в указанный в контракте срок* и доложить Заказчику, Росгидромету и ФГБУ «ВГИ» о начале защиты.

г) Провести противоградовые работы в соответствии с РД 52.37.731 в согласованные с Заказчиком сроки *с эффективностью не ниже 70%*.

д) В процессе проведения ПГЗ Исполнитель обязан строго соблюдать положения, инструкции, распоряжения и РД, регламентирующие порядок приобретения, хранения, перевозки и эксплуатации ПГИ и порядок оценки эффективности ПГЗ в соответствии с действующими РД и нормативно-техническими документами, приведенными в разделе 4.4.

е) По окончании сезона ПГЗ провести *оценку физической и экономической эффективности ПГЗ*, подготовить и представить Заказчику, в Росгидромет и ФГБУ «ВГИ» краткий и итоговый отчеты о проведении ПГЗ.

ж) ***Особые условия***:

1) Заказчик не вправе требовать от Исполнителя 100% предотвращения ущерба от града.

2) Исполнитель *не несет ответственность за ущерб* от града:

– за границей ЗТ и на ЗТ вне установленных в контракте сроков защиты;

– на территории городов, над которыми и в направлении которых, запрещено проведение противоградовых стрельб;

– в период, когда закончились ПГИ, из-за недостаточного или несвоевременного финансирования;

– при запрете органов авиации на проведение АВ по заявке ВС;

– при форс-мажорных ситуациях (наводнение, война и т.п.).

15.5 Режим работы противоградовых подразделений

15.5.1 Со дня начала подготовки КП и ПВ к началу сезона, в течение всего сезона ПГЗ и в период свертывания КП и ПВ (в течение около 7 месяцев) работа персонала отдела воздействия и контроля, ракетного отдела, отделов радиолокации, связи, автоматизации и обсуживающих их транспортных подразделений должны осуществляться во все дни сезона в круглосуточном режиме.

15.5.2 Перевод на такой режим работы осуществляется приказом начальника ВС (директора НИУ) с указанием начала и конца периода и перечислением всех подразделений и должностных лиц, участвующих в проведении ПГЗ.

15.5.3 В целях обеспечения круглосуточного режима дежурства следует организовать посменную работу персонала. В случае загрузки персонала сверх сменной работы и возникновении переработки, связанной с выполнением технологического процесса ПГЗ, их следует

компенсировать отгулами в сроки с меньшей загрузкой (без ущерба выполнению технологического процесса ПГЗ).

15.5.4 *Продолжительность сезона* ПГЗ в зависимости от региона варьирует в пределах от 5 до 6 месяцев. Однако для успешности проведения противоградовых работ режим работы ВС Росгидромета должен быть *круглогодичным,* включая периоды:

– подготовки технических средств и персонала к началу сезона ПГЗ;
– развертывание противоградовых подразделений;
– проведение ПГЗ в течение всего сезона;
– свертывание работы КП и ПВ по окончанию сезона;
– ремонт и профилактика технических средств;
– техучеба и трудовые отпуска персонала.

15.5.5 *Развертывание противоградовых подразделений* перед началом сезона ПГЗ занимает около одного месяца и предусматривает:

– расконсервацию и развертывание оборудования КП (МРЛ, средств автоматизации и связи);
– развертывание сети ракетных ПВ с установкой на позициях ПУ, радиостанций, мачт связи и грозозащиты, противопожарного оборудования, обустройство условий работы и быта на ПВ;
– ориентирование, горизонтирование, градуировка, и калибровка МРЛ, АСУ и ракетных установок;
– согласование с органами МВД и развозка ПГИ на ПВ;
– организацию работы дежурных смен персонала КП и ПВ;
– организацию взаимодействия с органами авиации и между ВО;
– налаживание прогностического обеспечения ПГЗ;
– проведение комплексных тренировок по отладке взаимодействия противоградовых подразделений и восстановлению навыков персонала;
– организацию круглосуточного дежурства персонала КП и ПВ.

В период развертывание противоградовых подразделений и в течение сезона ПГЗ весь персонал КП, ПВ, отделов АВ, радиолокации, связи, ракетного отдела, автотранспорта приказом руководителя ВС переводятся на казарменное положение и выполнение должностных функций во все дни, включая выходные и праздничные.

15.5.6 *Проведение противоградовых операций* в течение сезона ПГЗ предусматривает выполнение следующих видов работ:

– круглосуточное дежурство КП и ПВ в течение всего сезона ПГЗ в режиме постоянной связи между КП и ПВ;
– радиолокационное обнаружение и распознавание категорий ОВ;

– выработка команд на проведение операций АВ на градовые процессы на КП, их передача и исполнение на ПВ в любое время суток;

– контроль результатов воздействия.

Продолжительность сезона ПГЗ на Северном Кавказе обычно составляет 5 месяцев, в Крыму – 6 месяцев.

15.5.7 *Свертывание противоградовых подразделений* по окончании сезона ПГЗ занимает 1 месяц и предусматривает:

– вывоз ракет с ПВ в сроки и по маршрутам, согласованным с МВД;

– демонтаж ПУ, радиостанций, мачт связи и грозозащиты;

– перевозка ПУ, средств связи в склад на КП и их консервация;

– консервация жилых и служебных помещений на КП и ПВ.

15.5.8 *Ремонт и профилактика технических средств* (МРЛ, ракетных ПУ, средств автоматизации и связи) осуществляемый в межсезонный период занимает 2 месяца. Свободный от ремонта персонал в этот период обеспечивает посменную охрану КП и ПВ.

15.5.9 *Переподготовка, техническая учеба и повышение квалификации персонала* занимает около 1,5 месяцев и включает в себя:

– обучение и переаттестацию персонала КП на ежегодных Всероссийских курсах, проводимых научно-методическим центром (ВГИ);

– обучение персонала ПВ на ежегодных курсах, проводимых в ВС;

– изучение и освоение новой техники;

– самостоятельное изучение необходимых Руководств, РД, инструкций и нормативно-технических документов.

15.5.10 *Трудовые отпуска и отгулы* за *переработку* предоставляются в соответствии с действующим Трудовым законодательством и по согласию сторон.

15.5.11 Выполнение всего цикла технологического процесса ПГЗ, согласно Приложению Б, обеспечивает *круглогодичную занятость* персонала противоградовых подразделений.

16 ПОРЯДОК ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ГРАДОВЫЕ ПРОЦЕССЫ

16.1 Подготовка к проведению воздействия

Подготовка к проведению воздействия предусматривает:

– оценку готовности системы ПГЗ к проведению АВ;
– подготовку персонала к проведению АВ;
– организацию взаимодействия с органами авиации;
– проведение комплексных тренировок персонала КП и ПВ;
– организацию круглосуточных радиолокационных наблюдений за развитием градоопасных и градовых облаков на ЗТ и ПТ;
– оповещение населения региона о начале проведения ПГЗ.

16.1.1 Для оценки готовности системы ПГЗ к проведению АВ следует проверить:

– надежность функционирования МРЛ и АСУ суточным прогоном;
– надежность связи между КП и каждым ПВ;
– готовность ПВ и ПУ;
– сопротивление заземления технических средств радиолокации, связи, ПУ с составлением протокола измерений и принятием мер по уменьшению сопротивления заземления там, где оно превышает 4 Ом.

16.1.2 Подготовка персонала к проведению АВ предусматривает:

16.1.2.1 Подготовку трех дежурных смен КП, каждая из которых состоит из следующих специалистов:

– руководитель воздействия – руководитель смены;
– дежурный инженер по воздействию;
– инженер или техник по взаимодействию с ПВ (в зависимости от числа ПВ их может быть в смене один или два);
– инженер или техник по взаимодействию с органами авиации;
– инженер-программист по эксплуатации АСУ;
– инженеры по радиолокации и средствам связи.

16.1.2.2 Подготовку двух дежурных смен для каждого ПВ, состоящих из двух человек:

– руководителя смены – бойца 1-го класса;
– бойца 2-го класса.

Дежурные смены КП и ПВ комплектуются из специалистов, прошедших специальное обучение, имеющих опыт и аттестованных с допуском к работе на своем рабочем месте.

16.1.3 Организация взаимодействия с органами авиации включает подготовку:

а) инструкции по проведению противоградовых стрельб, согласованной с органами гражданской и военной авиации;

б) инструкции по взаимодействию с органами авиации;

в) карты-схемы взаимодействия с органами авиации, на которой указаны позиции ПВ, радиусы их действия, авиатрассы и коридоры, проходящие в радиусе действия ПВ, границы зон взаимодействия, по которым может запрашиваться разрешение на пуск ПГИ в зависимости от наличия ОВ или запрещаться пуск ПГИ при сложной авиационной обстановке в регионе;

г) прямой круглосуточной связи между КП и органами авиации.

16.1.4 Проведение комплексных тренировок персонала КП и ПВ перед началом сезона ПГЗ осуществляется с максимальной имитацией противоградовых операций в течение не менее 5 дней с анализом и устранением выявленных недостатков.

16.1.5 Организация круглосуточных наблюдений за развитием градоопасных и градовых облаков и поддержание постоянной готовности КП и ПВ к проведению АВ осуществляется в течение всего сезона ПГЗ.

16.1.6 Оповещение населения, проживающего на ЗТ, о начале проведения ПГЗ с применением ПГИ осуществляется через средства массовой информации и органы местного самоуправления.

16.2 Режимы работы персонала по воздействию

16.2.1 Работа по АВ осуществляется с помощью АСУ в трех режимах:

- ДЕЖУРСТВО;
- ВОЗДЕЙСТВИЕ;
- ДОКУМЕНТИРОВАНИЕ.

16.2.2 ***Работа в режиме ДЕЖУРСТВО*** осуществляется по «Готовности № 3 к проведению АВ» круглосуточно в течение всего сезона ПГЗ в следующем порядке:

16.2.2.1 *Дежурный на КП* инженер по воздействию, заступив на дежурство:

1) вводит в АСУ коррекцию количества ПГИ на ПВ, с учетом их пополнения или вывоза с ПВ;

2) принимает прогноз погоды и по данным радиозондирования атмосферы и вводит в программу АСУ информацию по 16.3.2;

3) направляет предварительную заявку на работу в органы авиации;

4) осуществляет круглосуточное радиолокационное наблюдение за развитием ГП, обеспечивает обнаружение и распознавание ОВ;

5) осуществляет радиосвязь с ПВ по установленному руководителем АВ расписанию;

6) при развитии ОВ на ЗТ и вблизи неё докладывает об этом руководителю АВ и вызывает дежурную смену на рабочие места;

7) по указанию руководителя АВ передает на ПВ команду «Готовность № 2 к проведению АВ» и подает заявку в органы авиации о времени начала противоградовых стрельб;

8) получив разрешение РЦ УВД, сообщает об этом руководителю АВ;

9) по окончании АВ снимает заявку на разрешение РЦ УВД.

16.2.2.2 *Дежурная смена ПВ*, получив команду «Готовность № 2»:

1) расчехляет ПУ;

2) выносит со склада ПГИ, осматривает каждое ПГИ на предмет прямолинейности и отсутствия трещин на корпусе согласно РД 52.37.710;

3) записывает номер и серию каждого ПГИ и заряжает ими ПУ;

4) после зарядки ПУ докладывает на КП о готовности ПВ к АВ;

5) находится на дежурной связи с КП в режиме ожидания команд.

16.2.3 ***Работа в режиме ВОЗДЕЙСТВИЕ*** осуществляется при наличии ОВ, угрожающих ЗТ, всей дежурной сменой:

16.2.3.1 *Руководитель АВ* занимает рабочее место за пультом АСУ и принимает решение о проведении АВ и дает указания:

а) запросить разрешение РЦ УВД на проведение АВ;

б) привести ПВ в «Готовность № 1»;

в) перевести МРЛ на автономное электропитание (от дизеля);

г) персоналу КП занять свои места и приготовиться к проведению АВ.

В процессе воздействия выполняет операции по выработке команд на пуск ПГИ и осуществляет руководство работой дежурных смен КП и ПВ.

16.2.3.2 *Инженер (или техник) по взаимодействию с РЦ УВД*:

а) по указанию руководителя АВ запрашивает разрешение РЦ УВД на проведение противоградовых стрельб;

б) поддерживает радиосвязь с РЦ УВД в период проведения АВ;

в) сообщает руководителю АВ о разрешении (запрете) РЦ УВД на проведение стрельб, а также обо всех изменениях в активации зон взаимодействия с РЦ УВД;

г) сообщает РЦ УВД об окончании АВ и отказе от активации зон;

д) регистрирует на магнитофон все переговоры с РЦ УВД, а также разрешения и запреты РЦ УВД в таблице взаимодействия с РЦ УВД по форме Приложения Ж в РД 52.37.731.

16.2.3.3 *Инженер (техник) по взаимодействию с ПВ* осуществляет:

а) радиоперекличку всех ПВ, сверку часов по системному времени, установленному в АСУ;

б) по указанию руководителя АВ дает команды «Готовность № 1», «Зарядить ПУ», «Вертикальный угол запуска ПГИ 00^0»;

в) принимает доклады о готовности ПВ к АВ и дает установку «Приготовиться к приему команд»;

г) передает на ПВ команды на пуск ПГИ, и, после их повтора бойцом ПВ, убедившись в правильности приема, дает команду «Огонь»;

д) контролирует и записывает время выполнения команд;

е) регистрирует сообщения ПВ о явлениях погоды;

ж) по окончании АВ дает команду ПВ «Отбой. Готовность № 2».

16.2.3.4 *Дежурная смена ПВ*, получив команду «Готовность № 1»:

а) подключает вилки ПГИ к пусковым розеткам ПУ;

б) докладывает на КП о готовности к проведению АВ, занимает рабочие места для приема и выполнения команд;

в) регистрирует в журнале и выполняет поступившие с КП команды на пуск ПГИ, докладывает о их выполнении;

г) сообщает на КП о случаях аномального функционирования ПГИ, выпадении градовых и ливневых осадков на ПВ;

д) при получении команды «Отбой. Готовность № 2» разряжает и зачехляет ПУ, заносит ПГИ в склад и укладывает на стеллажи.

16.2.3.5 Персонал, обслуживающий средства радиолокации, связи, ракетной техники и автоматизации, в период АВ дежурит в зале воздействия, контролирует функционирование технических средств и оперативно устраняет возникшие неполадки.

16.2.4 Работа в *режиме ДОКУМЕНТИРОВАНИЯ*

16.2.4.1 Документирование материалов воздействия на градовые процессы осуществляется для целей последующего анализа успешного и неуспешного воздействия, выявление ошибок, накопления опыта для повышения квалификации персонала по АВ, а также для научных исследований.

16.2.4.2 Документирование материалов воздействия предусматривает запись на Hard-диск компьютера АСУ:

1) всех файлов радиолокационного обзора пространства;

2) фрагментов засева ОВ, содержащих их двухуровневое сечение, границу площадки засева, траектории внесенных в нее ПГИ, дату, время, четырехзначный идентификационный код радиолокационного центра и наименование ВС (например, RUST Ставропольская ВС);

3) таблицы стрельб;

4) таблицы взаимодействия с РЦ УВД;

5) радиолокационной карты кинетической энергии градовых осадков;

6) радиолокационных карты степени повреждения превалирующих на ЗТ сельскохозяйственных культур;

7) прогноза погоды в соответствии с разделом 6.10.

16.2.4.3 Документирование материалов по пунктам 1) – 4) должно обеспечиваться в АСУ автоматически в процессе работы в режимах «Дежурство» и «Воздействие».

16.2.4.4 Подготовка карт по пунктам 5) и 6) проводится после окончания воздействия с помощью соответствующих программ АСУ.

16.3 Порядок проведения радиолокационных наблюдений

16.3.1 Радиолокационные наблюдения за развитием облачности, градовых и градоопасных облаков в период сезона ПГЗ проводятся с помощью АСУ круглосуточно по следующему регламенту:

– при отсутствии облачности или наличии слоистообразной облачности через один час;

– при наличии конвективной облачности непрерывно.

В целях экономии электроэнергии допускается, что дежурные наблюдения проводит один из соседних отрядов и при развитии градоопасной облачности на ЗТ оповещает об этом другие отряды.

16.3.2 Дежурный инженер по воздействию ежедневно должен принимать прогнозы погоды и устанавливать в программе автоматизированной системы управления противоградовыми операциями (АСУ) данные радиозондирования атмосферы в ближайшие сроки:

а) высоту изотермы 0 ^{o}C H_0, км;

б) высоту изотермы -6 ^{o}C H_{-6}, км;

в) высоту тропопаузы для целей штормооповещения $H_{тр}$, км;

г) скорость ведущего потока V, км/ч;

д) направление ведущего потока A, градус, откуда дует ветер;

е) высоту нижнего уровня двухуровневого сечения H_1 = 2,5 ± 0,5 км;

ж) высоту засева облаков H_2 = (H_0+1) км, варьирующую от 3 до 6 км, и используемую в АСУ по умолчанию при расчете координат пуска ПГИ.

16.3.3 Все циклы объемного обзора пространства записываются на жесткий диск независимо от режима наблюдений.

16.3.4 Анализ и оценку степени градоопасности облаков следует осуществлять в следующем порядке:

а) выбрать карту двухуровневого сечения или карту категорий ОВ;

б) выбрать удобный масштаб отображения облачности;

в) в каждом цикле обзора измерять и сохранять параметры наиболее мощных КЯ, нумеруя их в первом обзоре с запада на восток, с севера на юг, а в дальнейшем в хронологическом порядке их зарождения;

г) определить категорию ОВ;

д) определить направление и скорость перемещения ОВ;

е) определить тип ГП в соответствии с разделом 8.2;

ж) провести анализ особенностей пространственного строения КЯ по серии вертикальных сечений в разных направлениях, обратив особое внимание на наличие и направление навеса радиоэха* КЯ, его высоту и протяженность;

и) провести анализ закономерностей эволюции облачной системы, обратив особое внимание на место появления и диссипации КЯ путем просмотра анимации карты явлений погоды или карты воздействия по нескольким циклам обзора.

16.3.5 Распознавание градовых и градоопасных облаков и оценка степени их градоопасности осуществляется одноволновым и двухволновым радиолокационными методами в соответствии с разделом 7.12. При этом используются показатели градоопасности, признаки наличия крупного града и методы оценки размера и кинетической энергии града, представленные в разделе 7.12.4.

Примечание

**Навесом радиоэха* называют область, нависающую над областью слабого радиоэха и расположенную на правом наветренном фланге КЯ в процессах с правосторонним развитием и на левом наветренном фланге КЯ в процессах с левосторонним развитием. Навес радиоэха следует выделять по двухуровневому сечению КЯ как площадь повышенного радиоэха на уровне H_2, выступающую за пределы повышенного радиоэха на уровне H_1. В зависимости от стадии развития КЯ за область повышенного радиоэха принимают области радиоэха с Z_{25}, Z_{35} и Z_{45} dBZ. Не следует принимать за навес радиоэха наклон облака и наковальню, направленные на подветренный фланг.

16.4 Порядок распознавания объектов воздействия

16.4.1 АВ проводится на градовые и градоопасные облака, имеющие тенденцию развития и перерастания в градовое состояние, именуемые в дальнейшем ОВ [1, 2].

16.4.2 ОВ делятся на 4 категории [1, 2]:

16.4.2.1 ОВ I категории – новая потенциально градоопасная КЯ с максимумом радиоэха в слое от 0 до 5 км над уровнем изотермы 0 ^{o}C, имеющая тенденцию развития со скоростями прироста параметров:

dZ_m/dt > 1 dBZ/мин, dH_{25}/dt > 0,1 км/мин, $d\Delta q_m/dt$ > 0,2 кг/м^{2}мин, $d\Delta M_{25}$ > 0.

16.4.2.2 ОВ II категории – градоопасная КЯ, имеющая тенденцию развития со скоростями прироста параметров:

dZ_m/dt > 0,5 dBZ/мин, dH_{35}/dt >0,1 км/мин, $d\Delta q_m/dt$ > 0,2 кг/м^{2}мин, $d\Delta M_{25}$ > 0.

16.4.2.3 ОВ III категории – градовая КЯ, из которой по радиолокационным данным выпадает град, а ее параметры имеют тенденцию роста или сохранения во времени.

16.4.2.4 ОВ IV категории: Сверхмощная градовая КЯ из которой, по радиолокационным данным, выпадает град катастрофической интенсивности.

16.4.3 Под тенденцией развития ОВ следует понимать увеличение во времени значений его максимальной отражаемости, высоты повышенного радиоэха, приведенной и интегральной водности переохлажденного слоя ОВ, а под тенденцией диссипации – уменьшение их значений [2].

16.4.4 Распознавание ОВ различных категорий осуществляется по критериям градоопасности одномерных, двумерных и трехмерных параметров, характеризующим повышенное водосодержание переохлажденной части КЯ и наличие условия для зарождения и роста града [2]. Учет изменения во времени значений параметров (скорости прироста или убывания параметров) характеризует тенденцию развития ОВ и возможность их перерастания в другие категории градоопасности.

16.4.5 Расчет категорий ОВ должен быть реализован в программном обеспечении АСУ и осуществляться в автоматическом режиме при измерении параметров облаков по критериям, приведенным в таблице 16.1.

Таблица 16.1 – Критерии распознавания ОВ различных категорий

Категория ОВ	Критерии градоопасности					
I	$0 < \Delta H_{Zm} < 5$	$15 < Z_m < 45$	$\Delta q_m \geq 0{,}5$	$\Delta M_{25} > 10^3$	$d\Delta q_m/dt > 0{,}2$	$d\Delta M_{25} > 0$
II	$\Delta H_{35} > 3$	$Z_m \geq 45$	$\Delta q_m \geq 2$	$\Delta M_{35} > 2\cdot10^4$	$d\Delta q_m/dt > 0{,}2$	$d\Delta M_{35} > 0$
III	$\Delta H_{45} \geq 3$	$Z_m \geq 55$	$\Delta q_m > 8$	$\Delta M_{45} > 2\cdot10^4$	$d\Delta q_m/dt \geq 0$	$d\Delta M_{35} \geq 0$
IV	$\Delta H_{45} > 4$	$Z_m > 65$	$\Delta q_m > 16$	$\Delta M_{55} > 2\cdot10^5$	-	-

В таблице использованы следующие обозначения параметров и их размерности:

ΔH_{Zm}, км – высота максимума радиоэха над уровнем изотермы 0°С H_0;

Z_m, dBZ – максимальная отражаемость ОВ на длине волны λ = 10 см;

ΔH_{25}, ΔH_{35} и ΔH_{45}, км – превышение над уровнем H_0 высот верхней границы объемов радиоэха с Z_{10} = 25, 35 и 45 dBZ, соответственно;

Δq_m, кг/м^2 – максимальное значение приведенной водности выше уровня H_0;

ΔM_{25}, ΔM_{35}, ΔM_{45} и ΔM_{55}, т – интегральная водность объемов радиоэха выше уровня H_0 с Z_{10} = 25, 35, 45 и 55 dBZ, соответственно;

$d\Delta q_m/dt$, кг/м^{2}мин – скорость прироста приведенной водности КЯ выше уровня H_0;

dM_{25}/dt и dM_{35}/dt, т/мин – скорость прироста во времени интегральной водности объемов радиоэха выше уровня H_0 с Z_{10} = 25 и 35 dBZ, соответственно.

П р и м е ч а н и е – Допускается применение альтернативного варианта критериев засева, представленного в таблице Е.1 РД 52.37.731

16.5 Порядок выполнения противоградовых операций

16.5.1 Засев ОВ любой категории осуществляется в областях нового роста преимущественно в области нависающего радиоэха, где проходит формирование условий зарождения града.

16.5.2 Засев ОВ любой категории при любом типе ГП осуществляется в облачном слое с температурой в пределах -(6 ± 3) °С, соответствующей порогу кристаллизующего действия применяемого реагента и максимумам скоростей роста, размножения и агрегации кристаллов [1]. В случаях, когда нижняя граница нависающего или первого радиоэха превышает высоту уровня -6 °С на 1 км и более, засев осуществляется на уровне нижней границы нависающего радиоэха, ограниченном изолинией Z_{10} равной:

- 15 dBZ в ОВ I категории;
- 25 dBZ в ОВ II категории;
- 35 dBZ в ОВ III и IV категории.

16.5.3 ***Кратность засева*** зависит от категории ОВ [1]: ОВ I категории засеваются однократно, ОВ II категории – двукратно, ОВ III и IV категории трех и четырехкратно.

16.5.4 ***Порядок засев ОВ*** всех категорий *унифицирован* и включают следующую последовательность операций:

1) Радиолокационный обзор пространства и получение двухуровневых сечений радиоэха, именуемой на практике ПГЗ «картой воздействия».

2) Измерение параметров ОВ, определение их категорий, направления и скорости перемещения.

3) Определение направления навеса радиоэха и локализация места засева на двухуровневом сечении, фиксируя курсором точки перегиба границ площадки засева, в соответствии со схемами, показанными на рисунках 16.1 – 16.4.

4) Введение упреждения на скорость перемещения ОВ.

5) Выбор режима засева (экономичный, нормальный, массированный).

6) Выбор ракетных пунктов, могущих оптимально засеять ОВ и выработка команд на засев, передача, выполнение команд на засев и их документирование.

Эта последовательность операций выполняется в каждом цикле радиолокационного обзора, соблюдая следующие правила:

– направление навеса радиоэха определяется на двухуровневом сечении по линии, соединяющей центры Z_{45} в зоне осадков H_1 и высоте засева H_2. В случаях, когда нет четко выраженного навеса радиоэха, за его направление принимается направление перемещения ОВ;

– коррекция на перемещение ОВ осуществляется ее переносом области засева в направлении перемещения с учетом скорости перемещения ОВ и затрат времени на выполнение противоградовых операций (полуцикл обзора пространства, отображение двухуровневого сечения, выделение области засева, расчет, передача и исполнение команд на пуск ПГИ и полет ПГИ до зоны засева). Эти затраты времени в сумме составляют около 3 мин, половина которых занимает обзор полусферы выше уровня засева.

16.5.5 В системе управления противоградовыми операциями должны быть автоматизированы все 6 перечисленные выше операций, как это выполнено в «АСУ-МРЛ». Должно быть предусмотрено автоматическое построение двухуровневых сечений облачной системы, обеспечивающих наглядное представление ее ячейковой структуры, степени градоопасности КЯ и определение направления навеса радиоэха. Это повышает оперативность выполнения операций по локализации места и объема засева даже в сложной многоячейковой облачной системе.

16.5.6 Определение направления навеса радиоэха осуществляется по двухуровневому сечению радиоэха ОВ, которое представляет собой карту максимума отражаемости облачного слоя от (H_0 + 1) км до (H_0 + 5) км, на

фоне которого отображены изолинии Z_{10} = 45, 55 и 65 dBZ в слое осадков (обычно на высоте от 2 до 3 км в зависимости от орографии и высоты позиции МРЛ). Максимальный навес радиоэха, расположенный обычно в указанном слое автоматически выделяется на карте максимума отражаемости облачного слоя от (H_0 + 1) км до (H_0 + 5) км.

16.5.7 Перед началом АВ запрашивается разрешение РЦ УВД и согласно ему активируются (дезактивируются) зоны взаимодействия. Решение об АВ принимает руководитель АВ с учетом:

а) категории ОВ;

б) местоположения и направления перемещения ОВ (зарождение на ЗТ, вторжение на ЗТ, удаление или перемещение вдоль границы ЗТ);

в) типа ГП (одноячейковый, упорядоченный или неупорядоченный многоячейковый, суперячейковый, переходного типа). В зависимости от типа ГП оценивается возможность распространения процесса градообразования на ЗТ и выбирается стратегия АВ;

г) целесообразности экономии ПГИ.

16.5.8 Засев ОВ, угрожающих ЗТ, осуществляется дежурной сменой в любое время суток преимущественно в области нависающего радиоэха и его наветренного фланга в следующем порядке:

а) вывести на экран АСУ двухуровневое сечение облаков на 10-сантиметровом канале МРЛ-5 с цифровой коррекцией радиолокационных сигналов на R^2, подавлением мешающих отражений от местных предметов на фоне карты местности с позициями и радиусом действия ПВ;

б) установить масштаб изображения, обеспечивающий охват ОВ и ПВ, которые могут его засеять;

в) измерить параметры ОВ, определить его категорию, направление и скорость перемещения;

г) определить направление навеса радиоэха на двухуровневом сечении по линии, соединяющей центры Z_{45} на уровнях высоты H_1 и H_2. В случаях, когда нет четко выраженного навеса радиоэха, за направление навеса радиоэха принимается направление перемещения ОВ;

д) на двухуровневом сечении, устанавливая курсор на точки перегиба, зафиксировать щелчком левой клавиши мыши границы площадки засева (левую, фронтальную, правую и тыловую) в соответствии со схемами, представленными на рисунках 16.1 – 16.5;

е) ввести упреждение на скорость перемещения ОВ;

ж) выбрать режим засева (массированный, нормальный, экономичный) и выработать команды на засев;

и) передать команды на ПВ и проконтролировать их выполнение;

к) измерить параметры ОВ в новом цикле обзора, оценить эволюцию ОВ по временному ходу его параметров, уточнить категорию ОВ и при соответствии критериям засева провести повторный засев;

л) провести засев других ОВ, если они угрожают ЗТ.

16.5.9 Площадку засева следует всегда выделять полностью, чтобы обеспечить расчет КПД засева и наглядное отображение степени полноты засева площадки и невозможности засева из-за особенностей ее расположения относительно позиций ПВ, их радиуса действия и запретных секторов;

16.5.10 В случае применения ПУ с веерным размещением направляющих в малонаселенной местности с небольшим числом запретных секторов целесообразно проводить засев тройками ПГИ, а в густонаселенной местности с многочисленными запретными секторами – тройками, двойками и одиночными пусками ПГИ.

16.5.11 В случае применения автоматизированных ПУ засев проводится полными сериями ПГИ, вырабатываемыми автоматически, уже с учетом запретных секторов.

16.6 Порядок засева ОВ I категории

16.6.1 В ОВ I категории однократно засевается область нависающего радиоэха внутри изолинии Z_{10} = 15 dBZ (рис. 16.1). Для этого необходимо:

а) измерить параметры ОВ и уточнить его категорию;

б) определить высоту засева. Для этого провести вертикальное сечение ОВ, проходящее через максимум его радиоэха по направлению перемещения. Засев осуществляется на уровне изотермы -6 ^{o}C. Если нижняя граница навеса радиоэха расположена выше этого уровня, то засев осуществляется на уровне нижней границы радиоэха с Z = 15 dBZ;

в) выделить границы площадки засева в соответствии с рисунком 16.1. Для этого на двухуровневом сечении выделить площадь, ограниченную изолинией Z = 15 dBZ;

г) замкнуть контур площадки засева (щелчком правой кнопки мыши);

д) ввести упреждение на скорость перемещения ОВ;

е) выработать команду на засев и передать на ПВ для исполнения;

ж) в следующем цикле обзора измерить параметры ОВ. Если обнаружена тенденция развития ОВ, провести повторный засев, если нет тенденции развития – прекратить засев.

16.6.2 Время выработки, передачи и исполнения команды на засев ОВ I категории не должно превышать 1 мин.

16.6.3 В случае АВ на многоячейковые ГП в первую очередь следует засевать ОВ I категории, а потом более мощные ОВ.

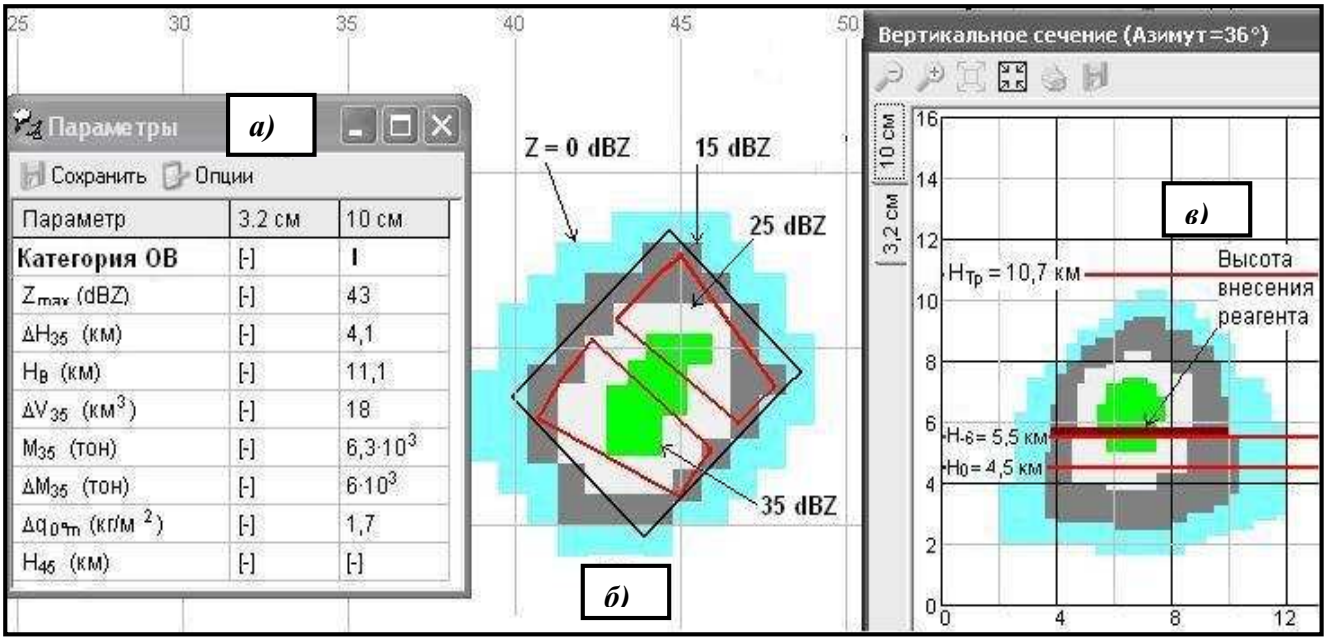


Рис. 16.1 – Схема засева ОВ I категории: а) параметры ОВ; б) схема засева на двухуровневом сечении ОВ; в) схема засева на вертикальном сечении ОВ

16.7 Порядок засева ОВ II категории

В ОВ II категории следует засевать фронтальный и наветренный фланги нависающего радиоэха (рис. 16.2) двукратно с интервалом около 7 мин (через один цикл обзора) на уровне изотермы -6°С. Если нижняя граница навеса радиоэха расположена выше этого уровня, то засев осуществляется на уровне нижней границы навеса радиоэха с Z = 25 dBZ. Для этого необходимо:

а) измерить параметры ОВ, направление и скорость перемещения;

б) определить наличие навеса радиоэха и его направление;

в) определить высоту нижней границы навеса радиоэха по вертикальному сечению, проходящему через максимум радиоэха в направлении максимального выступа навеса;

г) выделить площадку засева в области нависающего радиоэха ОВ, перемещаясь по часовой стрелке и фиксируя ее границы по точкам перегиба в соответствии с рисунком 16.2:

– *тыловую границу (1)* – вдоль границы изолинии Z_{10} = 35 dBZ;

– *правую границу (2)* – параллельно направлению навеса радиоэха по касательной к правой границе изолинии Z_{10} = 35 dBZ;

– *фронтальную границу (3)* – по фронтальной границе радиоэха;

– *левую границу (4)* – параллельно направлению навеса радиоэха по касательной к левой границе изолинии Z_{10} = 15 dBZ;

д) ввести упреждение на перемещение ОВ;

е) установить режим нормального засева и выработать команды на засев с максимальным охватом выделенной площадки и особенно ее наветренного фланга;

ж) передать команды на ПВ для исполнения;

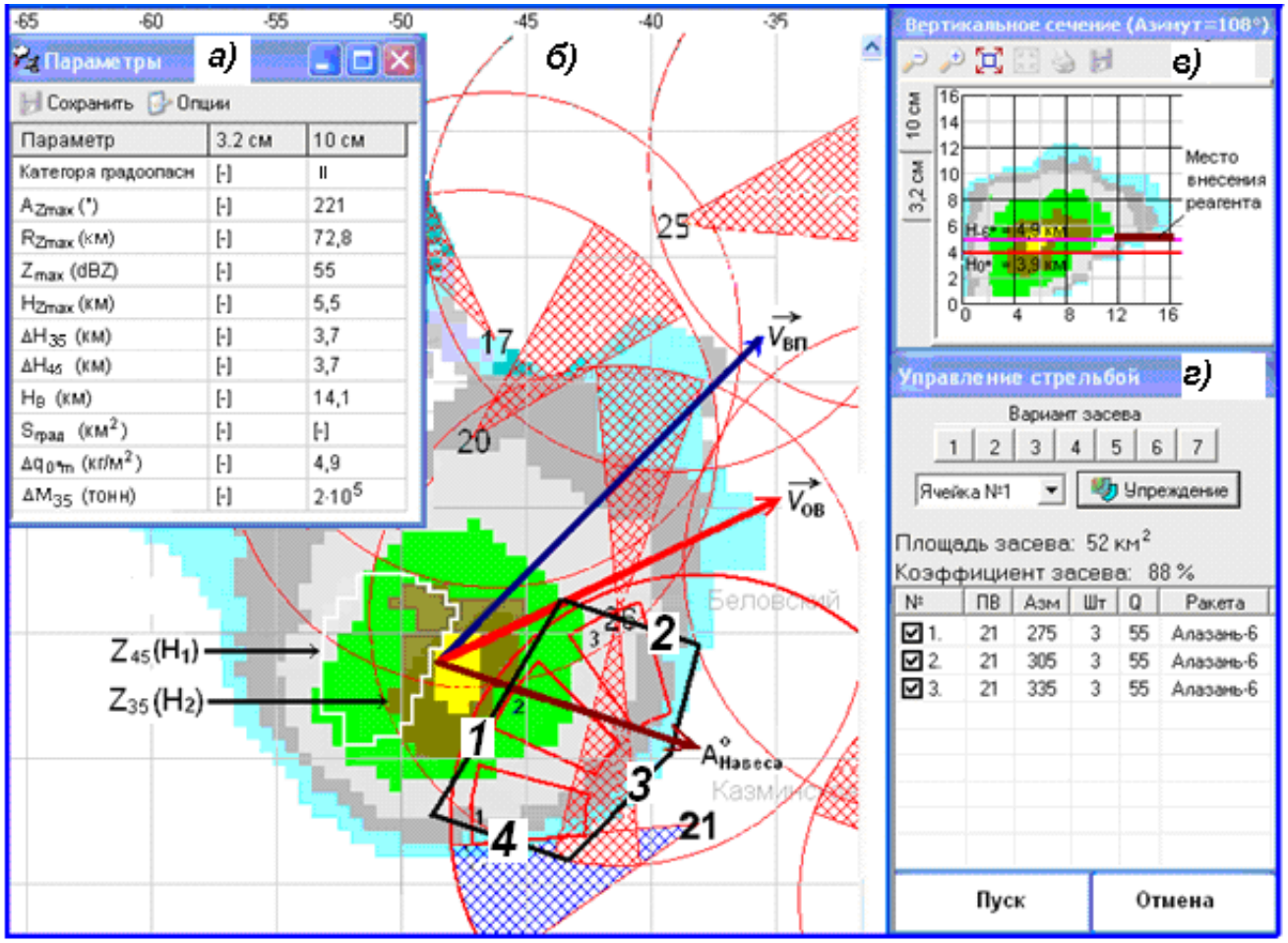


Рис. 16.2 – Схема засева ОВ II категории: а) параметры ОВ; б) схема засева на двухуровневом сечении ОВ; в) место засева на вертикальном сечении ОВ; г) команды на засев; $\vec{V}_{ПТ}$ – вектор ведущего потока; $\vec{V}_{ОВ}$ – вектор перемещения ОВ; $A^o_{Навеса}$ – направление навеса радиоэха

и) в следующем цикле обзора измерить параметры ОВ и с учетом тенденции его развития, принять решение о продолжении засева:

– в случае увеличения Z_m и высоты изолинии Z_{10} = 45 dBZ повторить операции от б) до ж) в этом же цикле обзора;

– если тенденции развития ОВ не обнаружено, то повторный засев выполнить через 1 цикл обзора.

16.8 Порядок засева ОВ III и IV категории с правосторонним развитием

16.8.1 В ОВ III и IV категории с правосторонним развитием следует засевать области нового роста (области будущего градообразования), расположенные на наветренном и правом флангах нависающего радиоэха и окружающих их фидерных облаках на уровне изотермы -6°С. Если нижняя граница навеса радиоэха выше этого уровня, то засев проводится на уровне нижней границы навеса радиоэха с Z = 35 dBZ.

16.8.2 Засев ОВ III и IV категории следует выполнить в следующем порядке:

а) измерить параметры ОВ, направление и скорость перемещения и уточнить категорию ОВ;

б) определить направление навеса радиоэха и высоту нижней границы по вертикальному сечению, проходящему через максимум радиоэха в направлении максимального навеса;

в) выделить контуры площадки засева, фиксируя ее границы по точкам перегиба (рис. 16.3) в следующей последовательности:

– *тыловую границу (1)* – вдоль линии тыловой границы изолинии Z_{10} = 35 dBZ навеса радиоэха, начиная от линии вектора ведущего потока, проходящей по тыловой границе навеса радиоэха;

– *правую границу (2)* – параллельно направлению навеса радиоэха по касательной к правой границе изолинии Z_{10} = 55 dBZ;

– *фронтальную границу (3)* – вдоль фронтальной границы изолинии Z_{10} = 0 dBZ, расширенной по направлению навеса радиоэха на 5 км;

– *левую границу (4)* – по левой границе изолинии Z_{10} = 0 dBZ, расширенной навстречу вектору ведущего потока на 5 км;

г) замкнуть контур площадки засева по периметру;

д) ввести упреждение на перемещение ОВ;

е) выбрать вариант засева в соответствии с разделом 16.10.5:

– *массированный засев* в случае мощных ГП с Z_m > 60 dBZ;

– *нормальный засев* во всех остальных случаях.

ж) выработать команды на засев с максимальным охватом выделенной площадки и, в первую очередь, ее наветренного фланга;

и) передать команды на ПВ для исполнения;

к) в следующем цикле обзора измерить параметры ОВ, уточнить категорию ОВ и при необходимости повторить операции от в) до и);

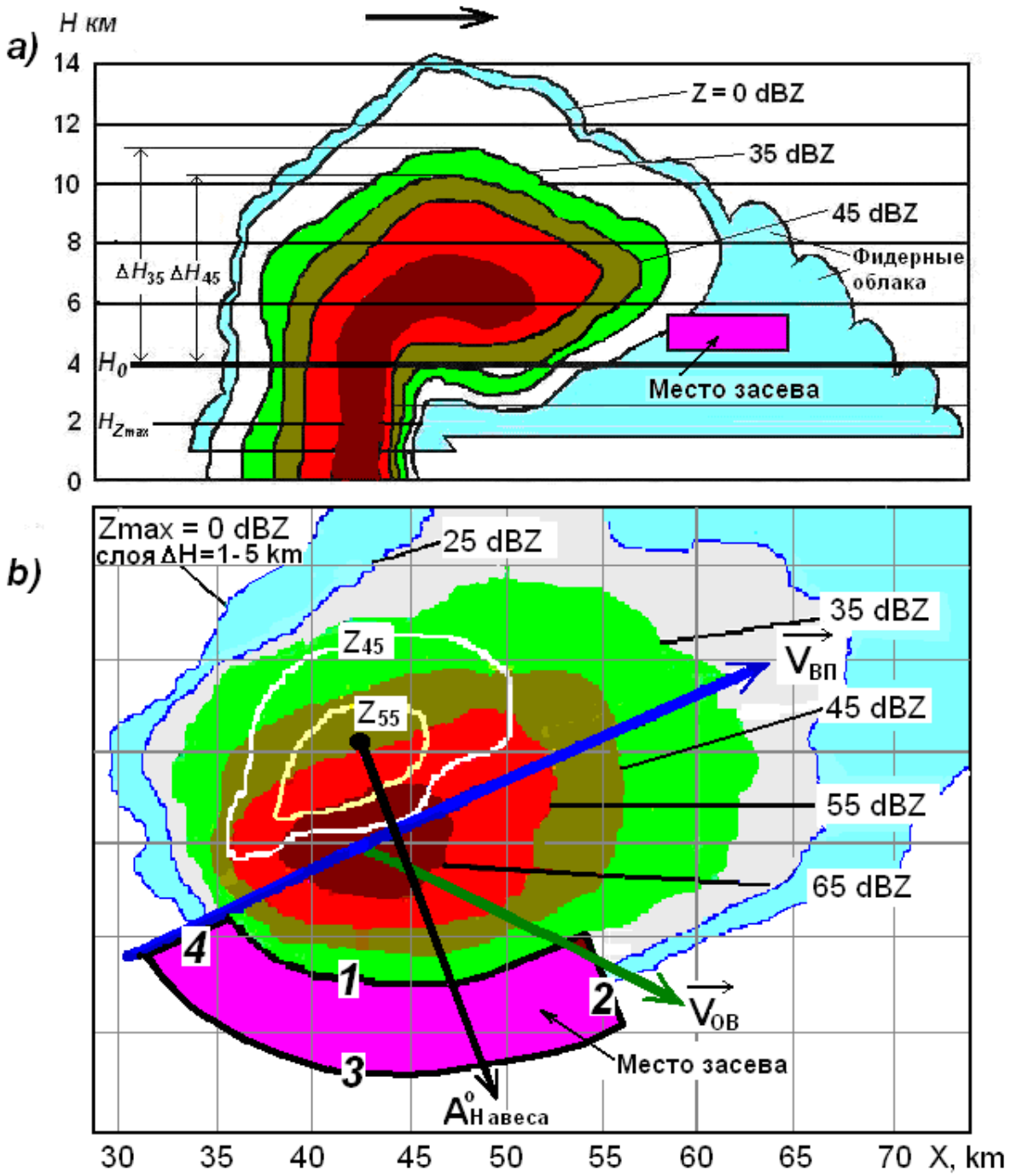


Рис. 16.3 –Схема засева ОВ III и IV категории с правосторонним развитием: а) на вертикальном сечении ОВ; б) на двухуровневом сечении ОВ. Остальные обозначения те же, что и на рисунке 16.2

16.8.3 При засеве ОВ с правосторонним развитием границы площадки засева удобнее выделять, двигаясь по часовой стрелки.

18.8.4 ОВ III категории засеваются трехкратно с интервалом около 7 мин (т.е., через один цикл обзора), а близкие по мощности к ОВ IV категории, имеющие тенденцию развития – в каждом цикле обзора. Каждый засев проводится с повторением операций от а) до и).

16.8.5 ОВ IV категории засеваются четырехкратно с интервалом около 3,5 мин (т.е., в каждом цикле обзора).

16.8.6 В случае наличия на наветренном фланге зоны осадков КЯ, не являющейся ОВ, границу *(4)* ограничить границей этих осадков. Если КЯ на наветренном фланге является ОВ, то засеять ее в соответствии со схемой засева данной категории.

16.9 Порядок засева ОВ III и IV категории с левосторонним развитием

16.9.1 Выполнить операции от а) до и) раздела 16.8.2 со сдвигом площадки засева на левый наветренный фланг [4]. Границы площадки засева выделяются в соответствии с рисунком 16.4*а* в следующей последовательности:

– *тыловую границу (1)* – по фронтальной границе Z_{10} = 35 dBZ;

– *правую границу (2)* – параллельно направлению навеса радиоэха по касательной к правой границе изолинии Z_{10} = 55 dBZ;

– *фронтальную границу (3)* – вдоль фронтальной границы изолинии Z_{10} = 0 dBZ, расширенной по направлению навеса радиоэха на 5 км;

– *левую границу (4)* – по левой границе изолинии Z_{10} = 0 dBZ, расширенной навстречу вектору ведущего потока на 5 км.

16.9.2 В случае засева ОВ с левосторонним развитием границы площадки засева удобнее выделять, двигаясь против часовой стрелки.

16.9.3 При разделении мощных КЯ на две (такое явление, зачастую, отмечается и в результате АВ), КЯ возникшая с левой стороны относительно направления перемещения обычно имеет левостороннее развитие, а правая КЯ – правостороннее развитие. Если эти КЯ являются ОВ, то их засев осуществляется в соответствии со схемами засева ОВ с правосторонним и левосторонним развитием.

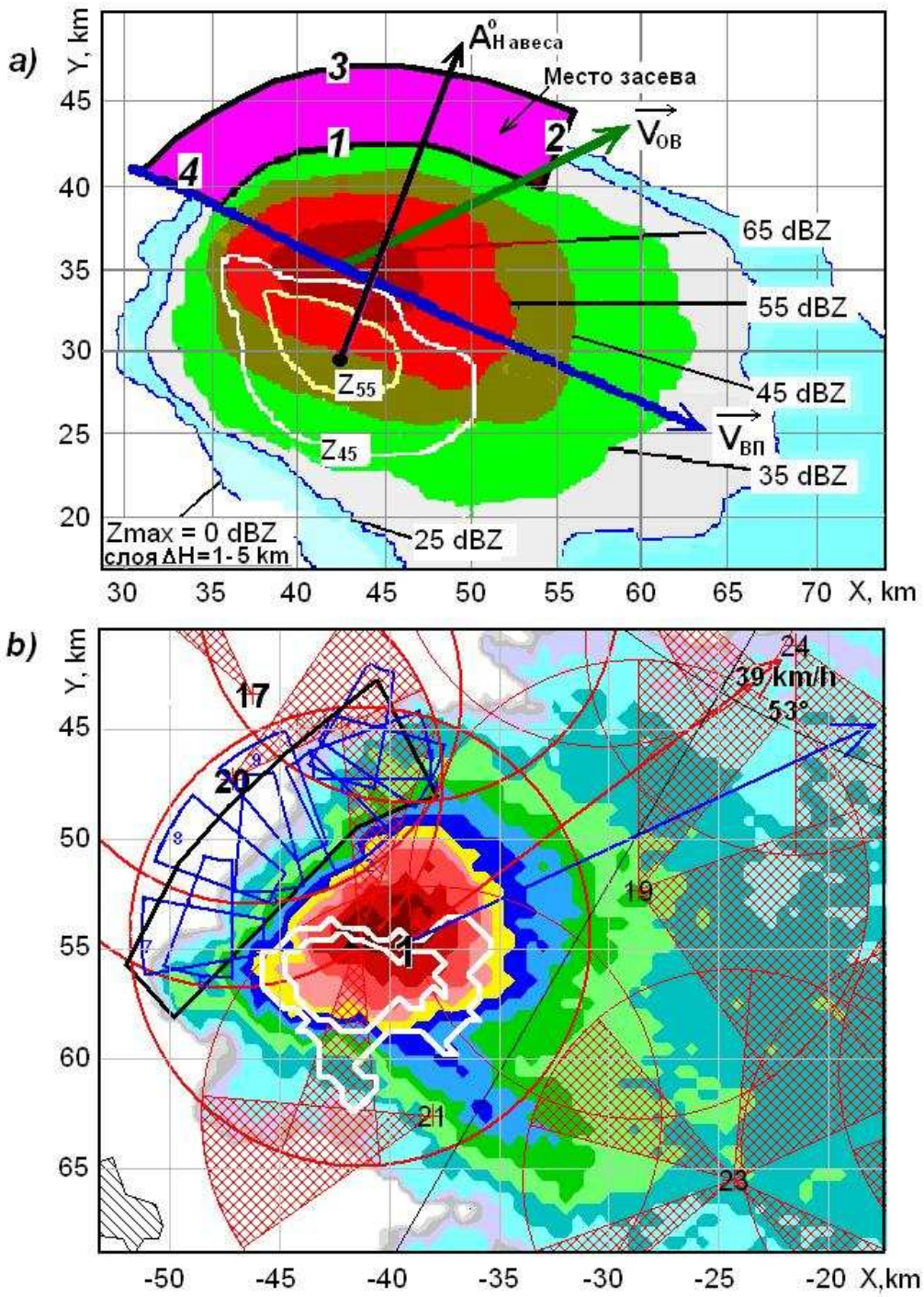


Рис. 16.4 – Схема засева ОВ III и IV категории с левосторонним развитием: ***a)*** – схема засева; ***b)*** – фрагмент засева реального ОВ IV категории

16.10 Нормы расхода противоградовых ракет

16.10.1 При моделировании АВ на градовые процессы Качурин [5], Орвилл [6], Кюрич [7] и др., обычно рассматривают засев всего объема области восходящих потоков и равномерную концентрацию ЛОЯ, равную 10^4, 10^5 или 10^6 м$^{-3}$. В реальности ракетная и авиационная технологии предусматривают засев не всей области восходящих потоков, а локальный засев области слабых восходящих потоков. При этом любые средства

засева формируют крайне неоднородные в пространстве и времени поля концентрации с очень высокими начальными значениями в точках и трассах внесения реагента. Со временем неоднородность концентрации выравнивается, но уже после взаимодействия частиц с облачной средой.

Дозировка реагента (кратность и частота засева, количество реагента для разового засева), согласно результатам теоретического моделирования диффузии и взаимодействия искусственного аэрозоля с облачной средой [8] должна устанавливаться с учетом водности облака, коэффициента турбулентной диффузии и скорости восходящих потоков. Поэтому для засева ОВ разных категорий введены разные режимы засева и понятие коэффициента засева K_S, характеризующего степень покрытия засевом области будущего градообразования.

16.10.2 Нормирование расхода ПГИ для засева ОВ осуществляется с расчетом, чтобы концентрация ЛОЯ в объеме засева через 3 минуты была не менее 10^7 м$^{-3}$, а по возможности достигала 10^8 м$^{-3}$, что, согласно данным теоретического моделирования [8], обеспечивает резкое повышение эффективности засева.

16.10.3 Для обеспечения этой концентрации при засеве ОВ IV категории и близких к ним по параметрам ОВ III категории повторные засевы осуществляются учащенной во времени и в пространстве дозировкой ПГИ типа «Алазань-6»:

- с интервалом времени между повторными засевами ≈ 3,5 минут;
- с расстоянием между серединами трасс засева, равным 0,5 км.

Для этого ПГИ «Алазань-6» должны запускаться веером по азимуту с шагом между «тройками ПГИ» в 5 градусов, как показано на рисунке 16.5*а*. В зависимости от размещения ПВ можно использовать схему засева, показанную на рисунке 16.5*б*. С учетом разброса траекторий ПГИ семейства «Алазань», пауз между их пусками и перемещения ОВ достаточно дублировать запуск троек ПГИ без перенаведения ПУ по азимуту.

16.10.4 В случае применения ПГИ, у которых выход активных ЛОЯ в несколько раз превышает выход ЛОЯ у ПГИ «Алазань-6», расстояние между серединами трасс засева может быть увеличено до 1 км.

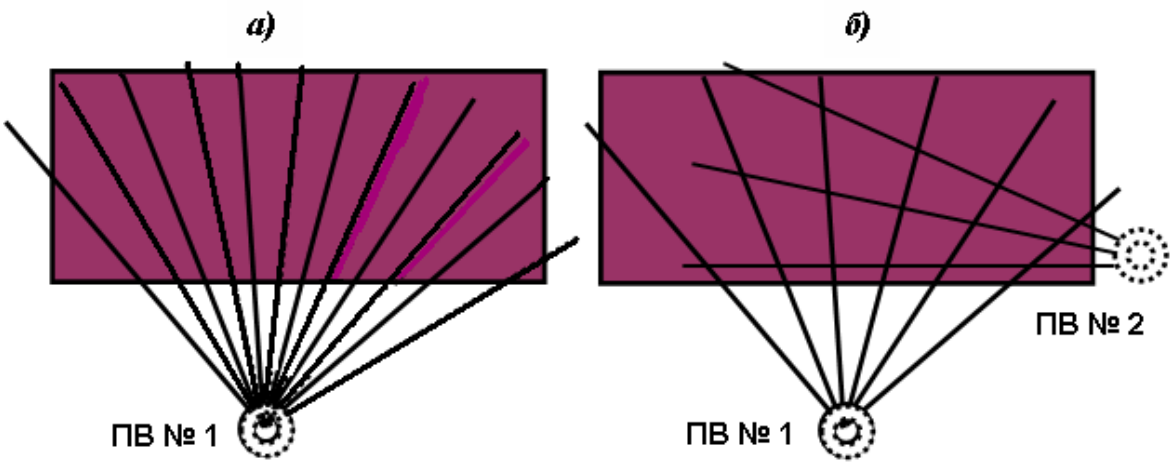


Рис. 16.5 – Схемы запуска ПГИ при засеве ОВ IV категории

16.10.5 При засеве ОВ различных категорий следует использовать следующие режимы засева:

а) *режим массированного засева*, с покрытием трассами реагента всей зоны засева с коэффициентом засева $80 < K < 100\%$ и интервалом между повторными засевами не более 4 минут (т.е. в каждом цикле обзора). Такой режим рекомендуется для засева ОВ 4 категории и мощных ОВ III категории с $Z_m > 60$ dBZ и $\Delta H_{45} > 5$ км;

б) *режим нормального засева*, предусматривающий покрытие трассами реагента основной части зоны засева с коэффициентом засева K равным от 50 до 80%, рекомендуемый при засеве ОВ III категории средней и слабой интенсивности;

в) *режим экономичного засева*, предусматривающий покрытие трассами засева с коэффициентом засева K равным от 30 до 50% и интервалом между повторными засевами около 7 минут (т.е. через один цикл обзора). Такой режим рекомендуется для засева ОВ I и II категории.

16.10.6 Нормы расхода ПГИ на засев одного ОВ рассчитываются по формуле:

$$N_i = K_i \frac{S_i}{\sigma_i \gamma}, \qquad (16.1)$$

где N_i – число ПГИ, требуемое для засева ОВ i-й категории; K_i – кратность засева ОВ i-й категории; S_i – площадь проекции объема засева на горизонтальную плоскость в км^2; σ_j – площадь, засеваемая одним ПГИ, равная 6 км^2 для «Алазань-6», и 8 км^2 для ПГИ «Ас»; γ – коэффициент эффективности использования трасс засева, равный в среднем 0,7.

16.10.7 Средние нормы расхода ПГИ на засев ОВ i-й категории приведены в таблице 16.2 и рассчитаны исходя из уточненных

многолетних данных о площадях зон засева ОВ S_i, кратности засева ОВ различных категорий K_i, коэффициента использования трасс реагента γ, а также учета многолетних данных о расходе ПГИ на засев ОВ разных категорий.

16.10.8 Годовой расход ПГИ N_Σ рассчитывается по формуле:

$$N_\Sigma = G\sum_{i=1}^{4}\overline{n}_i\overline{N}_i\ , \qquad (16.2)$$

где G – коэффициент градоопасности года защиты, который варьирует от 0,3 до 3,0; $\overline{n}_i$ – среднегодовое число засеваемых ОВ i-й категории.

16.10.9 Среднегодовая норма расхода ПГИ в таблице рассчитана при G = 1. В годы повышенной градоопасности расход ПГИ увеличится в G раз, а в годы пониженной градоопасности уменьшится в G раз.

Таблица 16.2 – Средние нормы расхода ПГИ на засев ОВ

Категория ОВ	Площадь горизонтального сечения зоны засева S_i, км^2			Кратность засева K_i	Средний расход ПГИ разного типа $\overline{N}_i$, шт.	
	минимальная	максимальная	средняя		Алазань-6, Алазань-9	Ас, Алан-3
I	3	25	8	1	4	4
II	6	30	18	2	9	8
III	6	50	36	3	24	20
IV	25	200	80	4	76	60

16.11 Радиолокационный контроль результатов засева

16.11.1 В процессе засева ОВ осуществляется контроль эффективности засева по изменению во времени параметров и категорий засеянных ОВ, а также эволюции карты их двухуровневого сечения.

16.11.2 Оценку эффективности засева ОВ разных категорий осуществляют дифференцировано по признакам, характерным для каждой категории ОВ [2]:

16.11.2.1 *Засев ОВ I категории* считается успешным и прекращается, если через два цикла обзора после однократного засева отмечается тенденция диссипации, выражающаяся в размывании радиоэха ОВ, уменьшении площади и высоты повышенного радиоэха до ΔH_{35} < 2 км, уменьшение приведенной водности до $\Delta q \le$ 0,5 кг/м^2 и максимальной отражаемости до Z_m < 35 dBZ.

16.11.2.2 *Засев ОВ II категории* считается успешным и прекращается, если через два цикла обзора после двукратного засева отмечается тенденция диссипации, выражающаяся в уменьшении параметров ОВ до следующих критериальных значений:

$$Z_m < 45 \text{ dBZ}; \Delta H_{45} < 2 \text{ км}; \Delta q_m < 2 \text{ кг/м}^2; \Delta M_{35} < 10^4 \text{ т и } \Delta H_{Zm} < 0.$$

16.11.2.3 *Засев ОВ III и IV категорий* считается успешным и прекращается при достижении через один цикл обзора после трех- и четырехкратного засева, соответственно, следующих эффектов:

а) исчезновение навеса радиоэха и характерной упорядоченной структуры радиоэха суперячейки или градообразующей ячейки многоячейкового ГП;

б) прекращение выпадения града, определяемое по исчезновению на двухуровневом сечении изолиний Z_{10} = 65 и Z_{10} = 55 dBZ, уменьшение площади внутри изолинии Z_{10} = 45 dBZ, а также исчезновению града на картах размера (d_m) и потока кинетической энергии ($\dot{E}$) града.

в) уменьшение параметров ОВ до критериальных значений:

$$\Delta H_{45} \leq 2 \text{ км}; Z_m < 55 \text{ dBZ}; \Delta q_m < 4 \text{ кг/м}^2; \Delta M_{55} = 0; \Delta M_{45} \leq 10^4 \text{ т}; \dot{E} \leq 0{,}1 \text{ Дж/м}^2\text{с}.$$

АВ на ОВ III и IV категории можно считать положительным, если достигнуто сокращение ширины полосы выпадения града, уменьшение размера и кинетической энергии града, снижение категории ОВ, разделение ОВ IV категории на два или несколько ОВ II и III категории.

16.11.3 Если указанные эффекты не достигнуты, или изменилась категория ОВ, то засев следует продолжить, уточнив категорию ОВ, в соответствии со схемой засева ОВ установленной категории.

16.11.4 После завершения АВ следует:

а) построить с помощью АСУ карту кинетической энергии града за период наблюдения ГП и передать ее в группу наземного контроля для оценки площадей выпадения и ущерба от града;

б) составить телеграмму о проведенном АВ по форме, предусмотренной в РД 52.37.732 и передать в Росгидромет, ФГБУ «ВГИ» и Заказчику.

16.11.5 После окончания смены персонал КП и ПВ осуществляет передач дежурства следующей смене с информированием о количестве ПГИ на ПВ и состоянии технических средств радиолокации, связи и ракетной техники, указав проблемы и недостатки, если они имеются.

16.12 Наземный контроль результатов воздействия

16.12.1 Для оценки результатов АВ не более чем в 5-дневный срок организуется обследование ЗТ с целью уточнения:

а) места и времени выпадения града;

б) площади градобития и степени повреждения сельхозкультур;

в) характеристик градовых осадков (размер града, толщина слоя);

г) характеристик сопутствующих явлений (ливневые дожди, ветер, смыв почвы, паводки, сели и т.п.).

16.12.2 Обследование ЗТ и оценка ущерба группой специалистов из представителей ВС, Заказчика и пострадавших от градобития хозяйств с выездом на место градобития.

16.12.3 Результаты обследования ЗТ с картой маршрута объезда, границами выпадения града, площадями повреждений, характеристиками града и сопутствующих явлений, а также результаты сравнения радиолокационных и наземных (фактических) данных об осадках включаются в отчет по АВ.

16.12.4 По результатам обследования составляются телеграммы с уточнением ущерба на ЗТ и ПТ и передаются Заказчику, в Росгидромет и ФГБУ «ВГИ».

16.12.5 Оценка физической и экономической эффективности ПГЗ и статистической значимости достигнутого эффекта осуществляется в соответствии с РД 52.37.732.

16.13 Порядок документирования противоградовых операций

16.13.1 После окончания АВ дежурной сменой КП осуществляется электронное документирование материалов АВ в соответствии с РД 52.37.731, которые включают:

а) отчет по АВ;

б) таблицу стрельб;

в) таблицу взаимодействия с РЦ УВД;

г) фрагменты засева;

д) карту кинетической энергии града или карту интенсивных осадков;

е) прогноз на день с АВ.

16.13.2 Документирование осуществляется в соответствии с инструкцией по эксплуатации применяемого типа АСУ.

16.13.3 Инженер по взаимодействию с ПВ сверяет выполнение команд на пуск ПГИ, поданных на ПВ.

16.13.4 Материалы АВ за каждый день сохраняются в электронном виде и сдаются на DVD дисках в архив службы. В случае АВ на ОВ IV категории с крупными градобитиями на ЗТ отчет об АВ печатается на бумажный носитель и направляется для анализа научно-методическому руководителю (ФГБУ «ВГИ»).

16.13.5 Первичная радиолокационная информация и данные об АВ, перечисленные в пункте 16.13.1, сохраняются на DVD дисках, которые сдаются в архив ВС. Кроме того, они отправляются в ФГБУ «ВГИ» вместе с годовым отчетом ВС о производственной деятельности для пополнения банка данных Росгидромета, межсезонного обучения персонала, анализа материалов АВ и исследования региональных особенностей ГП.

16.14 Основные проблемы при проведении воздействия

Основные проблемы, осложняющие проведение АВ на градовые процессы могут быть разделены на три основные группы.

16.14.1 *Технические*

1) Неправильное горизонтирование, ориентирование, градуировка, калибровка и изменение потенциала МРЛ приводят к ошибкам в распознавании категорий ОВ, выборе места засева, излишнему расходу ПГИ и пропускам града на ЗТ. При подготовке МРЛ и АСУ к работе по АВ следует тщательно провести их горизонтирование, ориентирование, градуировку и калибровку, с периодической проверкой в течение сезона ПГЗ, а также систематическим контролем потенциала по показаниям системы автокалибровки АСУ. Если в процессе работы обнаруживается значительное отклонение потенциала МРЛ от номинального, дежурный инженер по радиолокации должен принять срочные меры по устранению неисправности. Если же неисправность не удается оперативно устранить, рекомендуется в программе АСУ включить опцию по автоматическому введению поправки на изменение потенциала МРЛ, определяемую системой автокалибровки.

2) Выход из строя технических средств АВ (МРЛ, АСУ, радиостанции и ПУ). Это исключается резервированием и систематическим проведением регламентного технического обслуживания техники.

3) Нарушение ориентирования ПУ (по окончанию пусков ПГИ следует проверять ориентирование и горизонтирование ручных ПУ по реперным целям, а автоматизированные ПУ – по Солнцу).

4) Нарушения связи между КП и ПВ во время интенсивной грозовой деятельности и выпадения ливневых осадков (особенно при отсутствии прямой видимости), что снижает оперативность передачи команд на ПВ.

Для исключения этого следует применять ретрансляторы, радиостанции с направленными антеннами, проводную или спутниковую связь.

5) Отключение промышленной сети электропитания при грозовой деятельности и сильном ветре. Во избежание этого перед началом АВ все технические средства следует перевести на автономное электропитание.

16.14.2 *Организационные*

1) Срыв проведения АВ из-за несвоевременной подачи в РЦ УВД заявки на проведение АВ с пусками ПГИ. Это может быть связано с ошибкой прогноза и отсутствием постоянного радиолокационного слежения за развитием облаков. Для своевременной подачи заявки на проведение АВ дежурный на КП обязан:

– получить прогноз погоды и в случае возможного развития грозоградовых процессов в районе работ подать предварительную заявку в РЦ УВД с учетом ожидаемого времени их развития;

– проводить регулярные радиолокационные наблюдения и в начале развития ОВ вблизи ЗТ подать заявку на непосредственную работу по АВ;

– по окончании АВ снять заявку на проведение АВ.

Следует иметь в виду, что преждевременная и беспричинная заявка на получение разрешения РЦ УВД и запоздалый отказ от разрешения отрицательно сказывается на работе авиации и выдаче разрешений в последующем.

2) Отсутствие связи координации между соседними отрядами и службами при проведении воздействия на смежных территориях.

3) Низкий темп засева мощных градовых облаков и их недозасев из-за отсутствия второй ПУ на ПВ, зачастую приводящая к недозасеву ОВ в период перезарядки ПУ в течение 6 ÷ 8 минут.

4) Ограниченность запаса ПГИ на ПВ, приводящая к недозасву ОВ и снижению эффективности АВ.

16.14.3 Субъективные

1) Низкая квалификация персонала и связанные с этим нарушения технологии АВ, рекомендуемой настоящим руководством:

– недооценка или переоценка градовой опасности;

– опоздания с началом засева;

– неправильное выделение места и высоты засева (внесение ПГИ в зону локализации или выпадения града, вне зоны радиоэха на чрезмерном удалении от ее внешней границы;

– выработка команд без введения упреждения на перемещение ОВ

– неправильный выбор режима засева (массированный, нормальный, экономичный);

– низкая оперативность проведения противоградовых операций.

16.15 Порядок обеспечения безопасности ПГЗ

16.15.1 При подготовке и проведении ПГЗ осуществляются мероприятия, направленные на обеспечение безопасности обслуживающего персонала, населения, народнохозяйственных объектов, и полетов авиации.

16.15.2 Безопасность персонала, осуществляющего АВ, обеспечивается путем реализации мер, установленных приказами и распоряжениями Росгидромета и руководящими документами, регламентирующими порядок применения противоградовых комплексов: РД 52.37.601, РД 52.37.615 и РД 52.37.710.

16.15.3 Безопасность полетов авиации в районе проведения противоградовых стрельб обеспечивается выполнением персоналом КП, ПВ, группы взаимодействия и органами РЦ УВД требований, изложенных в инструкции [9].

16.15.4 Безопасность населения и народнохозяйственных объектов в районах проведения противоградовых стрельб обеспечивается проведением следующих мероприятий:

1) Оповещением населения перед началом сезона и в ходе ПГЗ через средства массовой информации, выпуском специальных памяток о противоградовых стрельбах и о порядке действий в случаях обнаружения на земле аномально функционировавших ПГИ.

2) Установлением запретных секторов пуска ПГИ в направлениях городов, АЭС, аэропортов и государственных границ в соответствии с РД 52.37.731.

3) Установлением запретных углов возвышения, при которых высота самоликвидации ПГИ над уровнем земли должна быть не ниже 1000 м, а максимальная высота их полета не выше 8000 м.

4) Обеспечением надежности функционирования ПГИ путем:

а) организации хранения, перевозки и эксплуатации противоградовых комплексов в соответствии с требованиями нормативных документов;

б) систематического контроля исправности применяемых ПГИ и ПУ;

в) применения ПГИ в пределах гарантийных сроков их годности.

5) Исключением возможности несанкционированного применения противоградовых комплексов посторонними людьми и не по назначению.

17 ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОТИВОГРАДОВЫХ РАБОТ

Применяемые технологии ПГЗ не могут обеспечить полного предотвращения града. В связи с этим весьма актуальной является проблема объективной оценки физической и экономической эффективности ПГЗ и статистическое обоснование того, что полученные эффекты являются следствием АВ, а не естественной пространственно-временной изменчивости градовых осадков [1].

Оценка эффективности ПГЗ включают в себя:

а) радиолокационную оценку эффективности засева отдельных градовых и градоопасных облаков в ходе АВ на них с целью принятия решения о прекращении или продолжении АВ;

б) экспресс оценку предотвращенного ущерба в период ПГЗ с целью определения величины ущерба, предотвращенного в результате АВ на отдельный градовый процесс;

в) оценку физической эффективности ПГЗ за сезон или многолетний период защиты с целью определения степени сокращения потерь от града (на сколько процентов или во сколько раз) в результате проведения ПГЗ;

г) оценку экономической эффективности ПГЗ за сезон или многолетний период защиты с целью определения экономической выгоды от проведения ПГЗ, окупаемости и рентабельности ПГЗ;

д) оценку статистической значимости достигнутого эффекта на доверительном уровне;

е) оценку экологической безопасности технологии ПГЗ.

17.1 Радиолокационные показатели эффекта засева ОВ

Радиолокационный контроль эффекта засева ОВ осуществляется в процессе АВ по трансформации макрофизических характеристик засеянных облаков (их ячейковой структуры, пространственного строения КЯ, динамики развития облачной системы, площади навеса радиоэха, высоты и площади повышенного радиоэха) и изменению их микрофизических характеристик (приведенной водности и интегрального водосодержания КЯ, размера и кинетической энергии града) и их распределения в пространстве [1].

17.1.1 Признаки и показатели эффекта засева

Эффект засева воздействия зависит от стадии развития и степени градоопасности ОВ [1]. Поэтому при оценке реакции градовых и

градоопасных облаков на засев рекомендуется дифференцированный подход по признакам, характерным для каждой категорий ОВ.

Анализ эволюции макрофизических характеристик засеянных градовых облаков показал [1, 2], что указателем реакции ОВ на засев является трансформация пространственной структуры их радиоэха:

– опускание нижней границы и исчезновение навеса радиоэха;

– трансформация характерной упорядоченной несимметричной структуры радиоэха суперячейковых и многоячейковых градовых облаков в осесимметричную;

– уменьшение поперечных размеров, высоты, площади и исчезновение объемов повышенной отражаемости (Z_{65}, Z_{55} и Z_{45}) в области отрицательных температур;

– трансформация одной области мощного радиоэха в несколько областей с более низкой отражаемостью;

– изменение направления и скорости перемещения засеянных ОВ.

Наиболее ранним указателем эффективности засева считается исчезновение навеса радиоэха. На рисунке 17.1 представлен пример опускания нижней границы, уменьшения площади и постепенного исчезновения навеса радиоэха по мере засева. Это свидетельствует об уменьшении поперечных площади и исчезновении струи мощных восходящих потоков, над которой формируется навес радиоэха.

Одним из надежных показателей эффекта засева является уменьшение в процессе засева поперечных размеров, высоты, площади и постепенное исчезновение изоконтуров повышенной отражаемости Z_{65}, Z_{55} и Z_{45} сначала в переохлажденной части, а потом во всей толще облака. Такая трансформация многоконтурной структуры засеянных мощных градовых облаков начинается через 15 – 20 мин после начала засева. Это можно видеть на вертикальных (рис. 17.1) и горизонтальных (рис. 17.2) сечениях радиоэха засеянных градовых облаков.

Зачастую после засева вместо одной области мощного радиоэха появляется несколько областей с более низкой отражаемостью (на рисунке 17.2 в 19^{24} видно ослабление засеянной КЯ № 2 и появление на правом фланге КЯ № 3, а в 19^{38} между ними появляется радиоэха новой КЯ № 4).

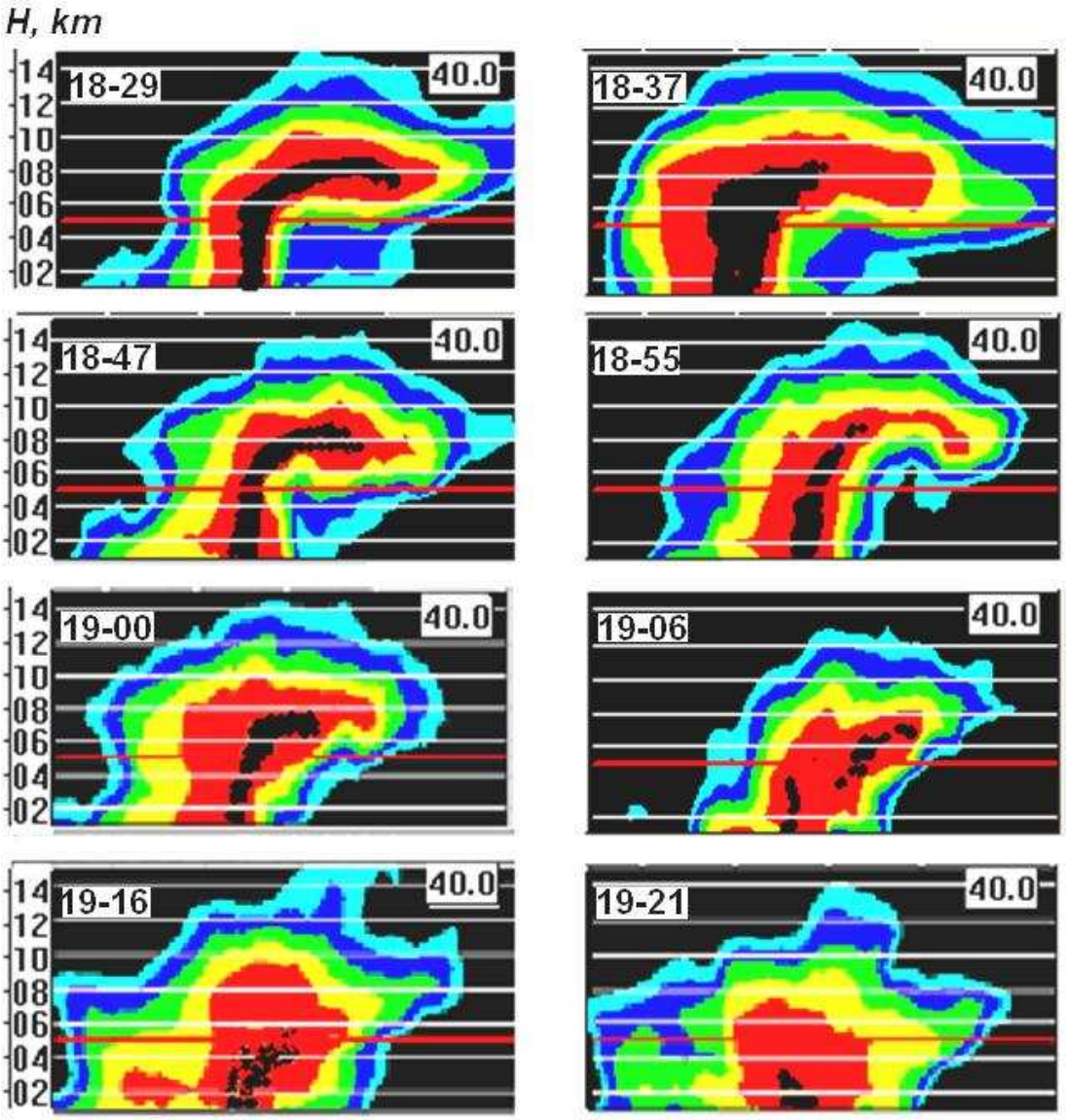


Рис. 17.1 – Эволюция структуры радиоэха на вертикальном сечении суперячейкового градового облака до засева (с 18^{29} до 18^{55}) и в период массированного ракетного засева (с 19^{00} до 19^{21}). Вертикальные сечения проведены в направлении максимального навеса радиоэха (азимут 40°). Аргентина, 27 декабря 1996 г. [1]

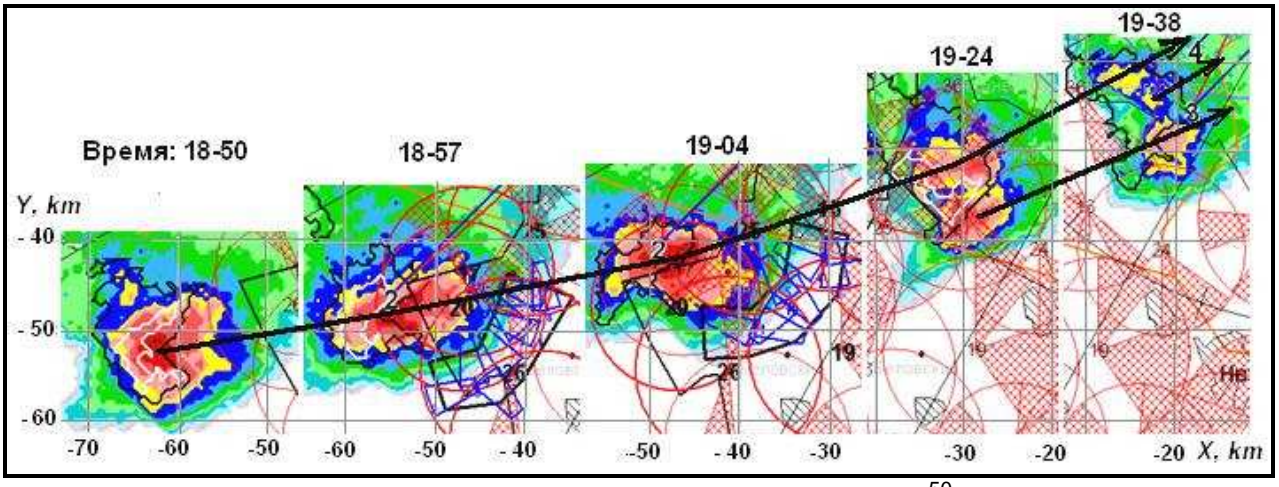


Рис. 17.2 – Карты двухуровневых сечений перед засевом (в 18^{50}), в процессе засева (с 18^{57} до 19^{31}) и после засева (19^{24}–19^{38}) суперячейки, вторгавшейся на ЗТ Ставропольской ВС 16.06.2006 г. Показаны не все фрагменты засева

Как правило, в результате засева уменьшается объем зоны роста града в области отрицательных температур (ΔV_{45}, ΔV_{55} и ΔV_{65}) за счет понижения высоты ее верхней границы и уменьшения поперечных размеров. Кроме того, градовый очаг приобретает изрезанную провалами структуру. После этого отмечается уменьшение высоты верхней границы ΔH_{65}, ΔH_{55} и ΔH_{45}, несколько позже (по мере прекращения выпадения града) уменьшается значение Z_m и еще позже высота верхней границы радиоэха $\Delta H_{\text{В}}$ [1].

Другим указателем эффекта засева является изменение направления перемещения градового облака. Известно, что мощные градовые облака в северном полушарии обычно имеют правостороннее развитие и перемещаются вправо, а в южном – левостороннее развитие и перемещаются влево от направления ведущего потока. Угол между направлением перемещения и ведущим потоком тем больше, чем мощнее градовое облако и мощнее струя питающего его восходящего потока, имеющая циклоническое вращение. По мере ослабления градового облака этот угол уменьшается, и направление перемещения приближается к направлению ведущего потока (рис. 17.2).

Эти особенности эволюции макрофизических характеристик градовых облаков в процессе засева могут использоваться для *качественной* оценки эффекта засева и тенденции диссипация или развития ОВ.

17.1.2 Особенности эволюции засеянных и незасеянных ОВ

Количественная оценка эффекта засева может осуществляться по тенденции увеличения (уменьшения) значений одномерных, двумерных и трехмерных параметров засеянных ОВ [1]:

– Z_m, ΔH_{45} и $Z_m \cdot \Delta H_{45}$;

– приведенная водность слоя роста града Δq для ОВ всех категорий;

– объемы зоны роста града ΔV_{45}, ΔV_{55} и ΔV_{65};

– интегральное водосодержание слоя роста града ΔM_{25} и ΔM_{35} для ОВ I и II категорий и ΔM_{45}, ΔM_{55} и ΔM_{65} для ОВ III и IV категорий;

– прекращение выпадения града, уменьшение размера и кинетической энергии града.

Исследования влияния засева на эволюцию ОВ разных категорий проводились путем сравнение особенностей трансформации параметров засеянных и незасеянных ОВ на Северном Кавказе [1, 3, 4], в Аргентине [4] и Закавказье [2]. Для этого на ЗТ и ПТ с примерно одинаковой градоопасностью и площадями выделялись ОВ и принималось решение о проведении АВ. На ЗТ осуществлялся ракетный или артиллерийский засев

ОВ, а на КТ такие же ОВ не засевались, но считались условно засеянными.

В качестве показателя эволюции засеянных и незасеянных ОВ был выбран временной ход значений одномерных параметров (Z_m, $\Delta H_{\Delta Z}$, ΔH_{45}, $P_Г$), двумерных (q_m, Δq_0) и трехмерных параметров (ΔV_{45}, ΔV_{55}, ΔV_{65}, ΔM_{45}, ΔM_{55}, ΔM_{65} и др.) нормированных к значениям, которые они имели в момент принятия решения о реальном или условном засеве ($X(t)/X(t_0)$: $\overline{\frac{Z_m(t)}{Z_m(t_0)}}$, $\overline{\frac{\Delta H_{45}(t)}{\Delta H_{45}(t_0)}}$, $\overline{\frac{q_m(t)}{q_m(t_0)}}$, $\overline{\frac{\Delta q_0(t)}{\Delta q_0(t_0)}}$, $\overline{\frac{\Delta V_{45}(t)}{\Delta V_{45}(t_0)}}$, $\overline{\frac{\Delta V_{55}(t)}{\Delta V_{55}(t_0)}}$, $\overline{\frac{\Delta V_{65}(t)}{\Delta V_{65}(t_0)}}$, $\overline{\frac{V_{45}(t)}{V_{45}(t_0)}}$, $\overline{\frac{V_{55}(t)}{V_{55}(t_0)}}$, $\overline{\frac{V_{65}(t)}{V_{65}(t_0)}}$, $\overline{\frac{\Delta M_{45}(t)}{\Delta M_{45}(t_0)}}$, $\overline{\frac{\Delta M_{55}(t)}{\Delta M_{55}(t_0)}}$, $\overline{\frac{\Delta M_{65}(t)}{\Delta M_{65}(t_0)}}$, $\overline{\frac{M_{45}(t)}{M_{45}(t_0)}}$ и $\overline{\frac{M_{55}(t)}{M_{55}(t_0)}}$.

Статистический материал о временном ходе нормированных значений $X(t)/X(t_0)$ был усреднен по группам засеянных и незасеянных ОВ каждой категории для получения сопоставимой картины различий в их эволюции. Установлено [1 – 5], что закономерности эволюции и реакция на засев засеянных и незасеянных ОВ различных категорий имеют существенные различия.

17.1.2.1 *Анализ эволюции засеянных ОВ I категории* показал, что после засева отмечается уменьшение значений Z_m, $\Delta H_{\Delta Z}$, размывание границ радиоэха вплоть до его исчезновения через 10 – 20 мин. Незасеянные ОВ I категории обычно продолжают развиваться и достигают градовой стадии. В среднем через 10 – 15 минут после формирования высоко зарождающегося первого радиоэха параметр $\overline{\frac{\Delta H_{\Delta Z}(t)}{\Delta H_{\Delta Z}(t_0)}}$ достигает своего максимального значения, в то время как для засеянных ОВ он уже приближается к нулю (рис. 17.3*а*). Продолжительность существования засеянных ОВ I категории в среднем на 35 – 50 минут меньше, чем незасеянных.

17.1.2.2. Анализ трансформации во времени нормированных значений параметров засеянных и незасеянных *ОВ II категории* показал, что закономерности их эволюции также имеют существенные различия.

Значения параметров засеянных ОВ после окончания АВ уменьшаются. Раньше эффект АВ проявляется в трансформации значений $\Delta H_{\Delta Z}$ и $P_Г$. Значение $P_Г$ засеянных ОВ II категории после начала АВ уменьшается и через 15 минут практически становится равным нулю. Значение $P_Г$ незасеянных ОВ в период условного воздействия увеличивается, что свидетельствует об их переходе из градоопасного состояния в градовое, затем в течение 15 – 20 мин (в стадии

квазистационарного состояния градовых облаков) остается практически неизменным, а потом начинает медленно уменьшаться.

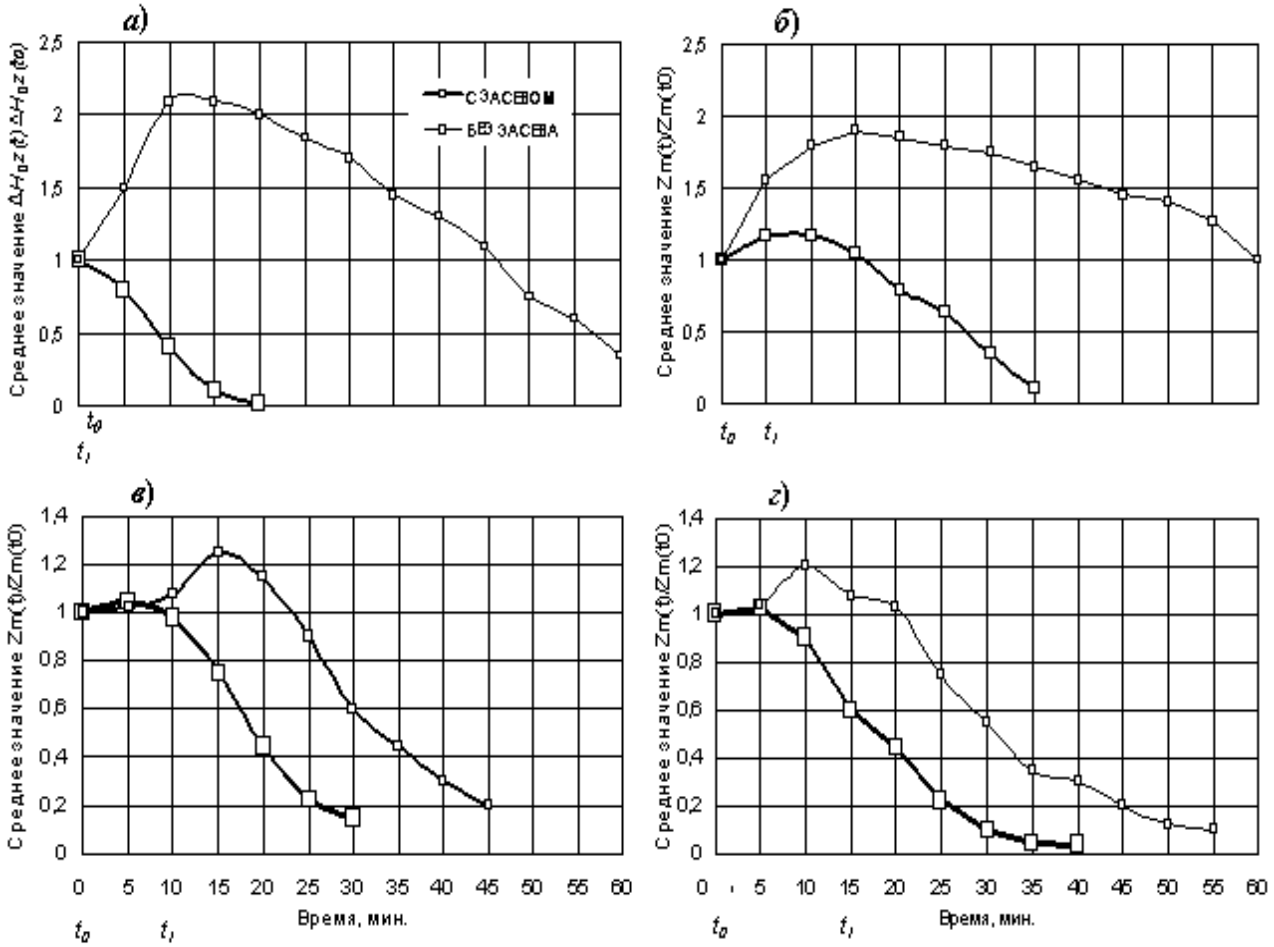


Рис. 17.3 – Эволюция во времени средних значений одномерных параметров засеянных и незасеянных ОВ I (*а*), II (*б*), III (*в*) и IV (*г*) категорий: t_0 – время начала реального и условного засева ОВ; t_1 – время окончания реального и условного засева

Значения $\Delta H_{\Delta Z}$, ΔV_{45} и ΔM_{45} через 5 – 7 мин после начала засева быстро уменьшаются, через 15 минут становятся значительно меньше, а через 25 – 30 минут практически равны нулю. Значения Z_m и ΔH_B реагируют на засев несколько позже (рис. 17.3*б*).

У незасеянных ОВ в период условного воздействия и после него значения этих параметров возрастают до значений, характерных для ОВ III и IV категорий. Продолжительность существования засеянных ОВ II категории в среднем на 30 – 35 мин меньше, чем незасеянных.

17.1.2.3 Различия в эволюции засеянных и незасеянных *ОВ III и IV категорий* также весьма ощутимы (рис. 17.4), хотя и в меньшей степени, чем для объектов I и II категорий. Более информативными показателями эффекта являются трехмерные параметры V_{45}, V_{55}, ΔV_{45}, ΔV_{55}, M_{45}, M_{55}, ΔM_{45} и ΔM_{55}. Одномерные параметры Z_m и ΔH_{45} несколько позже обнаруживают момент перехода засеянных градовых облаков в не градовое состояние, чем трехмерные параметры.

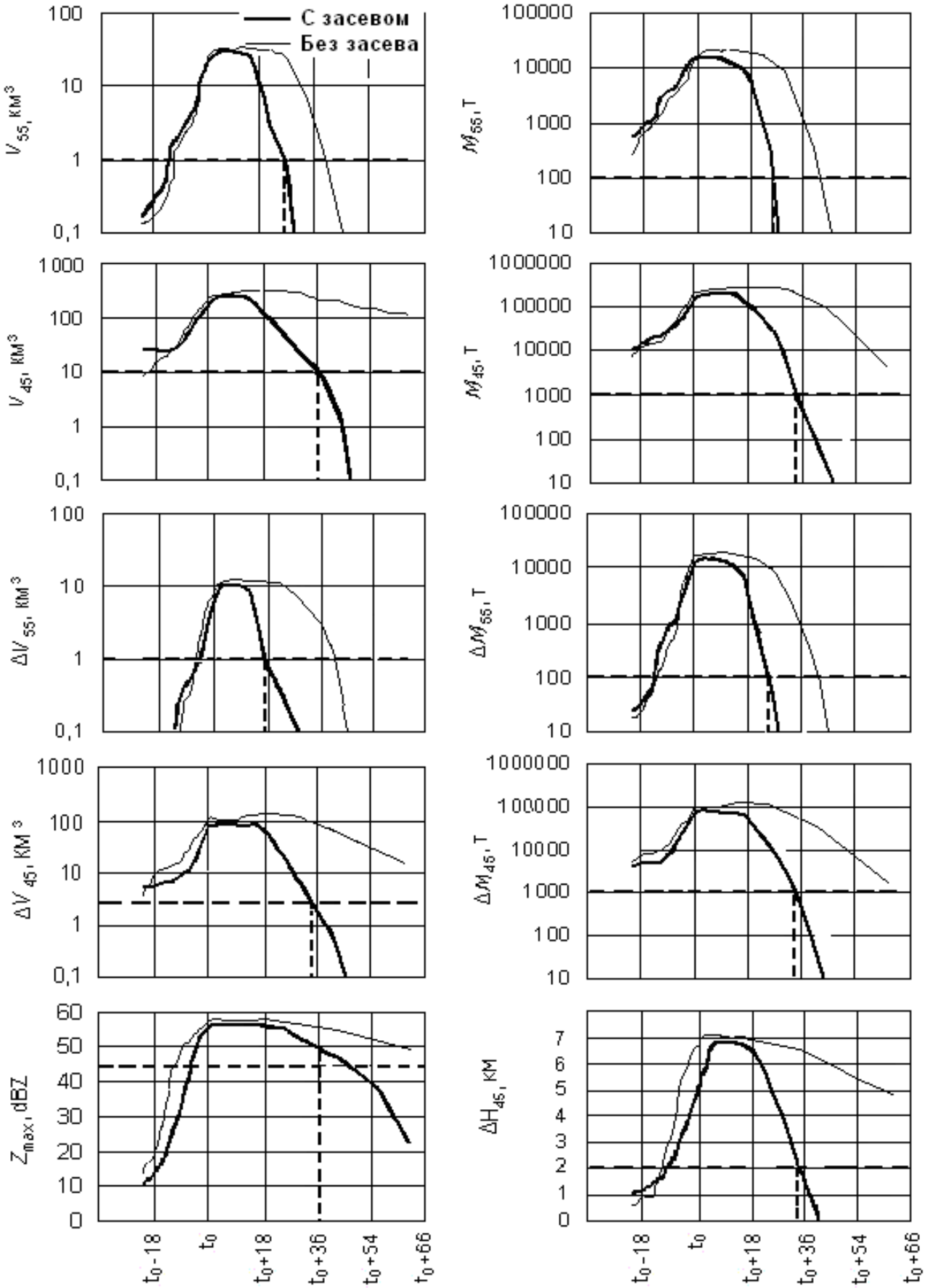


Рис. 17.4 – Эволюции одномерных (Z_m, ΔH_{45}) и трехмерных (V_{45}, V_{55}, M_{45}, M_{55}, ΔM_{45}, ΔM_{55}, ΔV_{45} и ΔV_{55}) параметров засеянных (жирные линии) и незасеянных (тонкие линии) ОВ III категории [1.]

Из рисунка 17.4 следует, что среднее время перехода в не градовое состояние 32 засеянных ОВ III категории после момента начала засева (t_0) составляет:

– t_0 + 21 минута по значениям $\Delta M_{55} = M_{55}$ = 100 т.

– t_0 + 21 и 24 минуты по значениям $\Delta V_{55} = V_{55}$ = 1 км^3;

– t_0 + 30 минут по значениям $\Delta M_{45} = M_{45}$ = 1000 т;

– t_0 + 33 минуты по значению ΔH_{45} = 2 км;

– t_0 + 33 и 36 минут по значениям ΔV_{45} = 1 км^3 и V_{45} = 10 км^3;

t_0 + 36 минут по не градовому значению Z_m = 50 dBZ.

Это означает, что наиболее ранним указателем эффекта засева являются параметры ΔM_{55} и M_{55}, характеризующие интегральное водосодержание более крупного града, которое через 21 мин после начала засева уменьшается более чем в 100 раз. С небольшой задержкой реагируют на засев параметры ΔV_{55} и V_{55}, характеризующие объемы локализации этого града, которые за 21 – 24 минут после начала засева сокращаются более чем в 10 раз.

Несколько позже (через 30 – 33 после начала засева) обнаруживают эффект засева параметры ΔV_{45}, V_{45}, ΔM_{45} и M_{45}, характеризующие объемы и водосодержание зоны локализации мелкого града.

Широко применяемые одномерные параметры ΔH_{45} и Z_m фиксируют среднее время перехода засеянных ОВ III категории в не градовое состояние через 33 и 36 минут, соответственно, после начала засева.

Среднее время градоопасного состояния группы засеянных ОВ III категории в 1,5 – 2 раза меньше, чем у такой же группы незасеянных. Это означает, что массированный ракетный засев сокращает длительность градового состояния ОВ III категории в 1,5 – 2 раза.

17.1.2.4 В группу засеянных *ОВ IV категории* попало 11, а в группу условно засеянных 14 мощных градовых облаков, наблюдавшихся на Северном Кавказе и провинции Мендоса Аргентины [1, 4].

Из рисунка 17.5 следует, что значения трехмерных характеристик переохлажденной части ОВ IV категории (ΔV_{45}, ΔV_{55} и ΔV_{65}, ΔM_{45}, ΔM_{55}, ΔM_{65}) обнаруживают эффект засева раньше, чем одномерные параметры. Это обусловлено тем, что они более адекватно характеризуют объемы и водосодержание зоны роста града, а также пространственность процесса градообразования [1].

Продолжительность градового состояния засеянных ОВ IV категории в 1,5 – 2 раза меньше, чем у незасеянных, что согласуется с результатами комплексного градового эксперимента ВГИ [6].

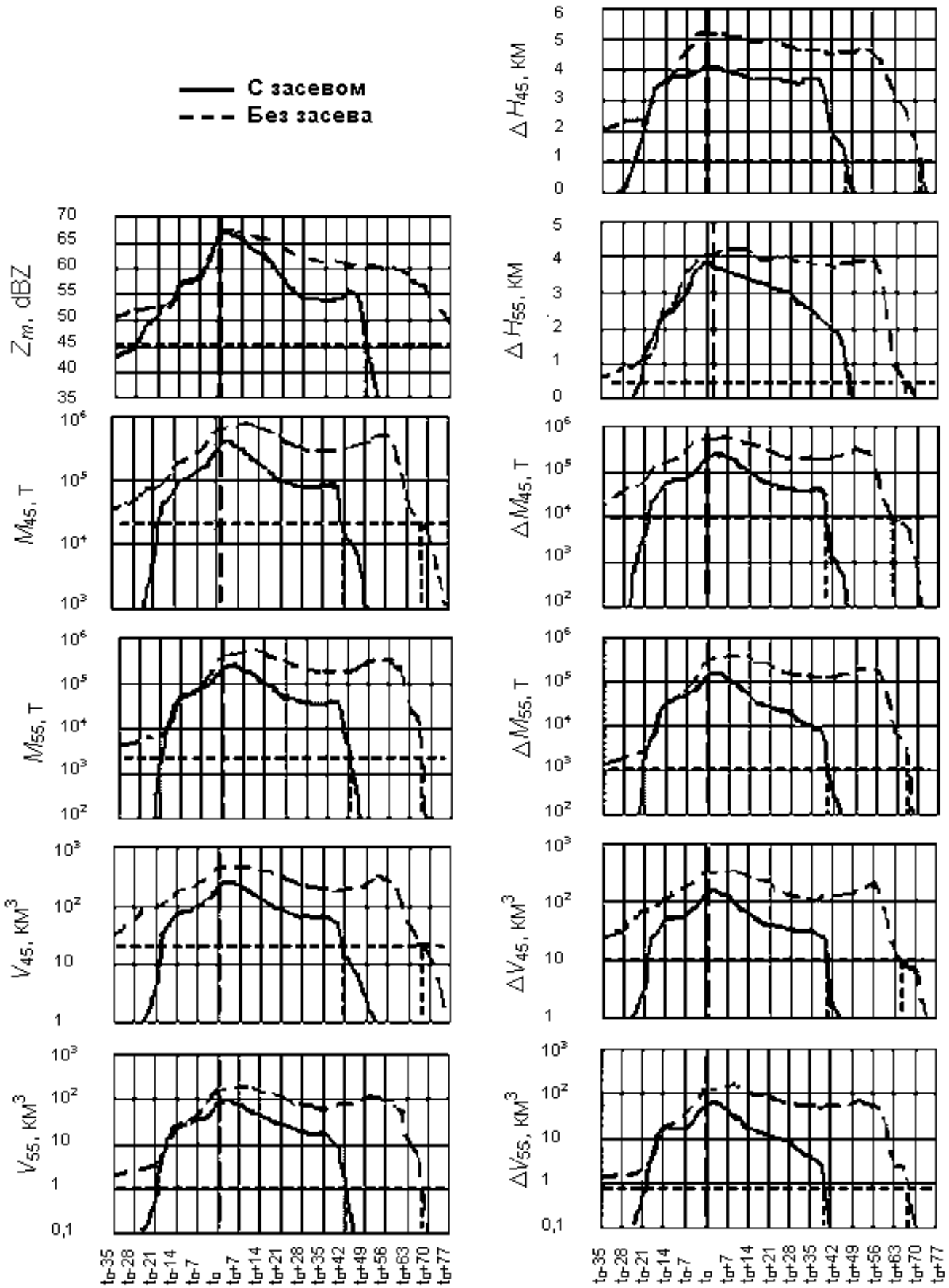


Рис. 17.5 – Эволюции одномерных (Z_m, ΔH_{45} и ΔH_{55}) и трехмерных (M_{45}, M_{55}, V_{45}, V_{55}, ΔM_{45}, ΔM_{55}, ΔV_{45} и ΔV_{55}) параметров засеянных и незасеянных ОВ IV категории: t_0 – время начала реального и условного засева [1]

17.1.2.5 Совместный анализ эволюции засеянных и незасеянных ОВ различных категорий показывает [1 – 5], что закономерности эволюции во времени параметров засеянных и незасеянных ОВ I – IV категорий значительно различаются. При этом в момент начала фактического и условного засева (t_0) различия в значениях их параметров минимальны, а после засева различия быстро нарастают. Это означает, что до начала АВ засеянные и незасеянные ОВ *i*-й категории относятся к одному и тому же статистическому семейству облаков. Засев приводит к появлению различий в эволюции засеянных и незасеянных ОВ, в результате чего они относятся уже к разным статистическим семействам.

Анализ рисунков 17.1 – 17.5 позволяет также утверждать, что массированный ракетный засев областей будущего градообразования приводит к изменениям физических характеристик засеянных ОВ:

– сокращает время жизни ОВ I категории в среднем на 35 – 50 минут, ОВ II категории – на 30÷35 минут, а ОВ III и IV категорий – на 20÷40 минут;

– засеянные ОВ I категории диссипируют при ΔV_{45} и ΔM_{45} = 0, в то время как незасеянные со временем перерастают в градовые облака;

– засеянные ОВ II категории диссипируют, не достигая опасных значений Δq_m, ΔV_{45} и ΔM_{45}, в то время как незасеянные имеют их опасные значения в течение 35 ÷ 40 минут после условного засева;

– засев ОВ III и IV категории приводит к изменению их пространственной структуры, уменьшению объема зоны роста града и интегрального водосодержания градовых облаков (Δq, ΔM_{65}, ΔM_{55} и ΔM_{45}), сокращает продолжительность градового состояния и интенсивность ливневых осадков, сокращая тем самым ущерб от катастрофических ливневых осадков, приводящих к паводкам и эрозии почвы. Наиболее ранним указателем эффекта засева являются уменьшение и исчезновение навеса радиоэха;

– чем ниже категория ОВ, тем выше эффект АВ и меньше его продолжительность. Поэтому в целях повышения эффекта АВ и сокращения расхода средств воздействия следует придерживаться стратегии засева ОВ на ранних стадиях их развития, соответствующих ОВ I и II категорий.

Эти различия в закономерностях эволюции засеянных и незасеянных ОВ, полученные в исследованиях, проведенных в трех регионах ПГЗ (Северный Кавказ, Закавказье, Аргентина) свидетельствуют о том, что массированный ракетный засев областей будущего градообразования приводит *к причинно-следственным изменениям* в эволюции засеянных облаков (предотвращает развитие ОВ I и II категории и сокращает продолжительность выпадения града из ОВ III и IV категорий).

17.2 Экспресс оценка предотвращенного ущерба

Эффективность противоградовых работ принято оценивать после окончания сезона защиты. Вместе с тем заказчиков зачастую интересует эффективность противоградовых операций в дни их проведения. В связи с этим на практике ПГЗ используется методика экспресс оценки предотвращенного ущерба для контроля качества противоградовых работ в процессе их выполнения [1].

Экспресс оценка осуществляется после уточнения фактического ущерба от градобития и предусматривает приближенную оценку предотвращенного ущерба на защищаемой территории (ЗТ) после каждой операции по АВ на градовые процессы на основе:

– данных о числе засеянных ОВ разных категорий;

– оценки ожидаемого ущерба, который могли нанести засеянные градовые и градоопасные облака, если бы не было проведено АВ;

– оценки фактического ущерба от градобитий на ЗТ в день с АВ.

17.2.1 ***Оценка предотвращенного ущерба*** от градобитий, в период ПГЗ осуществляется по формуле

$$\Delta Y = Y_{ож} - Y_{ф}, \qquad (17.1)$$

где ΔY – ущерб, предотвращенный в день с АВ; $Y_{ож}$ – ущерб на ЗТ, ожидаемый в данный день из засеянных ОВ; $Y_{ф}$ – фактический ущерб, нанесенный этими же ОВ.

17.2.2 ***Ожидаемым ущербом*** называется ущерб от градобитий, который мог быть, если бы не было проведено АВ. Оценка ожидаемого ущерба осуществляется [1] по среднемноголетним данным об ущербе от градобитий из ОВ *i*-й категории по формуле

$$Y_{ож} = \sum_{i=I}^{IV} n_i \ \overline{S}_{100\,i} \ \overline{C}, \qquad (17.2)$$

где $\boldsymbol{n_i}$ – количество ОВ *i*-й категории, засеянных в данный день; $\overline{\boldsymbol{S}}_{100\,i}$ – средняя площадь градобитий (га) из ОВ *i*-й категории в пересчете на 100% повреждения, наблюдавшаяся на контрольной территории; $\overline{\boldsymbol{C}}$ – средняя стоимость урожая с 1 га ЗТ (руб./га), которая рассчитывается по формуле

$$\overline{C} = \frac{\sum_{j=1}^{J} B_j C_j S_j}{S_к}, \qquad (17.3)$$

где B_j – средняя урожайность *j*-й культуры на ЗТ в отчётном году (т/га); C_j – стоимость тонны урожая *j*-й культуры в современных ценах (руб./т); S_j – площадь посева *j*-й культуры (га); $S_к$ – культивируемая площадь на ЗТ (га). В случае превалирования на ЗТ *j*-й культуры, можно полагать $\overline{C} \approx C_j$.

17.2.3 ***Фактическим ущербом*** называют реальный ущерб, нанесенный градобитиями на ЗТ. Оценку фактического ущерба от градобитий на ЗТ в день с АВ осуществляют после окончания АВ по данным радиолокационных наблюдений и уточнением по данным наземных наблюдений, проводимым группой контроля ВС совместно с представителями сельского хозяйства:

$$Y_{ф} = S_{100\,ф}\overline{C}, \qquad (17.4)$$

где $S_{100ф}$ – фактическая площадь повреждений от градобитий в рассматриваемый день с АВ в пересчете на 100% (га).

17.2.4. С учетом выражений (17.2) и (17.4) экспресс оценку предотвращенного ущерба ΔY можно выполнить по формуле:

$$\Delta Y = \overline{C} \cdot \left[\sum_{i=I}^{IV} n_i \, \overline{S}_{100\,i} - S_{100\,ф} \right]. \qquad (17.5)$$

Данные о количестве засеянных ОВ различных категорий n_i указываются в телеграммах о проведенном воздействии, передаваемых в день с АВ, а значения $S_{100ф}$ – в телеграммах об ущербе, передаваемых через 2 – 4 дня после проведения обследования площадей градобитий.

Значение $\overline{S}_{100_i}$ определяется по статистическим данным о площадях градобитий, связанных с незасеянными ОВ *i*-й категории на прилегающей территории по формуле

$$\overline{S}_{100i} = \sum_{i=1}^{IV} \frac{K_i \cdot S_i}{100}, \qquad (17.6)$$

где K_i и S_i – степень и площадь повреждений от града из ОВ *i*-й категории.

Степенью повреждений называется соотношение количества погибших от градобития растений или плодов к общему количеству растений или плодов, произрастающих на единице площади.

По статистическим данным о площадях градобитий из незасеянных ОВ *i*-й категории $\overline{S}_{100_i}$ для Северного Кавказа равны: $\overline{S}_{100_{IV}} \approx 1000$ га, $\overline{S}_{100\,_{III}} \approx 200$ га, $\overline{S}_{100_{II}} \approx 60$ га, $\overline{S}_{100_I} \approx 20$ га соответственно [99, 138]. Пример расчета $\overline{S}_{100_i}$ приведен в таблице В.1 Приложения В.

С учетом найденных значений $\overline{S}_{100_i}$ экспресс оценку предотвращенного ущерба после каждого дня с АВ на градовые процессы на Северном Кавказе рекомендуется проводить [138] по формуле

$$\Delta Y = \overline{C} \cdot \left[(n_I \cdot 20 + n_{II} \cdot 60 + n_{III} \cdot 200 + n_{IV} \cdot 1000) - S_{100ф} \right]. \qquad \textbf{(17.7)}$$

17.2.5 ***Оценка фактического ущерба от градобитий*** осуществляется двумя методами:

– путем объезда ЗТ и измерения площади градобития и оценки степени повреждений сельскохозяйственных культур;

– путем радиолокационных измерений с помощью АСУ.

В первом случае объезд ЗТ и оценка фактического ущерба осуществляется комиссией в составе представителей страховой компании, ВС и пострадавшего хозяйства путем обмера площади градобития и оценки степени повреждений.

Во втором случае оценка ущерба от града осуществляется после окончания АВ с помощью автоматизированной радиолокационной системы «АСУ-МРЛ» путем получения:

– карты кинетической энергии града за весь период АВ (рис. 17.8);
– карты степени повреждения превалирующей культуры;
– карты ущерба превалирующей культуры, установив в опциях программы среднюю стоимость урожая с 1 га (рис. 17.9).

17.3 Методы оценки физической эффективности ПГЗ

Под термином «физическая эффективность» здесь понимается способность применяемой технологии ПГЗ предотвратить градобития, уменьшить площадь градобитий, сократить ущерб от града в *n* раз (или на *N,* %) в отличие от термина «экономическая эффективность», под которым понимается экономическая выгода и окупаемость затрат на применение той или иной технологии ПГЗ.

Оценка физической эффективности осуществляется на основе данных об эволюции значений показателей эффективности.

Для оценки физической и экономической эффективности работ по модификации погоды обычно применяются:

– метод «исторического ряда», предусматривающий сравнение статистических рядов данных о частоте и площадях градобитий, ущербе от града или количества осадков до защиты и в годы защиты;
– метод «контрольной территории», предусматривающий сравнение значений указанных характеристик на ЗТ и КТ;
– сочетание методов исторического ряда и контрольной территории;
– метод рандомизации.

1) *Метод контрольной территории* базируется на сравнении характеристик града на ЗТ и КТ при условии, что характеристики градовых осадков, структура посевов и ущерб от града на КТ коррелирует с этими же характеристиками на ЗТ. Недостатками этого метода являются трудность выбора КТ с хорошей корреляцией характеристик градовых осадков и структуры сельхозугодий на ЗТ и возможность серьезных ошибок, связанных с большой пространственно-временной изменчивостью

градовых процессов (их частоты, интенсивности и масштаба). Кроме того, защита обычно осуществляется в горных долинах, окруженных горной местностью, где культивируемые территории отсутствуют. Из-за этих трудностей в выборе адекватной КТ в большинстве случаев применяется метод «исторического ряда».

2) *Метод исторического ряда* базируется на сравнении характеристик града и ущерба от града до защиты и в период защиты в предположении неизменности климатологии града в эти периоды. Для получения статистически надежных оценок требуются достаточно длинные ряды таких данных. Одной из проблем является также корректный учет градоопасности года защиты, который может варьировать в пределах ± 3 раза от среднего значения [1]. Точность метода исторического ряда повышается по мере увеличения длины рядов данных или площади ЗТ, так как охват большей площади приводит к уменьшению пределов пространственно-временных вариаций градовых осадков, имеющих локальный характер.

3) Метод рандомизации, рекомендуемый для статистической оценки эффективности предотвращения града и других видов работ в области модификации погоды, основан на использовании двух рядов данных для экспериментальных единиц с засевом и без засева облаков [7, 8]. Экспериментальной единицей может быть либо день, либо отдельное облако с засевом и без засева, выбираемых по закону случайных чисел (1 – засев, 0 – без засева).

Процедура выбора экспериментальной единицы или ОВ определяется на стадии разработки проекта модификации погоды и не изменяется в течение всего периода его реализации. В случаях, когда по закону случайных чисел выпадает день (или облако) с засевом, ОВ засеваются применяемыми реагентами, а в остальных случаях ОВ засеваются условно имитаторами средств воздействия, не содержащими реагентов. В результате реализации такого проекта создается два ряда данных о значениях параметров засеянных и незасеянных ОВ, статистическая обработка которых может обеспечить объективную оценку эффективности результатов засева.

Применение метода рандомизации для оценки эффективности работ по предотвращению града представляется неоправданным вследствие большого разнообразия типов градовых процессов, не сопоставимых между собой по интенсивности и масштабу градобитий. Одно суперячейковое облако может причинить ущерб, превышающий совокупный ущерб от всех остальных градовых облаков и нарушить однородность статистических рядов данных. Даже внутри класса

суперячейковых облаков имеются серьезные различия в масштабе, интенсивности и продолжительности градобития, исключающие их адекватное сравнение. Поэтому набор статистически обеспеченного ряда данных по суперячейковым облакам требует выполнения нереально продолжительных проектов.

Таким образом, реализация метода рандомизации наталкивается на серьезные проблемы, связанные с многообразием типов и мощности градовых процессов, невозможностью получения однородных и статистически обеспеченных рядов данных. Кроме того, экспериментальные проекты с рандомизацией (с чередованием дней с засевом и без засева) обычно не финансируются вследствие их дороговизны (заказчики предпочитают проекты защиты от града с систематическим засевом).

4) *Метод псевдорандомизации* [1 – 4], использованный в разделе 17.1.2, в этом плане более привлекателен. Согласно этому методу все градовые и градоопасные облака на ЗТ, соответствующие критериям засева, засеваются, а такие же ОВ на прилегающей территории (или идентичной по площади КТ), расположенной со стороны вторжения градовых процессов засеваются условно (т.е. не засеваются). Критерии выбора ОВ и решение о начале реального и условного засева принимаются идентично. На основе полученных данных формируется два статистических ряда по эволюции параметров засеянных (на ЗТ) и не засеянных (на КТ) ОВ. Эффективность этого метода повышается при дифференцировании ОВ по степени градоопасности по четырем категориям, как это было рассмотрено в разделе 17.1.2. Сравнение результатов засева ОВ всех категорий без такого дифференцирования, как это выполнено в работах [9, 10] приводит к смазыванию эффекта, так как эффективность засева зависит от степени градоопасности засеваемых облаков.

17.3.1 Показатели физической эффективности ПГЗ

17.3.1.1 Для оценки физической эффективности ПГЗ может быть использовано множество метеорологических и физических параметров градовых процессов: частота выпадения града (F), размер града (d_m, см), кинетическая энергия градовых осадков (E, Дж/м^2), суммарная (E_Σ, Дж) и глобальная кинетическая энергия градовых осадков (E_G, Дж), масса и слой выпавшего града, площадь выпадения града ($S_Г$, км^2), степень повреждений (K, %), ущерб от града (Y) и другие характеристики.

Пространственно-временная изменчивость продолжительности (от долей минут до нескольких часов) и площади градобитий (от долей га до десятков тысяч га), плохая корреляция ущерба с размером града, площадью градобития, а также увеличение ущерба за счет сопутствующего ливневого дождя и ветра осложняют выбор надежных показателей эффективности. Из множества перечисленных показателей эффективности следует выбрать такие, которые лучше реагируют на засев, могут быть достаточно надежно измерены и лучше характеризуют конечную цель ПГЗ – уменьшение потерь урожая.

17.3.1.2 Оценку параметров градобитий обычно осуществляют по данным градомерной сети, радиолокационных измерений и обследования районов выпадения града, заинтересованными учреждениями.

Сведения о частоте выпадения града (*F*) могут быть получены по данным сети метеорологических станций и постов, по которым строятся изолинии частоты выпадения града на ЗТ, КТ и ПТ. Однако эта сеть редкая, и выпадение града между пунктами наблюдений не фиксируются.

Методы оценки эффективности ПГЗ на основе данных градомерных сетей рассмотрены в работах [7, 8, 11 – 16] и др. Плотная градомерная сеть, как показано в этих работах, позволяет регистрировать выпадение града и получить данные о площади выпадения града и полях кинетической энергии града. Однако, несмотря на обилие применяемых типов датчиков (градовые подушки, градовые кубы, градосборники, сепараторы, оптические, акустические, ультразвуковые и пьезоэлектрические спектрометры), градомерные сети не обеспечивают требуемого разрешения в пространстве. Такие сети обычно создаются с плотностью не более одного датчика на 10 км^2.

Радиолокационные данные обеспечивают получение непрерывных во времени и пространстве полей градовых осадков и получение с достаточно высоким разрешением карты площади выпадения града, карт размера и кинетической энергии града на ЗТ и ПТ, а также значений глобальной кинетической энергии града E_{Σ} (Дж), интегрированной по всей площади выпадения града. Применение радиолокационного метода более предпочтительно в сочетании с данными градомерных наблюдений в отдельных реперных точках для калибровки радиолокационных данных.

Полезной является информация системы страхования от града, применяемая во многих странах, благодаря созданию длинных исторических рядов данных о количестве дней с ущербом от града, площади и степени повреждений. Однако методы страхования [17, 18, 19] в разных странах сильно отличаются друг от друга и изменяются со

временем. Кроме того, система страхования может охватывать не все хозяйства. Например, в бывшем СССР Госстрах страховал собственность колхозов, но не страховал собственность совхозов [17 – 18]. В Болгарии и Аргентине [19], при величине потерь от града меньше 5% страховая компания не возмещает ущерб. В США [16] и Аргентине [19] страховые компании возмещают 50% сокращения урожая. Потери определяются оценщиком страховой компании (который стремится снизить ущерб) и фермером (который стремится завысить ущерб). Поэтому при использовании данных органов страхования необходимо учитывать эти различия и изменения.

Более приемлемым и объективным является результат обследования площадей градобитий комиссией, состоящей из представителей органов сельского хозяйства, пострадавшего хозяйства, противоградовой службы и страхового агентства (если поля застрахованы). При этом представители пострадавшего хозяйства обычно заинтересованы в завышении ущерба, органы страхования и представители противоградовой службы – в занижении. В процессе дискуссии обычно достигается более объективная оценка. Такая система практиковалась в бывшем СССР и Аргентине. По данным таких совместных комиссий ниже проведена оценка эффективности ПГЗ в РФ, странах СНГ и Аргентине.

Преимуществом оценки ущерба на основе детального обследования пострадавших посевов является то, что каждое растение на ЗТ является своего рода градовой подушкой и при тщательном обследовании ЗТ обнаруживается любое мелкомасштабное градобитие и оценивается реальный ущерб.

К факторам, сильно влияющим на размер ущерба от града, относят:

– разную чувствительность сельхозкультур к повреждениям от града;

– зависимость ущерба от стадии вегетации;

– направления и силы ветра. Ущерб возрастает на 30%, если направление ветра перпендикулярно направлению рядов виноградника, фруктовых деревьев и т.д.;

– интенсивный град, даже небольших размеров может причинять более серьезный ущерб, чем крупный, но редкий град и т.д.

17.3.1.3 Для оценки физической эффективности ПГЗ используются апробированные на практике параметры:

– площадь выпадения града $S_{Г}$, га;

– площадь повреждённых от градобитий сельхозкультур $S_{П}$, га;

– степень повреждения сельхозкультур от градобитий K,%;

– площадь градобитий в пересчёте на 100% повреждения S_{100}, га;

– процент потерь сельхозпродукции от градобитий N,%;

– карты кинетической энергии градовых осадков E, Дж/м^2 и глобальной кинетической энергии градовых осадков E_{Σ}, Дж.

Площадь выпадения града $S_Г$ может измеряться с помощью МРЛ или плотной градомерной сети, но она охватывает как площади повреждений, так и площади без повреждения зеленых насаждений, и поэтому с точки зрения оценки эффективности ПГЗ этот параметр не очень информативен.

Значения $S_П$ и K оцениваются органами сельского хозяйства и страхования совместно с представителем противоградовой службы. Хотя эти оценки в определенной мере субъективны, без них не обходится ни один серьезный проект ПГЗ.

Параметр S_{100} – интегральный параметр, учитывающий площадь повреждений $S_П$ и степень повреждения сельхозкультур от градобитий K.

Наиболее информативным показателем физической эффективности ПГЗ является еще более интегральный параметр – процент потерь сельхозпродукции от градобитий N (%), который учитывает площадь градобитий, степень повреждений. Преимуществом этого параметра является то, что он нормирован к площади культивируемой территории, обеспечивает возможность сравнения градоопасности различных регионов и удобен для получения однородных рядов данных для статистических оценок независимо от изменений по годам площади ПГЗ. Значение N в предположении однородности урожая на площадях, охваченных и неохваченных градобитием, рассчитывается [1, 2] по формуле:

$$N = \frac{S_{100} \cdot \overline{C}}{S_к \cdot \overline{C}} \cdot 100 = \frac{S_{100}}{S_к} \cdot 100, \qquad (17.8)$$

где $S_к$ – площадь культивируемой территории на ЗТ (га);

$\overline{C}$ – средняя стоимость урожая с 1 га ЗТ (руб./га).

17.3.2 Порядок оценки физической эффективности ПГЗ

17.3.2.1 Оценку физической эффективности ПГЗ рекомендуется осуществлять путем сравнения значений вышеуказанных характеристик градовых осадков на ЗТ в год защиты X_S со среднемноголетними их значениями до защиты $\overline{X}_C$, либо с их значениями на КТ, где индекс c (control) относится к контрольному ряду данных, характеризующим период без защиты, а индекс s (seeding) – в период защиты [1].

Для этого необходимо, в первую очередь, сформировать статистические ряды данных о значениях X_S и X_C по результатам

экспериментальных наблюдений. Большая пространственно-временная изменчивость градовых осадков существенно осложняет оценку эффективности ПГЗ. Чем длиннее ряды данных, тем статистически более обеспечены результаты оценки. Достоверность оценки повышается и с увеличением площади защиты, так как это приводит к уменьшению пространственно-временных вариаций потерь от града и их дисперсии.

Поэтому прежде чем оценивать эффективность ПГЗ, необходимо изучить естественную изменчивость градовых осадков в интересующем регионе. Методика анализа естественной изменчивости градовых осадков базируется на общеизвестных статистических подходах [21,] и предусматривает анализ исходного экспериментального материала с целью определения статистических закономерностей:

– цикличности выпадения града, площадей повреждения, временного хода интенсивности ГП при естественном ходе процессов и в годы АВ, основных циклов путем гармонического Фурье анализа;

– среднемноголетних значений $\overline{X} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} X_i$;

– отклонений от среднего $\Delta\overline{X} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(X_i - \overline{X}\right)$;

– среднеквадратичных отклонений $\sigma = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)}\sum_{i=1}^{n}\left(X_i - \overline{X}\right)^2}$;

– коэффициента вариации $\chi = \frac{\sigma}{\overline{X}} \cdot 100\ \%$ и др.

Природная изменчивость параметров градовых осадков зависит от площади наблюдений и значения рассматриваемого параметра:

– если среднегодовая частота выпадения града $\overline{\boldsymbol{F}} < 1$, то отклонения от среднего обычно велики ($\Delta F > 1$), а если $\overline{\boldsymbol{F}} > 1$, то, $\Delta F < 1$;

– изменчивость данных тем меньше, чем больше площадь ЗТ.

Длина рядов данных, как правило, ограничена по длительности и подобный анализ приблизителен, особенно если площадь наблюдений мала. Однако для масштаба ЗТ ВС Росгидромета ($S_{ЗТ} > 800\ 000$ га) и при длительности наблюдений более 20 лет эта проблема практически исключается. Пример таких рядов данных для расчета физической эффективности ПГЗ за сезон или длительный период представлен в Приложении Г.

17.3.2.2 Оценка физической эффективности ПГЗ осуществляется [1] путем сравнения значений характеристик градовых осадков на ЗТ в год защиты $\boldsymbol{X_S}$ с их среднемноголетними значениями до защиты $\overline{\boldsymbol{X}}_{\boldsymbol{c}}$ (метод

исторического ряда), либо с их значениями $\boldsymbol{X_C}$ на КТ (метод контрольной территории) по формулам:

$$E_f = \left(1 - \frac{X_S}{G_S \overline{X}_C}\right) \cdot 100 , \qquad (17.9)$$

$$E_f = \left(1 - \kappa_i \frac{X_S}{X_C}\right) \cdot 100 , \qquad (17.10)$$

где E_f – физическая эффективность ПГЗ, показывающая на сколько процентов сокращено значение используемого показателя эффективности (%); G_S – коэффициент градоопасности года защиты на ЗТ; $\boldsymbol{\kappa_i} = \frac{\overline{\boldsymbol{X}}_S}{\overline{\boldsymbol{X}}_C}$ – соотношение средних значений i-го показателя эффективности на ЗТ и КТ.

17.3.2.3 Из-за отсутствия в большинстве случаев подходящей КТ для оценки физической эффективности ПГЗ E_f (%) обычно используется метод исторического ряда, который обеспечивает достаточно надежный результат при сравнении достаточно длинных рядов данных о потерях от града в годы защиты и до защиты.

Оценку средней физической эффективности за длительный период защиты $\overline{\boldsymbol{E}}_f$ осуществляют путем сравнения среднемноголетних значений доли сельхозпродукции (%), теряемой в годы защиты N_S и до защиты $\overline{\boldsymbol{N}}_C$:

$$\overline{E}_f = \left(1 - \frac{\overline{N}_S}{\overline{N}_C}\right) \cdot 100 , \qquad (17.11)$$

Значения N_S и $\overline{N}_C$ рассчитываются по формулам

$$N_S = \frac{S_{100}}{S_K} \cdot 100 , \qquad (17.12)$$

$$\overline{N}_C = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^{m} \frac{S_{100\,i}}{S_{K\,i}} \cdot 100 , \qquad (17.13)$$

где S_K – культивируемая площадь на ЗТ; m – количество лет наблюдений.

Площадь градобития в пересчёте на 100% повреждения S_{100}, га, можно рассчитать по формуле

$$S_{100} = \sum_{i=1}^{I} \frac{K_i S_{П\,i}}{100} , \qquad (17.14)$$

где I – количество сельхозкультур, занимающих не менее 1% площади ЗТ; K_i и $S_{П_i}$ – степень (%) и площадь (га) повреждений i-й культуры.

Среднемноголетнее значение $\overline{S}_{100}$ до защиты можно вычислить с использованием исторического ряда, сформированного по данным органов Госстраха и сельского хозяйства:

$$\overline{S}_{100_C} = \frac{1}{100\,m} \sum_{i=1}^{l} \sum_{j=1}^{m} K_{ij} \cdot S_{П_{ij}} \,. \qquad (17.15)$$

17.3.2.4 На оценку эффективности ПГЗ серьезное влияние может оказать значительная пространственно-временная изменчивость частоты и интенсивности градовых осадков, занижая оценку E_f в годы повышенной градоопасности, и, завышая в годы пониженной градоопасности. В целях исключения такого влияния оценку физической эффективности ПГЗ рекомендуется осуществлять [1, 2] с учетом *коэффициента градоопасности* конкретного года или периода защиты G_S, учитывающим тренд градоопасности в сравнении с предыдущим периодом.

17.3.2.5 Оценку $\boldsymbol{E_f}$ с учетом коэффициента градоопасности конкретного года или периода защиты G_S следует осуществлять [1] по формуле

$$E_f = \left(1 - \frac{N_S}{G_S \overline{N}_C}\right) \cdot 100 \,, \qquad (17.16)$$

где $\overline{N}_S$ и $\overline{N}_C$ – процент потерь сельхозпродукции на ЗТ в годы защиты и среднее многолетнее значение до защиты, соответственно (%).

Учет градоопасности позволяет сделать процедуру сравнения со среднемноголетними данными более приемлемой. В случае применения «метода контрольной территории» также необходимо учитывать коэффициент градоопасности КТ и ЗТ.

17.3.3 Методика оценки коэффициента градоопасности

17.3.3.1 Значение коэффициента градоопасности *i*-го года до защиты (G_{Ci}) может быть рассчитано в предположении (лучше оправдываемом при длинных рядах наблюдений), что $\overline{N}_C$ соответствует $\overline{G}_C$ = 1:

$$G_{Ci} = N_{C_i} / \overline{N}_C \,, \qquad (17.17)$$

где N_{C_i} и $\overline{N}_C$ – потери сельхозпродукции от градобитий в *i*-й год до защиты и в среднем за весь период наблюдения, соответственно.

17.3.3.2 *В годы защиты* засев облаков трансформирует величину потерь от града, поэтому оценка градоопасности *i*-го года защиты должна осуществляться по прогностическим или диагностическим параметрам, которые не трансформируются в результате засева облаков. Такими параметрами могут быть количество синоптических ситуаций, благоприятствующих развитию градовых облаков, количество градовых прогнозов, количество дней с градом, потери от града на КТ, расход ракет, количество засеянных ОВ и т.п. Сравнение этих данных в *i*-й год защиты

со среднемноголетними данными позволяет оценить градоопасность представляющего интерес года. Однако прогностическая информация не может однозначно характеризовать градоопасность из-за недостаточной оправдываемости прогнозов града, мезорайона развития, типа и интенсивности градовых облаков.

Более приемлемо использование диагностической информации о реальном количестве и градоопасности засеянных облаков, тем более, что 50 – 70% из них обычно вторгаются на ЗТ с ПТ [20]. Поэтому оценку коэффициент градоопасности года защиты G_{Si} рекомендуется рассчитывать по количеству засеянных ОВ разных категорий по формуле

$$G_{Si} = \sum_{i=1}^{4} A_i n_i \,/\, \sum_{i=1}^{4} A_i \overline{n}_i \,, \qquad (17.18)$$

где A_i – весовые коэффициенты для ОВ i-й категории;

n_i – число ОВ i-й категории, засеянных в год защиты;

$\overline{n}_i$ – среднемноголетнее число засеянных ОВ i-й категории.

Значения A_i определяются с учетом степени градоопасности ОВ различных категорий. Если для ОВ III категории условно принять A_{III} = 1,0, то значение A_{IV} рассчитывается по отношению средних значений S_{100} для ОВ IV и III категорий, найденных по экспериментальным данным

$$A_{IV} = n_{IV} \sum_{i=1}^{n_{IV}} S_{100\,IV} \,/\, n_{III} \,/\, \sum_{i=1}^{n_{III}} S_{100\,III} \,, \qquad (17.19)$$

где n_{III} и n_{IV} – количество ОВ III и IV категорий в выборке.

Учитывая, что вероятность перерастания ОВ I и II категорий в ОВ III категории по данным наблюдений составляет в среднем 0,1 и 0,3, соответственно, значения A_I и A_{II} принимают равными: A_I = 0,1 и A_{II} = 0,3.

Для условий Северного Кавказа найдено [1], что A_I = 0,1; A_{II} = 0,3; A_{III} = 1; A_{IV} = 5. Это означает, что площади градобитий из при ОВ IV категории в 5 раз больше, чем из ОВ III категории.

Значения коэффициента A_{IV} имеют небольшие региональные отличия. Уточнение его значений в провинции Мендоса Аргентины показало [5, 20], что для этого региона характерно A_4 = 5,59. Пример расчета коэффициента градоопасности года защиты G_S приведен в таблице 17.1.

Подставив данные таблицы 17.1 в выражение (17.18), получим коэффициент градоопасности G_S сезона 1996/1997:

$$G_S = \frac{0{,}1 \cdot 10 + 0{,}3 \cdot 16 + 1{,}0 \cdot 58 + 5{,}0 \cdot 54}{0{,}1 \cdot 38{,}5 + 0{,}3 \cdot 97{,}6 + 1{,}0 \cdot 66{,}1 + 5{,}0 \cdot 18} = 1{,}76 \,.$$

Это означает, что ожидаемые потери от града в сезоне 1996/97 в 1,76 раза больше средних потерь в предыдущие восемь сезонов.

Таблица 17.1 – Число засеянных ОВ различных категорий в оазисе Север провинции Мендоса в сезоне 1997/98 и 8 предыдущих сезонах

Сезоны защиты	Число засеянных ОВ (n_i) по категориям				
	n_I	n_{II}	n_{III}	n_{IV}	Всего
1986/87	3	35	45	12	95
1987/88	10	66	70	5	151
1988/89	3	132	42	3	180
1989/90	15	198	57	8	278
1990/91	28	135	70	8	241
1991/92	169	157	82	25	433
1993/94	42	39	99	34	214
1994/95	38	19	64	49	170
Среднее	38,5	97,6	66,1	18,0	220,2
1996/97	10	16	58	54	128

17.3.3.3 *Градоопасность региона* характеризуется среднегодовыми потерями сельхозпродукции. Если достаточно хорошо изучена градоопасность одного региона, то расчет градоопасности другого региона осуществляется по формуле

$$G_i = G_0 \frac{\overline{N}_i}{\overline{N}_0}, \qquad (17.20)$$

где G_0 – коэффициент градоопасности изученного региона, который можно положить равным единице; $\overline{N}_i$ и $\overline{N}_0$ – среднегодовые потери сельхозпродукции в новом и изученном регионах.

Так, например, на ЗТ Краснодарской ВС, где производственная защита осуществляется 51 год, $\overline{N}_0$ = 6,27%, а на ЗТ Ставропольской ВС, где защита началась в 1995 г., $\overline{N}_i$ = 4,2%. Следовательно, G_i = 0,67. Это означает, что градоопасность ЗТ Ставропольской ВС примерно в 1,5 раза ниже градоопасности ЗТ Краснодарской ВС.

17.3.3.4 Учет коэффициента градоопасности года и региона повышает точность оценок, устраняет недооценку эффективности ПГЗ в годы повышенной градоопасности и переоценку в годы пониженной.

На рисунке 17.6 представлен временной ход эффективности ПГЗ E_f на Северном Кавказе без учета *G,* с учетом *G*. Из него следует, что оценка эффективности ПГЗ без учета *G* приводит:

– к явному занижению эффективности противоградовых работ на Северном Кавказе E_f в годы повышенной градоопасности (например, в 1982 – 1983 годах, отличавшихся аномально высокой градоопасностью, занижение достигает 18%);

– к завышению значений E_f в годы пониженной градоопасности (например, в 1994 – 1996 гг. это завышение достигает 10%).

Кроме того, из рисунка 17.6 следует, что при высокой эффективности ПГЗ (когда площади повреждений на ЗТ малы) значение E_f мало зависит от метода оценки – с учетом коэффициента градоопасности или без учета.

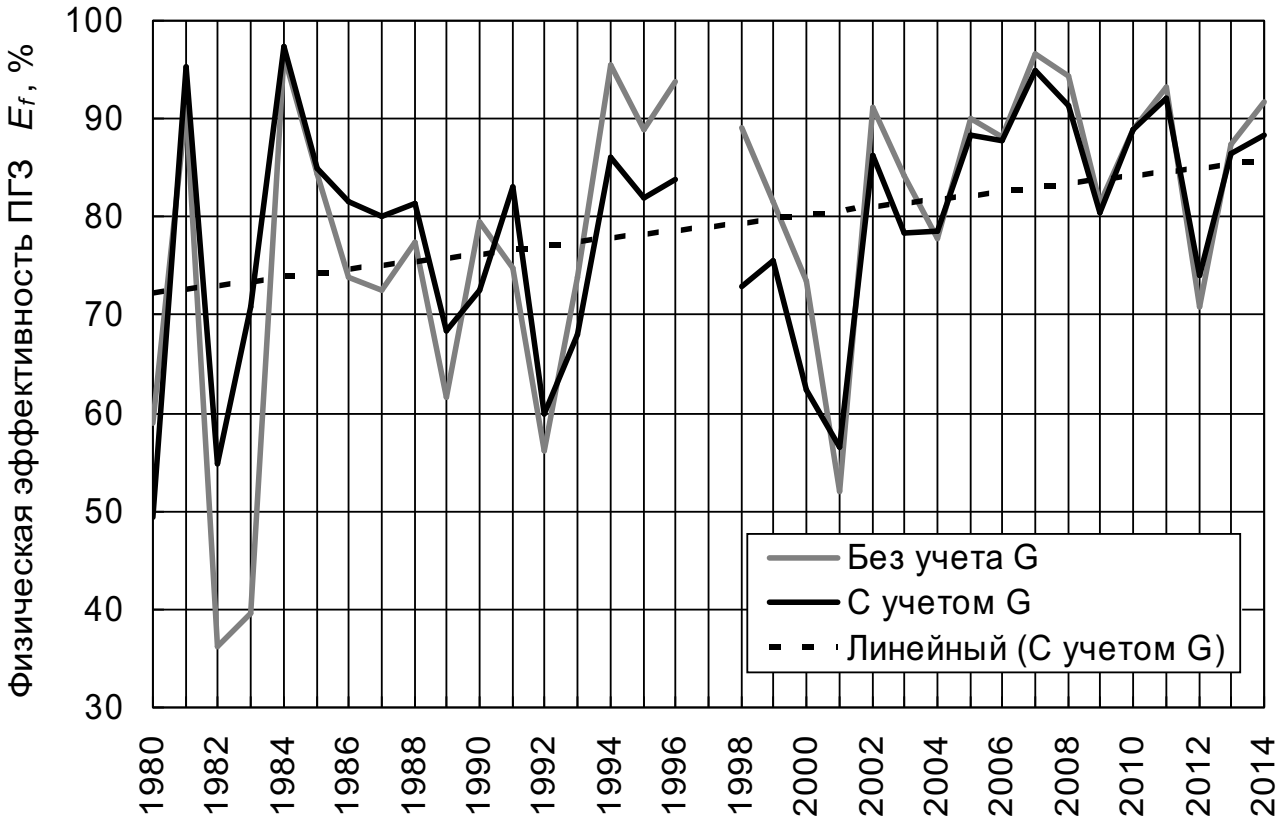


Рис. 17.6 – Временной ход физической эффективности ПГЗ на Северном Кавказе с учетом и без учета коэффициента градоопасности G_S (в 1997 г. защита не проводилась)

17.3.4 Инструментальные методы оценки физической эффективности ПГЗ

17.3.4.1 Для научного доказательства эффективности технологий предотвращения града целесообразно использовать объективные инструментальные данные об эволюции физических параметров градовых облаков в результате засева. Если засев эффективен, то это должно проявляться в причинно-следственных изменениях физических характеристик засеянных градовых облаков: площадях выпадения града, размере и кинетической энергии града.

Ранее было показано, что закономерности эволюции одномерных, двумерных и трехмерных радиолокационных параметров засеянных и незасеянных градовых и градоопасных облаков существенно отличаются. Массированный ракетный засев областей нового роста в градовых

облаках в 2 ÷ 2,5 раза сокращает время их градового состояния. Еще больше сокращается время градоопасного состояния развивающихся потенциально-градоопасных облаков. Это свидетельствует о том, что градовые и градоопасные облака реагируют на засев.

17.3.4.2 Объективным и наглядным показателем физической эффективности ПГЗ может быть сокращение площадей градобитий и кинетической энергии града по данным инструментальных измерений.

Карта кинетической энергии града за день с градом может быть получена по данным наземной сети градомерной сети (сети градовых подушек). Общепризнано, что сравнение глобальной кинетической энергии града, полученной с помощью наземной градомерной сети до защиты и в годы защиты, или ее значений на ЗТ и КТ может обеспечить объективную оценку эффективности ПГЗ. Однако создание градомерной сети с плотностью хотя бы один прибор на 10 км^2 требует значительных трудозатрат, и поэтому в большинстве проектов ПГЗ они не применяются.

17.3.4.3 Альтернативой градомерной сети может быть радиолокационный метод измерения площади выпадения и кинетической энергии града, степени повреждения и ущерба от града. Этот метод обеспечивает получение полей этих характеристик на больших площадях с высоким разрешением (0,5 х 0,5 км) за каждый день с градом и сезон.

17.3.4.3 Измерения кинетической энергии града в каждой точке площади обзора и получение карты E (Дж/м^2) реализовано в «АСУ-МРЛ» в по формулам (12.26) и (12.27).

Суммируя кинетическую энергию градовых осадков за все дни с градом, можно получить карту *глобальной кинетической энергии* E_{Σ} за весь сезон. Сравнение таких карт по защищаемой территории (ЗТ) и прилегающей территории (ПТ) может использоваться для объективной инструментальной оценки физической эффективности ПГЗ.

17.3.4.4 *Степень повреждения* сельхозкультур от града K (%) зависит от размера, интенсивности, продолжительности града и скорости ветра. Кинетическая энергии является интегральной характеристикой, которая учитывает все эти факторы и лучше коррелирует с повреждаемости различных культур. На основе анализ данных экспериментальных исследований повреждаемости винограда ($K_{Вин}$,%) в зависимости от кинетической энергии града E, представленных в работе [22], нами получено следующее уравнение регрессии:

$$K_{Вин} = 100 lgE - 145, \qquad (17.21)$$

В зависимости от вида сельскохозяйственных культур и стадии их вегетации коэффициенты корреляции могут значительно отличаться

(табл. 12.4). Путем аппроксимации данных экспериментальных полевых исследований повреждаемости пшеницы и кукурузы, проведенных в ВГИ [23] в [1] выведены выражения:

$$K_{Пш} = 56lgE - 58, \quad (17.22)$$

$$K_{К} = 66lgE - 90. \quad (17.23)$$

Анализ данных [22 – 23] показал, что степень повреждения не имеет большого разброса в зависимости от стадии вегетации сельхозкультур. Например, степень повреждения винограда $K_{Вин}$ по статистическим данным [22] увеличивается с увеличением кинетической энергии с разбросом в пределах 15 – 20% в зависимости от стадии вегетации, начиная от стадии цветения до стадии зрелости.

На рисунке 17.7 представлена зависимость степени повреждения винограда, пшеницы и кукурузы от кинетической энергии града.

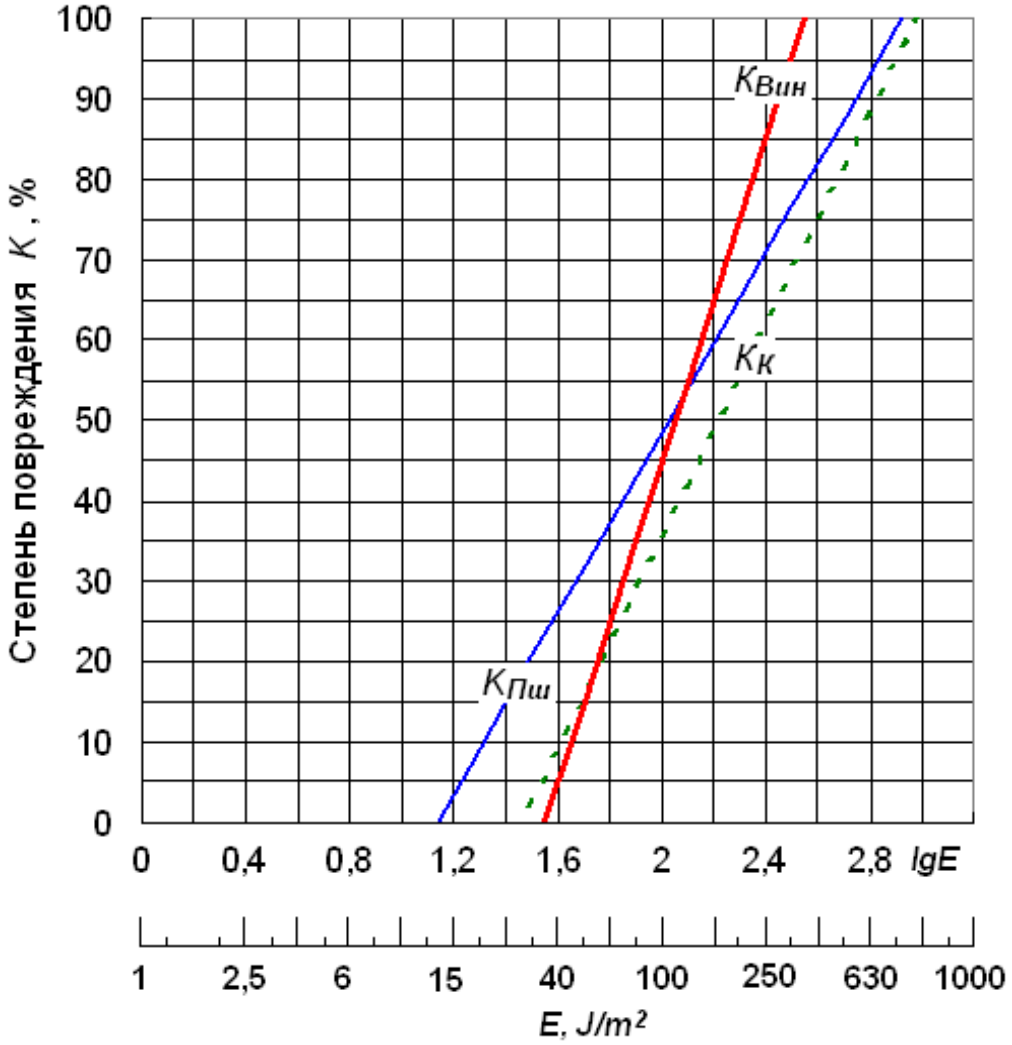


Рис. 17.7 – Зависимость степени повреждений винограда, пшеницы и кукурузы от кинетической энергии града по данным [22, 23]

Подставив в (17.21) – (17.23) значение E из выражении (5.6) получено выражение для расчета K% по радиолокационным данным, которое программно реализовано в «АСУ-МРЛ»:

$$K_{jn} = A_j \sum_{1}^{m} \left(0{,}086\, Z_{10n} - 5{,}25\right) \Delta t_i - B_j, \qquad (17.24)$$

где K_{jn} – степень повреждения j-й культуры в n-й ячейке площади обзора; A_j и B_j – приведенные выше коэффициенты регрессии.

На рисунке 17.8 приведены примеры карты степени повреждения пшеницы K в сравнении с картой кинетической энергии градовых осадков E. На рисунке видна хорошая корреляция места, площади и степени повреждений с картой кинетической энергии града. Максимальные повреждения, как, и следовало ожидать, отмечаются в области максимума кинетической энергии градовых осадков.

17.3.4.5 В «АСУ-МРЛ» предусмотрено также получение *карты ущерба* от градобитий Y (руб./га) с учетом значений K и стоимости урожая j-й культуры C_j (руб./га).

Суммирование значений Y_n с учетом экспликации земель и площадей каждой культуры S, (га) по всей площади измерений (в круге радиусом R) позволяет оценить *суммарный ущерб* Y_Σ за весь период выпадения града. Значение Y_Σ может использоваться в качестве интегральной характеристики, обеспечивающей объективное сравнение ущерба при разных градобитиях. Пример карт кинетической энергии града, степени повреждений и ущерба от града представлен на рисунке 17.9, на котором видна хорошая корреляция этих параметров между собой. Обследование места градобития показало их согласие с фактическим данными о степени повреждения и ущербе от града.

Зависимость значений K, Y, Y_Σ от вида и стадии вегетации сельхозкультур и приземного ветра в неявной форме учитываются используемыми корреляционными связями, но это требуют дальнейшего исследования.

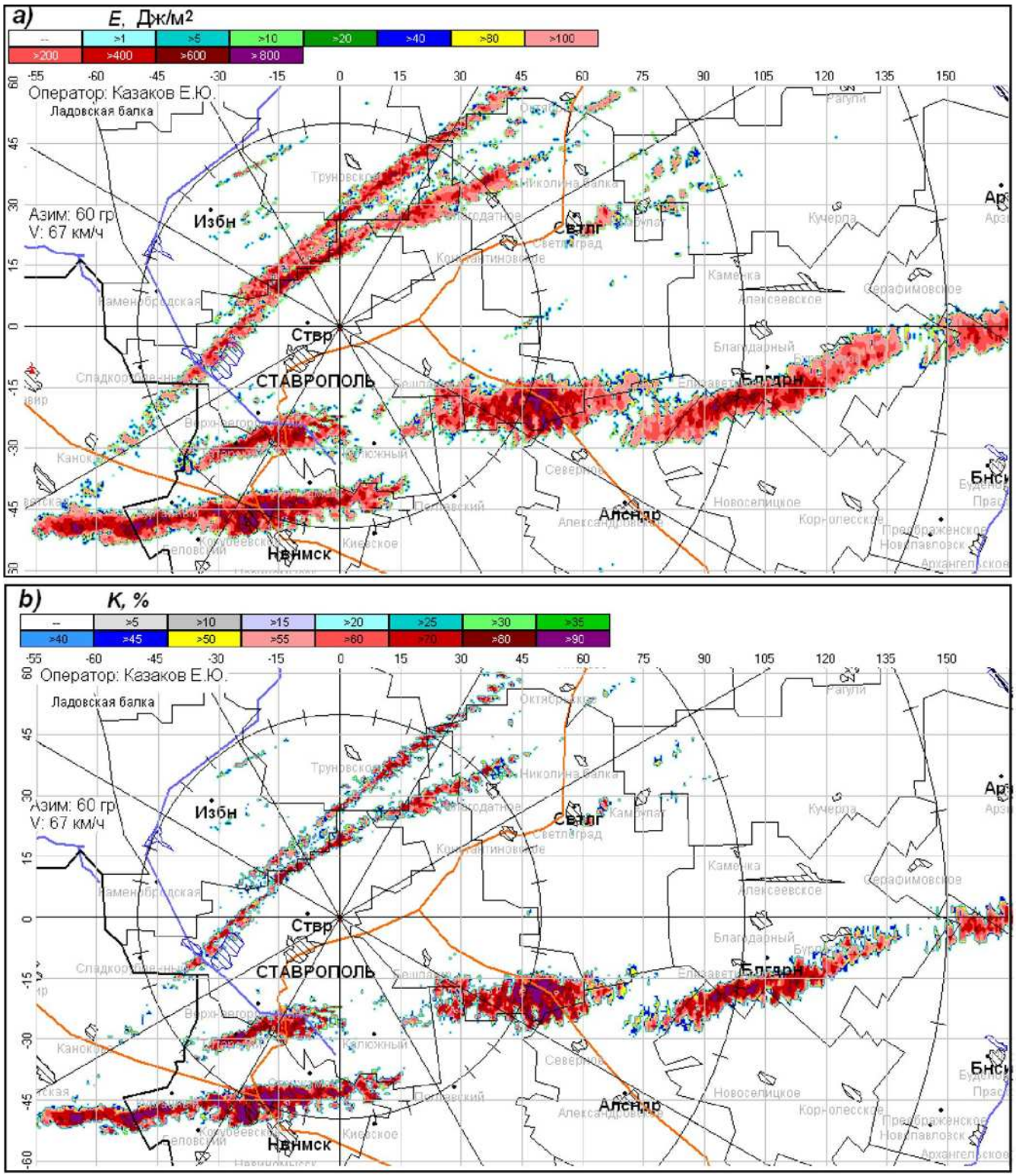


Рис. 17.8 – Пример радиолокационных карт: ***а)*** кинетической энергии града; ***б)*** степени повреждений пшеницы

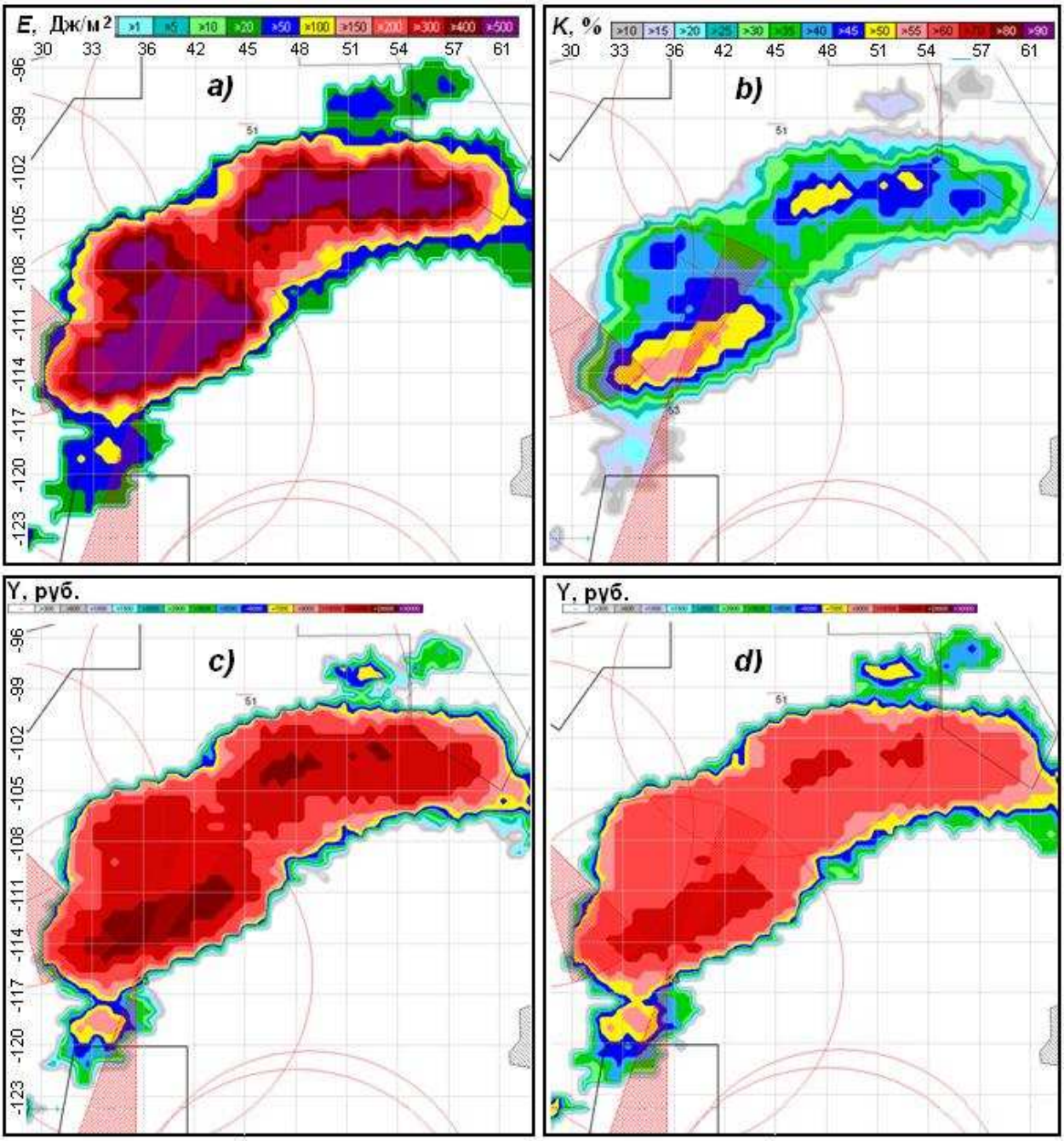


Рис. 17.9 – Укрупненные фрагменты: ***a)*** карты кинетической энергии града; ***b)*** карты степени повреждений кукурузы; ***c)*** и ***d)*** карты ущерба в руб. на 1 га кукурузы и пшеницы, соответственно, при градобитии, наблюдавшемся в Предгорном районе Ставропольского края 15.05.2010 г.

17.3.4.6 На рисунке 17.10 приведен пример карты глобальной кинетической энергии града, из которого следует, что кинетическая энергия града и площади выпадения града, проинтегрированные за весь сезон ПГЗ, на ЗТ заметно меньше, чем на ПТ. Эта карта получена на основе инструментальных измерений без внесения субъективных факторов и может являться основой для объективной инструментальной оценки физической эффективности ПГЗ с помощью выражения:

$$E_f = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^{\infty} \dot{E}_{Si} S_{Si}}{\sum_{i=1}^{\infty} \dot{E}_{Ci} S_{Ci}}\right) \cdot 100 \qquad (17.25)$$

где E_f – физическая эффективность ПГЗ (%), показывающая на сколько процентов сокращено значение кинетической энергии града на ЗТ по сравнению с ее значением на КТ; S_{Si} и S_{Ci} – площади ЗТ и КТ, охваченные выпадением града, га; E_{Si} и E_{Ci} – кинетическая энергия града, Дж/м^2, приходящаяся на i-ю ячейку площадей ЗТ и КТ.

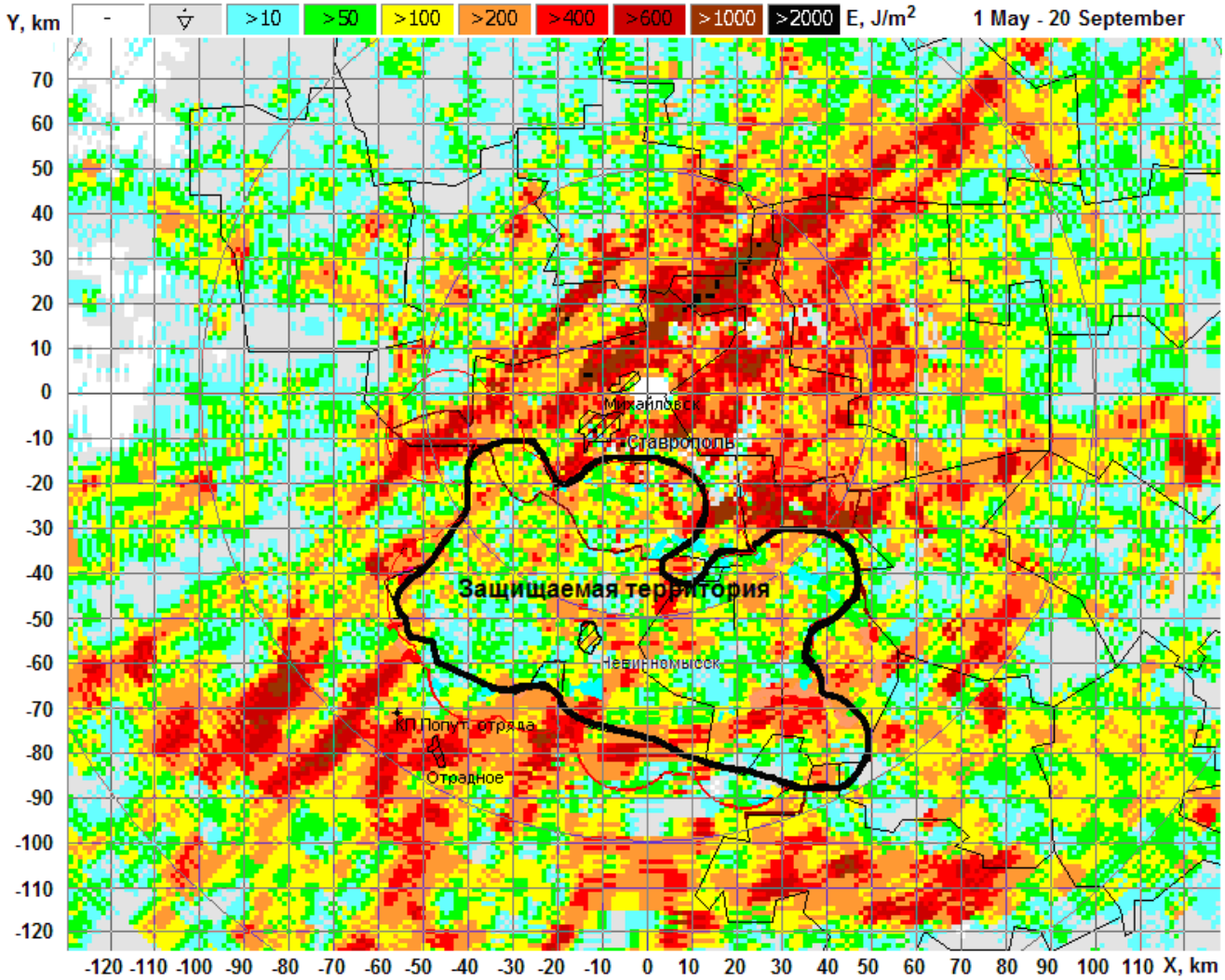


Рис. 17.10 – Карта суммарной кинетической энергии града в Ставропольском крае, просуммированной за период с 1 мая по 20 сентября 2004 г.

Из выражения (17.25) следует, что оценку физической эффективности ПГЗ E_f можно осуществлять путем сравнения значения глобальной кинетической энергии града, суммированной по всей площади ЗТ с его значением на ПТ. При наличии статистических данных за годы до защиты можно использовать метод сравнения данных до защиты и год защиты (метод исторического ряда).

Такую *инструментальную экспресс оценку* физической эффективности ПГЗ E_f можно провести за сезон ПГЗ или отдельный день с АВ, сравнивая значения глобальной кинетической энергии на ЗТ и ПТ.

Это дает оценку того, насколько процентов сокращена глобальная кинетическая энергия града в результате АВ (в предположении одинаковой градоопасности ЗТ и КТ или введения поправки на их различия). Многолетние данные позволят исключить пространственно-временную изменчивость градоопасности территорий.

Однако при оценке площади повреждений и реальных потерь от града необходимо учесть, что при E < 20 Дж/м^2 практически не отмечается ущерба от града, а при E > 660 Дж/м^2 согласно рисунку 17.7 урожай уничтожается полностью. Поэтому уменьшение значений E, например с 900 до 600 Дж/м^2 не дает никакого эффекта с точки зрения потерь урожая в сезоне, но уменьшается ущерб, наносимый многолетним насаждениям, которые при E > 800 Дж/м^2 приходится выкорчевывать. Поэтому для оценки физической эффективности ПГЗ с точки зрения потребителя целесообразно наряду с картой ущерба использовать карту кинетической энергии града.

17.4 Методы оценки экономической эффективности ПГЗ

Оценка экономической эффективности ПГЗ, так же как и физической, обычно осуществляется методами исторического ряда и контрольной территории. Эти методы предусматривают оценку эффективности ПГЗ за сезон или несколько сезонов путем сравнения значений площадей градобитий, степени повреждений и других характеристик градовых осадков на защищаемой территории (ЗТ) в год защиты со среднемноголетними их значениями до защиты либо с их значениями на контрольной территории (КТ) соответственно.

17.4.1 Обзор методов оценки экономической эффективности

17.4.1.1 Проблеме оценки экономической эффективности противоградовых работ E_e посвящено множество работ, в которых предложены различные методы оценки.

Бухникашвили, Карцивадзе и др. [24] условный экономический эффект (количество $E_У$ и стоимость E_e сельхозпродукции, сохраненной от градобития, рассчитывали по формулам

$$E_У = \left(\frac{\overline{S}_O}{\overline{S}_K} \frac{\overline{a}}{\overline{b}} \cdot S'_K b - S'_O a \right) Ур \ , \qquad (17.26)$$

$$E_e = \left(\frac{\overline{S}_O}{\overline{S}_K} \frac{\overline{a}}{\overline{b}} \cdot S'_K b - S'_O a \right) C \,, \qquad (17.27)$$

где $\overline{S}_O$ и $\overline{S}_K$ – среднемноголетняя площадь поврежденных градом сельхозкультур на ЗТ и КТ, соответственно до защиты; S'_O и S'_K – то же в год защиты; $\overline{a}$ и $\overline{b}$ – средневзвешенный процент повреждения на ЗТ и КТ до организации ПГЗ; *a* и *b* – то же в год защиты; *Ур* – средняя урожайность сельхозкультур, т/га; *С* – стоимость сельхозпродукции, руб./га.

Сулаквелидзе [25, 26] предложил для расчета E_e формулу

$$E_e = \left(\frac{S_{Oi}}{S_{Ki}} \cdot S'_K b - S'_O a \right) C \,, \qquad (17.28)$$

где $\frac{S_{Oi}}{S_{Ki}}$ – минимальное значение отношения площадей градобитий на ЗТ и КТ за 10-летний период до защиты.

Бокова и др. [27] предложила метод оценки E_e с использованием года-аналога:

$$E_e = \frac{S_{AH} \sum_{i=1}^{n} S_{3i} C_{3i}}{\sum_{i=1}^{n} S_{3i}} - У_{Ф} - З \,, \qquad (17.29)$$

где S_{3i} и C_{3i} – площадь *i*-й культуры, поврежденной градом и средняя стоимость урожая *i*-й культуры в год защиты; S_{AH} – площадь *i*-й культуры, поврежденной градом, до защиты в год-аналог; $У_{Ф}$ – фактический ущерб на ЗТ; *З* – затраты на проведение защиты.

Применение этого метода наталкивается на проблему подбора адекватного года-аналога.

Ломинадзе, Бартишвили и др. [28] для оценки E_e предложили выражение

$$E_e = C(S_K - S_З) - З \,, \qquad (17.30)$$

где S_S, и S_K – площади градобитий в пересчете на 100% повреждения на ЗТ и КТ.

В ВС Госкомгидромета СССР использовался метод оценки E_e, базирующийся на методике оценки эффективности капитальных затрат, рекомендованный Государственным комитетом СССР по науке и технике в 1961 г. В соответствии с этим методом

$$E_e = [\Delta У - (Ц + 0{,}15К)] \cdot S \,, \qquad (17.31)$$

где $\Delta У$ – разница в потерях сельхозпродукции до защиты и в год защиты в среднем на 1 га ЗТ; *Ц* – себестоимость защиты 1 га; *К* – объём капиталовложений на 1 га; *S* – площадь ЗТ.

Наурзоковым и др. [29] было предложено оценивать E_e по формуле

$$E_e = \sum_{i=1}^{n} \left(S_{Oi} Г_i К_{Пi} P_i - S'_{Oi}\right) У_{Oi} Ц_{Oi} , \qquad (17.32)$$

где S_{Oi} и S'_{Oi} – общая площадь и площадь погибших посевов *i*-й культуры в год защиты на ЗТ, га; $Г_i = \frac{\overline{S'}_{Oi}}{\overline{S}_{Oi}}$ – коэффициент ожидаемого повреждения *i*–й культуры на ЗТ; $У_{Oi}$ – урожайность *i*–й культуры в год защиты на ЗТ, т/га; $Ц_{Oi}$ – закупочная цена *i*-й культуры; $К_{Пi} = \frac{S_{Oi}}{\overline{S}_{Oi}}$ – коэффициент площади посевов *i*-й культуры; *n* – число культур, поврежденных градом на ЗТ; *P* – рентабельность ПГЗ, которую предлагается рассчитывать по отношению полученной выгоды к затратам.

Камалов, Махмудов и Муминов [30] для оценки стоимости сохраненного урожая хлопчатника предложили выражение

$$C = \left(S_S - S'_Ф\right) \cdot \Delta У \cdot Ц_{Хл} , \qquad (17.33)$$

где S_S и $S'_Ф$ – ожидаемая (без защиты) и фактическая площади повреждений хлопчатника на ЗТ, га; $\Delta У$ – уменьшение урожая хлопчатника за счет градобитий, т/га; $Ц_{Хл}$ – закупочная цена хлопка.

В целях повышения точности оценки эффективности ПГЗ Махмудов предложил оценку ущерба от градобитий осуществлять с учетом стадии развития хлопчатника [31].

Все эти методы основаны на сравнение потерь от града на ЗТ до защиты и в годы защиты и различаются в основном используемыми показателями, источниками информации и порядком обработки данных.

17.4.1.2 Основную сложность в оценке эффективности ПГЗ методом исторического ряда и контрольной территории представляет оценка ожидаемого ущерба, который был бы причинен без проведения защиты.

Ашабоков, Калажоков и Федченко [32, 33] исследовали возможности оценки ожидаемого ущерба на основе адаптивного прогнозирования, базирующегося на использовании кубических сплайн-функций и теоретического моделирования градовых процессов. Предложен метод предсказания значений потерь от града и других характеристик градовых процессов по данным о естественном ходе потерь от града, радиолокационных и других параметров градовых облаков и использовать их для оценки физической и экономической эффективности ПГЗ. Этот

подход требует достаточно длинных рядов наблюдений естественного хода значений параметров с частотой, обеспечивающей регистрацию всех их колебаний (гармоник), обусловленных различными физическими процессами (трендами климата, различиями в аэросиноптических и термодинамических характеристиках атмосферы, обуславливающих развитие градовых процессов разного масштаба и интенсивности).

Эти авторы, а также Качурин, Бекряев и Гурович [34] предложили оценку эффективности ПГЗ осуществлять на основе теоретического моделирования градовых процессов. Оценка эффективности работ по воздействию на облачные процессы на основе теоретического моделирования является одной из целей разработки трехмерной нестационарной модели грозового облака, осуществляемой в последние годы ГГО, совместно с ЦАО и ВГИ (Ю.А. Довгалюк, А.В. Шаповалов и др.).

17.4.1.3 Федченко и др. [35] предложили метод прогноза интенсивности градового процесса и оценки эффективности ПГЗ с ее учетом. В качестве критерия интенсивности градовых процессов помимо аэросиноптических и термодинамических характеристик атмосферы, была взята площадь гибели сельскохозяйственных культур S_{100} и были выделены три группы градовых процессов:

- интенсивные процессы (S_{100} > 1000 га),
- средние процессы (200 < S_{100} < 1000 га),
- слабые процессы (S_{100} < 200 га).

17.4.1.4 Приведенный обзор показывает, что основными задачами определения экономической эффективности и значимости сокращения потерь от града являются оценка:

- площади спасенного от градобитий урожая,
- количества спасенного урожая,
- экономической эффективности ПГЗ,
- чистого дохода от проведения ПГЗ,
- рентабельности затрат на проведение ПГЗ.

17.4.2 Показатели экономической эффективности

Из приведенного обзора следует, что для оценки экономической эффективности ПГЗ используются показатели, прямо или косвенно характеризующие ущерб от градобитий:

- площадь выпадения града $S_Г$ (га);
- площадь градобития $S_П$ (га);
- степень повреждений посевов от града K (%);

– площадь градобитий до защиты и в год защиты в пересчете на 100% повреждения $\overline{S}_{100c}$ и S_{100S} (га);

– процент потерь сельхозпродукции от градобитий на ЗТ до защиты $\overline{N}_C$ и в год защиты N_S или на КТ и ЗТ;

– степень сокращения ущерба от града на ЗТ в годы защиты E_f (%).

Информативность этих параметров различна. Площадь выпадения града $S_Г$, регистрируемая метеорологическими станциями и постами, радиолокатором, градомерной сетью или по показаниям очевидцев обычно значительно больше площади повреждений, так как мелкий град слабой интенсивности не наносит повреждений большинству культур. Кроме того, не вся эта площадь выпадения града охвачена сельскохозяйственным производством. Около 20 – 45% площадей ЗТ рассматриваемых регионов защиты не культивируются и заняты горами, лесами, озерами и водохранилищами, поймами рек, дорогами, населенными пунктами, промышленными объектами и т.д.

Площадь повреждений $S_П$ – более информативный показатель, чем площадь выпадения града, но большие пространственные вариации размера и интенсивности града приводят к большим вариациям степени повреждений (в пределах $0 < K < 100\%$). Ущерб на площади 1000 га с 5% повреждениями меньше ущерба на 100 га, поврежденных на 80%. С другой стороны степень повреждений зависит от вида и стадии вегетации растений и очень сильно варьирует по площади, охваченной градобитием.

Более информативным показателем ущерба является площадь градобития в пересчете на 100% повреждения S_{100}, учитывающая площадь градобития и степень повреждения. Однако различия площади ЗТ в разные годы и в разных регионах защиты затрудняют получение однородных сопоставимых статистических рядов данных.

Поэтому из множества показателей эффективности в качестве наиболее информативного предлагается параметр [1, 3], характеризующий долю потерь от града, выраженную в %. Этот параметр учитывает площади и степень повреждений и позволяет создать сравнимые статистические ряды данных до защиты ($\overline{N}_c$) и в период защиты (N_S) независимо от изменения по годам площади ЗТ ($S_{ЗТ}$).

Кроме того, для оценки экономической эффективности ПГЗ необходимы данные, характеризующие затраты на проведение защиты и стоимость защищаемой продукции:

– операционные (O) и капитальные (T) затраты на проведение ПГЗ;

– культивируемая площадь на ЗТ S_K (га);

– структура посевов (экспликация) на культивируемой территории;

– средняя стоимость урожая с 1 га ЗТ $\overline{C}$ (руб./га).

17.4.3 Порядок оценки экономической эффективности ПГЗ

Оценку эффективности ПГЗ следует осуществлять по сокращению S_{100}, от значения которого легко перейти к оценкам ущерба, зная среднюю стоимость урожая.

17.4.3.1. *Площадь спасенных от градобитий посевов* ΔS_{100} (га) следует рассчитывать по формуле

$$\Delta S_{100} = \overline{S}_{100C} - S_{100S}, \qquad (17.34)$$

где $\overline{S}_{100C}$ и S_{100S} – площадь гибели посевов до защиты (среднемноголетнее значение) и в год защиты соответственно (га).

17.4.3.2 *Количество спасенного урожая* ΔM_i (т) можно рассчитать, используя значение ΔS_{100} и данные по урожайности основных культур на соседних неповрежденных площадях с помощью выражения

$$\Delta M_i = \Delta S_{100} \cdot \sum_{i=1}^{n} \frac{S_i B_i}{S_K}, \qquad (17.35)$$

где S_K – площадь культивируемой территории на ЗТ (га); S_i – площадь посевов, занятая *i*-й культурой (га); B_i – средняя урожайность *i*-й культуры на ЗТ в рассматриваемый год (т/га).

17.4.3.3 *Годовой экономический эффект* E_e (руб.) можно рассчитать как разность между потенциальным и фактическим ущербом от града:

$$E_e = Y_C - Y_S = 0{,}01 S_K \overline{C} \left(\overline{N}_C G_S - N_S\right), \qquad (17.36)$$

где $Y_C = 0{,}01 \overline{N}_C G_S S_K \overline{C}$ – потенциальный ущерб на ЗТ в год защиты, который мог быть без проведения ПГЗ (руб.); $Y_S = 0{,}01 N_S S_K \overline{C}$ – фактический ущерб на ЗТ в год защиты (руб.); $\overline{C}$ – средняя стоимость урожая с 1 га ЗТ (руб./га).

Когда превалирует одна *i*-я культура, можно полагать $\overline{C} \approx C_i$. В случае сравнимости площадей, занятых различными культурами целесообразно расчет ущерба осуществлять по более точному выражению

$$Y_\Sigma = \frac{1}{100} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{J} K_{ni} \cdot S_{ni} \cdot C_{ni}, \qquad (17.37)$$

где C_{ni} - стоимость урожая с 1 га *i*-й культуры в *n*-й ячейке площади ЗТ.

Формы таблиц для расчета Y_C и Y_S и оценки экономической эффективности ПГЗ представлены в РД 52.37-732.

17.4.3.4 *Условно чистый доход*, получаемый от проведения ПГЗ *d* (руб.), рассчитывается по данным по формуле

$$d = E_e - U = (Y_C - Y_S) - (O + 0{,}15\,K), \qquad (17.38)$$

где U – суммарные годовые затраты на проведение ПГЗ (руб.); O – операционные расходы (руб.); 0,15 – коэффициент, учитывающий износ капиталовложений; K – объем капиталовложений, включающий стоимость капитального оборудования, баз КП и ПВ (руб.).

Операционные расходы включают затраты на заработную плату, приобретение ПГИ, ГСМ, энергоносителей, канцелярские и другие накладные расходы.

Основные затраты при реализации российской ракетной технологии ПГЗ складываются из следующих компонент:

– стоимость годового расхода ПГИ составляет около 40 – 50% себестоимости ПГЗ; такой разброс связан с тем, что расход ПГИ зависит от градоопасности ЗТ и года защиты;

– расходы на оплату труда составляют около 30 – 35% от себестоимости ПГЗ;

– остальные расходы (приобретение ГСМ, энергоносителей, расхода на коммунальные услуги, командировочные, канцелярские и накладные расходы) составляют около 10% от себестоимости ПГЗ.

17.4.3.5 *Рентабельность* (окупаемость) ПГЗ оценивается по формуле

$$R = \frac{E_e}{U}. \qquad (17.39)$$

17.4.3.6 Расчёт значений G_S, N_S, $\overline{N}_C$, E_e и d осуществляется по данным собранным по формам таблиц, приведенных в Приложении Г.

17.4.4 Методика сбора и обработки данных о градобитии

17.4.4.1 Для оценки эффективности ПГЗ, градоопасности территории, получения данных о характеристиках градовых осадков следует использовать методику сбора и обработки данных о градобитии, изложенную в РД 52.37.746.

Сбор и обработка данных о градобитиях в целях получения статистически обеспеченных данных осуществляется по возможно большому числу лет наблюдений. Основным источником данных о выпадении града считаются данные метеостанций и постов Росгидромета и других ведомств, а также данные ракетных ПВ.

Дополнительными источниками информации, могущими фиксировать выпадение града между метеостанциями и постами, считаются данные сети МРЛ, органов сельского хозяйства, страховых кампаний, данные пострадавших от градобития хозяйств и очевидцев.

Основным источником информации о площадях выпадения града,

площадях и степени повреждения от града считаются акты обследования района выпадения града комиссиями в составе представителей ЦГМС и ВС Росгидромета, органов сельского хозяйства, страховых компаний.

На основании актов обследования района выпадения града, а также данных о количестве засеянных объектов воздействия различной категории в отдельный день с градом осуществляется экспресс оценка предотвращенного ущерба в период ПГЗ согласно РД 52.37.672.

На основании сбора и обработки данных о выпадении града рассчитываются средние годовые значения и строятся региональные карты распределения числа дней с градом, площадей повреждений и осуществляется районирование территории по градоопасности в соответствии с РД 52.37.722.

17.4.4.2 Сбор и обработка данных о градобитиях осуществляются в соответствии с РД 52.37.746 для решения следующих задач:

– климатические исследования характеристик градовых осадков в разных регионах, включая частоту выпадения и размер града, продолжительность и площадь выпадения града, характеристики сопровождающих явлений (гроза, сильный ветер, ливень, паводок и т.д.);

– оценка градоопасности различных территорий для определения целесообразности и очередности организации ПГЗ на основе данных о среднем годовом числе дней с градом, средней годовой площади градобитий в пересчете на 100% повреждения, среднем годовом проценте потерь урожая и среднем годовом ущербе от града, отмечающихся в каждом районе обследуемой территории;

– оценка физической и экономической эффективности ПГЗ путем сравнения данных о площади градобитий (S_{100}), проценте потерь сельхозпродукции от градобитий (N) и ущербе от града на ЗТ в год защиты с их средними многолетними значениями до защиты или на КТ.

Исходя из этих задач, группой контроля АВ собираются и систематизируются следующие данные о градобитиях:

а) Данные о выпадении града:

– дата, время (ч, мин) и место выпадения града;
– продолжительность выпадения града (минут);
– максимальный диаметр градин (см);
– слой града на земле (см);
– длина и ширина градовой дорожки (км);
– общая площадь выпадения града(га);
– характеристика сопровождающих выпадение града явлений: шквал, ливень, сель, паводок, смыв пахотного слоя, эрозия почвы.

б) Данные об ущербе от градобития:

– общая площадь повреждения сельхозкультур ($S_Г$, га);
– степень повреждения культур от градобития (K, %);
– площадь повреждения от града в пересчете на 100% ($\boldsymbol{S_{100}}$, га);
– размер ущерба от градобития ($Y_Ф$, тыс. руб.);
– сумма страхового возмещения ($Y_{СВ}$, тыс. руб.).

в) Статистические данные о градоопасности территории:

– общая площадь рассматриваемой территории (S, га);
– площадь сельхозугодий на рассматриваемой территории (S_K, га);
– среднее многолетнее число случаев выпадения града (n);
– средняя многолетняя площадь повреждения ($\boldsymbol{S_{100}}$, га);
– средний многолетний процент потерь урожая от градобитий (K, %).

Все полученные данные должны вноситься в фонд данных об АВ на метеорологические процессы, направляемый во ВНИИГМИ-МЦД для пополнения информационных ресурсов Росгидромета.

17.4.5 Порядок обследования площади градобития

17.4.5.1 Оценка реальной площади выпадения града, площади и степени повреждений и ущерба от града осуществляются на основе обследования площадей выпадения града с выездом на место выпадения града. Детальное обследование пострадавших посевов обеспечивает обнаружение любого даже мелкомасштабного градобития и оценку реального ущерба, так как каждое растение, зеленое насаждение или объект является индикатором града.

Для минимизации субъективного фактора комиссия по обследованию должна включать представителей ЦГМС или ВС Росгидромета, органов сельского хозяйства, пострадавшего от града хозяйства и страховой компании.

17.4.5.2 Обследование ЗТ и КТ осуществляются по окончании воздействия на градовые процессы с целью определения:

– места и времени выпадения града;
– характеристик градовых осадков (размер и интенсивность града, толщина слоя града, длина и ширина градовой дорожки) и характеристик сопутствующих явлений (ливневые дожди, ветер, смыв почвы, паводки);
– обмер площади градобития, ее длины и ширины;
– оценка степени повреждений;
– оценка ущерба с выявлением реальных причин ущерба (от града, сильного ветра, смыва пахотного слоя, подтопления и т.п.).

17.4.5.3 Районы возможного выпадения града и маршрут объезда ЗТ и КТ определяют по карте кинетической энергии градовых осадков или карте ущерба от градобитий на фоне карты местности (рис. 17.8), полученной с помощью «АСУ-МРЛ» по методике, изложенной в руководстве по его эксплуатации [36].

17.4.5.4 Обследование района выпадения града осуществляется на каждом поврежденном поле, с учетом неоднородности интенсивности града по площади и пятнистости повреждений. Обследование посевов осуществляется в следующем порядке:

а) выбирается ряд площадок, расположенных по краям и в центре поврежденного поля, с произрастанием около 100 растений, поэтому размер площадки зависит от вида культур (пшеница, кукуруза, подсолнух, бахчевые);

б) на каждой выбранной площадке обсчитывается число погибших и частично поврежденных растений и рассчитывается степень повреждений в виде отношения числа погибших и серьезно пострадавших растений к общему числу растений на выбранной площадке;

в) определяется площадь поля (полей), к которому необходимо отнести данную степень повреждения;

г) по данным обследования на укрупненной карте полей проводятся изолинии степени повреждений, по которым в дальнейшем рассчитывается площадь градобития в пересчете на 100% повреждения.

Для оценки степени повреждений плодовых культур обследуется несколько деревьев в разных участках сада поперек полосы града и обсчитывается доля сбитых и поврежденных плодов.

Для обследования виноградника и ягодных культур выбирается несколько кустов с характерными повреждениями, и также обсчитывается доля погибших лоз и плодов. Ущерб от града рассчитывается на основе данных о средней урожайности пострадавшей культуры в предыдущие 5 лет, а также в сравнении с урожайностью на соседних не пострадавших участках.

17.4.5.5 По результатам обследования составляется акт по форме, представленной в РД 52.37.746, в котором указываются дата и порядок обследования, результаты обследования, с акцентом на реальные причины повреждения зеленых насаждений от града, сопутствующего ветра, смыва интенсивными ливневыми осадками и т.д.

17.4.5.6 Члены комиссии по обследованию (оценщики) должны разбираться в физиологии растений, в повреждениях от гербицидов, неправильной технологии обработки и уметь учитывать при оценке стадию вегетации, качество посевов (густота, всхожесть, запоздалый сев) так как:

а) на ранней стадии вегетации важно учесть повреждение листьев, побегов растений, а ближе к стадии зрелости это не играет такой роли;

б) на величину потерь урожая влияет и последующая погода и агротехника. Например, на богарных участках последующая засуха может привести к гибели посевов, а на поливных землях со своевременной культивацией посевы могут быть спасены.

Если оценщики затрудняются в оценке влияния повреждений на урожайность, то следует провести повторную оценку через 2 ÷ 4 недели, когда выяснится степень восстановления посевов, или отложить оценку до сбора урожая, и рассчитать его недобор, как это предусматривают инструкции по страхованию урожая [17 – 19].

17.5 Метод оценки статистической значимости эффекта ПГЗ

17.5.1 Оценку статистической значимости эффекта ПГЗ рекомендуется осуществлять с помощью метода *bootstrap*, который широко использовался для оценки эффективности АВ на облачные процессы [37 – 39].

С применением этого метода проведена статистическая оценка эффективности ПГЗ в РФ, странах СНГ [1, 2, 40, 41], Аргентине [5, 20] и показано статистически значимое сокращение во всех регионах площадей градобитий и ущерба от града в результате проведения ПГЗ.

Для обоснования успешности ПГЗ проведен также экзамен на статистический *t*-тест, согласно которому, если изменение показателей эффективности (площади повреждения градом и ущерба от града) превышают критическое значение на заданном уровне значимости α, то успешность ПГЗ считается доказанной на этом уровне значимости. Если же изменения меньше критического значения, то следует полагать, что показатели эффекта (характеристики градовых осадков) до защиты и в период ПГЗ существенно не изменились и среднестатистическая разница не превышает естественной вариации значений показателей. Следовательно, нет оснований говорить об успешности ПГЗ [1].

Этот подход использовался также для оценки достаточности длины рядов данных для оценки статистической значимости эффективности ПГЗ [1, 4, 5], и было показано, что длина используемых статистических рядов достаточна для утверждения о значимости обнаруженного эффекта сокращения потерь от града.

17.5.2 Следует отметить, что во многих проектах ПГЗ получен неоднозначный результат. В качестве таких примеров можно привести национальный градовый эксперимент США (NHRE), проведенный в 1972 –

1976 гг. [42] и эксперимент «Grossversuch-4», выполненный в Швейцарии в 1976 – 1980 гг. [8, 43], с целью оценки научных предпосылок и эффективности советского метода борьбы с градом.

Оба эти эксперимента дали неоднозначные результаты. Причиной этой неоднозначности явилось то, что наряду с хорошей программой инструментальных измерений и научных оценок, операции по засеву в экспериментах NHRE и «Grossversuch-4» не воспроизвели советские методы ПГЗ и на реализованном уровне не могли обеспечить успешного предотвращения града.

В эксперименте NHRE [42] оценивался метод Сулаквелидзе [154], основанный на концепции конкуренции и засеве зоны аккумуляции крупных капель. Засев осуществлялся кристаллизующими реагентами с борта самолета в области наиболее сильных восходящих потоков, в которых реагент выбрасывается из зоны градообразования в вершину облака. Во многих случаях такой засев может лишь ускорить рост града за счет создания смешанной капельно-кристаллической фракции. Кроме того, засев по траектории полета самолета эквивалентен засеву одной противоградовой ракетой, в то время как использовавшийся в СССР метод борьбы с градом для подавления мощного градового процесса предусматривал расход десятков, а иногда сотен ракет и снарядов.

В эксперименте «Grossversuch-4» [8] была сделана попытка проверки молдавского ракетного варианта советского метода [70]. При этом засев осуществлялся в области радиоэха с $Z > 45$ дВZ. Это означает, что засевалась область локализации града, что не могло дать желаемого результата. Кроме того, расход применявшихся ПГИ «Облако» и «ПГИ-М» на засев одного ОВ был многократно меньше требуемых норм расхода.

Таким образом, в экспериментах NHRE и «Grossversuch-4» критерии засева, место засева, время и количество вносимого реагента не соответствовали требованиям проверяемых методов и не могли характеризовать эффективность артиллерийского и ракетного методов защиты от града. Обзор статистических методов, применявшихся для оценки эксперимента «Grossversuch-4», приведен в [43].

17.5.3 Статистическая оценка эффективности ПГЗ на основе рядов данных о потерях от града до защиты и в годы защиты с использованием методов *bootstrap* и *t*-теста позволяет оценить надежность, статистическую значимость, доверительный интервал, плотность распределения и вероятность получения эффекта заданной величины.

Суть метода *bootstrap* заключается в следующем. В предположении, что климатология града и применяемая технология ПГЗ в рассматриваемый период существенно не изменились, путём

многократного (например, 10^6 раз) повторения эмпирических выборок о потерях от града до защиты и в период защиты формируются две большие выборки, имитирующие генеральные совокупности $\{N_{Si}\}$ и $\{N_{Ci}\}$. Из этих больших выборок с помощью генератора равномерно распределенных случайных чисел извлекается заданное число экспериментальных единиц и оценивается величина эффекта воздействия E_f. Многократное повторение этой процедуры позволяет, в конечном итоге, получить:

а) физическую эффективность E_f (%) на разном уровне значимости;

б) распределение плотности вероятности эффекта $P(E_f)$;

б) уровень значимости эффективности α;

в) вероятность эффекта меньше $P(E_f < X)$ и больше $P(E_f > X)$ заданного значения X;

г) вероятность того, что эффект находится в заданном интервале значений $P\ (E_1 < E_f < E_2)$;

д) вероятность эффекта на заданном уровне значимости $P(\alpha_0)$;

е) доверительный интервал (-1, $\overline{E}_\gamma$), где γ – доверительный уровень.

Если для каждой экспериментальной единицы известно значение двух и более физических параметров (например, число дней с градом и число дней с дождем), то могут быть рассчитаны вероятности следующих сложных событий:

– уменьшение (увеличение) числа дней с градом и одновременное увеличение (уменьшение) числа дней с дождем;

– статистически значимое увеличение (уменьшение) числа дней с градом и одновременное уменьшение (увеличение) числа дней с дождем;

– получение статистически значимого эффекта ПГЗ для града и дождя одновременно.

Однако прежде этих оценок необходимо убедиться в том, что длина статистических рядов данных достаточна для получения статистически значимых результатов.

17.5.4 Для оценки достаточности длины рядов данных для получения статистически значимых выводов проводится экзамен на t-тест, предполагая, что выборки $\{N_{Si}\}$ и $\{N_{Ci}\}$ состоят из нормально распределенных случайных величин с параметрами $\overline{N}_S = MN_{S_i}$, $\sigma_S^2 = DN_{Si}$, и $\overline{N}_C = MN_{C_i}$, $\sigma_C^2 = DN_{Ci}$, соответственно, где M – математическое ожидание, а D – дисперсия рассматриваемых параметров. Воспользовавшись статистикой t Стьюдента для сравнения средних двух независимых нормальных совокупностей, строится односторонний доверительный (с уровнем доверия 1 - α) интервал ($-\infty$, $(N_S - N_C)_k$) для

величины $\overline{N}_S - \overline{N}_C$. При этом критическое значение $(\overline{N}_S - \overline{N}_C)_к$ связано с верхней квантилью t_α (подсчитанной с помощью нормальной аппроксимации) уровня α распределения Стьюдента [44] с (n_S+n_C-2) степенями свободы соотношением

$$t_\alpha = \frac{\overline{N}_S - \overline{N}_C}{\sqrt{(n_S - 1)\sigma_S^2 + (n_C - 1)\sigma_C^2}} \sqrt{\frac{n_S n_C (n_C + n_S - 2)}{n_C + n_S}}. \qquad (17.40)$$

Отсюда для интересующей нас эффективности ПГЗ $\frac{\overline{N}_S}{\overline{N}_C} - 1$ получим критическое для t – теста значение эффекта ПГЗ E_K (%):

$$E_К = \left(\frac{\overline{N}_S}{\overline{N}_C} - 1\right)_К = t'_{2\alpha} \frac{\sigma_C}{\overline{N}_C} \sqrt{\frac{(n_S - 1)\sigma_S^2 / \sigma_C^2 + (n_C - 1)}{n_S + n_C - 2}\left(\frac{1}{n_S} + \frac{1}{n_C}\right)}, \qquad (17.41)$$

где $t'_{2\alpha}$ – верхняя квантиль уровня 2α распределения величины $|t|$; σ_S и σ_C – среднеквадратичное отклонение потерь от града в годы защиты и до защиты соответственно; n_S и n_C – количество лет защиты и количество лет наблюдений до защиты (т.е. за экспериментальную единицу принят год); $(\frac{\overline{N}_S}{\overline{N}_C} - 1)$ – среднестатистическое уменьшение потерь от града.

17.5.5 Для проведения экзамена на t-тест сравнивают фактическое значение эффективности E_f, найденное методом *bootstrap*, с критическим (E_K), найденным по формуле (17.41). Если $E_f > E_K$, то эффективность защиты считается статистически значимой при выбранном уровне значимости α = 0,05, и количество лет наблюдений до ПГЗ и в период ПГЗ достаточным для статистически значимого вывода о том, что сокращение потерь от града обусловлено ПГЗ, а не природной изменчивостью. Если же $E_f \le E_K$, то можно предполагать, что засев облаков не привел к существенным изменениям градовых осадков, т.е. среднестатистические изменения сравнимы с естественной изменчивостью градовых осадков и нет оснований утверждать, что защита эффективна.

Для удобства оценки можно использовать семейства кривых (рис. 17.11) зависимости критического значения эффекта ПГЗ E_K = $(\frac{\overline{N}_S}{\overline{N}_C} - 1)\cdot 100\%$ от n_S при разных значениях n_C, $\sigma_C / \overline{N}_C$ и σ_S / σ_C, рассчитанных по формуле (17.41). Из рисунка 17.11 следует, что для статистического подтверждения результативности ПГЗ очень значимы:

– величина эффективности E_f;

– длина статистических рядов (число экспериментальных единиц) до защиты n_C и в период защиты n_S;

– временная изменчивость показателей эффективности до и в период защиты (коэффициенты вариации $\chi_S = \frac{\sigma_S}{\overline{N}_S} \cdot 100\%$ и $\chi_C = \frac{\sigma_C}{\overline{N}_C} \cdot 100\%$);

– отношение изменчивости показателей эффективности до защиты и в период защиты σ_S / σ_C.

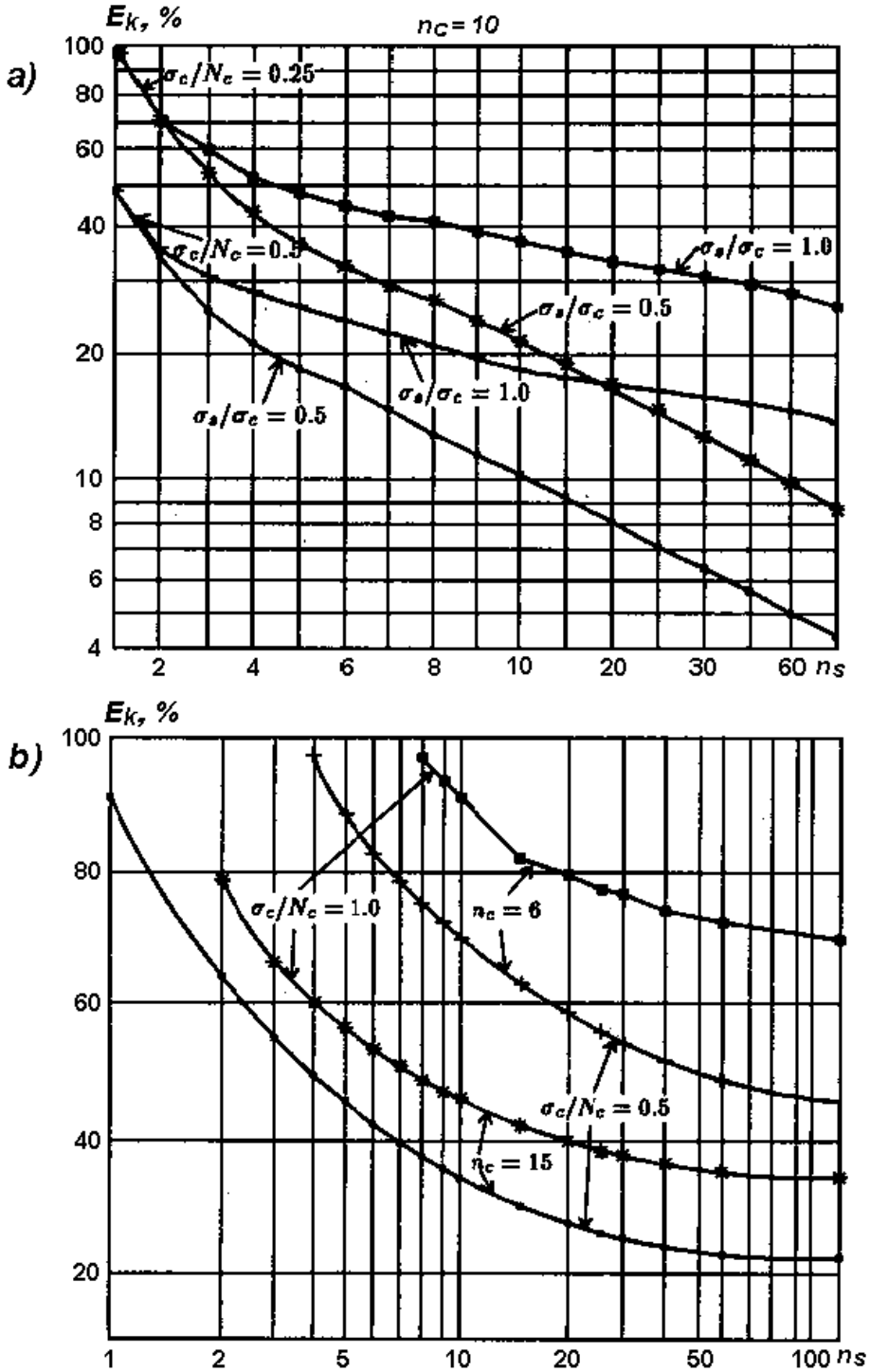


Рис. 17.11 – Зависимость *t*-критических значений эффекта ПГЗ (E_K, %) от числа лет с защитой n_s: ***а)*** при числе лет без защиты n_c = 10 лет и разных значениях коэффициента вариации $\sigma_c / \overline{N}_c$ = 0,25 и 0,5, σ_S / σ_C =0,5 и 1,0, α = 0,05; ***б)*** при длине контрольного ряда n_c = 6 и 15 лет, $\sigma_C / \overline{N}_C$ = 0,5 и 1,0 на уровне значимости α = 0,05

Так, при эффекте защиты E_f = 80%, n_C = 10 лет и малой временной изменчивости характеристик града (например, при $\sigma_C / \overline{N}_C$ = 0,25) для доказательства эффекта защиты на уровне значимости α = 0,05 достаточно одного года защиты. При этих же данных, но увеличении изменчивости характеристик града, для доказательства требуется значительно более длительный период защиты:

- при $\sigma_C / \overline{N}_C$ = 0,75 требуется 4 года;
- при $\sigma_C / \overline{N}_C$ = 1,0 необходимо 20 лет;
- при $\sigma_C / \overline{N}_C$ = 1,5 необходимо 120 лет защиты.

При $\sigma_C / \overline{N}_C \leq$ 0,5 (характерной для рассматриваемых ниже регионов ПГЗ), если данные до защиты имеются за 6 лет, то статистическое подтверждение эффективности защиты на уровне значимости α = 0,05 требует минимум двухлетнего периода защиты. Изменения за один год защиты даже со 100% эффектом не будут иметь статистической обеспеченности и могут быть отнесены к естественным колебаниям. Достоверное доказательство уменьшения ущерба от града на 60% при $\sigma_C / \overline{N}_C$ = 0,5 требует четырехлетнего периода защиты, а доказательство сокращения на 40% потребует периода защиты длительностью не менее 20 лет, т.е. чем меньше эффективность засева облаков, тем больший период требуется для его статистического подтверждения.

Таким образом, статистический *t*-тест позволяет, исходя из ожидаемой эффективности ПГЗ и природной изменчивости характеристик ОВ, оценить целесообразность и длительность планируемых проектов ПГЗ. Статистический *t*-эксперимент можно провести аналогичным способом по любому показателю эффективности (метеорологической, физической и экономической), по которому имеются статистические ряды данных без АВ и с АВ.

17.5.6 Для статистической оценки эффективности проектов ПГЗ в НПЦ «Антиград» разработан [1] пакет прикладных программ «Статистическая оценка эффективности ПГЗ» для персонального компьютера в среде DOS 6.0 и выше. Для проведения расчета необходимо:

а) данные по форме таблицы, приведенной в Приложении Г, внести в файл tab6.txt в коде ASCII при помощи встроенного редактора текстов оболочки «Norton Commander» или другого редактора текстов;

б) файл tab6.txt поместить в одну директорию с пакетом прикладных программ;

в) запуск ППП производить с помощью командного файла $E_f$pgz.bat;

г) результаты расчётов в виде графиков и таблиц вывести на печать.

Инструкция по применению ППП приводится в файле readme.txt.

17.6 Результаты оценки многолетних проектов ПГЗ

Для анализа результатов проектов ПГЗ рассмотрим показатели работы ВС и ОВЧ (отдельных военизированных частей) Госкомгидромета СССР, функционировавших в разных регионах в период 1981 – 1990 гг.

17.6.1 В таблице 17.2 приведены площади ЗТ, число отрядов и ПВ и среднегодовое число дней с градом и АВ в регионах ПГЗ стран СНГ [1]. Из нее следует, что среднегодовое число дней с градом составляет около 10 – 60% дней с грозой и ливнями и варьирует в разных регионах от 11 дней в наименее градоопасном регионе (Одесская область Украины), до 60 дней в более градоопасном регионе (Северный Кавказ).

Продолжительность сезона ПГЗ наибольшая в Грузии (214 дней), Азербайджане и Армении (198 дней) и наименьшая в Узбекистане и Таджикистане (152 дня). Сезон защиты в Средней Азии и Закавказье начинается с 25 марта – на месяц раньше, чем на Северном Кавказе, Украине и в Молдове.

Таблица 17.2 – Площадь ЗТ, число отрядов и ПВ в 1989 г. и среднегодовое число дней с градом в разных регионах ПГЗ в период апрель – сентябрь 1981 – 1990 гг.

Наименование ВС, ОВЧ	Площадь ЗТ $S_{ЗТ}$, тыс. га	Число отрядов	Число ПВ	Среднегодовое число дней с градом			Среднего довое число дней с АВ
				$\overline{N}_Г$		$K_{\overline{N}_Г}$, %	
Азербайджанская	1 330	12	94	46	56	10,7	56
Армянская	1 003	11	53	41	74	14,7	74
Грузинская	1 350	5	119	50	71	3,0	71
Краснодарская	770,6	6	50	56	45	2,2	45
Крымская	501	5	47	21	31	6,6	31
Молдавская	2 430	18	161	33	46	9,1	46
Одесская	401,5	2	26	11	20	15,4	20
Северо-Кавказская	1 145	5	108	60	52	4,2	52
Таджикская	700	9	37	28	39	10,0	39
Узбекская	860	9	61	20	51	15,0	51
Всего	10491,1	82	756	366	485		485
Среднее	1 049			36,6	49	9	49
$\sigma_{\overline{N}_Г}$	551,6			15,7	1,5	4,7	19,8
$\chi_{\overline{N}_Г} = \sigma_{\overline{N}_Г} / \overline{N}_Г$ %	52,58			43,6	53,5	52,6	25,1

17.6.2 *Число дней с успешным и неуспешным АВ*

В таблице 17.3 приводятся среднегодовое число дней с АВ на градовые процессы, число дней с успешным и неуспешным АВ. Сопоставление данных таблиц 17.2 и 17.3 показывает, что среднегодовое число дней с АВ в 1,3 раза превосходило число дней с градом. С одной стороны, это свидетельствует о значительной перестраховке персонала, а с другой стороны, может быть обусловлено сокращением числа дней с градом на ЗТ за счет АВ. Однако такое сокращение в ряде регионов не может быть значительным в контексте оценки числа дней с градом, так как площадь ЗТ в несколько раз меньше площади прилегающих территорий.

При суммарном по всем ВС, среднегодовом числе дней с АВ, равном 485, в 83% случаев засев проведен успешно и на ЗТ не отмечено ущерба от градобитий, а в 17% случаев засева – неуспешно или не полностью успешно, так как на ЗТ отмечалось выпадение града с ущербом. Наибольшая доля дней с пропуском градобитий на ЗТ в рассматриваемый период отмечалась в Северо-Кавказской, Краснодарской и Грузинской ВС, работавших в наиболее градоопасных регионах.

Наименьшая доля дней с неуспешным АВ отмечается в Узбекской (8%) и Армянской (9%) ВС, что, по-видимому, связано и с отмеченной выше перестраховкой – засевом облаков даже низкой степени градоопасности, что сокращает риск запоздалого засева. Поэтому в этих ВС число дней с АВ в 1,8 и 2,5 раза, соответственно, превышало число дней с градом, но в 1,4 – 1,5 раза меньше числа дней с грозой и ливнями.

В некоторых ВС такая перестраховка отсутствует (например, в Северо-Кавказской и Краснодарской ВС среднегодовое число дней с АВ несколько меньше среднегодового числа дней с градом).

17.6.3 *Число ОВ с успешным и неуспешным засевом*

В таблицах 17.3 представлено *среднегодовое число засеянных ОВ* и расход ПГИ фактический и нормированный на 100 тысяч га и на 1 ОВ.

Число засеянных ОВ наиболее высокое в Грузинской и Молдавской ВС. Из 5628 засеянных ОВ 4614 (или 79%), были засеяны успешно (т.е. без пропуска града на ЗТ), а 1007 (или 21%) – неуспешно. Наибольшая доля успешно засеянных ОВ отмечается в Грузинской ВС (97%), где самый большой расход ПГИ, а наименьшая – в Северо-Кавказской (≈ 64%).

17.6.4 *Расход ПГИ*

Расход ПГИ на обработку одного ОВ, как следует из таблицы 17.3, варьирует в значительных пределах от 8 до 35 шт. Наибольший расход отмечался в Армянской (35 шт.), Грузинской и Узбекской ВС (29 – 30 шт.), а наименьший – в Крымской и Одесской ВС (8 – 9 шт.). Причиной этого

является использование в Армении артиллерийских батарей из 4-х пушек, а в Грузии 2 – 3 ракетных пусковых установок и большая густота сети ПВ, обеспечивающих высокий темп засева ОВ. Большой расход ПГИ на 1 ОВ в Узбекской ВС, по-видимому, обусловлен большими масштабами конвективных ячеек в этом регионе.

Следует отметить, что расход ПГИ больше в тех ВС, в которых была выше скорострельность ПВ. Это обусловлено тем, что засев ОВ в этих ВС осуществлялся непрерывно в течение периода градоопасного состояния облаков с достижимой скорострельностью, не дожидаясь проявления эффекта засева. Малый расход ПГИ на 1 ОВ в Крымской и Одесской ВС объясняется меньшей градоопасностью региона, а также низкой скорострельностью противоградовых комплексов «Облако» и «ПГИ-М», применявшихся в этих ВС до 1987 года.

Средний по всем ВС расход ПГИ на 1 ОВ (21 шт.) является, по-видимому, тем оптимумом, который устранял бы возможность недостаточного засева и исключал перерасход ПГИ. Однако следует отметить, что применение в последующие годы более совершенных ракет «Кристалл», «Небо», «Алазань-6» и «Алан-2», с длинными трассами засева и более эффективными кристаллизующими реагентами привело к сокращению расхода ракет более чем в 2 раза.

Таблица 17.3. Среднегодовое число ОВ, расход ПГИ и реагента, на 100 тысяч га ЗТ и на засев одного ОВ в период 1981 – 1990 гг.

Наименование ВС и ОВЧ	Средне-годовое число ОВ на 100 тыс. га $\overline{N}_{ОВ}$, шт.	Годовой расход ПГИ на 100 тысяч га $\overline{N}_{ПГИ}$, шт.	Фактический расход ПГИ, $\overline{N}_{ПГИ}$ шт.		Среднегодовой расход *AgI*	
			всего	на 1 ОВ	всего, кг	г/км^2
Азербайджанская	33,0	768,0	10214	23,2	76,4	5,7
Армянская	52,4	1825,1	18320	34,8	156,8	15,6
Грузинская	97,2	2822,4	37115	29,0	414,7	31,5
Краснодарская	65,5	1339,3	10321	20,4	72,2	9,4
Крымская	41,2	348,9	1748	8,5	19,6	3,9
Молдавская	74,8	911,0	27096	14,5	325,9	13,1
Одесская	34,9	312,8	1257	9,0	14,1	3,5
Северо-Кавказская	52,9	1263,7	17060	23,8	204,1	15,1
Таджикская	82,1	1352,0	9464	14,6	93,6	13,4
Узбекская	44,3	1347,9	11592	30,4	114,7	13,3
Всего	578,3	-	144187		1492,1	124,5
Среднее	57,8	1229,1		21	149	12,4

П р и м е ч а н и е: Приводится суммарный: расход ПГИ «Эльбрус-4», содержащих 80 г AgI, «Алазань» – 13 г AgI, «Облако» – 100 г AgI, и «ПГИ-М» – 6 г AgI.

Суммарный расход ПГИ, как следует из таблицы 17.3, повышен в Армянской, Грузинской и Таджикской ВС, в которых число дней с АВ, число засеянных ОВ и расход ПГИ плохо коррелируют с градоопасностью региона и продолжительностью сезона ПГЗ и, по-видимому, обусловлено перестраховкой персонала и высокой скорострельностью ПВ.

Число дней с АВ, число засеянных ОВ и расход ПГИ в значительной степени зависит от применяемой технологии. Например, в Грузинской ВС после перехода на унифицированную технологию годовой расход ракет в 1988 – 89 гг. сократился вдвое по сравнению с предыдущими годами, когда применялась технология засева Института геофизики АН Грузии [1].

В среднем, на засев одного ОВ IV категории расходовалось около 130 ПГИ, а в некоторых случаях – до 400 ÷ 600 ракет. После тщательной отладки автоматизированной системы ПГЗ в провинции Мендоса Аргентины в 1995/96 – 1997/98 гг. этот расход был сокращен до 75 ÷ 90 ПГИ [5, 20, 45], а на засев 1 ОВ I, II и III категории расходовалось в среднем 6, 21 и 77 ПГИ соответственно (рис. 10.8).

Средний расход ПГИ всех типов («Эльбрус-4», «Облако», «ПГИ-М» и «Алазань-2») на защиту 100 тысяч в период 1981 – 1990 гг., как следует из таблицы 17.3, составлял около 1230 ПГИ и варьировал в зависимости от градоопасности региона и льдообразующей эффективности ПГИ. В период с 1967 по 1988 г. этот расход составлял 1107 шт., а период 2001 – 2014 г. сократился более чем в два раза (рис. 17.12) за счет применения ПГИ «Алазань-5» и «Алазань-6», имеющих повышенные льдообразующую эффективность и радиус действия.

Расход ПГИ на единицу площади ЗТ уменьшается по мере увеличения монолитной площади ЗТ, так как при этом увеличивается соотношение площади ЗТ и зоны предзащиты, и в результате сокращается доля расхода ПГИ в зоне предзащиты, осуществляемого для подавления градовых процессов, вторгающихся на ЗТ в зрелом состоянии. Например, в Молдавской ВС, где площадь защиты достигала 2,5 млн га, расход ПГИ был несколько меньше чем в среднем по всем ВС Госкомгидромета СССР.

В период с 1966 по 1982 г. расход ракет «Облако» и «ПГИ-М» на 100 тысяч га ЗТ в Молдавской ВС составлял около 800 шт. (рис. 17.13). В период 1983 – 1992 г. с переходом на более скорострельный комплекс ПГИ «Алазань-2М» расход повысился до 1100 ÷ 1600 шт., а в период с 1990 по 2013 год с применением более эффективных ПГИ «Алазань-5» и «Алазань-6» расход ПГИ сократился до среднегодового значения 224 шт.

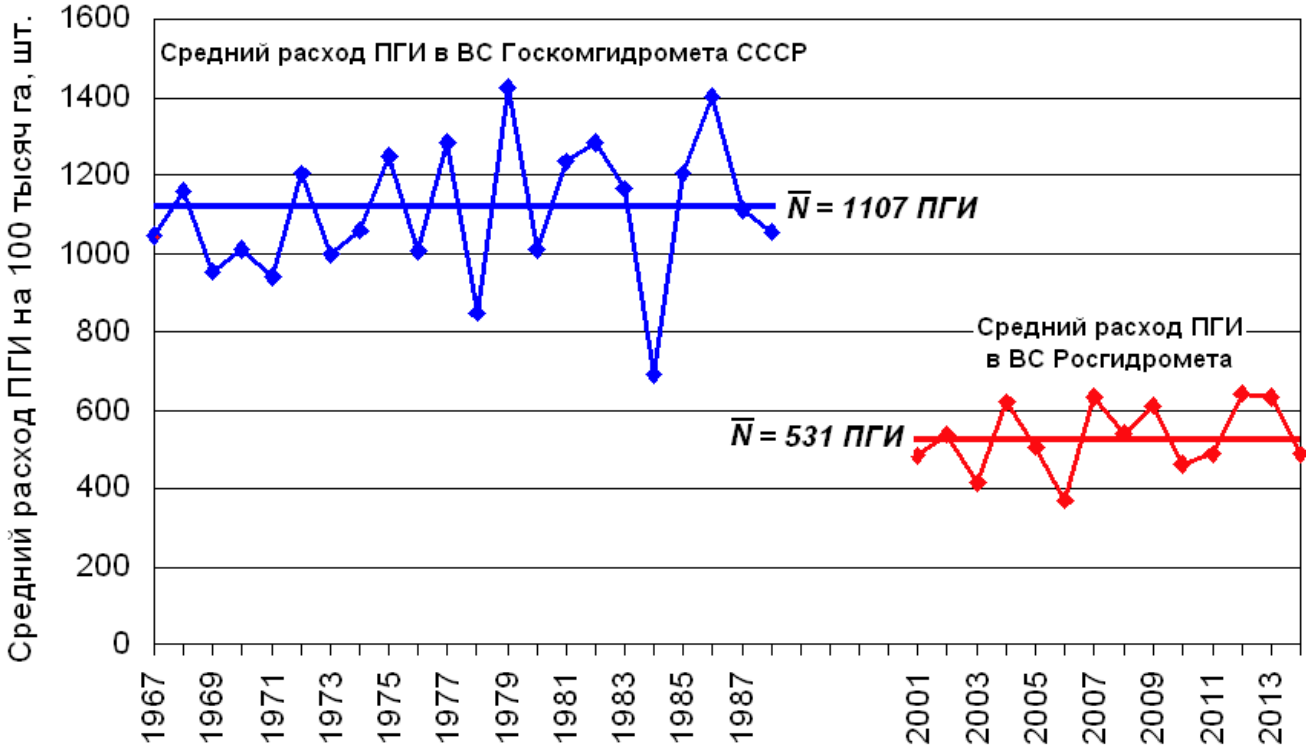


Рис. 17.12 – Средний расход ПГИ на защиту 100 тысяч га в ВС Госкомгидромета СССР и ВС Росгидромета

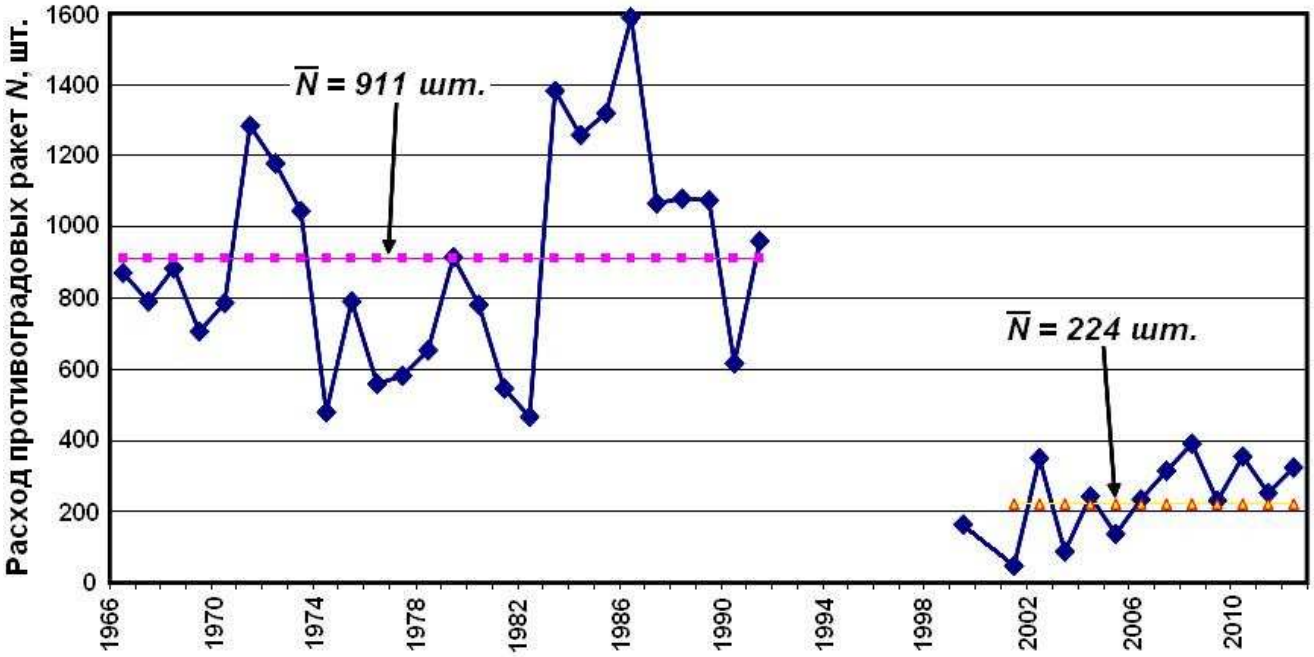


Рис. 17.13 – Расход противоградовых ракет в Молдавской ВС на защиту 100 тысяч га в период с 1966 по 2013 г.

17.6.5 *Сокращение площадей градобитий на ЗТ*

В таблице 17.4 представлены площади ЗТ, среднегодовые площади градобитий в пересчете на 100% повреждения до защиты и в годы защиты, фактические и нормированные на 1 млн га.

Согласно таблице 17.4, на общей площади ЗТ, равной 10,5 млн га, среднегодовая площадь гибели сельскохозяйственных культур до защиты она составляла 308 тысяч га, а в годы защиты – 40,95 тысяч га. Наибольшие площади повреждений на единицу площади ЗТ (1 млн га) отмечались на ЗТ в Северо-Кавказской, Краснодарской и Грузинской ВС, а наименьшие в Узбекской и Армянской ВС.

Таблица 17.4 – Площадь ЗТ, среднегодовые площади градобитий S_{100} до (S_C) и в период ПГЗ (S_S) и физическая эффективность ПГЗ

Наименование ВС и ОВЧ	Площадь ЗТ в 1989 г., S, тыс. га		Средняя площадь градобитий на ЗТ $\overline{S}_{100}$, тыс. га		Площадь градобитий на ЗТ, нормированная на 1 млн га, S_S, тыс. га	Физич. эффек. ПГЗ $\overline{E}_f$ %
	общая	культивируемая	до защиты, S_C	в годы защиты, S_S		
Азербайджанская	1330	836	28,8	1,445	1,237	93
Армянская	1003	487	21,0	0,779	0,750	95
Грузинская	1350	707	35,8	9,217	7,934	71
Краснодарская	771	628	39,4	9,767	13,552	82
Крымская	501	388	11,4	0,933	1,972	91
Молдавская	2430	1763	55,2	3,785	1,852	92
Одесская	402	354	13,7	0,525	1,688	93
Северо-Кавказская	1145	817	51,1	12,238	14,136	67
Таджикская	700	663	23,2	1,276	1,875	90
Узбекская	860	491	28,5	0,986	1,342	96
Всего	10492	7134	308,1	40,951	46,338	-
Среднее	1049	713	30,8	4,095	4,634	87

17.6.6 Сокращение потерь от града

Из таблицы 17.4 и рисунка 17.14 и следует, что потери урожая до защиты в разных регионах ПГЗ варьируют в пределах 2,48 < N_C < 12,93%. Наибольшие потери до защиты отмечались на ЗТ Краснодарской, Северо-Кавказской ВС и Аргентине, а также, наименьшие – в Крыму, Молдове и Азербайджане. Оценка физической и экономической эффективности ПГЗ по формуле (17.16) показала что, средняя эффективность системы ПГЗ в странах СНГ, с 1967 по 2014 год варьировала в пределах 57 – 96%, а по отдельным ВС – от 22 до 100%. Среднегодовые потери до защиты равнялись $\overline{N}_C$ = 3,87%. В период ПГЗ из года в год значение $\overline{N}_S$ уменьшалось и в среднем за период 1967 – 2014 гг. составила 0,76%. Это означает, что в это период достигнуто сокращение потерь от града на 84% (т.е. в 6,2 раза).

Сравнение статистических рядов данных о потерях от града до и в период ПГЗ показывает, что средние, минимальные и максимальные значения N_S и S_{100} в годы защиты значительно меньше, чем их значения N_C и S_C до защиты (рис. 17.14 и таблицы 17.4 и 17.5).

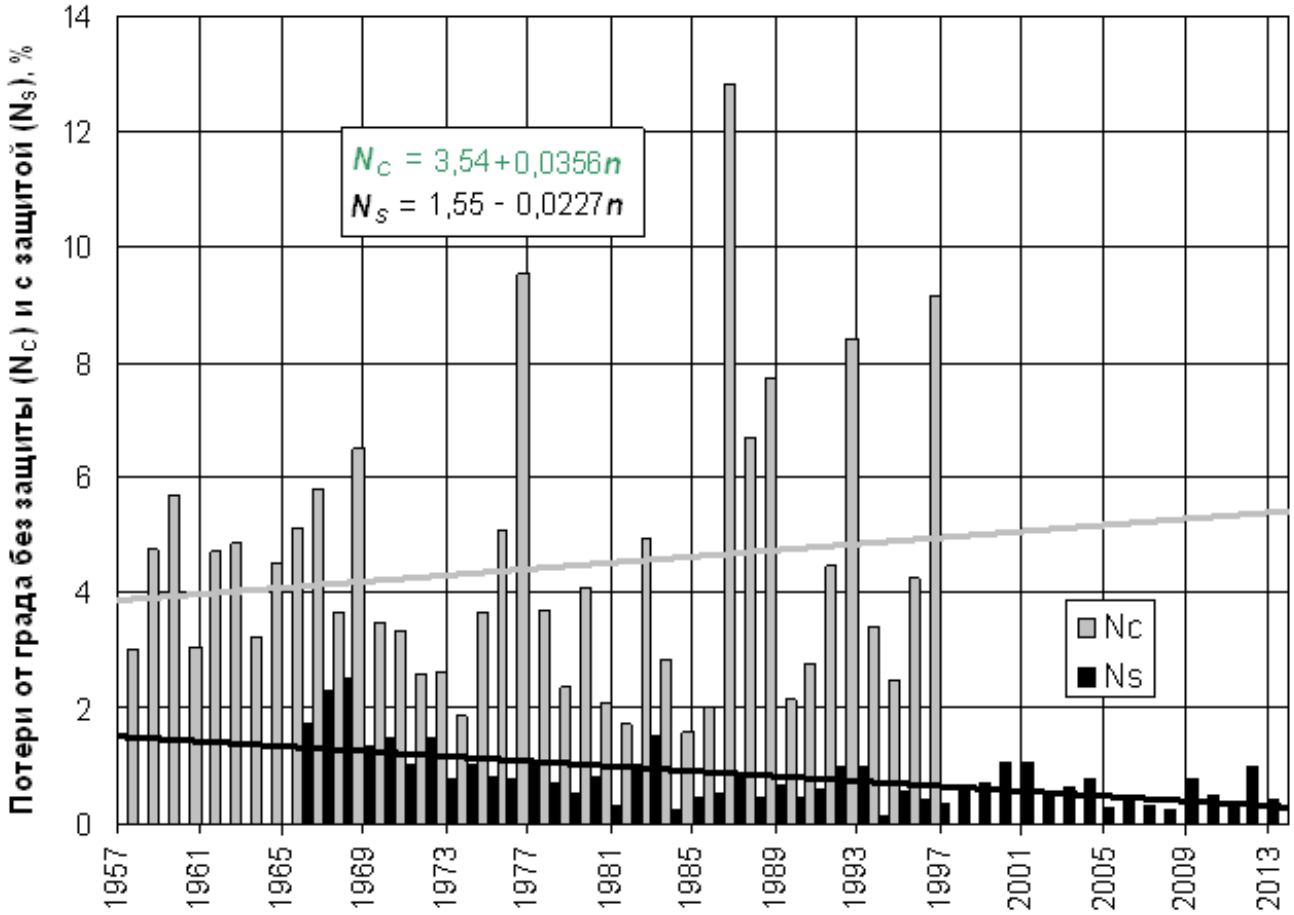


Рис. 17.14 – Средние потери урожая по всей площади ПГЗ в странах СНГ: зеленый цвет – на ЗТ до защиты и на КТ; красный цвет на ЗТ в годы защиты

Показатели противоградовых работ, выполненных ВС Росгидромета в период с 2007 по 2014 г., представлены в 17.5. Из нее следует, что общая площадь ПГЗ в последние годы составляет около 2,52 млн га, из которых 1878,7 га заняты сельхоз культурами. Среднее число дней с АВ составляло 36,7, что коррелирует с числом дней с градом (37,5). Ежегодно в среднем засевалось около 890 ОВ, из которых более половины приходится на Ставропольскую ВС, в которой осуществляется более детальное разделение ОВ (в отличие от других ВС в одной градовой выделяются несколько КЯ, идентифицируемых как ОВ). Годовой расход ПГИ варьировал от 13000 до 16000 «Алазань-6», а на засев одного ОВ – от 7,3 до 32,4, составляя в среднем около 17,1 шт. Физическая эффективность ПГЗ в среднем составляла 87,3%.

Среднегодовые потери сельхозпродукции до ПГЗ составляли $\overline{N}_C$ = 3,87% со среднеквадратичным отклонением σ_C = 2,63 и коэффициентом вариации χ_C = 0,68 (табл. 17.6). В годы ПГЗ они составляли:

– в период 1967 – 2010 гг. $\overline{N}_S$ = 0,76, σ_S = 0,77 и χ_S = 1,01;

– в период 1981 – 2014 гг. $\overline{N}_S$ = 0,59, σ_S = 0,56 и χ_S = 1,06.

Таблица 17.5 – Показатели ПГЗ в ВС Росгидромет с 2007 по 2014 г.

Годы ПГЗ	$S_{ЗТ}$, тыс. га	S_K, тыс. га	Число дней с градом	Число дней с АВ	Число засеянных ОВ	Расход ПГИ, шт.		Физичес. эффектив. ПГЗ, E_f, %
						всего	на 1 ОВ	
Показатели Северо-Кавказской ВС								
2007	801,4	530,1	26	26	152	2838	18,7	95,8
2008	801,4	530,1	30	31	112	1797	16,0	90,8
2009	801,4	530,1	38	35	160	2142	13,4	96,2
2010	801,4	530,1	39	34	145	1420	9,8	98,1
2011	801,4	530,1	40	39	133	1543	11,6	95,2
2012	801,4	530,1	34	22	109	1240	11,4	64,0
2013	801,4	530,1	33	31	87	1196	13,7	96,1
2014	801,4	530,1	44	23	80	850	10,6	96,2
Среднее	801,4	530,1	35,5	30,1	122	1628	13,3	91,6
Показатели Краснодарской ВС								
2007	830	678,7	27	33	239	6464	27,0	95,7
2008	880	688,7	18	37	233	4503	19,3	88,3
2009	880	688,7	23	40	256	6377	24,9	45,3
2010	880	688,7	28	38	256	5596	21,9	78,0
2011	880	688,7	24	32	201	6087	30,3	81,6
2012	880	688,7	31	51	283	8094	28,6	61,1
2013	880	688,7	28	28	221	7159	32,4	65,8
2014	880	688,7	29	38	177	5698	32,2	76,8
Среднее	880	688,7	26	37,1	233	6247	26,8	74,1
Показатели Ставропольской ВС								
2007	680	540	39	31	447	5371	12,0	99,0
2008	740	582	42	47	614	6843	11,1	99,4
2009	740	582	43	49	572	6313	11,0	95,6
2010	740	584	46	38	398	4119	10,3	90,0
2011	839	660	54	46	636	4668	7,3	100
2012	839	660	61	45	688	6850	10,0	92,1
2013	839	660	64	45	584	7642	13,1	98,3
2014	839	660	59	59	345	5787	16,8	96,2
Среднее	839	660	51	45	535,5	5949	11,1	96,3
Среднее по всем ВС			37,5	37,4	296,8	4608	17,1	87,3

Эти различия стандартных отклонений σ_S, σ_C и коэффициентов вариации χ_S, χ_S означают, что засев привел к изменению статистического ряда данных о потерях от града и, в частности к многократному уменьшению этих потерь во всех регионах ПГЗ и увеличению коэффициента вариации потерь χ_S в 1,1 ÷ 2,8 раз. Особенно значимое увеличение χ_S наблюдается в регионах с высокой эффективностью ПГЗ. В Армении, Украине, Узбекистане, Таджикистане, где наряду с близкими к нулю потерями в отдельные годы отмечаются пропуски серьезных градобитий.

В странах СНГ в целом средняя эффективность защиты, как видно из рисунков 17.14 и 17.15 повышалась по мере совершенствования применяемой техники и технологии. В период 1967 – 2010 гг. средняя эффективность составила 84%, в период 1981 – 2014 гг. – 87%, а в ВС Росгидромета в период с 2007 по 2014 г. – 87,3%.

В провинции Мендоса Аргентины, которая представляет собой один из самых градоопасных регионов мира, в период 1985 – 1994 гг., когда технология ПГЗ была не полностью реализована из-за некомплектности системы ПГЗ, перерывов в защите и ошибок персонала, средняя эффективность ПГЗ составила 70%. После автоматизации и доведения системы ПГЗ до кондиции под руководством российских специалистов в период 1995 – 1998 гг. достигнута эффективность 90% (десятикратное сокращение потерь от града), несмотря на то, что градоопасность региона в эти годы была, в среднем, в 2 раза выше нормы. Среднее сокращение потерь от града за весь период защиты в Аргентине составило 79%.

В провинции Санта Каталина Бразилии, для которой характерна меньшая градоопасность, технология воздействия грубо нарушалась, и в результате 7-летней защиты, получено среднее сокращение потерь от града на всего на 25%.

Результаты оценки физической эффективности ПГЗ в Российской Федерации представлены на рисунке 17.15, из которого следует, что эффективность ПГЗ повышалась по мере совершенствования технологии и технических средств. Средняя эффективность ПГЗ в Российской Федерации в последние 20 лет варьирует в пределах от 72 до 96% при среднем значении около 87%. Из рисунка 17.15 следует также, что эффективность ПГЗ снижалась в годы с аномально высокой (1983 г.) и повышенной градоопасностью (1992 и 1993 г.).

Для сравнения можно отметить, что по опубликованным данным в Болгарии потери от града сокращены на 75% [46], в Сербии [47], Хорватии [48] и Словении [49] – на 74 – 78%, а Китае в период 1995 – 1998 гг. на 71,6% [50].

Таблица 17.6 – Статистические характеристики и результаты оценки эффективности ПГЗ в Российской Федерации и странах СНГ в период с 1981 по 2014 год

Регион защиты	Период наблюдений		Число лет наблюдений		Площадь ЗТ (1989 г.) S, км^2	Среднегодовые потери урожая, %		Среднеквадратичное отклонение		Коэффициент вариации χ		$\frac{\sigma_S}{\sigma_C}$	Физическая эффективность E_f, %	Экзамен на t-test
	до ПГЗ	в период ПГЗ	до защиты n_C	в период защиты n_S		до защиты $\overline{N}_C$	в период защиты $\overline{N}_S$	до защиты σ_C	в период защиты σ_S	до защиты $\sigma_C / \overline{N}_C$	в период защиты $\sigma_S / \overline{N}_S$			
Азербайджан	1961- 66	**1981-1990**	6	**10**	13 300	3,45	**0,27**	1,5	**0,16**	0,43	**0,59**	0,11	**92,2**	+
Армения	1960 - 65	**1981-1991**	6	**11**	10 030	4,33	**0,22**	2,49	**0,26**	0,58	**1,18**	0,10	**94,9**	+
Грузия	1990 - 97	**1981-1989**	8	**9**	13 500	5,03	**1,52**	3,91	**1,40**	0,77	**0,92**	0,36	**69,8**	+
Краснодарский край	1960 - 66	**1981-2014**	7	**24**	7 706	6,27	**1,24**	4,69	**1,15**	0,75	**0,93**	0,24	**80,0**	+
Крым	1952 - 69	**1981-2009**	16	**29**	5 010	2,48	**0,16**	1,68	**0,19**	0,75	**1,20**	0,11	**93,0**	+
Одесская обл.	1968 - 80	**1981-1994**	13	**14**	4 015	4,36	**0,30**	3,05	**0,51**	0,70	**1,70**	0,17	**93,1**	+
Молдова	1962 - 71	**1981-2014**	10	**24**	24 300	3,13	**0,25**	1,61	**0,22**	0,51	**0,88**	0,14	**92,0**	+
Северный Кавказ	1962 - 66	**1981-2014**	5	**24**	11 450	6,25	**1,58**	1,41	**1,11**	0,23	**0,70**	0,78	**75,0**	+
Ставропольский край	1962-1993	**1995-2014**	32	**24**	5 900	3,31	**0,41**	2,88	**0,55**	0,87	**1,33**	0,19	**87,0**	+
Таджикистан	1957- 66	**1981-2014**	10	**24**	7 000	3,84	**0,30**	2,43	**0,34**	0,63	**1,13**	0,14	**92,1**	+
Узбекистан	1959 - 68	**1981-2014**	10	**24**	8 600	5,96	**0,26**	3,26	**0,28**	0,56	**1,08**	0,09	**96,0**	+
Среднее:						3,87	**0,59**	2,63	**0,56**	0,68	**1,06**	0,22	**87,7**	+

Примечание: В Краснодарской, Северо-Кавказской и Крымской ВС защита не осуществлялась в 1997 г., в Молдавской ВС в 2000 г.

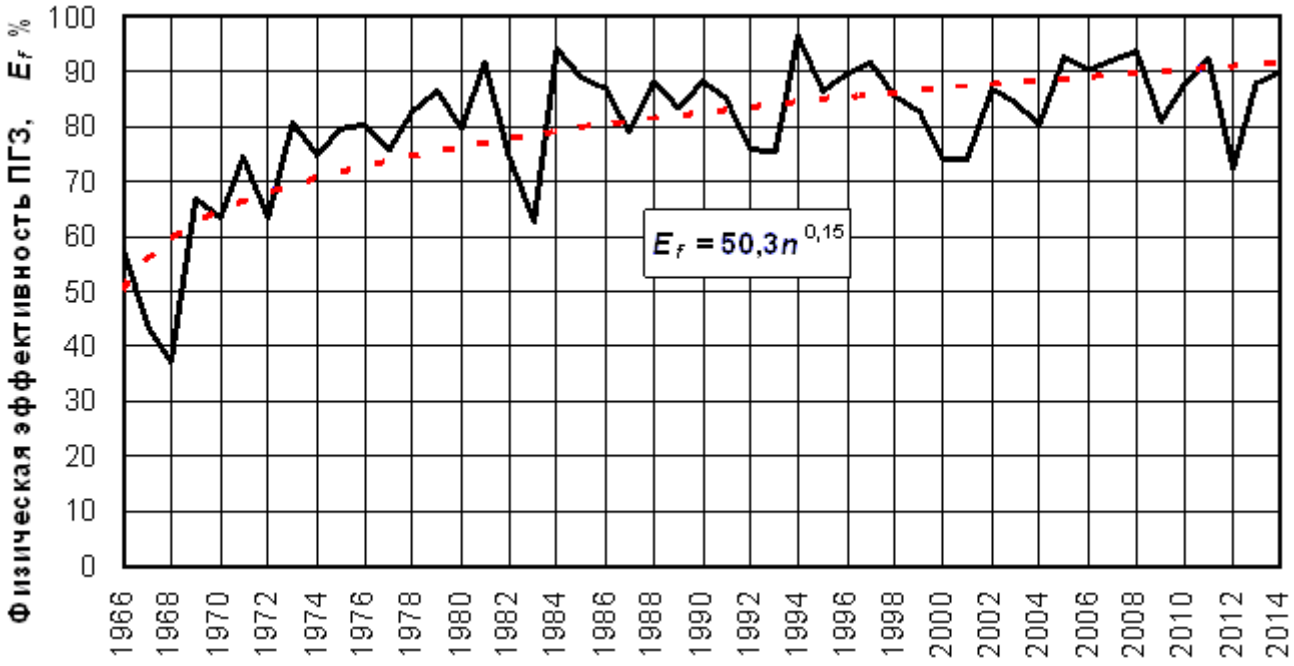


Рис. 17.15 – Временной ход физической эффективности ПГЗ в Российской Федерации

17.6.7 ***Окупаемость затрат*** на реализацию российской технологии ПГЗ варьирует в зависимости от градоопасности территории и ценности защищаемых сельхозкультур в пределах от 3 до 11 раз. В среднем экономический эффект противоградовых работ, проведенных ВС Росгидромета в 2003 – 2013 гг., превысил затраты примерно в 7 раз (рис. 17.16) при себестоимости ПГЗ в 2014 ш. около 184 руб./га.

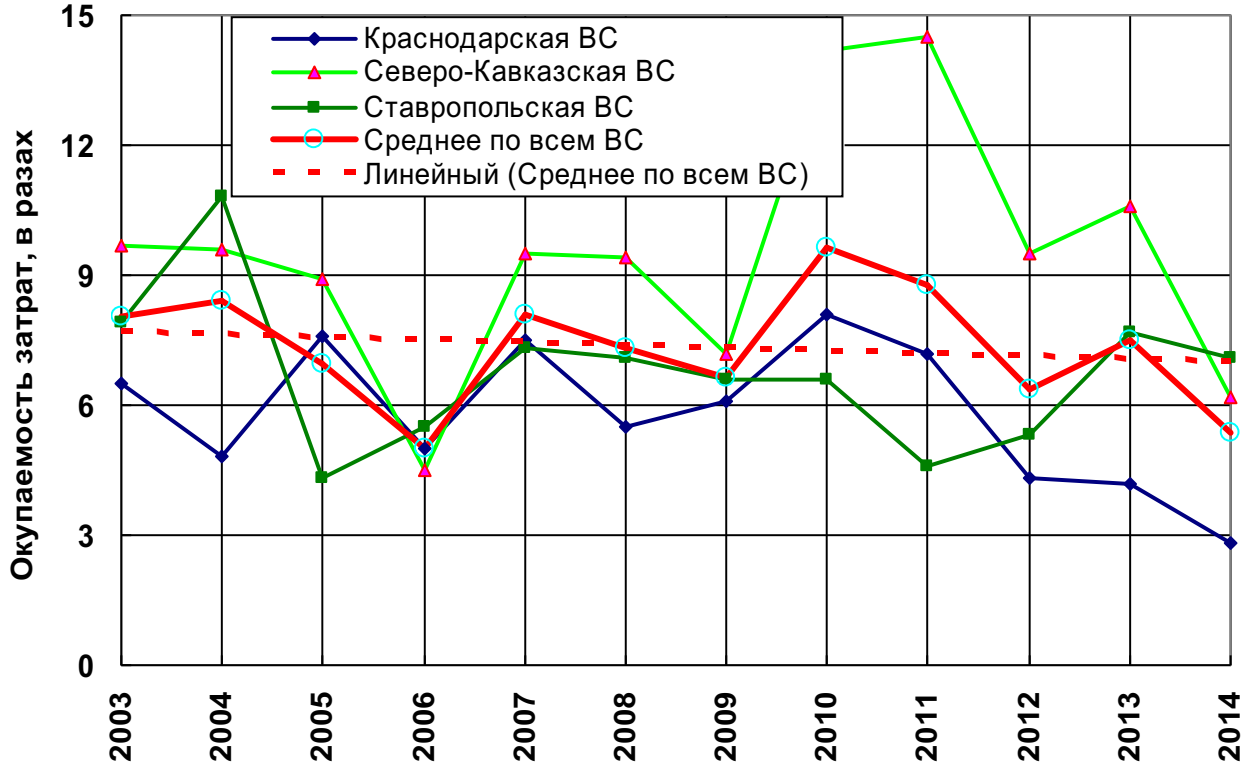


Рис. 17.16 – Окупаемость затрат на ПГЗ на Северном Кавказе

17.6.8 ***Плотность распределения величины эффективности ПГЗ*** и вероятности получения эффективности большей или меньшей заданной величины, рассчитанные *bootstrap*-методом, для суммарных данных по всем ВС в период 1981 – 2010 гг. приведены на рисунке 17.17.

Из рисунка 17.17 следует, что в целом по всем регионам ПГЗ практически исключается вероятность нулевого результата ПГЗ. Максимум повторяемости эффективности $P(E_f)$ в большинстве регионов выше 80%, исключение составляют Грузинская ВС и Северо-Кавказская ВС (75%).

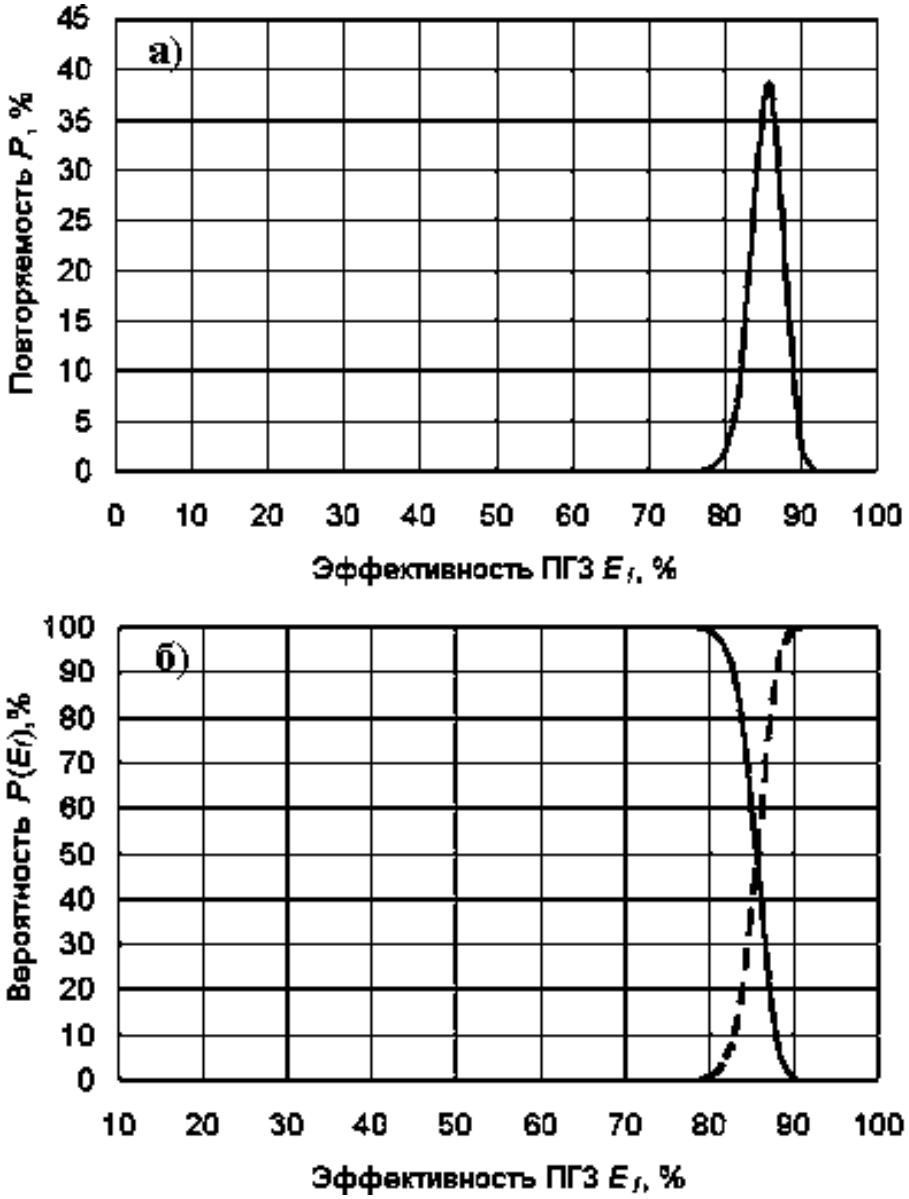


Рис. 17.17 – Распределение: а) плотности вероятности P получения физической эффективности E_f на сети ПГЗ стран СНГ в период 1981 – 2010 г.; б) вероятности получения эффекта больше $P(E_f > -X)$ и меньше $P(E_f < -X)$ заданного [1]

17.6.9 ***Оценка доверительного интервала*** достигнутого уменьшения потерь от града проведена *bootstrap*-методом (при $b = 10^6$). Результаты оценки приведены на рисунке 17.18 в таблице 17.7, из которой следует, что в период 1981 – 2010 гг. физическая эффективность ПГЗ на

уровне значимости α = 0,05 и уровне доверия γ = 0,95 в среднем по всем регионам составляет 82%, а на уровне доверия γ = 0,7 $\overline{E}_f$ = 84,5%. Это означает, что на уровне техники и технологии периода 1981 – 2010 гг. в 70% сезонов эффективность ПГЗ ≥ 84,5%, а в 95% сезонов ≥ 82%.

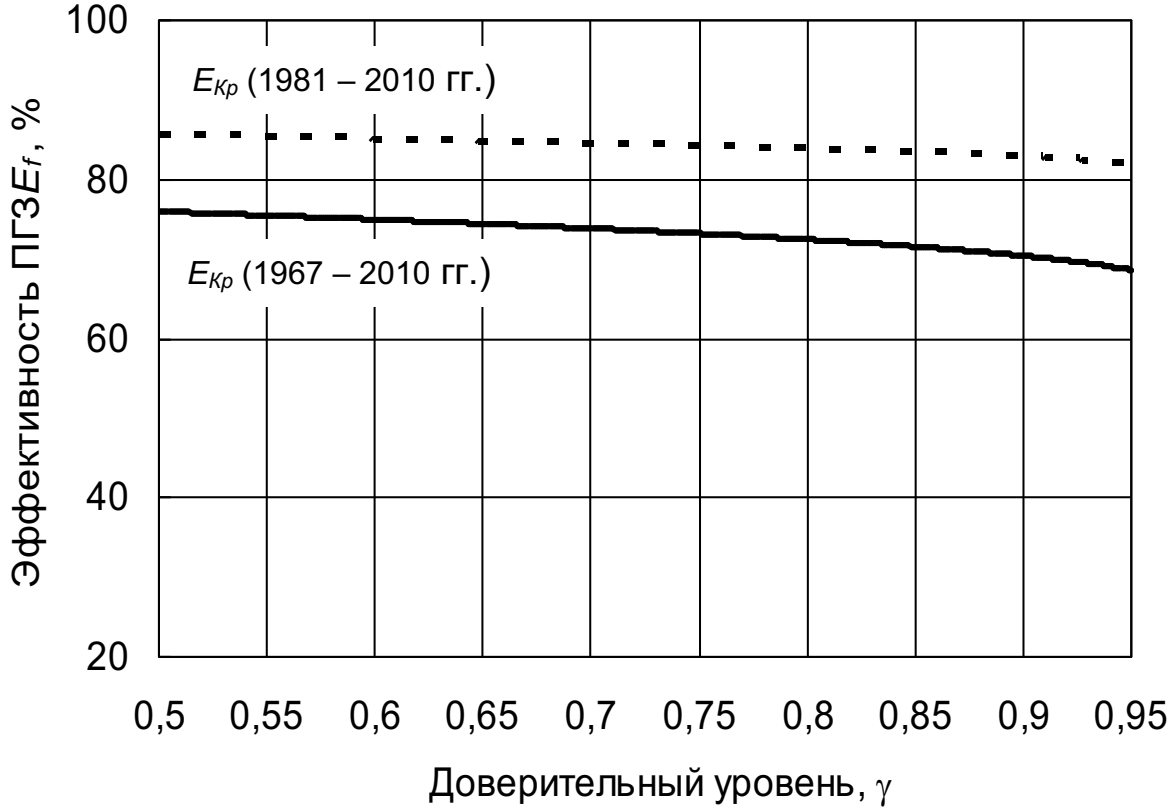


Рис. 17.18 – Верхняя граница доверительного интервала эффекта ПГЗ в СНГ в E_f в период 1967 – 2010 гг. (сплошная) и в период 1981 – 2010 гг. (пунктир)

За весь период защиты (1967 – 2010 гг.) (табл. 17.7*а*) на уровне доверия γ = 0,95 по всем СНГ $\overline{E}_f$ = 68,6%, а на уровне доверия γ = 0,7 $\overline{E}_f$ = 73,8%. Следовательно, и в этом случае достигнутые эффекты ПГЗ статистически значимы на уровне α = 0,05 и уровне доверия до γ = 0,95.

17.6.10 ***Оценка достаточности длины рядов наблюдений*** до защиты и в годы защиты для получения статистически значимого результата проведена методом *t*-теста на уровне статистической значимости α = 0,05, с доверительной вероятностью γ = 0,95. Оценка показала, что при наблюдаемой временной изменчивости потерь от града до защиты и в годы защиты ($\sigma_C / \overline{N}_C$ и σ_S/σ_C) и имеющейся длине рядов наблюдений (n_C, n_S) значение E_{Kp} для разных регионов ПГЗ варьирует в пределах от 18 до 35%. Фактическая эффективность ПГЗ во всех регионах превышает 75%, кроме Бразилии.

Таблица 17.7 – Доверительный интервал (-1, $\hat{E}_\gamma$) для эффекта ПГЗ в разных регионах на уровне значимости α = 0,05 и уровне доверия γ:

а) *в период 1967 – 2010 гг.*

Регион защиты	Величина -$\hat{E}_\gamma$ при уровне доверия γ					
	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95
Азербайджан	93,5	93,2	92,8	92,4	91,8	90,9
Армения	71,5	69,9	68,0	65,8	62,7	57,7
Грузия	70,3	68,8	66,9	64,7	61,5	56,3
Северный Кавказ	67,5	66,8	66,0	65,1	63,8	61,9
Краснодарский край	76,2	74,9	73,4	71,5	68,7	63,7
Крым	92,1	91,7	91,4	90,9	90,3	89,3
Одесская область	91,4	90,8	90,0	89,1	87,9	85,9
Молдова	86,1	85,6	84,9	84,3	83,3	81,7
Таджикистан	65,3	63,5	61,2	58,5	54,7	48,2
Узбекистан	93,4	93,1	92,8	92,5	92,0	91,3
Ставропольский край	84,9	84,1	83,1	81,8	80,2	77,6
В среднем по всем ВС	73,8	73,2	72,5	71,6	70,4	68,6

б) *в период 1981 – 2010 гг.*

Азербайджан	92,1	91,7	91,3	90,8	90,2	89,1
Армения	93,6	93,3	92,8	92,2	91,4	90,1
Грузия	64,3	62,0	59,3	56,0	51,3	43,6
Северный Кавказ	72,3	71,7	70,9	70,0	68,8	67,0
Краснодарский край	76,0	74,6	73,0	71,0	68,1	63,1
Крым	91,8	91,4	91,0	90,5	89,8	88,6
Одесская область	91,4	90,8	90,0	89,1	87,9	85,9
Молдова	90,7	90,3	89,9	89,3	88,6	87,4
Таджикистан	88,4	87,7	86,9	86,0	84,7	82,6
Узбекистан	94,9	94,7	94,4	94,2	93,8	93,2
Ставропольский край	85,0	84,1	83,1	81,9	80,2	77,6
В среднем по всем ВС	84,5	84,2	83,8	83,4	82,8	82,0
Аргентина	67,1	66,1	64,9	63,4	61,5	58,5

Таким образом, фактическая эффективность ПГЗ превышает критерий *t*-теста (т.е. $E_f > E_{Kp}$). Следовательно, экзамен на *t*-тест успешно выдержан по всем регионам ПГЗ и длина статистических рядов данных (n_c и n_s) достаточна для утверждения, что сокращение потерь от града во всех регионах, кроме Бразилии, является результатом защиты, а не их природной изменчивости. Результат ПГЗ в Бразилии не является статистически значимым, так как $E_f < E_K$, и может быть обусловлен природной изменчивостью потерь от града.

18 ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ

Технологии воздействия на окружающую среду, в том числе и технология защиты от града должны быть экологически безопасными, и воздействие на одно атмосферное явление (процесс) не должно приводить к негативным изменениям других явлений и процессов. Поэтому одним из важных аспектов оценки проектов ПГЗ является оценка уровней вредного физического воздействия (ВФВ) на природную среду, побочных эффектов и экологической безопасности применяемых технологий.

18.1 Основные факторы ВФВ на окружающую среду при проведении ПГЗ

18.1.1 К основным факторам ВФВ на окружающую среду при реализации российской ракетной технологии ПГЗ [1] относятся:

– загрязнение атмосферного воздуха, почвы и воды в открытых водоемах продуктами сгорания пиротехнических составов используемого реагента, зарядов двигателей и шашек взрывчатых веществ (ВВ) системы самоликвидации корпусов противоградовых ракет;

– загрязнение почвы осколками корпусов противоградовых ракет;

– электромагнитное излучение радиолокаторов и средств радиосвязи, применяемых для обнаружения ОВ и управления АВ;

– непреднамеренное изменение режима осадков (уменьшение или увеличение их количества) на защищаемой (ЗТ) и прилегающих (ПТ) территориях.

18.1.2 Продукты сгорания пиротехнического состава реагента и заряда двигателя, вносимые в атмосферу при засеве градовых облаков, частично вымываются осадками и попадают в почву и открытые водоемы (около 80%), а частично (около 20%) остаются в атмосфере, распространяются воздушными потоками и могут быть вынесены за пределы ЗТ (преимущественно на восток и северо-восток).

18.1.3 Радиолокаторы «МРЛ-5» и УКВ радиостанции, применяемые в системе ПГЗ, работают на частотах, выделенных для этих целей государственной инспекцией электросвязи. Расчет санитарно-защитной зоны и мероприятия по защите населения от вредного воздействия СВЧ электромагнитного излучения осуществляются в соответствии с методическими указаниями по контролю и нормализации электромагнитной обстановки, создаваемой метеорологическими радиолокаторами [2]. С целью уменьшения плотности потока мощности излучения должны осуществляться организационно-технические

мероприятия по выбору позиций и другие меры, предусмотренные инструкциями по эксплуатации источников излучения:

– антенны МРЛ и радиостанций размещаются выше уровня жилых и рабочих строений и на расстояниях от них, превышающих размеры санитарно-защитных зон;

– систематически осуществляются меры по контролю уровня плотности потока СВЧ и УКВ излучения на рабочих местах и окружающих объектах и обеспечению санитарно допустимых норм – не более 5 мкВт/см^2 при предельно допустимом (в России) уровне 25 мкВт/см^2.

18.1.4 Во избежание недопустимого уровня акустического воздействия на жителей близлежащих населенных пунктов ракетные пункты воздействия ПГЗ размещаются не ближе 100 м от жилых объектов, что обеспечивает уровень шума при старте ракет не более 55 дБ, разрешенной стандартами Всемирной Организации Здравоохранения.

18.1.5 Применение ракетной технологии ПГЗ не представляет опасности для полетов авиации и жизнедеятельности населения по следующим причинам:

– самолеты не летают через градовые облака, которые являются ОВ;

– инструкция по применению ПГИ строго запрещает их пуск без санкции органов управления авиацией и в направлении городов;

– люди обычно укрываются от ливневого дождя, грозы и града;

– разброс траектории ПГИ составляет [1] не более 1/50 дальности на доверительном уровне 0,95, т.е. при максимальной дальности полета ПГИ 12 км ее отклонение от направления пуска не превышает ± 240 м;

– среднегодовой расход ПГИ с одного ПВ составляет около 100 шт.;

– суточный расход ПГИ одного ракетного пункта не превышает 50 шт.;

– годовое число дней с засевом облаков не превышает 40 дней;

– суммарная продолжительность времени пуска ПГИ с одного ПВ за весь сезон ПГЗ не более 30 минут.

18.1.6 Анализ непреднамеренного влияния ПГЗ на режим осадков, выпадающих на ЗТ и ПТ, показал:

а) на ЗТ количество осадков сокращается на 5 – 15% за счет уменьшения в 1,5 – 2 раза продолжительности и интенсивности ливневых и градовых осадков, но этот эффект частично компенсируется увеличением умеренных и слабых осадков;

б) на подветренной территории (на которую переносится остающаяся в атмосфере часть реагента, внесенного в градовые облака) количество осадков увеличивается на величину от 5 до 15% сезонной нормы.

Эти непреднамеренные эффекты ПГЗ оказывают положительное

влияние на окружающую среду, так как способствует уменьшению эрозии почвы ливневыми осадками на ЗТ и увеличению количества осадков на подветренной территории, которая в регионе Северного Кавказа имеет засушливый климат.

18.1.7 Из вышеизложенного следует, что основным фактором вредного физического воздействия на природную среду при проведении ПГЗ является загрязнение атмосферного воздуха, почвы и воды в открытых водоемах продуктами функционирования ПГИ (газообразные выбросы, осколки и остатки корпусов). Ниже приводятся результаты исследований этих загрязнений, проведенных в регионах с многолетней защитой (Северный Кавказ, Грузия, Молдова).

18.2 Состав и объем вредных веществ, выбрасываемых в окружающую среду

АВ на градовые процессы осуществляется путем внесения кристаллизующего реагента непосредственно в требуемые объемы облачной среды (в области будущего градообразования) с помощью ПГИ типа «Алазань-6», «Алазань-9» и «Ас».

ПГИ семейства «Алазань» состоят из головной части, двигателя, стабилизатора с перьями и системы обеспечения безопасности. Головная часть ракеты «Алазань» снабжена моноблочной, пиротехнической шашкой – генератором кристаллизующих аэрозолей массой 630 г с льдообразующим составом АД-1, содержащим 8% йодистого серебра (AgI). Стартовый и маршевый двигатели снаряжены экологически чистым топливом. Системы самоликвидации корпуса отработавших ПГИ «Алазань-6» и «Алазань-9» содержат, соответственно, 240 и 130 г взрывчатого вещества, обеспечивающего дробление бумажно-бакелитовых корпусов ПГИ на мелкие, безопасные для населения осколки.

ПГИ «Ас» [1] имеет пластиковый корпус, двигатель и систему его дробления без применения ВВ. Генератором кристаллизующих частиц является маршевый двигатель, снаряженный льдообразующим топливом с 2% содержанием AgI, и создающим реактивную тягу на всей траектории полета.

Химический состав вредных веществ в продуктах горения заряда двигателя, пиротехнического состава и шашки самоликвидации ПГИ «Алазань» и «Ас», полученный на основе химического анализа [3], представлен в таблицах 18.1 и 18.2 В этих таблицах используется классификация вредных веществ в соответствии с российским стандартом ГОСТ 12.1.007-76:

1-й класс – вещества чрезвычайно опасные;

2-й класс – вещества высоко опасные;
3-й класс – вещества умеренно опасные;
4-й класс – вещества малоопасные.

Таблица 18.1 – Содержание вредных веществ, выделяемых ПГИ «Алазань-6» и «Алазань-9»

Химическая формула	Класс опасности	Масса выхода вредных веществ с 1 ракеты, г	
В продуктах сгорания пиротехнического состава реагента (50-02-02)			
		Алазань-6	«Алазань-9»
CH_4	2	117,00	74,29
HIO_5	2	18,53	11,77
NH_3	4	0,003	0,00
AgI	2	5,12	3,25
I_2	2	5,60	3,56
CO	4	263,40	167,24
SiO_2	4	33,50	21,27
HCl	2	25,36	16,10
Итого:		468,51	297,47
В продуктах взрыва шашки самоликвидатора ракет			
NH_3	4	0,03	0,02
CO	4	62,15	33,66
Итого:		62,18	33,68
В продуктах сгорания зарядов двигателей ракет			
CO	4	1876,4	938,2
CH_3	4	0,46	0,23
	Итого:	1876,86	938,43
	Всего в ПГИ:	2407,55	1269,58

Таблица 18.2 – Содержание вредных веществ в продуктах сгорания заряда двигателя ПГИ «Ас»

Наименование вредного вещества	Химическая формула	Класс опасности	Масса выхода вредных веществ с 1 ПГИ «Ас», г
Водород	H_2	4	16,56
Йод	I	3	2,79
Йодистый водород	HI	3	91,26
Угарный газ	CO	4	261,94
Углекислый газ	CO_2	4	253,45
Углеродистый азот	N_2C	4	80,28
Йодистое серебро	AgI_K	2	15,77
Медь конденсированная	Cu_K	3	23,32
Окись железа конденсированная	FeO_K	3	1,58
Железо конденсированное	Fe_K	4	23,66
Азот	N_2	4	22,22
Водяной пар	H_2O	4	72,70
		Итого:	865,54

Из таблиц 18.1 и 18.2 следует, что при использовании ПГИ «Алазань» и «Ас» нет выброса вредных веществ 1-го и 3 классов. Поэтому в качестве вредных веществ, вызывающих загрязнение окружающей среды, следует указать вещества 2-го класса опасности: йодистое серебро AgI, йод и йодистую кислоту. При этом основным загрязнителем следует считать AgI, предельный выброс которого не должен превышать ПДК, равных согласно [4]: в воздухе атмосферы 0,5 мкг/м^3; в воде водоемов 0,05 мг/л; в почве 2820 мг/кг.

Как видно из таблиц 18.1 и 18.2, упомянутые ПГИ вносят в атмосферу в основном малоопасные вещества 4-го класса опасности и очень ограниченное количество высоко опасных веществ 2-го класса опасности.

Ракетная технология ПГЗ предусматривает засев развивающихся над ЗТ и вторгающихся на нее четырех категорий ОВ. Среднегодовой расход ракет на засев одного ОВ *i*-й категории представлен в таблице 16.2.

Среднегодовой расход ПГИ на засев всех ОВ зависит от их повторяемости в регионе. В последние годы на Северном Кавказе составляет в среднем около 630 на защиту 100000 га. Средний расход ПГИ может варьировать в зависимости от градоопасности засеваемых ОВ и сезона ПГЗ пределах $\pm$ 2 раза.

18.3 Методика теоретической оценки уровней ВФВ при ПГЗ

Теоретические исследования загрязнения окружающей среды при ракетном засеве облаков проводились [5] путем расчета максимальных концентраций загрязняющих веществ в атмосфере, почве и воде на основе данных о расходе ПГИ и спектрального анализа содержания этих веществ в продуктах сгорания состава реагента с AgI, зарядов двигателей и продуктов взрыва шашки ВВ системы самоликвидации ракет.

Расход ракет в течение сезона неравномерен: максимум в северном полушарии обычно приходится на май – июнь, а в южном полушарии – на декабрь – январь. В отдельные дни с мощными градовыми процессами расходуется до 30% годовой нормы. Поэтому расчет максимально возможных загрязнений природной среды реагентами засева и другими веществами выполнен в предположении мгновенного расхода всей среднегодовой нормы ракет. Кроме того, в расчетах использован расход ракет в провинции Мендоса Аргентины, максимальный по сравнению с расходом ракет во всех остальных регионах применения российской ракетной технологии ПГЗ.

18.3.1 Расчет максимальной объемной концентрации *j*-го загрязняющего вещества K_{Aj} (мкг/м^3), вносимого ***в атмосферу*** в день проведения ПГЗ, при равномерном распределении этого вещества над

территорией, где осуществляется засев ОВ, согласно [3] следует проводить по формуле

$$K_{Aj} = 10^6 \frac{\sum_{i=1}^{n} N_{i\ max} \cdot m_{ij}}{S \cdot H} = 10^3 \frac{\sum_{i=1}^{n} M_{ij}}{S}, \qquad (18.1)$$

где N_{imax} – максимальный расход ПГИ i-го типа за 1 день АВ; m_{ij} – масса j-го загрязняющего вещества, выделяемого одним ПГИ i-го типа, г; S – площадь, над которой осуществляется выброс веществ в атмосферу, включая территорию ЗТ и зоны предварительной обработки ОВ, м^2; H – толщина слоя атмосферы, в котором производится распыление загрязняющих веществ, принятая равной 1000 м; M_{ij} - общая масса j-го загрязняющего вещества, выделяемого при максимальном расходе ракет i-го типа за 1 день с АВ, г.

18.3.2 Расчет максимальных концентраций j-го вещества K_{Bj} (мг/л), которое может накопиться на территории засева ***в воде*** открытых водоемов за один сезон ПГЗ в предположении полного и равномерного осаждения вносимого в атмосферу вещества на поверхность воды открытых водоемов, можно провести по формуле

$$K_{Bj} = \frac{\sum_{i=1}^{n} N_{i\Sigma} \cdot m_{ij}}{S \cdot h_B} = \frac{M_j}{S}, \qquad (18.2)$$

где $N_{i\Sigma}$ – суммарный расход ПГИ i-го типа за сезон ПГЗ; h_B – глубина водоема, принятая равной 1 м; M_j – общая масса j-го вредного вещества, выделяемого ракетами всех типов за сезон ПГЗ, г.

18.3.3 Максимальная концентрация j-го вредного вещества $K_{\Pi j}$ (мг/кг), которое может накопиться ***в почве*** за один сезон ПГЗ, в предположении полного и равномерного осаждения загрязняющих веществ на поверхность почвы, следует рассчитывать по формуле

$$K_{\Pi j} = \frac{\sum_{i=1}^{n} N_{i\Sigma} \cdot m_{ij}}{\rho_\Pi \cdot S \cdot h_\Pi} = 2{,}5 \cdot \frac{M_j}{S}, \qquad (18.3)$$

где ρ_Π – удельная плотность почвы, принятая равной 2 кг/дм^3; h_Π – глубина пахотного слоя земли, принятая равной 0,2 м.

18.3.4 Масса осколков и корпусов ракет K_O (кг/га), которая может накопиться ***в почве*** за один сезон ПГЗ на 1 га защищаемой и прилегающей территории, можно рассчитать по формуле

$$K_O = 10\frac{\sum_{i=1}^{n} N_{i\Sigma} \cdot m_{oi}}{S} = 10\ \frac{M_{oi}}{S}, \qquad (18.4)$$

где m_{oi} – масса осколков корпуса одного ПГИ, г; M_{Oi} – масса осколков или корпусов всех ПГИ, израсходованных на проведение ПГЗ за один сезон, г.

18.3.5 ***Результаты расчетов*** оценки уровней ВФВ по описанной выше методике при засеве облаков ракетами «Алазань-6» и «Ас» представлены в таблице 18.3. Анализ этих результатов показывает, что российская ракетная технология ПГЗ при выполнении всех ее требований является экологически безопасной. Максимально возможные концентрации вредных веществ, которые могут образоваться в воздухе, открытых водоемах и почве даже при единовременном расходе годовой нормы ракет, в 10^2 – 10^6 раз ниже предельно допустимых концентраций этих веществ, составляющих для веществ 2-го класса опасности в воздухе 0,1 ÷ 1,0 мг/м^3, а для веществ 4-го класса опасности – 10 мг/м^3. Эти выбросы значительно ниже выбросов других антропогенных и природных источников загрязнения.

18.3.6 Корпуса ПГИ «Алазань-6» изготовлены из изоляционной бумаги, пропитанной бакелитовым лаком с весовым составом компонентов: бумага – 53%, лак – 47%. Этот материал не токсичен, токсичных соединений не образует и экологически безопасен. Масса осколков корпусов отработавших ПГИ «Алазань», падающих на подстилающую поверхность не превышает за год 0,06 кг/га площади ЗТ, что экологически вполне безопасно.

Пластиковые корпуса ПГИ «Ас» дробятся без применения ВВ после окончания работы двигателя. При этом масса осколков, падающих на ЗТ за один сезон ПГЗ, не превышает 0,01 кг/га. Это значительно меньше выбросов в почву других антропогенных источников и экологически безопасно [5].

18.3.7 Таким образом, по данным теоретических исследований максимальные концентрации реагента AgI, продуктов сгорания зарядов двигателей и пиротехнических составов, осколков корпусов отработавших ракет, накапливаемые в почве, воде и атмосфере, при применении российской ракетной технологии ПГЗ, в 10^2 – 10^6 раз меньше предельно допустимых концентраций (даже в самых градоопасных регионах) и экологической опасности не представляют.

Таблица 18.3 – Количество выбросов загрязняющих веществ в окружающую среду при проведении ПГЗ с применением ПГИ «Алазань-6» на примере Краснодарской ВС, где отмечался максимальный расход ПГИ

Вещество	Класс опасности	Максимально возможный выброс загрязняющих веществ			Максимальная концентрация веществ, создаваемая при условии мгновенного расхода максимального годового расхода ПГИ			Предельно-допустимая концентрация ПДК		
		с одного ПГИ «Алазань-6», m_{ij}, г	в день максимума расхода ПГИ (1200 шт.) μ_j, кг/день	за сезон ПГЗ M_j, кг/год	в атмосфере K_{Aj}, мкг/м^3	в воде открытых водоемов K_{Bj}, мг/л	в почве $K_{Пj}$, мг/кг	в атмосфере, мкг/м^3	в воде открытых водоемов, мг/л	в почве, мг/кг
Аммиак, NH_3	4	0.033	0,0396	0,27	$2{,}67\cdot10^{-5}$	$2{,}67\cdot10^{-8}$	$2{,}67\cdot10^{-7}$	20,0	0,05	-
Аэросил, SiO_2	4	33,50	40,2	271,1	$2{,}71\cdot10^{-2}$	$2{,}71\cdot10^{-5}$	$271\cdot10^{-4}$	1,0	-	-
Йод, J_2	2	5,60	6,72	45,33	$4{,}53\cdot10^{-3}$	$4{,}53\cdot10^{-6}$	$4{,}53\cdot10^{-5}$	1,0	-	-
Йодистая кислота, HIO_5	2	18,33	21.996	148,36	$1{,}48\cdot10^{-2}$	$1{,}48\cdot10^{-5}$	$148\cdot10^{-4}$	2,0	-	-
Иодид серебра, AgI	2	5.12	6,144	41,44	$4{,}14\cdot10^{-3}$	$4{,}14\cdot10^{-6}$	$4{,}14\cdot10^{-5}$	0,5	0.05	2,82
Метан, CH_4	4	0,46	0,552	3,72	$3{,}72\cdot10^{-4}$	$3{,}72\cdot10^{-7}$	$3{,}72\cdot10^{-6}$	10,0	-	-
Угарный газ, CO	4	2201,95	2642,34	17822	1,78	$1{,}78\cdot10^{3}$	$1{,}78\cdot10^{-2}$	5,0	-	3,6
Углеводород, CH_3	2	117	140,4	947	$9{,}47\cdot10^{-2}$	$9{,}47\cdot10^{5}$	$947\cdot10^{-4}$	10,0	-	-
Хлористый водород, HCl	2	25,36	30,432	205,3	$2{,}05\cdot10^{-2}$	$2{,}05\cdot10^{-5}$	$2{,}05\cdot10^{-4}$	1,0	300	2,35
Осколки корпусов	-	4700	5640	38042	$2{,}67\cdot10^{-5}$	-	0,04 кг/га	-	-	-

18.4 Экспериментальная оценка уровней ВФВ

18.4.1 Экспериментальный контроль и оценку загрязнения природной среды при проведении ПГЗ осуществляется по содержанию в воздухе атмосферы, почве и воде открытых водоемов токсичных веществ, выделяющихся при использовании ПГИ (в первую очередь, AgI). Для этого осуществляется взятие проб в реперных точках маршрута обследования:

– атмосферного воздуха с борта летательного аппарата на высотах засева от 3 до 5 км и у поверхности земли над ЗТ и с ее подветренной стороны до удаления 100 км;

– жидких и твердых осадков;

– воды из поверхностного слоя открытых водоемов (озера, пруды, водохранилища) до глубины 1 м;

сухих выпадений на поверхности земли.

Реперные точки для взятия проб сухих выпадений, осадков, воды из водоемов и почвы следует выбирать на ЗТ и ее подветренной стороне на расстоянии от 10 до 20 км друг от друга: в 3 ÷ 5 точках на возвышенностях, в низинах, на равнинной части ЗТ и на подветренной стороне.

Маршруты полетов летательного аппарата следует выбирать таким образом, чтобы 1 маршрут пересекал ЗТ по направлению ведущего потока от наветренной границы до подветренной, а второй маршрут пересекал центральную часть ЗТ поперек ведущего потока.

Пробы воздуха на высотах следует брать сразу же после проведения АВ; пробы осадков и сухих выпадений – в течение нескольких часов, включая период АВ и после него; пробы воды и почвы берутся 1 раз в месяц в течение сезона ПГЗ.

Химический анализ проб воздуха, воды и почвы осуществляют стандартными методами, применяемыми в Росгидромете. Результаты химического анализа проб сводят в таблицу, после чего осуществляют сравнительный анализ уровня содержания йодистого серебра в воздухе, осадках, воде и почве с наветренной стороны от ЗТ, над ЗТ и с подветренной стороны от нее.

18.4.2 ***Экспериментальные исследования*** содержания и накопления применяемых реагентов (AgI, PbI_2) в атмосфере, воде и почве проводились в районах многолетних работ на Северном Кавказе, Молдавии и Грузии [6 – 9] путем забора проб воздуха, осадков, воды открытых водоемов и почвы на открытых и закрытых старыми строениями участках почвы и последующего химического анализа.

Исследования на Северном Кавказе, проведенные в 1964 – 1973 гг. [6]), показали:

– выпадение AgI и PbI_2 имеет пятнистый характер с вариациями их концентрации в осадках в пределах от 0,002 до 2,6 мкг/л, а в градовых осадках до 31 мкг/л;

– плотность выпадения серебра в осадках составляет 0,01 – 29,4 мкг/м^2;

– среднее по сезону ПГЗ содержание серебра в воздухе над ЗТ в 1986 – 89 гг. составляло от $6{,}4 \cdot 10^{-5}$ до $8{,}3 \cdot 10^{-5}$ мкг/м^3.

Исследования в Молдавии, проведенные в 1980 – 1983 гг. [7], дали следующие результаты:

– до 1980 г. при применении ракет «Облако» с PbI_2 средняя в сезоне концентрация свинца в воздухе над ЗТ составляла 1,16 – 1,61 мкг/м^3, превышая ПДК в 4 – 5 раз;

– после перехода в 1984 г. на ракеты с AgI содержание свинца снизилось до 0,08 – 0,1 мкг/м^3 (что в 3 раза меньше ПДК), а содержание серебра в воздухе над ЗТ составляло 0,009 – 0,012 мкг/м^3, что в 1000 раз меньше ПДК [7];

– концентрация серебра в открытых водоемах на ЗТ в 1983 – 1989 гг. составляла 1,62 – 5,37 мкг/л, что на много меньше ПДК, равного 0,05 мг/л.

Исследования в Алазанской долине, проведенные в 1965 – 1977 гг. [8, 9], показали следующее:

– в дни с АВ содержание йода в осадках увеличивается;

– вертикальное распределение PbI_2 в почвах Кахетии свидетельствует о том, что разница в содержании свинца в поверхностных и нижележащих слоях почвы составляет не более 1 мг/кг, что находится в пределах ошибки измерений;

– содержание PbI_2 в почвах Алазанской долины и других районов Грузии, где не проводились противоградовые работы, практически не различаются между собой и от среднего содержания в почвах других регионов мира;

– содержание реагентов засева в пробах почвы, взятых на ЗТ и под зданиями, построенными до проведения АВ, не выявило изменений;

– содержание природного йода в слое почвы 10 см (в зоне активного обмена) составляет 500 – 100 мг/кг, что в 1000 раз превышает уровень вноса за счет засева градовых облаков;

– содержание йода в почвах Кахетии (на ЗТ) до и в период ПГЗ практически не различается, и в 2 раза ниже, чем в почвах других

регионов, что объясняется низким содержанием в почвах Кахетии гумуса, являющегося концентратором йода.

Результаты этих экспериментальных исследований уровней загрязнения воздуха, осадков и почвы согласуются с данными теоретических расчетов, приведенных выше.

18.5 Заключение об экологической чистоте технологии ПГЗ

18.5.1 На основе результатов экспериментальных и теоретических исследований, можно заключить, что максимальная концентрация наиболее опасного из вносимых загрязняющих веществ AgI в районах многолетнего проведения ПГЗ составляет:

– в воздухе атмосферы от 0,04 до 0,06 мкг/м^3;

– в воде открытых водоемов менее 0,000013 мг/л при допустимом стандартом ВОЗ значении 0,05 мг/л);

– в почве менее $3{,}3 \cdot 10^{-5}$ мг/кг.

Следовательно, уровень загрязнения окружающей среды при проведении ПГЗ значительно ниже ПДК [4], хотя могут быть локальные выпадения повышенной концентрации AgI и PbI_2 (последний в связи с этим с 1986 г. не применяется).

18.5.2 Уровень вредного физического воздействия ПГЗ на окружающую среду при использовании российской ракетной технологии ПГЗ значительно ниже ПДК с учетом факторов загрязнения, электромагнитного излучения, шума и других побочных эффектов. Это дает основание, сделать вывод, что российская ракетная технология ПГЗ является экологически безопасной.

18.5.3 Можно также с уверенностью сказать, что применение авиационной технологии засева облаков также экологически безопасно, так как масса вносимого в атмосферу реагента меньше чем при ракетном засеве. Хуже обстоит в случае применения наземных генераторов AgI. При их длительной работе в фиксированных точках могут формироваться такие концентрации AgI на земной поверхности вокруг генератора, при которых возможны гибель растений, полезных и вредных микробов и процессы их мутации.

18.5.4 Оценку вредного физического воздействия методов АВ на облачные и склоновые процессы следует осуществлять при изменении технологии и применении других технических средств воздействия в соответствии с РД 52.11.679.

19 ПОРЯДОК ОТЧЕТНОСТИ О ПРОВЕДЕНИИ ПГЗ

По результатам проведения ПГЗ составляются оперативные и итоговые отчеты по унифицированным формам в соответствии с РД 52.37.732, определяющего задачи и порядок отчетности, формы отчетов, сроки их представления, общие требования, структуру и содержание форм отчетности.

19.1 Формы отчетов

Формы отчетов о проведении ПГЗ делят на оперативные и итоговые.

Задачей оперативной отчетности является представление информации в Росгидромет, научно-методический центр и заказчику о начале и завершении ПГЗ, о ходе ПГЗ (количестве засеянных ОВ, расходе ПГИ, выпадении града на ЗТ и ПТ, площади повреждений, аномальном функционировании ПГИ), которая обеспечивает возможность своевременного оказания оперативной помощи в обеспечении ПГИ, расследовании случаев аномального функционирования ПГИ, причин выпадения града на ЗТ и принятии мер по их устранению.

Задачей итоговой отчетности является представление исчерпывающей информации о производственной деятельности ВС за отчетный год с указанием объема работ, источников и объема финансирования, особенностей противоградового сезона, основных результатов ПГЗ, характеристики деятельности всех подразделений ВС. К отчету могут прилагаться справки и другие документы, характеризующие оценку деятельности ВС Заказчиком.

19.2 Оперативная отчетность в течение сезона ПГЗ

19.2.1 *Оперативную отчетность* следует представлять по типовым формам в соответствии с приложением А в РД 52.37.732, включающим:

– телеграмму о готовности ВС к началу сезона ПГЗ;
– телеграмму о проведенном АВ;
– телеграмму-уточнение результатов АВ;
– телеграмму об аномальном функционировании ПГИ;
– описание опыта по АВ в соответствии с РД 52.37.731;
– месячные справки о результатах ПГЗ;
– телеграмму об окончании сезона ПГЗ.

Оперативную отчетность представляет начальник ВС (или его заместитель) в адреса УСНП Росгидромета, научно-методического руководителя ВС (ОАВ ФГБУ «ВГИ») и Заказчика.

19.2.2 *Телеграмма о готовности ВС к началу сезона ПГЗ* представляется перед началом сезона ПГЗ с указанием следующих сведений:

– наименование ВС;
– количество ВО;
– количество КП и ПВ;
– общая и культивируемая площади ЗТ;
– дата начала ПГЗ по договору и фактическая;
– запас ПГИ на начало сезона.

19.2.3 *Телеграмма о проведенном АВ* представляется на фирменном бланке ВС в день с АВ или следующий день и должна содержать:

– дату и время АВ;
– тип и интенсивность градового процесса;
– количество засеянных ОВ по категориям;
– расход ПГИ по типам;
– имеющиеся сведения о выпадении града на ЗТ и ПТ с краткой характеристикой (размер града, интенсивность, сопутствующие явления) и ущербе (пострадавшие районы и хозяйства, площадь и степень повреждений, перечень пострадавших сельхозкультур);
– факторы, осложняющие АВ, причины выпадения града на ЗТ.

19.2.4 В случае невозможности оперативного получения данных о площади и степени повреждений сельхозкультур на ЗТ и ПТ в телеграмме о проведенном АВ пишут «Данные об ущербе уточняются», и в течение ближайших 3 ÷5 дней дают *телеграмму–уточнение результатов АВ* в соответствии с РД 52.37.672.

19.2.5 *Телеграмма об аномальном функционировании ПГИ* составляется в соответствии с РД 52.37.672 и подается в день выявления аномального функционирования ПГИ со следующей информацией:

– наименование ВС и ВО;
– дата и вид аномального функционирования;
– тип ПГИ, номер партии и заводской номер ПГИ;
– причина аномального срабатывания;
– последствия аномального функционирования;
– предпринимаемые меры.

19.2.6 *Отчет о проведенном АВ* составляют в соответствии с РД 52.37.731 (приложение Ж), включающим:

– титульный лист за подписью руководителя АВ и утвержденный командиром ВО, с указанием даты, времени и номера АВ, типа градового процесса, количества засеянных ОВ по категориям, количества израсходованных ПГИ, оценки результата АВ;

– таблицу стрельб;

– таблицу взаимодействия с РЦ УВД и запретов пуска ПГИ;

– фрагменты засева;

– радиолокационную карту кинетической энергии града;

– прогноз града с данными стратификации температуры, влажности, направления и скорости ветра на стандартных высотах.

В случае выпадения града на ЗТ с ущербом на площади более 5000 га копию отчета следует направить в адрес УСНП Росгидромета и ФГБУ «ВГИ» для независимого анализа.

19.2.7 *Месячная справка о результатах ПГЗ* за истекший месяц со сведениями по форме таблицы А.1 приложения А РД 52.37.732 представляют не позднее 3-го числа следующего месяца.

19.2.8 *Телеграмма об окончании сезона ПГЗ* составляется в соответствии с разделом А.5 приложения А РД 52.37.732. Эта телеграмма передается в адреса УСНП Росгидромета, ОАВ ФГБУ «ВГИ» и Заказчика по окончания сезона ПГЗ, который оговорен в Государственном контракте на проведение ПГЗ, или иной срок, согласованный с Заказчиком, с указанием причины досрочного прекращения (или продления) срока защиты.

19.3 Годовые отчеты о проведении ПГЗ

19.3.1 Итоговая отчетность о проведении ПГЗ включает:

– краткий отчет о результатах ПГЗ в сезоне;

– годовой отчет о производственной деятельности ВС.

Основными требованиями к этим отчетам являются их информативность, краткость и конкретность изложения результатов работы, анализ недостатков и соответствие отчета единой форме, регламентируемой РД 52.37.732.

19.3.2 *Краткий годовой отчет о результатах ПГЗ* направляется Заказчику, в УСНП Росгидромета и ОАВ ВГБУ «ВГИ» в двухнедельный срок по окончании сезона ПГЗ со следующими сведениями:

– данные о сроках начала и завершения ПГЗ;

– общая и культивируемая площади ЗТ;
– источники и объем финансирования (плановый и фактический);
– количество ВО и ПВ и их техническое оснащение;
– *характеристику градоопасности сезона* – количество дней с градом, грозой, ливнем и шквалом;
– *основные результаты ПГЗ* в виде таблицы (по форме Б.2.26 РД 52.37.732) и карты градобитий на ЗТ и ПТ (либо радиолокационной карты глобальной кинетической энергии града за сезон);
– *выводы* об основных результатах ПГЗ в сезоне, стоимости защиты 1 га, недостатках и трудностях, имевших место в течение сезона, предложения по их устранению.

19.3.3 *Годовой отчет о производственной деятельности ВС* является основным документом, в котором излагаются исчерпывающие сведения о ПГЗ, эффективности и рентабельности работ.

19.3.3.1 Годовой отчет о производственной деятельности ВС составляется исполнителем работ под руководством заместителя начальника ВС по оперативно-производственной работе в соответствии с приложением Б РД 52.37.732, рассматривается на совещании руководителей подразделений, утверждается начальником ВС. К отчету прилагаются акты выполненных работ, справки о стоимости сельхозкультур в год защиты, согласованные с заказчиком.

Годовой отчет в срок до 10 ноября отчетного года направляют заказчику ПГЗ, в УСНП Росгидромета и ОАВ ФГБУ «ВГИ». В ФГБУ «ВГИ» вместе с отчетом следует направить DVD диск с файлами радиолокационных обзоров, с фрагментами засева за весь сезон ПГЗ, а также все виды оперативных и итоговых отчетов для внесения в информационный фонд данных Росгидромета.

19.3.3.2 Годовой отчет о производственной деятельности ВС должен включать в указанной ниже последовательности:
– титульный лист;
– список исполнителей;
– реферат;
– содержание;
– введение;
– основную часть;
– заключение;
– приложения.

19.3.3.3 Итоговый отчет оформляется в соответствии с ГОСТ 7.32. Он должен быть отпечатан на одной стороне листа белой бумаги формата А4

через 1,5 межстрочных интервала, 14 кеглем Times New Roman, таблицы – 12 кеглем. Размер левого поля – 30 мм, правого – 15 мм, верхнего и нижнего – 20 мм.

Отчет представляется в твердом переплете. Список исполнителей указывается в алфавитном порядке: фамилия, инициалы, а через запятую – занимаемая должность, ученая степень или звание. Далее, в скобках, указывают номер раздела (подраздела) отчета, подготовленного данным исполнителем, или выполненная им часть работы.

Приложение А

(рекомендуемое)

Формы технических паспортов складов ПГИ

А.1 - ФОРМА ТЕХНИЧЕСКОГО ПАСПОРТА СКЛАДА ДЛИТЕЛЬНОГО ХРАНЕНИЯ ПГИ

ИНВ. № _____

**МИНИСТЕРСТВО ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ
И ЭКОЛОГИИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ И МОНИТОРИНГУ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ
(Росгидромет)**

Федеральное государственное бюджетное учреждение

«_____»

(полное наименование ВС (НИУ), кому принадлежит склад)

(ФГБУ «_____ ВС»)

(краткое наименование ВС, НИУ)

ТЕХНИЧЕСКИЙ ПАСПОРТ

СКЛАДА ПРОТИВОГРАДОВЫХ ИЗДЕЛИЙ

201__ г.

ПАСПОРТ
склада длительно хранения противоградовых изделий

1.	
(Наименование и местонахождение склада)	
2. Собственник склада	
	(Полное наименование собственника)
3. Тип склада:	
	(Постоянного, временного хранения)
4. Дата сдачи в эксплуатацию:	
	(№ и дата акта приемки)
5. Размеры: длина, ширина, высота:	
6. Из какого материала построен:	
7. Характеристика полов:	
8. Характеристика кровли	
9. Число входов:	
10. Остекление, наличие на окнах решеток (сеток):	
11. Емкость склада для противоградовых изделий:	
- «Алазань-6»	
- «Алазань-9»	
- «Ас»	
12. Наличие отсеков, их назначение, характеристика:	
а)	
б)	
13. Сооружения:	
а) караульное помещение, проходная	
б) навес для противопожарных средств	
в) водоем (противопожарный водопровод)	
г) караульная вышка	
д) въездные ворота	
14. Освещение территории:	
15. Освещение внутри склада:	
Количество и тип светильников	
16. Ограждение, запретная зона:	
– материал ограждения:	
– высота ограждения:	

– расстояние от стен склада:
– ширина запретной зоны от ограды:
17. Грозовая защита, основные характеристики:
18. Характеристика помостов и стеллажей:
19. Сигнализация и связь:
– с охраной (караульным помещением)
– с пожарной частью
– с администрацией местного самоуправления
20. Противопожарная безопасность:
очистка периметра склада от растительности и других горючих материалов
21. Количество и номенклатура противопожарных средств

Наименование	Количество	Примечание
а)		
б)		
в)		
г)		
д)		

22. Охрана склада:
– общее количество охранников:
– число смен:
– количество охранников в смену:
– число постов (днем, ночью):
23. Наличие приборов для измерения:
– температуры воздуха
– влажности воздуха:
24. Наличие табличек типа «Запретная зона», «Вход воспрещен»:
24. Наличие инструкций о порядке пользования и содержания противопожарных средств и мерах на случай возникновения пожара:

Приложение: 1. Схема маршрута доставки ПГИ от поставщика до склада.
2. План территории склада в масштабе 1:200.
3. Схема расположения заземления.

Паспорт составлен: _____
(дата)

Начальник ВС _____
(Подпись, инициалы, фамилия)

Начальник РАО _____
(Подпись, инициалы, фамилия)

Командир ПВ _____
(Подпись, инициалы, фамилия)

Печатается 4 экземпляра: 1-й экз. – храниться на складе ПГИ; 2-й – в ВС;
3-й – в УСНП Росгидромета; 4-й – в ФГБУ «ВГИ».

А.2 – ПАСПОРТ
склада временного хранения ПГИ на ракетном пункте в течение сезона противоградовых работ

1.	
(Наименование ПВ, № и местонахождение)	
2. Дата сдачи в эксплуатацию:	
3. Размеры: длина, ширина, высота:	
4. Из какого материала построен:	
5. Характеристика полов:	
6. Характеристика кровли:	
7. Наличие запираемого входа:	
8. Емкость склада для противоградовых изделий:	
- «Алазань-6»	
- «Алазань-9»	
- «Ас»	
9. Характеристика помостов и стеллажей: _____	
10. Количество и номенклатура противопожарных средств	

Наименование	Количество	Примечание
а)		
б)		
в)		
г)		
д)		

11. Наличие табличек типа «Запретная зона», «Вход воспрещен»:

12. Наличие инструкций по правилам безопасности: _____

Приложение: 1. Схема маршрута доставки ПГИ от поставщика до склада.

Паспорт составлен: _____
(дата)

Начальник ВС _____
(Подпись, инициалы, фамилия)

Начальник РАО _____
(Подпись, инициалы, фамилия)

Командир ПВ _____
(Подпись, инициалы, фамилия)

Печатается 2 экземпляра: 1-й экз. – храниться в складе ПГИ; 2-й – в ВС.

Приложение Б
(рекомендуемое)

Перечень этапов технологического процесса ПГЗ и ориентировочные сроки их выполнения

№ пп	Наименование вида работ[1]	Сроки выполнения[2]
1	Подготовка рабочей документации, программ и журналов по РД 52.37.731, РД 52.37.731, РД 52.37.601 и РД 52.37.615	10.01 – 15.02
2	Переподготовка, обучение и аттестация персонала	15.02 – 10.04
3	Развертывание противоградовых подразделений:	10.04 – 25.04
3.1	Расконсервация МРЛ, АСУ и средств связи на КП	10.04 – 20.04
3.2	Развертывание сети ПВ (вывоз на позиции, расконсервация и монтаж ПУ, средств связи, жилых и рабочих помещений)	01.04 – 20.04
3.3	Ориентирование, горизонтирование и калибровка МРЛ, ПУ	15.04 – 25.04
3.4	Организация дежурных смен и круглосуточной работы КП и ПВ	20.04 – 25.04
3.5	Проведение комплексных тренировок КП и ПВ	20.04 – 25.04
3.6	Проверка готовности, устранение недостатков и допуск КП и ПВ к работе по АВ	25.04 – 30.04
3	Проведение противоградовых работ[3]:	В соответствии со сроками указанными в контракте
3.1	Круглосуточное дежурство КП и ПВ	
3.2	Радиолокационное обнаружение градовых и градоопасных облаков, распознавание ОВ	
3.3	Проведение операций по воздействию на градовые процессы	
3.4	Контроль результатов и оформление материалов воздействия	
3.5	Подготовка и передача Заказчику, в УСНП Росгидромета и ВГИ оперативных отчетов о противоградовых операциях	
4	Свертывание КП и ПВ, демонтаж оборудования ПВ и вывоз на склады межсезонного хранения	01.09 – 30.09
5	Ремонт, профилактическое обслуживание и консервация оборудования КП и ПВ	01.10 – 30.12
6	Отпуска персонала и отгулы за переработку	1 месяц +

Примечание:

1 – Начало этапов работ и ответственные исполнители определяются приказами руководителя учреждения-исполнителя противоградовых работ.

2 – Сроки выполнения работ указаны применительно к условиям Северного Кавказа.

3 – Сроки начала и завершения ПГЗ устанавливаются в контракте с Заказчиком и могут быть изменены только по согласованию с ним.

Приложение В

(рекомендуемое)

Формы таблиц для оценки физической и экономической эффективности ПГЗ

Таблица В.1 – Пример типовой формы таблицы и расчёта процента потерь сельхозпродукции N_S (%)

Дата градобития	Площадь повреждённых сельхозкультур S_i, га	Степень повреждений K_i, %	Площадь градобитий в пересчёте на 100% $S_{100} = S_i K_i / 100$, га
15.06.2009	300	100	300
	500	От 50 до 100	375
	1000	От 20 до 50	350
	2000	От 0 до 20	200
Всего за 15.06.2009			S_{100} = 1225
30.07.2009	50	100	50
	80	От 50 до 100	60
	200	От 20 до 50	70
Всего за 30.07.2009			S_{100} = 180
Всего за 2009 г.			1405

П р и м е р – Пусть культивируемая площадь на ЗТ S_k = 600 тыс. га, тогда, по данным таблицы В.1, потери сельхозпродукции на ЗТ в год защиты составят:

$$N_S = \frac{S_{100}}{S_k} 100 = \frac{1405}{600000} 100 = 0{,}23\ \%.$$

Таблица В.2 – Типовая форма таблицы для расчёта экономической эффективности ПГЗ в 201__ году

Год защиты	Операционные расходы O, руб.	Объём капиталовложений K, руб.	Площадь повреждений сельхозкультур в пересчёте на 100% S_{100}, га		Ущерб от градобитий в год защиты, руб.	
			средняя многолетняя до защиты	в год защиты	потенциальный Y_C	фактический Y_S

Таблица В.3 – Типовая форма таблицы для расчёта фактического ущерба от градобитий на ЗТ в 201__ году

Наименование повреждённой сельхоз-культуры	Средняя урожай-ность *i*-й культуры B_i, т/га	Стоимость 1 т урожая *i*-й культуры C_i, руб./т	Площадь повреждения сельхозкультуры в пересчёте на 100% S_{100}, га	Фактиче-ский ущерб Y_S, руб.
Итого				
П р и м е ч а н и е: Таблица составляется путем выборки данных, представленных хозяйствами по форме 29-СХ, и актов о повреждениях сельхозкультур в результате градобитий.				

Таблица В.4 – Данные для расчёта средней стоимости урожая с 1 га ЗТ

Наименование *i*-й культуры	Площадь посева *i*-й культуры S_i, га	Средняя урожайность *i*-й культуры B_i, т/га	Стоимость 1 т урожая *i*-й культуры C_i, руб./т	Стоимость урожая *i*-й культуры с 1 га, руб./га
Итого				
Средняя стоимость урожая с 1 га ЗТ $\overline{C}$, руб./га:				
П р и м е ч а н и е: Таблица составляется по данным органов министерства сельского хозяйства и продовольствия по современным рыночным ценам.				

Приложение Г

(рекомендуемое)

Пример статистического ряда данных для оценки эффективности противоградовых работ, проведенных Северо-Кавказской ВС

Число лет	Год	Общая площадь ЗТ S, тыс. га	Культивируемая площадь ЗТ S_K, тыс. га	Площадь повреждений в пересчёте на 100% S_{100}, га	Потери урожая $N = \frac{S_{100}}{S_K}100$, %	Коэффициент градоопасности года G	Нормированные потери N/G
1	2	3	4	5	6	7	8
До защиты (*Xc*)							
1	1962	362,0	262,1	13661	5,21	0,83	6,25
2	1963	380,0	262,1	14760	5,63	0,90	6,25
3	1964	390,7	262,1	21847	8,34	1,33	6,25
4	1965	400,5	262,1	12090	4,61	0,74	6,25
5	1966	410,6	262,1	19494	7,44	1,19	6,25
В годы защиты (X_S)							
1	1967	410,0	295,0	9180	3,11	1,6	1,94
2	1968	410,0	295,0	3690	1,25	0,8	1,56
3	1969	410,0	295,0	8590	2,91	1,1	2,65
4	1970	410,0	295,0	5680	1,93	0,8	2,41
5	1971	410,0	295,0	15720	5,33	1,3	4,10
6	1972	410,0	295,0	7380	2,50	0,8	3,13
7	1973	410,0	295,0	450	0,15	0,4	0,38
8	1974	410,0	295,0	4040	1,37	0,7	1,96
9	1975	546,0	399,0	9350	2,34	0,9	2,60
10	1976	546,0	487,0	17483	3,59	1,4	2,56
11	1977	546,0	487,0	19032	3,91	1,6	2,44
12	1978	546,0	487,0	5580	1,15	0,6	1,92
13	1979	546,0	487,0	5241	1,08	0,5	2,16
14	1980	624,0	506,0	21665	4,28	1,9	2,25
15	1981	660,0	506,0	3026	0,60	0,4	1,50
16	1982	662,0	506,0	11638	2,30	0,9	2,56
17	1983	702,0	541,0	23087	4,27	2,2	1,94

Продолжение таблицы

1	2	3	4	5	6	7	8
18	1984	695,0	541,0	988	0,18	0,3	0,60
19	1985	871,9	621,0	10321	1,66	0,7	2,37
20	1986	871,5	668,0	14936	2,24	1,0	2,24
21	1987	1000,0	768,0	14815	1,93	0,9	2,14
22	1988	1145,0	820,0	14689	1,79	0,8	2,24
23	1989	1145,0	820,0	16266	1,98	0,9	2,20
24	1990	1145,0	820,0	20112	2,45	1,0	2,45
25	1991	1145,0	820,0	18220	2,22	0,9	2,47
26	1992	1130,0	820,0	33850	4,13	1,8	2,29
27	1993	1034,0	743,0	21234	2,86	1,2	2,38
28	1994	10206,0	743,0	2946	0,40	0,3	1,33
29	1995	950,0	717,0	9830	1,78	0,5	3,56
30	1996	390,0	285,6	2190	0,77	0,3	2,57
31	1997	В 1997 г. защита не проводилась					
32	1998	390,0	285,6	4270	2,20	0,5	4,40
33	1999	690,0	450,4	3300	0,73	0,5	1,46
34	2000	494,0	295,0	8970	3,04	0,6	5,06
35	2001	690,0	449,0	7625	1,69	0,8	2,11
36	2002	690,0	479,0	5243	1,16	0,9	1,21
37	2003	784,0	530,0	12110	2,28	1,2	1,90
38	2004	784,0	530,0	9181	1,73	1,2	1,44
39	2005	835,8	560,8	4987	0,89	1,6	0,55
40	2006	835,8	560,8	830	0,15	0,5	0,30
41	2007	801,4	530,1	1300	0,25	0,96	0,26
42	2008	801,4	530,1	2292	0,43	0,75	0,57
43	2009	801,4	530,1	1347	0,20	0,84	0,24
44	2010	801,4	530,1	574	0,11	0,94	0,12
45	2011	801,4	530,1	1373	0,26	0,87	0,30
46	2012	801,4	530,1	12095	2,28	1,01	2,25
47	2013	801,4	530,1	880,5	0,17	0,7	0,24
48	2014	861,4	580,0	1640	0,28	0,6	0,47

Приложение Д
(обязательное)
Форма таблиц о результатах ПГЗ

Таблица Е.1 – Основные результаты ПГЗ

Наименование ВО	Количество ПВ, шт.	Площадь ЗТ, тыс. га		Количество дней с АВ, день			Количество засеянных ОВ, шт.			Расход ПГИ, шт.	Площадь повреждений сельхозкультур в пересчете на 100% S_{100}, га		Сокращение площадей градобитий на ЗТ по сравнению со среднемноголетними, раз
		общая	культивируемая	всего	с ущербом	без ущерба	всего	с градом	без града		на ЗТ	на ПТ	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Итого по													

П р и м е ч а н и е: 1 В графах 5 – 7 каждый календарный день с АВ указывают один раз, независимо от того, проводилось в этот день АВ в одном или нескольких ВО.

2 В графе 9 приводят количество засеянных ОВ с градом по радиолокационным данным.

3 Графу 13 заполняют при наличии данных.

Таблица Е.2 – Сведения о повреждениях посевов на ЗТ и ПТ _____ ВС в 20__ г.

Дата	Место градобития (наименование пострадавшего района, населенного пункта)	Наименование поврежденной сельхозкультуры	Площадь повреждений $S_П$, га	Степень повреждений K, %	Площадь повреждений в пересчете на 100% S_{100}, га	Проблемы, осложнявшие АВ	Примечание
Итого	-	-		-			

Библиография

К разделу 4. Общие положения

[1] Положение о лицензировании работ по активному воздействию на гидрометеорологические и геофизические процессы и явления, утверждено Постановлением Правительства Российской Федерации от 30.12.2011 № 1216

[2] Постановление Правительства Российской Федерации от 15.07.1999 № 807 «Об утверждении Положения о приобретении, хранении и использовании средств активного воздействия специализированными организациями активного воздействия на метеорологические и другие геофизические процессы»

[3] Положение о поставках продукции производственно-технического назначения (Утв. Постановлением Совета Министров СССР от 25.07.88 № 888).

[4] Приказ Росгидромета от 02.02.2011 № 33 «О внесении изменения в приказ Росгидромета от 26.02.2007 года № 58 «Об утверждении Инструкции «О порядке учета, хранения и передачи средств активного воздействия одной специализированной организацией другой специализированной организации»

[5] Распоряжение Правительства РФ от 18.12.92 № 2392-Р «Об усилении контроля за приобретением, перевозкой, хранением, учетом и использованием противоградовых и противолавинных ракетно-артиллерийских комплексов, применяемых для работ по активному воздействию на гидрометеорологические процессы».

[6] Распоряжение Правительства Российской Федерации от 02.11.2009 № 1629-р

«О перечне объектов, подлежащих обязательной охране полицией»

[7] Приказ Министра обороны Российской Федерации № 220, Минтранса Российской Федерации № 89, Росгидромета № 51 от 15.05.2001

«Об утверждении Инструкции по организации и проведению противоградовых стрельб на территории Российской Федерации»

[8] Инструкция по заполнению бланка формы № 1 «Тактико-технические данные РЭС» (третья ред.). Государственная комиссия по радиочастотам (ГКРЧ). М., 2003. – 53 с.

[9] Федченко Л.М., Гораль Г.Г., Беленцова В.А., Мальбахова Н.М. Опасные конвективные явления и их прогноз в условиях сложного рельефа. М.: Гидрометеоиздат, 1991. – 425 с.

К разделу 5. Град и климатология града

[1] Report of the Meeting of experts to review the present status of hail suppression. WMO. Weather Modific/ Program. Hail Suppression Research. Nalchik, Russia, 2003. – 140 p.

[2] Абшаев М.Т., Малкарова А.М. Оценка эффективности предотвращения града. СПб.: Гидрометеоиздат, 2006. – 280 с.

[3] Smith P.L. Hail suppression activity around the world. Preprints of the Symposium on Plan. Inadvertent Weather Modification, Atlanta. Published by the Amer. Met. Soc., Boston, Mass, 1992.

[4] Krauss T. Aircraft seeding technology and same outstanding Issues in hail suppression // Report No 6. WMO Meeting on Hail Suppression. Nalchik, 2003. P. 57-61.

[5] Dessens J., Berthet C., Sanchez J.L.. Mitigation of hail damages by cloud seeding in France and Spain // 5th European Conference Conf. on Severe Storms, 2009. Landshut, Germany. P.

[6] Boev P., Simeonov P. Hail suppression activities in Bulgaria // Report No 6. Meeting of experts on hail suppression. Nalchik, 2003. P. 161-164.

[7] Абшаев М.Т., Буранова И.А., Малкарова А.М. Особенности климатологии града в разных регионах // Известия ВУЗов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки, 2009. № 4. С. 116-121.

[8] Федченко Л. М., Гораль Г. Г., Беленцова В. А., Мальбахова Н. М. Опасные конвективные явления и их прогноз в условиях сложного рельефа. М.: Гидрометеоиздат, 1991. – 424 с.

[9] Абшаев М.Т., Малкарова А.М. Статистическая оценка эффективности противоградовой защиты в Аргентине // Обозрение прикладной и промышленной математики, 1995. Том 2, Вып.2. С. 204-222.

[10] Гигинейшвили В.М. Градобития в Восточной Грузии. Л.: Гидрометеоиздат, 1960. – 156 с.

[11] Опасные гидрометеорологические явления на Кавказе / Под ред. Г.Г. Сванидзе и Я.А. Цуцкиридзе. Л.: Гидрометеоиздат, 1983. – 288 с.

[12] Стихийные метеорологические явления на Украине и Молдавии. / Под ред. В.Н. Бабиченко. Л.: Гидрометеоиздат, 1991. – 224 с.

[13] Опасные гидрометеорологические явления в Средней Азии. / Под ред. А.Д. Джураева и др. Л.: Гидрометеоиздат, 1977. – 195 с.

[14] Женев Р. Град. Пер. с франц. Л.: Гидрометеоиздат, 1966. – 106 с.

[15] Changnon S.A. The scales of hail // J. App. Met., 1976. No 12. – 38 p.

[16] Changnon S.A. Urban effects on thunderstorm and hailstorm frequencies // Proc. of 2nd Conf. on Biometeorology. Philadelphia, 1972. P. 177-184.

[17] Абшаев М.Т., Малкарова А.М., Борисова Н.А. О тенденции изменения климата на Северном Кавказе // Труды Всемирной конференции по изменению климата. М.: Гидрометеоиздат, 2003. С. 190-191.

[18] Климатический справочник СССР. Вып. №№ 1-34. Л.: Гидрометеоиздат, 1960-1970.

[19] Метеорологические ежемесячники. Ростов-на-Дону, 1958-1992.

[20] Fraile R., Castro A., Marcos J.L., Vega A., Sanchez J.L. On hail detection at the ground // 6th WMO Sci. Conf. on Weather Modification Paestum, Italy, 1994. Vol. 1. P. 201-204.

[21] Kozminski Cz. Geographiczne rozmic szezenic wie kszych lurz gradowych lanotowanych na obsjarje Polski w latach 1946-1950 // Pizeclad Geograf., 1964. T. XXXVI. – Z. 1-15.

[22] Абшаев М.Т. Абшаев А.М. Малкарова А.М. Жарашуев М.В. Автоматизированная идентификация, измерение параметров и классификация конвективных ячеек для целей защиты от града и штормооповещения // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные. науки. Ростов-на-Дону, 2010. № 1. С. 109-113.

[23] Gerber Z, Bizic0 D., Matvijev M. Hailfall characteristics in Northern Croatia in the period 1982-1991 // National Hail Research. Experiment Colorado Assococ. University Press, Boulder, 1982. P. 121-123.

[24] Becroith W.S. Hail observations in the Denver area. United Air Lines // Met. Circular, 1956. № 40.

[25] NOAA National Climatic Extremes Committee. July 30, 2010. South Dakota Storm

Produces Record Hailstone. crh.noaa.gov. Accessed Aug. 2, 2010.

[26] Douglas R.H., Hitschfeld W. Studies of Alberta hailstorms // Sci. Rept. Montreal Univ. – 1958. № 27.

[27] Atlas D., Ludlam F.H. Multi wavelength radar reflectivity of hailstorms // Quart. J. Roy. Met. Soc., 1961. Vol. 87, No 374. P. 523-532.

[28] Weikmann H. The language of hailstorms and hail. Nubila, Anno, 1962.

[29] Schumann T. E. W. The theory of hailstone formation // Quart. J. of Royal Met. Soc. Vol. 64, No 273, 1938. P. 3-21.

[30] List R. Growth and structure of graupel and hailstones. Physics of precipitation. – Geophysical Monograph, 1960, No 5, Am, Geophysical Un. Washington. – 317 p.

[31] Качурин Л.Г. Физические основы воздействия на атмосферные процессы. Л.: Гидрометеоиздат, 1990. – 463 с.

[32] Жекамухов М.К. Жекамухов М.К. Некоторые проблемы формирования структуры градин. М.: Гидрометеоиздат, 1982. – 168 с.

[33] Закинян Р.Г. К теории образования слоистой структуры льда на поверхности пластины, помещенной в поток переохлажденного водного аэрозоля // Журнал технической физики, 2004. Том 74. С. 9-14.

[34] Абшаев М.Т. О концентрации градин и зародышей града в облаках // Труды ВГИ, Вып. 3 (5), 1976. С. 191-197.

[35] Smith P.L. Some aspects development in the detection and measurement of hail // Papers presented at the II Int. Conf. on Hailstorms and Hail Prevention. Sofia, 1982. P. 75-93.

[36] Admirat P., Wojtiw L., Goyer G.G., Lozowsky E. Haifall and hailstorm characteristics in Switzerland, Canada and South Africa // Papers presented at the II Int. Conf. on Hailstorms and Hail Prevention. Sofia, 1982. P. 111-118.

[37] Абшаев М.Т., Чеповская О.И. О функции распределения града // Метеорология и гидрология, 1967. № 6. С. 36-42.

[38] Тлисов М.И. Физические характеристики града и механизм его образования. СПб.: Гидрометеоиздат, 2002. – 386 с.

[39] Оржоникидзе А.А. К вопросу о скорости падения града // Сборник «Физика облаков и осадков». М.: Изд. АН СССР, 1961. С. 62-69.

[40] Ludlam F.H. Hailstone studies. Nubila, 1958. № 1. – 28 p.

[41] Абшаев М.Т., Атабиев М.Д., Макитов В.С. Радиолокационные измерения кинетической энергии градовых осадков // Труды ВГИ, Вып. 59, 1984. С. 60-77.

[42] Waldvogel A., Federer B., Schmidt W. The kinetic energy of hail falls. Part 1: Hailstone spectra // Appl. Met, 1978. Vol. 17, No 4. P. 515-520.

[43] Waldvogel A., Federer B., Schmidt W., Megeiw I.E. The kinetic energy of hail falls. Part II: Radar and hail pads // J. App. Met., 1978. Vol. 17, No 2. P. 1680-1693.

[44] Ulbrich W. Relationships of equivalent reflectivity factor to the vertical fluxes of mass and kinetic energy of hail // Appl. Met., 1978. Vol. 17. No 12. P. 1803-1808.

[45] Long, A.B., Crow E.L., Huggins A.W. Analysis of the hailfall during 1972-74 in the National Hail Research Experiment. WMO, Geneva, 1976. No 443. P. 265-272.

[46] The Detection and Measurement of Hail // Report No 2 of the Meeting of Experts held in Nalchik, USSR. WMO, Geneva, 1979. – 29 p.

[47] Changnon S.A. Examples of economic losses from hail in the U.S. // J. Appl. Met., 1972,

No 11. - P. 1128-1137.

[48] Strong, G.S. and E.P. Lozowski. An Alberta study to objectively measure hailfall intensity // Atmosphere, 1977. No 15. P. 33-53.

[49] Li Fengsheng, Fu Chuanlin. The characteristics of hail Weather and an analysis of effect of artificial hail suppression at Dezhou Region, Shandong province // National Hail Research Experiment. Colorado Assoc. University Press, Boulder, 1982. P. 59-62.

[50] Guoguang Zheng. An overview of Weather modification activities in China // 8th WMO Conf. Weather Mod., 2003. Casablanca, Morocco. P. 25-30.

[51] Berz G.A. Siebert. World of natural hazards. CD-ROM 302-02650, Munchener Ruckversicherung, 2000.

[52] Giaiotti, D., S. Nordio, F. Stel. The climatology of hail in the plain of Friuli Venezia Giulia // J. Atm. Res, 67/68, 2003. P. 247-259.

[53] Пастух В.П., Сохрина Р.Ф. Град на территории СССР // Труды ГГО, 1957. Вып. 74. С. 115-132.

[54] Данов Е.И., Данова Е.И. К прогнозу экстремальных градобитий // Труды научно-практической конференции, посвященной 40-летию начала производственных работ по защите от града. Нальчик, 2011. С. 91-97.

[55] Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2009 год. Росгидромет. – 57 с.

[56] Abshaev M.T., Abshaev A.M., Malkarova A.M. Estimation of antihail projects by tendency of hail climatology change // 10th WMO Sci. Conf. on Weather Modification. Bali, Indonesia, 4 - 7 October, 2011. P 109-127.

К разделу 6. Прогноз града

[1] Сулаквелидзе Г.К., Глушкова Н.И., Федченко Л.М. Прогноз града, гроз и ливневых осадков. Л.: Гидрометеоиздат, 1970. – 183 р.

[2] Федченко Л.М., Гораль Г.Г., Беленцова В.А., Мальбахова Н.М. Опасные конвективные явления и их прогноз в условиях сложного рельефа. М: Гидрометеоиздат, 1991. – 424 с.

[3] Глушкова Н.И., Беленцова В.А. Аэросиноптические условия, наблюдаемые при развитии грозоградовых процессов на Северном Кавказе // Труды ВГИ, 1968. Вып. 2. С. 5-10.

[4] Чеповская О.И. Аэросиноптические условия выпадения града в предгорных районах Северного Кавказа // Труды ВГИ, 1972. Вып. 20. С. 36-50.

[5] Темникова Н.С. Некоторые характеристики климата Северного Кавказа и прилегающих степей. Л.: Гидрометеоиздат,1964. –175 с.

[6] Бокова П.А. К вопросу прогноза локальных районов возникновения и усиления градовых процессов // Труды САРНИГМИ, 1975. Вып. 16(97). С. 54-60.

[7] Гораль Г.Г., Барекова М.В. Кинематика высотных циклонов и интенсивность градовых процессов в регионе Кавказа // Труды ВГИ, 1989. Вып. 74. С.124-132.

[8] Гораль Г.Г., Мальбахова Н.М. Оценка потенциальной неустойчивости атмосферы при развитии градовых процессов // Метеорология и гидрология, 1985, №3. С. 36-45.

[9] Гораль Г.Г., Барекова М.В. Характеристика циклонов, обусловливающих развитие интенсивных градовых процессов // Труды ВГИ, 1987. Вып.69. С.37-47.

[10] Беленцова В.А., Федченко Л.М., Чеповская О.И. Оценка интенсивности градовых процессов на Северном Кавказе // Труды ВГИ, 1974. Вып. 25. С. 3-16.

[11] Шишкин Н.С. Облака, осадки и грозовое электричество. М.: Гидрометеоиздат, 1964. – 402 с.

[12] Renick J.H., Maxvell J.B. Forecasting hailfall in Alberta // Hail: Review of hail science and hail suppression. Met. Mon., No 38, Vol. 16, 1977. P. 145-151.

[13] Глушкова Н.И. Результаты исследования механизма образования сильных ливней и града // Труды Гидрометцентра СССР, 1978. Вып. 201. С.57-67.

[14] Федченко Л.М., Беленцова В.А. Усовершенствованный способ прогноза интенсивных градовых процессов // Труды ВГИ, 1987. Вып.67. С. 57-64.

[15] Абшаев М.Т. Структура и динамика развития градовых процессов // Труды ВГИ, 1982. Вып.53. С. 6-22.

[16] Абшаев М.Т., Гораль Г.Г., Мальбахова Н.М. Прогноз типа градового процесса // Труды ВГИ, 1986. Вып. 67. С.72-79.

[17] Бибилашвили Н.Ш., Ковальчук А.Н., Терскова Т.Н., Черняк М.М. О влиянии взаимодействия процессов разного масштаба на структуру и механизм развития мощных градовых процессов // Труды ВГИ, 1978. Вып. 39. С. 43-60.

[18] Гораль Г.Г. К определению скорости нисходящих потоков и распределение водности осадков в кучево-дождевых облаках // Труды ВГИ, 1974. Вып. 28. С. 118-126.

[19] Гораль Г.Г. Метод прогноза шквалов // Труды Гидрометцентра СССР, 1974. Вып. 136. С. 60-67.

[20] Гораль Г.Г., Чеповская О.И. К прогнозу шквалов, связанных с развитием конвективных облаков // Труды ВГИ, 1981. Вып. 47. С. 67-73.

К разделу 7. Радиолокационное обнаружение града

[1] Керр Д. В. Распространение ультракоротких радиоволн / Пер. с англ. М.: Изд-во Советское радио, 1954. – 710 с.

[2] Атлас Д. Успехи радарной метеорологии / Пер. с англ. Л.: Гидрометеоиздат, 1967. – 194 с.

[3] Баттан Л. Дж. Радиолокационная метеорология / Пер. с англ. Л.: Гидрометеоиздат, 1967. – 196 с.

[4] Степаненко В. Д. Радиолокация в метеорологии. Л.: Гидрометеоиздат, 1973. -343 с.

[5] Справочник по радиолокации. Пер, с англ. в четырех томах. Под ред. К.Н. Трофимова. М.: Изд-во Советское радио.

[6] Теоретические основы радиолокации. Под ред. Ширмана Я. Д. М.: Советское радио, 1970. – 560 с.

[7] Бартон Д., Вард Г. Справочник по радиолокационным измерениям / Пер. с англ. М.: Советское радио, 1976. – 392 с.

[8] Колосов М.А., Арманд Н.А., Яковлев О.И. Распространение радиоволн при космической связи. М.: Издательство «Связь», 1969. – 506 с.

[9] Довиак Р., Зрнич Д. Доплеровские радиолокаторы и метеорологические наблюдения / Пер. с англ. Л.: Гидрометеоиздат, 1988. – 512 с.

[10] Абшаев М. Т., Бурцев И. И., Шевела Г.Ф. Руководство по применению радиолокаторов МРЛ-4, МРЛ-5 и МРЛ-6 в системе градозащиты. Л.: Гидрометеоиздат, 1980. – 231 с.

[11] Mie G. Beitrage zur optic truber medien speziel kolloidaler metalosungen // Ann. Phys., 1908, Bd. XXV. – Z. 377-422.

[12] Шифрин К.С. Рассеяние света в мутной среде. М. Гостехиздат, 1951. – 288 с.

[13] Розенберг В.И. Рассеяние и ослабление электромагнитного излучения атмосферными частицами. Л.: Гидрометеоиздат, 1972. – 348 с.

[14] Абшаев М. Т., Розенберг В. И. Рассеяние и ослабление радиоизлучения сантиметрового диапазона градом // Изв. АН СССР, Физика атмосферы и океана,1969. Сер. 5, № 8. С. 803-809.

[15] Абшаев М. Т., Розенберг В. И. Рассеяние и ослабление радиолокационного излучения обводненными градинами // Изв. АН СССР, Физика атмосферы и океана, 1969. Том 5, № 9. С. 973-980.

[16] Абшаев М. Т., Дадали Ю. А., Розенберг В. И. Радиолокационное определение микроструктурных характеристик снегопадов // Труды ВГИ, 1970. Вып. 17. С. 260-273.

[17] Battan L. J., Browning S. R. and Herman B. M. Tables of the radar cross-section of wet and dry ice spheres // Tech. Rep. No 21, Inst. of Atm. Phys, Univ. of Arizona, Tucson. 1970.

[18] Абшаев М.Т., Розенберг В.И., Кармов Х.Н. Поглощение и полное ослабление микрорадиоволн в градовых и дождевых осадках // Труды ВГИ. 1975, Вып. 29. С. 18-40.

[19] Абшаев М Т., Жакамихов Х. М. Об алгоритме расчета радиолокационных характеристик однослойных и двухслойных частиц // Труды ВГИ, 2001. Вып. 91. С. 109-122.

[20] Bringi, V.N., and V. Chandrasekar. Polarimetric Doppler Weather Radar. Principles and Applications. Cambridge University Press, 2001. – 636 p.

[21] Абшаев М.Т., Чеповская О.И. О функции распределения града // Метеорология и гидрология, 1967. № 6. С. 36-42.

[22] Musil D.J., May E.L., Smith P.L., Sand W.R. Structure of an evolving hailstorms. Part IV: Internal structure from penetrating aircraft // Mon. Weat. Rev. No 104, 1976. P. 596-602.

[23] Auer A.H. Distribution of graupel and hail with size // Mon. Weather Rev., 100, 1972. P. 325-328.

[24] Абшаев М.Т., Кулиев Д.В. Рассеяние и ослабление радиоволн в градовых облаках и осадках со смешанной микроструктурой // Труды 7-го Всес. совещ. по радиометеорологии. М.: Гидрометеоиздат, 1986. С.43-44.

[25] Abshaev M.T. Радиолокационный метод определения спектра и концентрации градин в конвективных облаках // Труды ВГИ, Вып. 3(5), 1966. С. 154-163.

[26] Абшаев М.Т. Радиолокационные методы измерения микроструктурных характеристик облаков // Труды III Всес. совещ. по радиометеорологии. М.: Гидрометеоиздат, 1966. С. 72-87.

[27] Абшаев М.Т. Радиолокационное обнаружение града // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана, 1982. – Том 18, № 5. С. 483-494.

[28] Справочник. Облака и облачная атмосфера / Под. ред. И.П. Мазин, А.Х. Хргиан. Л.: Гидрометеоиздат, 1989. – 690 с.

[29] Holler H. and Meischner P.F. Multiparameter Radar investigation of hailstorms and operational storm seeding in Southern Germany // 6th WMO Sci. Conf. on Weather Modification. Paestum, Italy, 1994. Vol. 1. – P. 47-50.

[30] Ryzhkov, A. V. and D. S. Zrnić: Precipitation observed in Oklahoma mesoscale systems with polarimetric radar // J. Appl. Meteor., 1994. No 33. P. 455–464.

[31] Picca J., Ryzhkov A. Polarimetric radar discrimination between small, large, and giant hail at S band. Final 2011-Tsk1-Hail, 2011. – 14 p.

[32] Ryzhkov A.V., D.S. Zrnic, J. Krause, M.R. Kumjian and S.M. Ganson. Discrimination between large and small hail. Final report. NOAA / NSSL, 2010. – 18 p.

[33] Rinehart R.E. Radar for meteorologists. Fourth Edition. Columbia, Rinehart Publications PO Box 30800, 2006. – 482 p.

[34] Абшаев М. Т., Белявский А. В., Тетуев Х. Б. О связи доплеровских характеристик радиоэха метеообъектов с их микроструктурой // Труды ВГИ, Вып. 24, 1973. – С. 150-172.

[35] Абшаев М. Т., Кармов Х. Н. Обнаружение градовых очагов радиолокационно-радиометрическим методом // Труды IV Всес. сов. по радиометеорологии, 1978. С. 81-87.

[36] Абшаев М. Т., Кучмезов О. М., Пинхасов А. М. Вероятностно-статистический метод индикации градовых облаков // Труды ВГИ, 1969. Вып. 13. С. 230-248.

[37] Абшаев М.Т., Сонечкин Д.М., Виноградская А.В., Макитов П.М. Распознавание градовых радиоэхо с помощью квазилинейной дискриминантной функции // Метеорология и гидрология, 1978. № 3. С. 30-35.

[38] Абшаев М.Т., Абшаев А.М. Радиолокационные критерии распознавания градовых облаков и крупного града // Труды Международной конф., посвященной 50-летию противоградовых работ в Молдавии. Кишинев, 2014. С. 70-80.

[39] Абшаев М. Т. Радиолокационное обнаружение града и определение предградового состояния облаков // Доклады II Межд. конф. по борьбе с градом, София, 1984. С. 235-243.

[40] Абшаев М.Т., Малкарова А.М. Оценка эффективности предотвращения града. СПб.: Гидрометеоиздат, 2006. – 279 с.

[41] Абшаев М. Т., Абшаев А. М., Малкарова А. М., Мизиева Ж. Ю. Радиолокационные исследования водосодержания кучево-дождевых облаков. Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2009. Том 45, № 6. С. 1-7.

[42] Abshaev M.T. Complex radar methods of hail cloud structure, evolution dynamics and microstructure. Cloud Dynamics. Proc. of a Symposium Third General Assembly of IAMAP. Hamburg. D. Reidel Publishing Company, 1982. P. 301-313.

[43] Eccles P. J., Atlas D. A new method of hail detection by dual-wavelength radar // 14th Radar Met. Conf. Tucson. Amer. Met. Soc. Boston, 1970. P. 106-112.

[44] Абшаев М. Т., Атабиев М. Д. Двухволновый метод коррекции на ослабление радиоволн в метеообъектах // Труды VI Всес. совещания по радиометеорологии. М.: Гидрометеоиздат, 1984. – С. 103-106.

[45] Foote B., Browning K.A., K.A. Borland, S.A. Chengnon ets. Hail: A review of hail science and hail suppression. Met. Mon., Vol. 16, No 38. Edited by G. Brant Foote and Charles A. Knight. Amer. Met. Soc. Boston, 1977. – 277 p.

[46] Browning, K.A., and G.B. Foote. Airflow and hail growth in supercell storms and some implications for hail suppression // Quart. J. Roy. Met. Soc., 1976. Vol. 102. P. 499-534.

[47] Zrnic D.S. Three-body scattering produces precipitation signature of special diagnostic value. Radio Sci., 1987. – No 22. P. 76–86.

[48] Treloar, A.B.A. Vertically Integrated Radar Reflectivity as an Indicator of Hail Size in the Greater Sydney Region of Australia // Preprints, 19th Conf. on Severe Local Storms, Minneapolis. Minnesota, Amer. Met. Soc., 1998. P. 48-51.

[49] Witt, A., M. D. Eilts, G. J. Stumpf, E. D. Mitchell, J. T. Johnson and K. W. Thomas. Evaluating the Performance of WSR-88D Severe Storm Detection Algorithms. Weather Forecasting, 13, 1998. P. 513–518.

[50] Lakshmanan V, Smith T, Stumpf G and Hondl K D. The Warning Decision Support System Integrated Information; Weather. Forecasting, 22 596, 2007. – 612 p.

[51] Zabel P. Evaluating the Reliability of VIL Density for Determining Severe Hail in Iowa. Presentation for Baron Radar Systems, 2012. – 30 p.

[52] Базлова Т.А., Бочарников Н.В., Брылев Г.Б., Кузнецова Л.И., Линев А.Г., Маланичев С.А., Оленев В.А., Паркинен Т.В., Солонин А.С., Устинов В.К., Фролов В.И. Четверикова Е.С., Якимайнен Н.А. Метеорологические автоматизированные радиолокационные сети. СПб.: Гидрометеоиздат, 2002. – 331 с.

[53] Абшаев М.Т., Абшаев А.М. Возможности и ограничения радиолокационных метеорологических измерений // Труды II Всерос. научной конф. «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды». Том. I. СПб. 2012. С. 276-288.

[54] Чочаев Х.Х. Радиолокационные характеристики конвективных облаков: проблемы измерений и анализа. Нальчик: Полиграфсервис и Т, 2009. – 77 с.

[55] Абшаев М.Т., Абшаев А.М., Котелевич А.Ф., Сирота Н.В. Автоматизированная система обработки радиолокационная информации для целей штормооповещения и активного воздействия на облачные процессы // Труды XXVII Всерос. симп. «Радиолокационное исследование природных сред». – СПб. 2011. С. 211-225.

К разделу 8. Макрофизика градовых процессов

[1] Chisholm, A.J., Renick J.H. Supercell and multicell Alberta hailstorms // Proc. Inter. Cloud physics Conf., 1972. London. P. 62-68.

[2] Marwitz J.D. The structure and motion of severe hailstorms. Parts I - III. J. Appl. Met. 1972. Vol. 11. No 1. P. 166-201.

[3] Абшаев М.Т., Имамджанов Х.А. Структура и динамика развития градовых процессов в Ферганской долине // Труды ВГИ, Вып. 33, 1976. С.100-114.

[4] Абшаев М.Т. Структура и динамика развития градовых процессов // Труды ВГИ, Вып. 53, 1982. С. 6-22.

[5] Borland K.A., Browning K.A., Foote B., Chengnon S.A., et al. Hail: A review of hail science and hail suppression. – Met. Mon., Vol. 16, No 38. Edited by G.B. Foote and C.A. Knight. Amer. Met. Soc. Boston, Mass, 1977. – 277 p.

[6] Abshaev M.T., Nunez J.M. Hailstorms principal differences between some regions of the Northern and Southern hemispheres and the operating procedures at present // Proc. 6th WMO Sci. Conf. on Weather Modification, Paestum, Italy, 1994. P. 101-104.

[7] Browning K. A. and Foote G. B. Airflow and hail growth in supercell storms and some implications for hail suppression. Quart. J. Roy. Met. Soc., 1976. V. 102. P. 499-533.

[8] Fankhauser, J.C.,1971: Thunderstorm-environment interactions determined from aircraft and radar observations. Mon. Weather. Rev. P. 171-192.

[9] Fujita T. A detail analysis of the Fargo tornado of June 20, 1957 // Research Papers, No 42, 1960. US Weather Bureau, Washington. – 70 p.

[10] Джуртубаева Ф.Х., Малкарова А.М. Опасные явления погоды на территории Южного Федерального округа // Доклады конф/ молодых ученых КБНЦ РАН, Нальчик, 2006. С. 29-36.

[11] Силверман Б.А. Влияние гор на конвекцию // В книге «Динамика кучевых облаков» / Пер. с англ. М.: Изд. Мир, 1964. С. 15-44.

[12] Старостин А.Н., Миннахметов Р.М., Швецов В.С. Мезомасштабная структура полей радиоэха конвективных облаков в Молдавии. М.: Гидрометеоиздат, «Метеорология и гидрология», 1983, №10. С. 55-59.

[13] Плюснин С.Д., Потапов Е.И., Гараба И.А., Попова В.П. Прогноз эволюции конвективных штормов на основе анализа их радиоэха и годографа ветра в тропосфере в подвижной системе координат. М.: Гидрометеоиздат, Метеорология и гидрология, Вып.7, 2013. С. 43-52.

[14] Потапов Е.И. Особенности реализации технологии активного воздействия на градовые процессы в Республике Молдова на современном этапе // Труды Международной научно-практической конференции, посвященной 50-летию начала работ по защите от градf в Республике Молдова. Кишинев, 2014. С. 40-49.

К разделу 9. Микрофизика градовых процессов

[1] Bringi V.N. and V. Chandrasekar. Polarimetric Doppler Weather Radar. Principles and Applications. Cambridge University Press, 2001. – 636 p.

[2] Holler H. and Meischner P.F. Multiparameter Radar investigation of hailstorms and operational storm seeding in Southern Germany // 6th WMO Sci. Conf. on Weather Modification, Vol. 1. Paestum, Italy, 1994. – P. 47-50.

[3] Foote B, Browning K.A., K.A. Borland, S.A. Chengnon et al, 1977: Hail. A review of hail science and hail suppression. Published by Met. Mon., Vol., No 38, 1977. Amer. Met. Soc. Boston, Mass. – 277 p.

[4] Абшаев М.Т., Абшаев А.М., Малкарова А.М., Мизиева Ж.Ю. Радиолокационные исследования водосодержания кучево-дождевых облаков // Известия РАН. Физика атмосферы и океана, Том 45, № 6, 2009. С. 731-736.

[5] Heymsfield A.I., Jameson A.R., Frank H.W. Hail growth mechanisms in a Colorado storm: Part II. Hail Formation processes // J. Atm. Sci, V. 37, No 8, 1980. P. 1779-1807.

[6] Heymsfield A.I., Musil D.I. Case study of a hailstorms in Colorado. Part III: Particle growth processes at mid-levels deduced from inset measurements // J. Atm. Sci., V. 39, No 12, 1982. P. 2847-2866.

[7] Heymsfield A.I. Case study of a hailstorm in Colorado. Part IV. Graupel and hail growth mechanisms deduced from particle trajectory calculations // J. Atm. Sci., V. 40, No 6, 1983. P. 1482-1509.

[8] Heymsfield A.I. and Hjemfelt M.R. Processes of hydrometeor development in Oklahoma convective clouds // J. Atm. Sci., V. 41, No 19, 1984. P. 2811-2835.

[9] Абшаев М.Т. Новый метод воздействия на градовые процессы // Труды Всес. кон. по АВ на гидрометпроцессы. Л.: – Гидрометеоиздат, 1990. С. 118-126.

[10] Abshaev M.T. A new concept of hailstorm modification // Proc. 6th WMO Sci. Conf. on Weather Modification. Paestum, Italy, Vol. I, 1994. P. 139-142.

[11] Сулаквелидзе Г.К. Ливневые осадки и град. Л.: Гидрометеоиздат, 1967. – 412 с.

[12] Хоргуани В.Г. Микрофизика зарождения и роста града. М.: – Гидрометеоиздат, 1984. – 183 с.

[12] Knight C.A. Knight N.C. Hailstone embryos // J. Atm. Sci, 1970. Vol. 27, No 3. P. 659-666.

[13] Knight., C.A., and P. Squires, (editors). Hailstorms of the Central High Plains. Vol. I: The National Hail Research Experiment. Colorado Ass. Univ. Press, Boulder, 1982. – 282 p.

[14] Foote G.B. The study of hail growth utilizing observed storm conditions // J. Climate. Appl. Meteor., 1984. No 23. P. 84-101.

[15] Krauss T.W. and M. English. Hailstorm Seeding Experiment in Alberta // 9th Int. Cloud Physics Conf., Tallinn, USSR, 1984. Vol. III. P. 707-711.

[16] English M. Results of hail suppression research in Alberta, Canada // Preprints 11th Conf. on Weather Modification Amer., Met. Soc., 1987. Edmonton, – P. 98-101.

[17] Hallett J., Mossop S.C. Production of secondary ice particles during the riming process. Nature, No 249, 1974. P. 26-28.

[18] Абшаев М.Т. О концентрации градин и зародышей града в облаках // Труды ВГИ, 1976. Вып. 3 (5). С. 191-197.

[19] Rasmussen R.M., Heymsfield A.J. Melting and shedding of graupel and hail: model physics // J. Atm. Sci., 1987. – No 44. P. 2754-2763.

[20] Мейсон Б.Дж. Физика облаков / Пер. с англ. Л.: Гидрометеоиздат, 1961.

К разделам 10 и 11. Физические основы предотвращения града и Технологии ПГИ

[1] Федоров Е.К. Активные воздействия на метеорологические процессы // Вестник АН СССР, 1962. № 9. С. 73-78.

[2] Bergeron T. Of the physics of clouds and precipitation // Proc. Conf. Int. Union Geodesy and Geophysics, Lisbon, 1933. Part II. P. 156-178.

[3] Schaefer V.J. The production of ice-crystals in a cloud of super cooled water droplets // Science, 1946. Vol. 104, No I,. P. 457-464.

[4] Vonnegut B. The nucleation of ice formation by silver iodide // J. Appl. Phys., 1947. Vol. 18, No 7. P. 593-595.

[5] Сулаквелидзе Г.К., Бибилашвили Н.Ш., Лапчева В.Ф. Образование осадков и воздействие на градовые процессы. Л.: Гидрометеоиздат, 1965. – 203 с.

[6] Сулаквелидзе Г.К. Ливневые осадки и град. Л.: Гидрометеоиздат, 1967. – 412 с.

[7] Бартишвили И.Г., Бартишвили Г.С., Гудушаури Ш.Л., Ломинадзе В.П. К вопросу комбинированного воздействия на теплую и переохлажденную часть облака с целью предотвращения града // Труды ЗакНИГМИ, 1967. Вып. 2. С. 7-22.

[8] Вульфсон Н.И., Левин Л.М. Разрушение развивающихся кучевых облаков с помощью взрывов. Изв. АН СССР, Физика атмосферы и океана, Т. 8, № 2, 1972. С. 156-166.

[9] Browning K. A. and Foote G. B. Airflow and hail growth in supercell storms and some implications for hail suppression. Quart. J. Roy. Met. Soc. V. 102, 1976. P. 499-533.

[10] Абшаев М.Т., Дадали Ю.А. Некоторые вопросы воздействия на градовые процессы // Труды ВГИ, 1973. Вып. 22. С. 104-116.

[11] Абшаев М.Т. Новый метод воздействия на градовые процессы // Труды Всес. конф. «Активные воздействия на гидрометпроцессы», Киев. Под ред. Седунова Ю.С. Л.: Гидрометеоиздат, 1990. С. 118-126.

[12] M.T. Abshaev M.T., and A.I. Kartsivadze A.I. Radar methods and equipment for hail suppression // Proc. of the WMO/IAMAP Sci. Conf. on Weather Modification. Tashkent, 1973. P. 343-351.

[13] Денис А. Изменение погоды человеком / Пер. с англ. под ред. Ю.С. Седунова. М.: Изд. Мир, 1983. – 272 с.

[14] Бухникашвили А.В., Гайворонский И.И., Карцивадзе А.И., Кизирия Б.И., Окуджава А.М., Орджоникидзе А.А., Серегин Ю.А. Методика АВ на градовые процессы и результаты опытов в Алазанской долине // Труды Всес. совещ. по АВ на градовые процессы. Тбилиси, 1964. С. 76-87.

[15] Foote B, Browning K.A., K.A. Borland, S.A. Chengnon et al and hail suppression. Met. Mon., Vol. 16, No 38. Published by Amer. Met. Soc. Boston, Mass., 1977. – 277 p.

[16] Musil D.J., Sand W.R., Schleusener R.A. Analyses of data from T-28 aircraft penetration of a Colorado hailstorm // J. Appl. Met., 1973. No 12. P. 1364-1370.

[17] Musil D.J., May E.L., Smith P.L., Sand W.R. Structure of an evolving hailstorms. Part IV: Internal structure from penetrating aircraft // Mon. Weather. Review, No 104, 1976. P. 596-602.

[18] Heymsfield A. I. and Hjemfelt M. R. Processes of hydrometeor development in Oklahoma convective clouds // J. Atm. Sci., 1984. Vol. 41, No 19. P. 2811-2835.

[19] Marwitz I.D. Precipitation efficiency of thunderstorms on the High Plains // J. Res. Atmos., 1972. No 6. P. 245-247.

[20] Atlas D. The paradox hail suppression // J. Atm. Sci., 1977. Vol. 5. P. 139-145.

[21] Бартишвили Я.Т., Бартишвили Г.С., Гудушаури Ш.Л., Ломинадзе В.П., Цицвашвили Ш.И., Шмерлинг И.С. Результаты противоградовых работ, проводимых по методу ЗАКНИГМИ // Труды VIII Всес. конф. по физике облаков и АВ. Л.: Гидрометеоиздат, 1969. С. 500-507.

[22] Berthoumieu J.F. The concept of cloud base seeding with hygroscopic salts flares for hail prevention and rain precipitation. An actualization // Proc 9th Int. Sci. Conf. WMO, 2003. Casablanca. P. 263-267.

[23] Бибилашвили Н.Ш., Гораль Г.Г., Калов Х.М., Экба Я.А. Исследование разрушения конвективных облаков взрывом и продуктами ликвидации противоградовых снарядов // Труды ВГИ, 1981. Вып. 47. С. 36-44.

[24] Гайворонский И.И., Зацепина Л.П., Зимин В.В. Результаты опытов по воздействию на конвективные облака грубодисперсными порошками // Труды ЦАО, 1976. Вып. 105. С. 49-63.

[25] Серегин Ю.А.: Исследования по искусственным воздействиям на облака и туманы.

Труды ЦАО, 1981. Вып.153. С. 30-45.

[26] Колосков Б.П., Корнеев В.П., Петров В.В., Берюлев Г.П., Данелян Б.Г. Метеозащита мегаполисов: концепция, технические средства и результаты // Труды ЦАО Вопросы физики облаков (сборник памяти С.М. Шметера). М., 2008. С. 174-200.

[27] Колосков Б.П., Корнеев В.П., Щукин Г.Г. Методы и средства модификации облаков. СПб. 2012. – 341 с.

[28] Абшаев А.М., Абшаев М.Т. Проекты авиационной технологии защиты от града // Труды научно-практической конф., посвященной 40-летию начала производственных работ по защите от града. Нальчик, 2011. –С. 101-110.

[29] Абшаев М.Т., Жакамихов Х.М. О вымывании облачной воды грубодисперсным аэрозолем // Труды Всерос. конф. по физике облаков и АВ на гидромет. процессы. СПб: Гидрометеоиздат, 2005. С. 131-142.

[30] Абшаев М.Т., Белявский А.В., Дудин В.Е., Тхамоков Б.Х. Доплеровские исследования движения гидрометеоров и вертикальных потоков в грозоградовых облаках // Труды V Всес. совещ. по радиометеорологии. М.: Гидрометеоиздат, 1981. С. 41-46.

[31] Abshaev M.T., Abshaev A.M., Burtsev I.I., Jekamuhov M.K., Malkarova A.M., Sulakveldze G.K., Fedchenko L.M., et al. Development of rocket and artillery technology for hail suppression // In the book «Achievements in Weather Modification», UAE, Abu Dhabi, 2006. P. 109-127.

[32] Кондратенко В.А. Определение льдообразующей эффективности некоторых хладореагентов и пиротехнических композиций // Труды ВГИ, 1987. Вып. 69. С. 23-28.

[33] Rusmussen R.M., Lew I.K., Pruppacher H.R. A wind tunnel investigation of the riming model ice crystal aggregations // Proc. of the 9th Int. cloud physics Conf. Tallin, USSR, 1984. Vol. 1. P. 151-155.

[34] English, M. Results of hail suppression research in Alberta, Canada // Prep. 11th Conf. Weather Modification Amer., Met. Soc., 1987. Edmonton, Alta. P. 98-101.

[35] Abshaev A.M. Crystallizing agent dispersion at rocket and artillery seeding of hailstorms // Proc. 8th Int. Sci. Conf. WMO on Weather Mod. Casablanca, 2003. P. 357-360.

[36] Абшаев А.М., А.М., Абшаев М.Т., Садыхов Я.А. О распространении искусственного аэрозоля в мощных конвективных облаках // Метеорология и гидрология, 2003, № 9. С. 28-35.

[37] Абшаев А.М., Абшаев М.Т., Жекамухов М.К. Моделирование ракетного засева градовых облаков // Труды научно-практической конференции, посвященной 40-летию начала производ. работ по защите от града, 2011. Нальчик. С. 147-171.

[38] Report of the Meeting of experts to review the present status of hail suppression // WMO. Weather Modification Program. Hail Suppression Research. Nalchik, Russia, 27 September - 2 October 2003. – 140 p.

[39] Simpson J, Brier J.M., Simpson R.H. Stormfury Cumulus Seeding Experiment 1965: Statistical analysis and main result // J. Atmos. Sci, 1967. Vol. 24. - P. 508-521.

[40] Farley R.D., Wu Ting, Orville H.D., Hui Chen. The Numerical Simulation of Hail Suppression Experiments // Sixth WMO Sci. Conf. on Weather Modification Paestum, Italy, 1994. Vol. 1. P. 161-166.

[41] Ашабоков Б.А., Шаповалов А.В. Математическое моделирование градовых облаков // Труды научно-практической конф., посвященной 40-летию начала производст. работ по защите от града. Нальчик, 2011. С. 137-144.

[42] Vittori O. Preliminary note on the effects of pressure waves upon hailstones // Nubila 3, 1960. No. 1. P. 34-52.

[43] Dessens J., Berthet C., Sanchez J.L. The French hail prevention program ANELFA: Result updating and proposal for duplication // 8th WMO Conf. Weather Mod. Casablanca, Morocco, 2003. P. 295 – 298.

[44] Dessens J., Berthet C., Sanchez J.L. Seeding optimization for hail prevention with ground generators // J. Weather Modification, No 41, 2009. P. 104-111.

[45] Dessens J.A physical evaluation of a hail suppression project with silver iodide ground burners in southwestern France. J. Appl. Meteor., 1998. No 37. P. 1588-1599.

[46] Dessens J., Berthet C., Sanchez J.L. Mitigation of hail damages by cloud seeding in France and Spain // Proc. 5th European Conference on Severe Storms, 2009. Landshut, Germany.

[47] Changnon S.A., Davis Jr.R., Morgan G.M., ets. Hail suppression. Impacts and issues. 1975. – 451 p.

[48] Smith P.L. Hail suppression activity around the world // Preprints of the Symp. on Plan. Inv. Weather Modification Modif. Atlanta, 1992. Published by the Amer. Met. Soc. Boston, Mass.

[49] Krauss T. Aircraft Seeding Technology & Outstanding Issues in Hail Suppression // WMO Meeting on Hail Suppression. Nalchik, 2003. P. 57-61.

[50] English M. Results of hail suppression research in Alberta, Canada // Preprints 11th Conf. Weather Modification Amer., Met. Soc., 1987. Edmonton, Alta. P. 98-101.

[51] Krauss T. W. Alberta hail suppression project. Final report 2006 // Alberta Severe Weather Management Society, Calgary, Canada, 2006. P. 152-158.

[52] Guoguang Sh., Guo X., Hu H. Overview of hail suppression projects in China // WMO Meeting on Hail Suppression. Nalchik, 2003. P. 165-173.

[53] Дадали Ю.А., Лившиц Е.М. Радиолокационные исследования трансформации параметров облаков при естественном развитии и при активном воздействии на них // Труды ВГИ, 1985. Вып. 59. С. 104-113.

[54] Абшаев М.Т., Малкарова А.М. Оценка эффективности предотвращения града. – СПб.: Гидрометеоиздат, 2006. – 287 с.

[55] Седунов Ю.С. Активные воздействия на метеорологические процессы в интересах народного хозяйства // Метеорология и гидрология, 1986. № 9. С. 5-17.

[56] Abshaev M.T. Automated rocket technology of hail suppression // 8th WMO Sci. Conf. on Weather Modification, 2003. Casablanca, Morocco. P. 335-338.

[57] Abshaev M.T. Russian rocket technology of hail suppression, seeding concept, criteria, schemes, radar control, rockets, efficiency estimation // Report No 6. Meeting of experts on hail suppression. Nalchik, 2003. P. 91-98.

[58] Абшаев М.Т. Этапы развития и основные положения современной ракетной технологии противоградовой защиты // Труды научно-практической конференции, посвященной 40-летию начала производственных работ по защите от града. Нальчик, 2011. С. 11-29.

[59] Абшаев М.Т., Абшаев А.М., Несмеянов П.А., Малкарова А.М., Емельянов В.Н. Российская автоматизированная технология противоградовой защиты // Журнал Экология и промышленность России, 2007, № 6. С. 20-23.

[60] Bruintjes R.T., Clark T.L., Hall W.D. The dispersion and transport of tracer plumes in complex terrain and the implications for cloud seeding experiments // 6th WMO Sci. Conf. on Weather Modification. Paestum, Italy, 1994. Vol. 1. P. 291-294.

[61] Reinking R.F., Martner B.E. and B.W. Orr. Cloud investigation of seeding material determined by tracking chaff with dual-polarization radar // 6th WMO Sci Conf. Weather Modification Paestum, Italy, 1994. Vol. 1. P. 309-312.

[62] Абшаев М.Т., Малкарова А.М. Оценка эффективности предотвращения града. СПб.: Гидрометеоиздат, 2006. – 280 с.

[63] Руководство по применению радиолокаторов МРЛ-4, МРЛ-5, МРЛ-6 в системе градозащиты / М.Т. Абшаев, И.И. Бурцев, С.И. Ваксенбург, Г.Ф. Шевела. Л.: Гидрометеоиздат, 1980. – 230 с.

[64] Абшаев М.Т., Бибилашвили Н.Ш., Бурцев И.И., Пометельников В.А., Сулаквелидзе Г.К. Временные методические указания по организации и проведению противоградовых работ. Л.: Гидрометеоиздат, 1974. – 142 с.

К разделу 12. Радиолокационное обеспечение ПГЗ

[1] Абшаев М.Т., Бибилашвили Н.Ш., Бурцев И.И., Пометельников В.А., Сулаквелидзе Г.К. Временные методические указания по организации и проведению противоградовых работ. Л.: Гидрометеоиздат, 1974. – 142 с.

[2] Абшаев М.Т. Радиолокационные характеристики и микроструктура конвективных облаков // Труды ВГИ, Вып. 5, 1966. С. 86-105.

[3] Абшаев М.Т., Капитанников А.В., Каплан Л.Г., Тапасханов В.О. и др. Трехволновый автоматизированный радиолокационный комплекс // Труды ВГИ, Вып.74., 1989. С. 93-99.

[4] Абшаев М.Т., Шевела Г.Ф., Васильев Г.Ф., Ваксенбург С.И. Специализированный радиолокатор градозащиты и штормооповещения МРЛ-5 и его метеорологическая эффективность // Труды ВГИ, Вып. 33, 1975. С. 3-30.

[5] Абшаев М. Т., Бурцев И. И., Шевела Г.Ф. Руководство по применению радиолокаторов МРЛ-4, МРЛ-5 и МРЛ-6 в системе градозащиты. Л.: Гидрометеоиздат, 1980. – 231 с.

[6] Абшаев М.Т., Пашкевич М.Ю. Способы и устройства отображения структуры радиоэха метеообъектов на черно-белых экранах // Труды Тр. ВГИ, Вып. 33, 1975. С. 31-42.

[7] Абшаев М.Т., Вовшин Б.М., Вылегжанин И.С., Ефремов В.С., Жуков В.Ю., Мельничук Ю.В. Стасенко В.Н., Шаповалов А.В., Щукин Г.Г. Когерентный метеорологический радиолокатор с поляризационной селекцией сигнала для оснащения сети Росгидромета // Труды XXVII Всероссийского симпозиума «Радиолокационные исследования природных сред». СПб. 2011. С. 195-211.

[8] Абшаев М.Т., Абшаев А.М., Малкарова А.М., Тезадов С.М., Бендерский Г.П., Ефремов В.С., Вылегжанин И.С., Соловьев А.Г. Метеорологический канал трассового радиолокационного комплекса с электронным сканированием пространства // Доклады Всероссийской Всерос. конф. по физике облаков и АВ на гидрометеорологические . процессы. Нальчик, 2011. С. 327-333.

[9] Абшаев М.Т., Абшаев А.М. Программа обработки информации различных метеорологических радиолокаторов // Труды XXIII Всерос. симпозиума «Радиолокационные исследование природных сред». СПб, 2013. С. 214-222.

[10] Абшаев М.Т., Абшаев А.М., Котелевич А.Ф., Сирота Н.В. Автоматизированная система обработки радиолокационная информации для целей штормооповещения и активного воздействия на облачные процессы // Сборник трудов XXVII Всерос. симп. «Радиолокационные исследования природных сред». СПб. 2011. С. 211-225.

[11] Абшаев М.Т., Абшаев А.М., Кузнецов Б.К., Котелевич А.Ф., Чочаев Х.Х. и др. Новые успехи в автоматизации ракетной технологии защиты от града // Труды Всерос. конф. по физике облаков и АВ на гидрометпроцессы. Нальчик, 2011. С. 320-327.

[12] Абшаев М.Т., Малкарова А.М. Оценка эффективности предотвращения града. – СПб.: Гидрометеоиздат, 2006. – 287 с.

[13] Абшаев М.Т., Абшаев А.М., Жарашуев М.В., Котелевич А.Ф., Сирота Н.В. Автоматизированная система управления противоградовыми операциями // Труды научно-практической конф., посвященной 40-летию начала производственных работ по защите от града. Нальчик, 2011. С. 211-225.

[14] Довиак Р., Зрнич Д. Доплеровские радиолокаторы и метеорологические наблюдения / Пер. с англ. Л.: Гидрометеоиздат, 1988. – 512 с.

[15] Сальман Е.М. Влияние неоднородности распределения отражаемости на точность ее измерения // Труды ГГО, Вып. 281, 1973. С. 14-18.

[16] Hachenberg, O.: in Landolt-Bornstein, New Series, Vol. VI/2a, Astronomy and Astrophysics (Editors K. Schaifers, H. H. Voigt). Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1981. P. 287.

[17] Tapping, K.F., Boteler, D., Charbonneau, P., Crouch, A., Manson, A., Paquette, H. – Solar Physic. No 246, 2007. – 309 p.

[18] Tapping, K.F., Zwaan, C.: Solar Phys. 199, 2001. – 317 p.

[19] Kevin M. Calibration of the Doppler on Wheels System Gain using Solar Flux, 2002.

[20] Абшаев А.М., Абшаев М. Т. Метод калибровки МРЛ и ДМРЛ по радиоизлучению солнца // Труды Международной конф., посвященной 50-летию противоградовых работ в Молдавии. Кишинев, 2014. С. 168-175.

[21] Абшаев М.Т., Абшаев А.М. Возможности и ограничения радиолокационных метеорологических измерений // Труды II Всерос. конф. «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля природной среды». Том. I. СПб, 2012. С. 276-288.

К разделу 13. Технические средства засева градовых облаков

[1] Borland K.A., Browning K.A., Foote B., Chengnon S.A. et al. Hail: A review of hail science and hail suppression. – Met. Mon. Vol. 16, No 38, Edited by G.B. Foote and C.A. Knight. Amer. Met. Soc. Boston, Mass, 1977. –277 p.

[2] Krauss T.W. Aircraft seeding technology and some outstanding issues of hail suppression // Hail suppression research, Report No 6. Meeting of experts WMO on Hail Suppression, Nalchik, 2003. P. 175-176.

[3] Колосков Б.П., Корнеев В.П., Щукин Г.Г. Методы и средства модификации облаков. СПб. 2012. – 341 с.

[4] Несмеянов П.А., Корнеев В.П., Петрунин А.М., Платонов Н.А., Шакиров И.Н. Новые наземные и самолетные генераторы льдообразующего аэрозоля // Труды научно-практической конф., посвященной 40-летию начала производственных работ по защите от града. Нальчик, 2011. С. 293 - 297.

[5] Корнеев В.П., Петров В.В., Квочур А.Н., Ресницкий Ю.П. Перспективы использования самолета СУ-30 в работах по активным воздействиям на облака // Труды научно-практической конф., посвященной 40-летию начала производственных работ по защите от града. Нальчик, 2011. С. 287-297.

[6] Патент SU 163090. Артиллерийский противоградовый снаряд / Чупров Я.С., Сулаквелидзе Г.К., Окунь Г.А., Бибилашвили Н.Ш. и др.

[7] Wen Fang, Guoguang Zheng, Xueliang Guo and Huanbin Xu. Hail suppression activities in China: an overview // Hail suppression research, Report No 6. Meeting of experts WMO on hail suppression, Nalchik, 2003. P. 163-173.

[8] Жекамухов М.К., Абшаев А.М. Диспергирование кристаллизующих реагентов методом взрыва. III. Сложная схема броуновской коагуляции и формирование спектра льдообразующих частиц // Метеорология и гидрология, 2012. № 9. С. 58-68.

[9] Ćurić M. and Babić Z. Hail suppression activities in Serbia // Hail suppression research, Report No 6. Meeting of experts WMO on hail suppression, Nalchik, 2003. P. 175-176.

[10] Boev P. and Simeonov P. Hail suppression activities in Bulgaria // Hail suppression research, Report No 6. Meeting of experts WMO on hail suppression, Nalchik, 2003. P. 161-164.

[11] Патент РФ № 2060002 от 30.01.1992. Противоградовая ракета / Гончаренко Б.И., Карягин Н.В., Мелешков Л.А., Палей А.А., Скачек О.В.

[12] Гайворонский И. И., Серегин Ю. А. О введении реагентов в облака при воздействии на градовые процессы // Труды ЦАО, 1966, Вып. 65. – 48 с.

[13] Abshaev M.T., Stasenko V.N., Nesmeyanov P.A., Dubinin B.N., Korneev V.P., Peive V.I., Ioffe E.I. Russian hail suppression rocket systems: main technical and performance characteristics, development concept // 8th WMO Sci. Conf. on Weather Modification. Casablanca, Morocco, 2003. P. 311-314.

[14] Абшаев А.М., Азиев В.Х., Бурцев И.И., Дубинин Б.Н.., Кривошапка О.Н., Кузнецов Б.Н., Несмеянов П.А., Серов В.Д., Сидоров А.И., Федченко Л.М. Новые противоградовые комплексы «Небо» и «Кристалл» // Труды Всесоюзной конф. «АВ на гидрометпроцессы», Киев. Л: Гидрометеоиздат, 1990. С. 476-482.

[15 Абшаев М.Т., Кузнецов Б.К., Дядюченко В.Н., Стасенко В.Н., Несмеянов П.А., Иоффе Е.И., Зорин В.А., Кратиров Д.В., Михеев Н.И., Каиров А.М. Состояние разработки и перспективы оснащения противоградовых работ малогабаритными противоградовыми ракетами и установками нового поколения // Труды научно-практической конференции, посвященной 40-летию начала производственных работ по защите от града. Нальчик, 2011. С. 278-286.

[16] Вареных Н.М., Емельянов В.Н., Несмеянов П.А., Шакиров И.Н. Состояние работ по созданию противоградовых ракет нового поколения // Труды научно-практической конф., посвященной 40-летию начала производственных работ по защите от града. Нальчик, 2011. С. 276-277.

[17] Abshaev, M.T., Abshaev A.M., Kuznetscov B.K., Kotelevich A.F., Chochaev H.H., at al. New advances in automation of antihail rocket technology // 10th WMO Conf. Weather Mod. Modification, Bali, Indonesia, 2011. P. 191-199.

[18] Абшаев А.М., Абшаев М.Т., Зорин В.А., Кратиров Д.В., Михеев Н.И. Автоматизированный малогабаритный противоградовый комплекс «Ас-Элия» // Труды Международной конф., посвященной 50-летию противоградовых работ в Молдавии. Кишинев, 2014. С. 134-143.

[19] Абшаев М.Т., Дубинин Б.Н., Шимшилашвили М.Э. Об эффективности технических средств воздействия на градовые процессы // Труды Тр. ВГИ, Вып. 63, 1986. С. 110-126.

[20] Дадали Ю.А., Лившиц Е.М. Радиолокационные исследования трансформации параметров облаков при естественном развитии и при активном воздействии на них // Труды ВГИ, 1985. Вып. 59. С. 104-113.

[21] Беляев С.П., Ким Н.С., Оганесян С.Х., Сенковенко С.А. Влияние обдува генератора воздушным потоком на дисперсность образующихся аэрозолей // Коллоидный журнал, Т. 42, № 3, 1980. С. 533-535.

[22] Хоргуани В.Г. Микрофизика зарождения и роста града. М.: Гидрометеоиздат, 1984. – 183 с.

[23] Абшаев М.Т., Анаев М.А., Соловьев В.В., Шагин С.И.. Беспилотный авиационный комплекс для мониторинга и предотвращения опасных явлений погоды. Экология и промышленность России. 2008. № 10. С. 4-8.

[24] Абшаев А.М., Абшаев М.Т., Малкарова А.М. Состояние и перспективы развития техники и технологии противоградовой защиты // Труды Международной конф., посв. посв. 50-летию противоградовых работ в Молдавии. Кишинев, 2014. С. 21-31.

К разделу 14. Реагенты для засева градовых облаков

[1] Schaefer V.J. The production of ice-crystals in a cloud of supercooled water droplets. – Science, 1946, Vol. 104. – 457 p.

[2] Wegener A. Thermodynamik der Atmosphere. Leipzig, 1911. – 311 p.

[3] Vonnegut B. Experiments with silver-iodide smokes in the natural atmosphere. Bull. Amer. Meteor. Soc., 1950, vol. 31.

[4] Никандров В.Я. Искусственные воздействия на облака и туманы. Л.: Гидрометеоиздат, 1959. – 191 с.

[5] Ким Н.С. Докторская диссертация «Искусственная кристаллизация в переохлажденных облачных средах». НПО «Тайфун», Обнинск, 1999. – 271 с.

[6] Закинян Р.Г. Кинетика роста льда на поверхностях предметов различных форм, помещенных в поток переохлажденного аэрозоля. // Материалы V научно-технической конференции СК ГТУ. 2001.- С. 20.

[7] Шилин А.Г., В.Н. Иванов А.Г., А.В.Савченко А.Г., и др. Исследование процессов старения льдообразующих аэрозолей, содержащих йодистое серебро // Труды Всерос. конф. по физике облаков и АВ, Нальчик, 2014. С.

[8] Емельянов В.Н., Несмеянов П.А., Эрландц Н.Ю., Шакиров И.Н. Результаты разработки новых пиротехнических составов льдообразующего аэрозоля для средств активного воздействия на облака // Труды юбилейной конф., посв. 40-летию начала производств. работ по защите от града. Нальчик: Печатный двор, 2011. С. 259-260.

[9] Федоренко А.И., Шилин В.А., Савченко А.В, Шилин А.Г. Новые возможности исследования льдообразующих составов на базе модернизированной горизонтальной

аэродинамической трубы ИЭМ // Труды Всерос. конф. по физике облаков и АВ, Нальчик, 2011. С. 278-286.

[10] Петрунин А.М., Корнеев В.П., Ким Н.С., Стасенко В.Н., Резников М.С., Поносов В.С. Стенд аэродинамический для проверки эффективности льдообразующих составов // Труды Всерос. конф. по физике облаков и АВ. Нальчик: Печатный двор, 2011. С. 286-293.

[11] Абшаев М.Т., Абшаев А.М., Жекамухов М.К. Моделирование ракетного засева градовых облаков // Труды юбилейной конф., посвященной 40-летию начала производств. работ по защите от града. Нальчик: Печатный двор, 2011. С. 147-171.

[12] Mather G.K., Terblanche D.E., Steffens F.E., Fletcher L. Results of South African cloud-seeding experiments using hygroscopic flares // J. Appl. Met. 1997. V.36. № 11. P.1433-1447.

[13] Беляева М.В., Дрофа А. С., Иванов В.Н. Эффективность стимулирования осадков из конвективных облаков солевыми порошками // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана, 2013. Т. 49, № 2. С.171-179.

[14] Shilin A.G., Drofa A.S., Ivanov V.N., Savchenko A.V., Shilin V.A. Experimental Studies of Silver Iodide Pyrotechnic Aerosol Ice Forming Efficiency Dynamics // 19th Inter. Conf. “Nucleation and Atm. Aerosols”. AIP Conf. Proc., New York, 2013, V 1527. P. 945-949.

[15] Гайворонский И.И., Зацепина Л.П., Серегин Ю.А. Результаты опытов воздействия на конвективные облака. Изв. АН СССР, Физика атмосферы и океана, 1970, т. 6, Вып. 3. С. 252–258.

[16] Колосков Б.П., Корнеев В.П., Щукин Г.Г. Методы и средства модификации облаков. СПб. 2012. – 341 с.

[17] Young K.C. A numerical examination of same hail suppression concepts // Hail: review hail science and hail suppression. Met. Monograph, Vol.16, No 38, 1977. P. 195-214.

[18] Абшаев М.Т., Жакамихов Х.М. О вымывании облачной воды искусственными центрами коагуляции // Труды Всерос. конф. по физике облаков и АВ. Нальчик, 2005. С. 131-142.

[19] Cotton W.R., Cornin M.L. Seeding considerations for selected cloud systems // WMO PEP. Geneva. 1978. Report No 9.

[20] Gagin A. Cloud seeding technology. Weather Modification Program, Precipitation Enhancement Project // WMO PEP. Geneva. Report No 13. 1979. P. 136-152.

[21] Лактионов А.Г. Характеристики мгновенных точечных и трассирующих источников ледяных ядер // Метеорология и гидрол. 1983. № 1. С. 37-43.

[22] Stith J.L., Scala J., Reinking R.F., Martner B. Three techniques for studying the transport and dispersion of seeding material // 6th Conf. on Weather Modification Paestum, Italy, 1994. P. 405-408.

[23] Smith P.L., Orville H.D., Stith J.L., Boe B.A., Griffith D.A., Politovich M.K., Reinking R.F. Evaluation studies of the North Dakota cloud modification project // 5th Conf. on Weather Modification and app. cloud phys. Beijing, China, 1989. P. 371-377.

[24] Aleksis N.M., Talenta B. Technological feasibility of hail suppression hypotheses // 6th WMO Scientific Conference on Weather Modification Paestum, Italy, 1994. P. 147-150.

[25] Абшаев А.М., Абшаев М.Т., Садыхов Я.А. О распространении искусственного аэрозоля в мощных конвективных облаках // Метеорология и гидрология. № 9, 2003. С. 28-35.

[26] Абшаев А.М., Абшаев М.Т., Садыхов Я.А. Диффузия кристаллизующего аэрозоля в мощных конвективных облаках // Труды научно-практической конф., посвященной 40-летию начала производст. работ по защите от града. Нальчик, 2011. С. 172-190.

К разделу 15. Порядок организации ПГЗ

[1] Думанский Ю.Д., Никитина Н.Г., Иванов Д.С., Щукин Г.Г., Брылев Г.Б., Устинов В.К., Фогель И.А., Абшаев М.Т., Юрманов В.А. Методические указания. Контроль и нормализация электромагнитной обстановки, создаваемой метеорологическими радиолокаторами». – Л: Гидрометеоиздат, 1990. – 63 с.

[2] Физические факторы производственной среды. Электромагнитные поля в производственных условиях. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы (Утв. Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации, Постановление от 19.02.2003 № 10).

[3] Санитарные нормы, правила и гигиенические нормативы «Гигиенические требования к ЭМП в производственных условиях», Постановление № 69 от 21.06.2010.

[4] Программа подготовки бойцов ракетных пунктов военизированных служб по активному воздействию на метеорологические и другие геофизические процессы (Утв. Росгидрометом 22.11.2011).

[5] Положение о приобретении, хранении и использовании средств АВ специализированными организациями активного воздействия на метеорологические и другие геофизические процессы (Утв. Постановлением Правительства РФ от 15.05.1999 г. № 807).

[6] Распоряжение Правительства РФ от 18.12.92 № 2392-Р «Об усилении контроля за приобретением, перевозкой, хранением, учетом и использованием противоградовых и противолавинных ракетно-артиллерийских комплексов, применяемых для работ по активному воздействию на гидрометеорологические процессы».

[7] Положение о поставках продукции производственно-технического назначения (Утв. Постановлением Совета Министров СССР от 25.07.88 № 888).

[8] Положение о порядке предъявления и рассмотрения претензий предприятиями, организациями и учреждениями и урегулирования разногласий по хозяйственным договорам (Утв. Постановлением Совета Министров СССР от 17.10.83 № 753).

[9] Инструкция о порядке учета, хранения и передачи средств активного воздействия одной специализированной организацией другой специализированной организации (Утв. приказом Росгидромета от 07.12.99 № 141).

[10] Дополнения к приказу Росгидромета от 26.02.2007 года № 58 «Об утверждении Инструкции «О порядке учета, хранения и передачи средств активного воздействия одной специализированной организацией другой специализированной организации» (приказ Росгидромета от 02.02.2011 № 33).

[11] ГОСТ Р 51270-99 «Изделия пиротехнические. Общие требования безопасности» (Утв. Постановлением Госстандарта России от 27.05.1999 г. № 135).

[12] ГОСТ 19433-88 Грузы опасные. Классификация и маркировка.

[12] ГОСТ 19433 Г

[13] Технический регламент о безопасности пиротехнических составов и содержащих их изделий (Утв. Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.12.2009 г. № 1082 г.).

[14] Распоряжение Правительства Российской Федерации от 02.11.2009 г. № 1629-р «Перечень объектов, подлежащих обязательной охране подразделениями милиции вневедомственной охраны при органах внутренних дел Российской Федерации».

К разделу 16. Порядок воздействия на градовые процессы

[1] Абшаев М.Т. Новый метод воздействия на градовые процессы // Труды Всес. конф. по АВ на гидромет. процессы. Л.: Гидрометеоиздат, 1990. С. 118-126.

[2] Абшаев М.Т., Малкарова А.М. Оценка эффективности предотвращения града. СПб.: Гидрометеоиздат, 2006. – 280 с.

[3] Абшаев М.Т., Абшаев А.М., Несмеянов П.А., Малкарова А.М., Емельянов В.Н. Российская автоматизированная технология противоградовой защиты // Журнал Экология и промышленность России, 2007, № 6. С. 20-23.

[4] Abshaev M.T., Nunez J.M. Hailstorms principal differences between some regions of the Northern and Southern hemispheres and the operating procedures at present // Proc. 6th WMO Sci. Conf. on Weather Modification, Paestum, Italy, 1994. P. 101-104.

[5] Качурин Л.Г. Качурин Л.Г. Физические основы воздействия на атмосферные процессы. Л.: Гидрометеоиздат. 1990. – 463 с.

[6] Farley R.D., Nguyen P., Orville H.D. Numerical simulation of cloud seeding using a three-dimensional cloud model // Journal Weather Modification, No 26, 1994. P. 113-124.

[7] Curic M. On the modeling of hail storms // // Report No 6. Meeting of WMO experts on Weather Modification. Nalchik, Russia. 2003. P. 133-142.

[8] Абшаев М.Т., Абшаев А.М., Жекамухов М.К. Моделирование ракетного засева градовых облаков // Труды юбилейной конф., посвященной 40-летию начала производств. работ по защите от града. Нальчик: Печатный двор, 2011. С. 147-171.

[9] Приказ Министра обороны Российской Федерации № 220, Минтранса Российской Федерации № 89, Росгидромета № 51 от 15.05.2001 «Об утверждении Инструкции по организации и проведению противоградовых стрельб на территории Российской Федерации».

К разделу 17. Оценка эффективности противоградовых работ

[1] Абшаев М.Т., Малкарова А.М. Оценка эффективности предотвращения града. СПб.: Гидрометеоиздат, 2006. – 280 с.

[2] Абшаев М.Т., Сафаров С.Г. Оценка эффективности активного воздействия на градовые процессы // Труды ВГИ. 1991. Вып. 80. С. 122-136.

[3] Abshaev M.T., 1999. Evolution of seeded and non-seeded hailstorms. Proceedings 7th WMO Sci. Conf. on Weather Modification, Chiang Mai, Thailand, Vol. 2, pp. 407-410.

[4] Abshaev M.T., Malkarova A.M. Efficiency of Russian hail suppression technology in different regions // Hail suppression research. Report No 6. Meeting of experts WMO on hail suppression. Nalchik, 2003. P. 99-115.

[5] Abshaev M.T., Malkarova A.M. Results of hail suppression Project in Argentina. Proc. 7th WMO Sci. Conf. on Weather Modification, Chiang Mai, Thailand, Vol. 2, 1999. P. 391-394.

[6] Федченко Л.М., Абшаев М.Т., Тлисов М.И. Комплексный градовый эксперимент: задачи, техническое оснащение, предварительные результаты // Труды Всесоюзной конф. «АВ на гидрометпроцессы», Киев. Л.: Гидрометеоиздат, 1990. С. 126-133.

[7] Foote G.B., Mohr C.G. Results of randomized hail suppression experiment in northeast Colorado. Part VI. Post hoc stratification by storm intensity and type // Appl. Met., 1979, № 18. P. 1589-1600.

[8] Federer B., Waldvogel A., Schmidt W. et al. Main results of Grossversuch-4 // J. Climate Appl. Met. 1986. Vol. 25. P. 917 - 957.

[9] Krauss T.W. Radar Characteristics of Seeded and Non-Seeded Hailstorms in Alberta, Canada // 7th WMO Sci. Conf. on Weather Modification. Chiang Mai, Thailand, 1999, Vol.2. P. 415-418.

[10] Krauss T.W., Santos J.R. The effect of hail suppression operations on precipitation in Alberta, Canada // 8th WMO Sci. Conf. on Weather Modification. Casablanca, Morocco, 2003. P. 279-282.

[11] Dessens J., Jose Luis Sanchez, Roberto Fraile. Response of Silver iodide ground seeding on different types of hailstorms as measured with hail pads // 7th WMO Sci. Conf. on Weather Modification. Chiang Mai, Thailand, 1999. Vol. 2. P. 387-390.

[12] Dessens J., Berthet C. Sanchez J.L. The French hail suppression program “ANELFA”: Results updating and proposal for duplication // 8th WMO Sci. Conf. on Weather Modification. Casablanca, Morocco, 2003. P. 295-298.

[13] Long A.B., Crow E.L., Huggins A.W. Analysis of hailfall during 1972-74 in the NHRE // Proc. Int. Weather Modification, Boulder, WMO. P. 138-157.

[14] Тлисов М.И. Физические характеристики града и механизм его образования. СПб.: Гидрометеоиздат, 2002. – 386 с.

[15] Тлисов М.И., Хучунаев Б.М. исследование физических характеристик града при помощи наземных индикаторов // Труды ВГИ, Вып. 69, 1987. С. 81-87.

[16] Smith P.L., Johnson L.R., Priegnitz D.L., Mielke P.W. Statistical evaluations of the North Dakota cloud Modification Project // 6th WMO Sci. Conf. On Weather Modification Paestum, Italy, 1994. Vol. 1. P. 281-284.

[17] Инструкция о государственном обязательном страховании имущества сельскохозяйственных предприятий системы Госагропрома СССР.- М.: Финансы и статистика, 1988. – 96 с.

[18] Инструкция по определению и выплате страхового возмещения сельскохозяйственным предприятиям системы МСХ СССР по обязательному страхованию сельхозкультур и многолетних насаждений. М.: Финансы, 1978. – 26 с.

[19] Manual de Tasaciones de Danos de granizo en vinedos. Mendosa, 1973. – 87 p.

[20] Abshaev M.T. Informes Antigrad Latinoamericana S.A. de la Lucha Antigranizo en la Zona Norte de la Provincia de Mendoza República Argentina, San Martin:

- Informes final No 1 – Campaña 1993/1994. –119 p.;
- Informes final No 2 – Campaña 1994/1995. – 122 p.;
- Informes final No 3 – Campaña 1996/1997. – 141 p.;
- Informes final No 4 – Campaña 1997/1998. – 98 p.

[21] Агекян Т.А. Основы теории ошибок для астрономов и физиков // 2-е изд. М.: Наука. 1972. – 170 с.

[22] Berville P., Jean C., Lescure A. Relations entre les parameters physique, des chutes de grele et les degats occasiones aux cultures // Contr. GNEFA ACH. 1980. No 39. – 59 p.

[23] Тлисов М.И., Таумурзаев А.Х., Федченко Л.М., Хучунаев Б.М. Физические характеристики града и повреждаемость сельхозкультур // Всес. конф. по АВ на гидрометпроцессы. Л.: Гидрометеоиздат, 1990. С. 153-157.

[24] Бухникашвили А.В., Карцивадзе А.И., Гайворонский И.И., Серегин Ю.А. и др. Методика активных воздействий на градовые процессы и результаты опытов, проведенных в Алазанской долине // Труды Всес. совещания по АВ на градовые процессы. Тбилиси, 1964. С. 76-87.

[25] Сулаквелидзе Г.К. Ливневые осадки и град. Л.: Гидрометеоиздат, 1967. – 412 с.

[26] Сулаквелидзе Г.К., Джураев А.Д., Сокол Г.П. Оценка эффективности противоградовых работ // Труды СаНИИ. 1977. Вып. 48 (129). С. 32 - 44.

[27] Бокова П.А., Джураев А.Д., Севастьянова Т.В. Некоторые синоптические характеристики градообразующих процессов в Гиссарской долине // Труды САРНИГМИ. 1974. Вып. 31 (46). С. 135-144.

[28] Ломинадзе В.П., Бартишвили И.Г., Гудушаури Ш.Л. Методика оценки экономической эффективности работ по борьбе с градом // Труды ЗакНИИ. 1974. Вып. 55 (61). С. 79-91.

[29] Легкоступ С.С., Наурзоков Ю.Х. Методика расчета общей (абсолютной) экономической эффективности противоградовых мероприятий // Труды ВГИ. 1972. Вып. 20. С.18-21.

[30] Камалов Б.А., Махмудов К.М., Муминов Ф.А. Оценка эффективности противоградовой защиты хлопчатника. М.: Гидрометеоиздат, 1984. С. 7.

[31] Махмудов К. Определение ущерба от градобитий хлопчатника на разных стадиях развития // Метеорология и гидрология,1981. № 3. С. 97-102.

[32] Ашабоков Б.А., Калажоков Х.Х. О применении сплайн-функций к решению задачи прогнозирования в методах оценки эффективности противоградовых работ // Труды ВГИ. 1984. Вып. 55. С. 24-30.

[33] Ашабоков Б.А., Калажоков Х.Х., Федченко Л.М. Методы оценки эффективности активных воздействий на градовые процессы. Обзор ВНИИГМИ–МЦД. Гидрометеорология. 1989. Вып. 5. – 36 с.

[34] Качурин Л.Г., Бекряев В.И., Гурович М.В. Анализ эффективности воздействия на градовые процессы на основе численной модели // Тез. докл. Всес. конф. по активным воздействиям на гидрометпроцессы. Обнинск, 1987. С. 57.

[35] Федченко Л.М., Гораль Г.Г., Беленцова В.А., Мальбахова Н.М. Опасные конвективные явления и их прогноз в условиях сложного рельефа. М.: Гидрометеоиздат, 1991. – 424 с.

[36] Абшаев М.Т., Абшаев А.М., Жарашуев М.В., Котелевич А.Ф., Сирота Н.В. Автоматизированная система управления противоградовыми операциями // Труды научно-практической конф., посвященной 40-летию начала производственных работ по защите от града. Нальчик, 2011. С. 211 - 225.

[37] Буйков М.В., Кузьменко А.Г. Анализ с помощью бутстрэпа результатов эксперимента по ослаблению градобитий // Труды УкрНИИ. 1987. Вып. 221. С. 13-29.

[38] Журбенко И.Г., Кудлаев Э.М. О выявлении эффекта воздействия в рандомизированных экспериментах // Успехи матем. 1989. Т. 39, Вып. 1 (235). С. 3-38.

[39] Кудлаев Э.М., Козлов М.В., Лагутин М.Б., Федченко Л.М. Статистическая оценка эффективности работы противоградовой службы Северного Кавказа в 1978-1983 гг. // Обозрение прикладной и промышл. матем. 1995. Т. 2, Вып. 2. С. 223-253.

[40] Абшаев М.Т., Бадахова Г.Х. Оценка экономической эффективности противоградовых работ// Труды ВГИ, 1991. Вып. 83. С. 116-125.

[41] Абшаев М.Т., Малкарова А.М. Эффективность российской технологии воздействия на град // Доклады Всерос. конф. по физике облаков и АВ на гидрометпроцессы. Нальчик, 2005. С. 393-399.

[42] Foote G.B, Browning K.A., Borland K.A., Chengnon S.A., at al. Hail: A review of hail science and hail suppression. Met. Mon., Vol. 16, No 38, Edited by G.B. Foote and C.A. Knight. Am. Met. Soc. Boston, Mass, 1977. – 277 P.

[43] Megreditchian G. The statistical aspects of inviting and designing Weather Modification experiments // Weather Modification Program. WMP. Report No 2. Tech. Doc. WMO/TD. Vol. 11. No 53. P. 291-296.

[44] Никулин М.С. О критерии χ-квадрат для непрерывных распределений // Теория вероятностей и ее применения. 1973. Т. 8, № 3. С. 675-676.

[45] Makitov V.S. The hailstorm trajectories in Northern Caucasus vs. Argentina // Report No 6. Meeting of WMO experts on Weather Modification. Nalchik, 2003. P. 117-118.

[46] Boev P., Simeonov P. Hail suppression activities in Bulgarian // Report No 6. Meeting of WMO experts on Weather Modification. Nalchik, 2003. P. 161-164.

[47] Vucinic Z. 30 Years of hail suppression in Serbia // 7th WMO Sci. Conf. on Weather Modification. Chiang Mai, Thailand, 1999. Vol. 2. P. 383-386.

[48] Pocakal D.J., Stalec. Statistical analysis of hail characteristics in the hail-protected western part of Croatia, using data from hail suppression stations. J. Atm. Res. No 67/68, 2003. P. 533-540.

[49] Rakovec J., Gregoric B., Kranjc A., Mekinda T., Kajfez-Bogataj L. Some evaluations of hail suppression system efficiency in Slovenia, Yugoslavia. Theor. Appl. Clim. No 41, 1990. P. 157-171.

[50] Wen Fanf, Guoguang Zheng. Overview of hail suppression in China // Report No 6. Meeting of WMO experts on Weather Modification Nalchik, 2003. P. 165-173.

К разделу 18. Оценка экологической чистоты технологии ПГЗ

[1] Abshaev M.T., Malkarova A.M., Sulakvelidze G.K., Fedchenko L.M., et al. Development of rocket and artillery technology for hail suppression. In the book «Achievements in Weather Modification», UAE, Abu Dhabi, 2006. – P. 109-127.

[2] Думанский Ю.Д., Никитина Н.Г., Иванов Д.С., Щукин Г.Г., Брылев Г.Б., Устинов В.К., Фогель И.А., Абшаев М.Т., Юрманов В.А. Методические указания. Контроль и нормализация электромагнитной обстановки, создаваемой метеорологическими радиолокаторами». Л: Гидрометеоиздат, 1990. – 63 с.

[3] Ракеты противоградовые. Методика оценки экологической чистоты. 000Д2. ВНИИП «Дарг», 1996. – 39 с.

[4] Безопасные уровни содержания вредных веществ в окружающей среде. – Свердловск: Издательство НИИ общей и коммунальной гигиены им. А.Т. Сысина АМН СССР. 1990.

[5] Малкарова А.М. Оценка экологической безопасности ракетной технологии ПГЗ // Труды научно-практической конф., посвященной 40-летию начала производственных работ по защите от града. Нальчик, 2011. С. 354-365.

[6] Бурцев И.И., Бурцева Л.В., Воробьева Т.И., Шведов С.В. Оценка концентрации реагентов в атмосферном воздухе и осадках на противоградовых полигонах Северного Кавказа // Труды ВГИ. 1974. Вып. 25. С. 98-106.

[7] Никорич Т.Д., Никорич В.А., Попов Е.И. Влияние противоградовой защиты на содержание реагента засева в малых водоемах на территории Молдавской ССР. – Труды ЦАО, 1984. Вып. 156. С. 76-83.

[8] Абесалашвили Л.Ш., Сунаташвили Г.Д. Химический состав атмосферных осадков Алазанской долины // Труды ИГАН Грузии: Мецниэреба, 1980. Вып. VII. С. 6-93.

[9] Абесалашвили Л.Ш., Сунаташвили Г.Д. Содержание йода и свинца в почвах Кахетии // Труды ИГАН Грузии, 1982. Вып. XIX. С. 103-110.

Авторы Руководства по организации и проведению противоградовых работ

М.Т. Абшаев – доктор физ-мат наук, профессор, академик РАЕН, «Заслуженный деятель науки РФ», Лауреат Государственных премий СССР и КБР, Правительства РФ, Международной премии «За выдающиеся достижения в области модификации погоды», автор более 500 научных работ, патентов, монографий и РД

А.М. Абшаев – кандидат физ-мат наук, доцент, Лауреат Международной премии «За выдающиеся достижения в области модификации погоды, автор 92 научных работ, патентов, РД, теоретической модели АВ и программно-технических комплексов «АСУ-МРЛ», «АСУ-Элия», ПУ «Элия-2»

М.В. Барекова – канд. физ-мат наук, автор более 30 научных работ и докладов в области детализированных прогнозов града, мезорайона разития, интенсивности и типа градовых процессов

А.М. Малкарова – доктор физ-мат наук, доцент, Лауреат Международной премии «За выдающиеся достижения в области модификации погоды», автор 105 научных работ, монографий, патентов и РД