

АКТИВНО - ПАССИВНАЯ РАДИОЛОКАЦИЯ

**грозовых
и грозоопасных
очагов
в облаках**

Под редакцией
Л. Г. КАЧУРИНА
и Л. И. ДИВИНСКОГО



Санкт-Петербург Гидрометеоиздат 1992

551.501.81+551.594.21-1

УДК 551.501.81 : 551.594.21

551.594.25

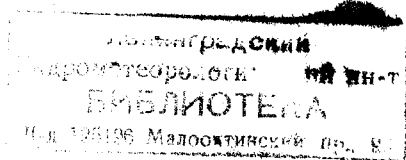
А. В. Белоцерковский, Л. И. Дивинский, Н. К. Екатериничева, Б. Д. Иванов,
Л. Г. Качурин, Ю. Г. Осипов, Е. В. Осокина, В. Ф. Псаломщиков

Рецензенты: д-р техн. наук В. Д. Степаненко, канд. физ.-мат. наук Б. Ф. Ев-
теев, канд. физ.-мат. наук В. С. Снегуров, канд. техн. наук С. М. Гальперин
(Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова), А. А. Иванов
(Центральная аэрологическая обсерватория)

Активно-пассивная радиолокация грозových очагов в широком диапазоне
длин волн — научно-техническое направление, позволяющее получать качест-
венно новую информацию об электрическом состоянии облаков. В догрозовой
стадии определяется степень обострения ситуации, а также потенциальная
грозоопасность облачности для летательных аппаратов. В грозовой стадии опре-
деляется местоположение и моменты появления молний разных масштабов, дли-
тельность их существования. На основании полученных данных в реальном
масштабе времени строятся пространственно-временные панорамы грозовой
активности и предвычисляется тенденция развития грозowego процесса.

Книга предназначена для широкого круга специалистов по радиометеороло-
гии, экспериментальной физике атмосферы, средствам грозозащиты. Может быть
рекомендована аспирантам и студентам старших курсов соответствующих спе-
циальностей.

356100



А 1805040400-050 1-92
069(02)-92

ISBN 5-286-00743-0

© А. В. Белоцерковский, Л. И. Дивинский,
Н. К. Екатериничева, Б. Д. Иванов,
Л. Г. Качурин, Ю. Г. Осипов, Е. В. Осо-
кина, В. Ф. Псаломщиков, 1992 г.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Книга посвящена новому быстро развивающемуся научно-техническому направлению — активно-пассивной радиолокации грозовых и грозоопасных очагов в различных стадиях их развития: от предгрозовой до диссипации.

Как известно, гроза — опасное метеорологическое явление, она способна наносить ущерб многим отраслям народного хозяйства. Грозовые процессы могут явиться причиной повреждения линий связи и высоковольтных линий электропередачи, энергетического оборудования, могут вызвать лесные пожары, самопроизвольное срабатывание взрывных устройств в открытых горных разработках. Гроза — опасный противник летательных аппаратов (ЛА) и крупных наземных промышленных сооружений. В связи с этим своевременное обнаружение грозоопасных областей пространства, определение местоположения и тенденции развития грозовых очагов является весьма актуальным.

Радиолокационные методы зондирования облачности, зародившиеся в 40—50-е годы, показали высокую эффективность в системе метеорологического штормоповещения. Радиозондирование облаков в сантиметровом диапазоне длин волн позволяет дистанционно определять основные параметры, характеризующие плотность облачности и ее геометрические размеры. Применение когерентных и некогерентных радиолокаторов сантиметрового диапазона позволяет получать сведения о динамике воздушных движений и о фазовом состоянии воды в облаках. Однако применяемыми сейчас наземными и самолетными радиолокационными средствами гроза надежно идентифицируется лишь в среднем для большого количества случаев. Оперативно же для конкретной ситуации эти средства только с некоторой вероятностью выделяют грозоопасные области пространства. Исследования последних лет показали отсутствие тесной связи отражаемости частиц облаков и осадков в сантиметровом диапазоне радиоволн с интенсивностью грозовых процессов в облаках. Кроме того, при наблюдении за атмосферными явлениями радиолокационными станциями сантиметрового диапазона (РЛС_{см}) ближние к РЛС_{см} атмосферные образования (мощные облака, ливневые осадки, град), существенно рассеивая и поглощая проходящие сквозь них электромагнитные волны, могут сильно экранировать дальние облачные системы. Обнаружено также, что зоны максимальной отражаемости гидрометеоров в облаках, как

правило, расходятся с зонами максимальной грозовой активности. Все это делает сантиметровые волны не очень пригодными для наблюдения за грозоопасными зонами при метеообеспечении аэропортов и других крупных ответственных объектов.

Наблюдения за облачностью со спутников средствами пассивной радиотеплолокации дают достаточно полное представление лишь о полях горизонтальной протяженности облачности, но не грозовой ее активности (опасности).

Наблюдения с помощью метеорологических радиолокаторов (МРЛ) в сочетании с грозопеленгаторами-дальномерами повысили надежность грозообнаружения, но их возможности ограничены. Однопунктные грозопеленгаторы с высокой точностью определяют лишь угловые координаты грозовых очагов. Многопунктные грозопеленгаторы требуют создания дорогостоящей помехозащищенной системы синхронизации, объединяющей отдельные пункты. И, наконец, самое главное — и МРЛ, и грозопеленгаторы нечувствительны к пред- и послегрозовым стадиям развития облачности, когда молниевых разрядов нет, но процессы электризации облачной массы весьма интенсивны и высока опасность искусственного инициирования (провокации) молниевых разрядов оказавшимся поблизости летательным аппаратом за счет локального усиления поля самим ЛА. С помощью МРЛ и грозопеленгаторов затруднительно определить стадию развития грозового процесса и его тенденцию, невозможно выявить потенциально опасные в электрическом отношении облака.

Рост интенсивности воздушного движения, существенное увеличение размеров самолетов и скоростей полета сопровождаются возрастанием количества летных происшествий и катастроф, обусловленных неожиданными для экипажа и наземных служб поражениями самолетов молниями [62, 63, 189, 195, 201]. Известны также аварии, происшедшие во время запусков космических кораблей (см., например, [187, 194, 203, 222]). Подобные случаи отмечаются также при полете к облакам негрозовых форм, причем даже в зимнее время. Такие ситуации возникают в основном из-за того, что получаемой традиционными средствами зондирования метеорологической информации недостаточно для объективной оценки степени грозоопасности облачности. Для решения задач управления воздушным движением необходимо располагать не только данными о координатах грозовых облаков, но и информацией о потенциально грозоопасных облаках, в которых молниевые разряды не наблюдаются, однако возможно инициирование (провокация) молнии приближающимся самолетом. Кроме того, требуется прогноз трансформации грозового процесса. В настоящее время не существует достаточно полной количественной теории провокации молний в грозоопасной облачности. В создании такой теории должны помочь опыты с управляемыми моделями ЛА, запускаемыми в облако, либо полеты в облаках на самолетах-лабораториях при одновременном контроле электрической активности методами активно-пассивной радиолокации с Земли и с ЛА.

В наибольшей степени современным требованиям к грозооповещению удовлетворяют данные, получаемые методами активной и пассивной радиолокации грозовых очагов в СВ- и УКВ-диапазонах радиоволн в сочетании с обычными радиолокационными наблюдениями за облаками с помощью РЛС_{см}. Приоритет в разработке этих методов принадлежит СССР. Радиолокационные сигналы, отраженные от каналов молний, были обнаружены в 50-е годы [23, 24, 229, 236], однако систематические, обладающие достаточной информативностью наблюдения за грозовыми разрядами с помощью РЛС метрового и дециметрового (РЛС_м, РЛС_{дм}) диапазонов начались лишь в конце 60-х годов [39, 48, 94, 166]. Несколько раньше были впервые начаты систематические целенаправленные наблюдения за грозами методом пассивной нетепловой радиолокации на разных стадиях развития грозы (включая и предгрозовую) в широком диапазоне длин волн [74, 91, 92], по результатам которой стала возможна индикация всех электрически активных областей пространства, в том числе не проявляющих себя молниевыми разрядами. Позднее была синтезирована единая система наблюдений, получившая название активно-пассивной радиолокации грозовых и грозоопасных очагов [10, 83, 127]. В этой области накоплен большой объем экспериментальных и теоретических результатов. В настоящее время назрела необходимость в обобщающей работе, в которой с единых позиций обсуждались бы как методические вопросы проведения наблюдений, обработки и анализа результатов, так и прикладные вопросы применения новой физической информации, ставшей доступной благодаря использованию активно-пассивной радиолокации.

В известной степени восполнить этот пробел призвана настоящая монография, в основу которой легли результаты многолетних исследований авторов, выполненных в основном на уникальном экспериментальном полигоне в районе высокой грозовой активности. В книге показано, что сочетание традиционной активной радиолокации облаков в сантиметровом диапазоне длин волн с новыми методами активной радиолокации грозовых разрядов в метровом (дециметровом) диапазоне и привлечение данных о собственном нетепловом радиоизлучении (пассивная радиолокация) конвективных облаков, разрядов молний в СВ- и УКВ-диапазонах дает качественно новую информацию об электрическом состоянии мощных конвективных облаков, позволяет судить о пространственной ориентации грозовых очагов, степени их электрической активности, о стадии развития грозового процесса с выделением его начальной фазы (предшествующей появлению молниевых разрядов), стадии зрелости и фазы распада грозовых очагов.

Исследования велись Российским государственным гидрометеорологическим институтом (далее по тексту сохраняется старая аббревиатура — ЛГМИ) в тесном контакте с Институтом геофизики АН Грузии, Высокогорным геофизическим институтом, Военно-воздушной службой активного воздействия на гидрометеоро-

рологических процессы, Главной геофизической обсерваторией им. А. И. Воейкова. В работе принимал участие большой коллектив преподавателей, научных сотрудников, инженерно-технических работников, студентов, аспирантов и стажеров ЛГМИ. В Алазанской долине (Восточная Грузия) и в Приэльбрусье на учебно-научных метеорологических полигонах выполнен широкий комплекс радиофизических исследований внешней среды. Это позволило создать метод активно-пассивной радиолокации природных объектов — грозовых и грозоопасных облаков, атмосферных вихрей, лавин и ледников. Исследование грозовых процессов с высокой интенсивностью, происходящих в Восточной Грузии, позволило вскрыть такие особенности структуры грозовых очагов и ее динамики, которые подчас трудно выявить в грозах слабой интенсивности, идущих в условиях равнинной местности.

Книга состоит из десяти глав. В первой главе дается краткий обзор радиотехнических методов наблюдения за грозами. В последующих трех главах рассматриваются методы активной (гл. 2), пассивной (гл. 3) и активно-пассивной (гл. 4) радиолокации грозовых очагов. Приводится описание аппаратуры и методики соответствующих наблюдений. Отмечается, что активная радиолокация в метровом (дециметровом) диапазоне дает надежную информацию о координатах грозовых разрядов, что позволяет прямым способом определять грозоопасность облаков, судить об интенсивности грозовой деятельности, детально исследовать структуру и эволюцию грозовых очагов. Прием собственного нетеплового радиоизлучения конвективных облаков в СВ- и УКВ-диапазонах длин волн позволяет задолго до появления грозовых разрядов предупреждать о приближении грозы, определять потенциальную грозоопасность облачности, а во время развившегося грозового процесса определять степень и тенденцию развития грозы. Показано, что сочетание этих двух дополняющих друг друга методов с традиционными наблюдениями за облачностью с помощью метеорологических радиолокаторов сантиметрового диапазона существенно расширяет возможности дистанционного зондирования грозовых и грозоопасных очагов.

В пятой и шестой главах излагаются новые методы и приводятся результаты автоматической обработки и анализа активно-пассивных радиолокационных измерений с целью оценки степени грозоопасности обзереваемого пространства (в смысле опасности встречи ЛА с молниевым разрядом, когда в данной области пространства происходят разряды молний, и опасности провокации молниевым разрядом летательным аппаратом в облаке, в котором разряды молний не наблюдаются). Предлагаются оптимальные методы прогноза степени грозоопасности и выбора наименее опасной траектории полета в условиях повышенной грозовой активности. Применение методики прогнозирования с использованием адаптивных и стохастических моделей современно, и мы нашли нужным поместить в книгу ее математическое обоснование и краткие пояснения.

Седьмая глава содержит рекомендации по совершенствованию аппаратуры активно-пассивной радиолокации грозовых очагов применительно к системам управления воздушным движением в районе крупных аэропортов. Приводятся основные технические параметры разработанного в ЛГМИ радиолокационного комплекса грозообнаружения.

Восьмая глава посвящается вопросам определения с помощью бортовой аппаратуры опасности поражения молниями ЛА. Предлагается наиболее перспективный, по мнению авторов, метод определения грозовой опасности по трассе полета, основанный на приеме собственного радиоизлучения ЛА при полете в мощных облаках и осадках.

В девятой главе приводятся результаты исследований физической природы нетеплового радиоизлучения конвективных облаков (используемого в пассивной радиолокации грозовых очагов), а также других природных объектов.

Десятая глава посвящена численному моделированию физических процессов, протекающих в исследуемых облаках. Используется численная модель конвективного облака, созданная в ЛГМИ. Приводятся результаты численного моделирования параметров облака, характеристики турбулентности в нем.

В заключении излагаются основные результаты выполненных экспериментов, формулируются задачи дальнейших исследований, направленных на повышение безопасности полетов в процессе управления воздушным движением.

ГЛАВА I

**КРАТКИЙ ОБЗОР
СОВРЕМЕННЫХ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ МЕТОДОВ
НАБЛЮДЕНИЙ ЗА ГРОЗАМИ
И РАДИОИЗЛУЧЕНИЕМ ОБЛАКОВ**

Радиотехнические методы обнаружения грозовых облаков стали широко применяться лишь в послевоенное время. В основном это пелегационные методы, основанные на приеме радиоизлучения, вызванного молниевыми разрядами (пассивная радиолокация), а также методы активной радиолокации, основанные на приеме сигналов, отраженных от гидрометеоров. Этим вопросам посвящено довольно много работ, среди которых есть ряд обобщающих, но мы их рассмотрим несколько позже. Вначале остановимся на исследованиях радиоизлучения облаков в УКВ-диапазоне радиоволн, поскольку эта тема, как нам представляется, недостаточно освещена, а интерес к ней, особенно в последнее время, значительно возрос.

Одной из первых публикаций, посвященных исследованиям радиоизлучения облаков в УКВ-диапазоне, является работа Дж. Гибсона [202], в которой приведены результаты исследований сигналов, излучаемых конвективными облаками в миллиметровом диапазоне радиоволн. Автор, по-видимому, первый отметил, что наблюдаемое излучение имеет интенсивность слишком высокую в этом диапазоне для теплового излучения облака. По расчету температура объекта должна быть примерно на 150 К больше реальной, для того чтобы тепловое излучение облака имело регистрируемую интенсивность. Дж. Гибсон не высказал своих соображений о природе наблюдаемых расхождений. Д. Хогг и Р. Семплак [207] обнаружили, что за нетепловое радиоизлучение (НТРИ) ответственны не только сильноточные атмосферные разряды. Наряду с НТРИ молний наблюдается также возникновение излучения в сантиметровом диапазоне радиоволн и при отсутствии молниевых разрядов. Авторы [207] объяснили это излучение перераспределением зарядов на дождевых и водяных внутриоблачных каплях. Измерения проводились в диапазоне 4—6 ГГц (5—7,5 см).

Д. Сартор [245] попытался объяснить природу НТРИ облаков в УКВ-диапазоне столкновением заряженных капель. Подтверждением правильности предположения о таком механизме НТРИ служат экспериментальные исследования, проведенные Ф. Дикеем [198]. В результате этих работ [198, 245] установлено, что максимальная энергия излучения приходится для заряженных капель

на длину волны λ , связанную с диаметром эмпирическим соотношением $\lambda \approx 7D$. Это объяснено наличием резонанса на поверхностных волнах, при которых на половине длины большого круга — сферической капли — уместается $1/4$ длины волны колебаний.

В дальнейшем Ф. Хорнер и П. Бредли [208], Д. Сартор [246], А. Кимпара [217] показали, что столкновением заряженных капель нельзя объяснить всех явлений, связанных с излучением конвективных облаков. Если допустить, что причиной НТРИ облаков является только соударение или разлет заряженных капель, то согласно [198], максимум спектральной плотности излученного сигнала должен наблюдаться на длине волны, соизмеримой с размерами капель. В действительности спектральная плотность излученного сигнала монотонно нарастает с убыванием частоты.

К. Зонге и В. Эванс [260] измеряли радишумовое излучение грозовых облаков на частотах 12, 100 кГц; 2,5, 10 и 110 МГц. Прием сигналов производился на ненаправленные антенны. Одновременно осуществлялась запись напряженности электростатического поля, велись радарные наблюдения за облачностью и визуальные наблюдения за грозовыми разрядами. При проведении полевых экспериментов в Аризоне авторам [260] удалось трижды четко связать повышение интенсивности радишума с развитием грозового облака, когда в окрестностях станции наблюдалась только одна грозовая ячейка. Результаты их наблюдений подтвердили факт возникновения НТРИ грозового облака до появления первой молнии. Время между началом повышения интенсивности радишума и первой молнией составляет 10—15 мин. По мнению авторов, измерения наиболее удобно производить в диапазоне от единиц до 100 МГц. Никаких предположений о причинах, вызывающих повышение интенсивности радишума, высказано не было.

В последующие годы выделяются три направления исследований НТРИ облаков в УКВ-диапазоне.

Первое направление связано с исследованием радишумового излучения конвективных облаков в УКВ-диапазоне. Здесь следует отметить работы Д. Сартора [246], а также Р. Харви и И. Льюса [204].

Второе направление связано с исследованием УКВ-излучения молниевых разрядов. В хронологическом порядке в числе первых известных нам публикаций в этой области следует отметить работу Ф. Хорнера и П. Бредли [208], в которой приведены спектральные характеристики излучения близких молний до частоты 450 МГц. А. Кимпара в работе [217] обобщил известные сведения и привел данные об излучении до частоты 500 МГц. Много внимания он уделил спектральным характеристикам излучения молнии. А. Кимпара указал на различие методик обработки информации и получения данных разными исследователями, что в конечном итоге порождает различие числовых значений получаемых величин, характеризующих спектральную интенсивность излучения.

В 1967 г. Институтом физических проблем АН СССР была организована экспедиция по исследованию сигналов радиоизлуче-

ния молний в дециметровом диапазоне длин волн [150]. Она была оснащена комплектом приемников и спектроанализаторов, перекрывающих диапазон 400—4 000 МГц. Приемники имели чувствительность 10^{-11} Вт при соотношении сигнал/шум, близком к единице. Спектроанализаторы при том же соотношении сигнал/шум имели чувствительность 10^{-10} — 10^{-9} Вт и обеспечивали обзор спектра в диапазоне 550—3 000 МГц при разрешающей способности 20—50 МГц. Сигнал, излученный молнией, принимался обычно с расстояния в несколько километров, которое определялось по запаздыванию звукового сигнала относительно момента разряда. Выходные напряжения приемников подавались на пятилучевой осциллограф и фотографировались. Эти исследования показали, что длительность излучения на частотах 100 и 400 МГц составляла 0,5—5 мс, при этом импульс состоял из непрерывной последовательности более коротких импульсов длительностью 50—100 мкс. На частотах 800—1 300 МГц длительность излучения была 50—100 мкс. Мощность сигналов, принимавшихся на частоте 100 МГц, обычно равнялась 10^{-11} — 10^{-10} Вт в полосе частот 100 кГц, а на частотах 400—1 300 МГц она составляла $(1-5) \cdot 10^{-10}$ Вт в полосе частот 1 МГц.

В последующие годы в экспериментах использовались приемники, настроенные на частоты 100, 400, 700, 900 и 1 300 МГц. Сигнал, излученный линейной молнией, принимался рамочной антенной, усиливался и запускал пятилучевой осциллограф. Производилось фотографирование экрана осциллографа в течение примерно 100 мс с момента запуска развертки, после окончания которой осуществлялась смена кадра в фотокамере. Таким образом было получено около 200 осциллограмм с сигналами на частотах 100, 400, 700 и 900 МГц. На 20 осциллограммах есть также сигналы на частоте 1 300 МГц. Самый продолжительный наблюдавшийся сигнал — 10 мс на частоте 700 МГц. В результате этих исследований [104] уточнена спектральная плотность на частотах 400, 700 и 900 МГц. В этой работе высказываются предположения о механизме излучения молнии в УКВ-диапазоне, отличном от дипольного (приводящего в области более низких частот к шумовому спектру типа $1/f^2$), и о том, что УКВ-генерация может быть обусловлена магнито-тормозным излучением электронов в магнитном поле, создаваемом током молнии.

Следующая работа [105] посвящена исследованию узкополосного радиоизлучения молний в дециметровом диапазоне. В течение сезона наблюдений авторы [105] отметили 39 случаев узкополосного излучения молнии. Максимум излучения отмечается в диапазоне 120—160 МГц. Одиночные акты излучения наблюдались на частотах до 600 МГц. Средняя длительность излучения узкополосного сигнала оценивается в 50 мс. К сожалению, синусоидальный характер используемой в индикаторе развертки и, как следствие, неравномерная скорость перемещения луча по экрану электронно-лучевой трубки (луч быстро проходил через центральную часть экрана и долго находился в периферийных частях развертки) мо-

тут приводить к нежелательным особенностям зарегистрированных изображений сигналов. Действительно, в момент появления широкополосного излучения, изображение будет проходить через приемный тракт и проявляться в виде кратковременного импульса на выходе приемного устройства. При этом наиболее часто импульс будет приводить к появлению светящейся точки на краю линии развертки. Наложение таких светящихся точек друг на друга может привести к появлению значительных засветок у краев развертки и создать впечатление длительного узкополосного сигнала.

С 1967 г. получило развитие третье направление в исследованиях радиоизлучения грозовых облаков. Впервые, в отличие от предыдущих, эти исследования были направлены на комплексное изучение сигналов, излученных и молниями, и облаками в широком диапазоне радиоволн на разных стадиях развития грозовой деятельности. Для проведения экспериментов был создан специальный комплекс высокочувствительной аппаратуры, включающий шесть радиоприемных каналов, настроенных на частоты 0,11; 0,5; 3; 30; 101 и 300 МГц [77]. Ширина полосы пропускания приемных устройств в зависимости от частоты настройки находилась в интервале 20—120 кГц, чувствительность составляла 4—6 мкВ. В качестве антенн для приемников длинных и средних волн (0,11—3 МГц) использовались ненаправленные вибраторы Герца. Приемник, настроенный на частоту 30 МГц, имел антенну типа волновой канал с шириной диаграммы направленности в горизонтальной и вертикальной плоскостях около 80°. Для приемников, настроенных на частоты 101 и 300 МГц, использовались антенны типа волновой канал с отражателем в виде параболического цилиндра. Ширина диаграммы направленности для этих антенн равнялась соответственно 30 и 12°. Принятые сигналы регистрировались на многоканальном магнитофоне с полосой записываемых частот 11 кГц, а также фотографировались с экрана осциллографа. Для наблюдения за облачностью и коррекции положения в пространстве максимумов диаграмм направленности антенных систем применялась радиолокационная станция (РЛС) трехсантиметрового диапазона. Первые результаты исследований, проведенных в 1969 г. [74, 91, 114], показали, что НТРИ конвективных облаков в диапазоне 0,11—300 МГц имеет нестационарный характер и проявляется в виде совокупности импульсов, объединенных в отдельные «пакеты». Основное внимание было уделено временным и энергетическим характеристикам пакета импульсов излучения.

Дальнейшие исследования напряженности электромагнитного поля излученных сигналов на разных стадиях развития конвективных облаков показали [92], что во всем диапазоне частот 0,11—300 МГц по мере приближения облака к грозовой фазе развития напряженность увеличивается, предгрозное излучение облаков имеет уровень на один-два порядка выше уровня непрерывного шумового НТРИ и на два-три порядка ниже уровня

НТРИ, возникающего в грозовом облаке от сильноточных атмосферных разрядов.

С 1973 г. дополнительно исследовалось НТРИ молний в диапазоне 830 МГц [94]. Для этого использовались антенная система и приемный тракт РЛС дециметрового диапазона (РЛС_{дм}), работающей в пассивном режиме (с отключенным передатчиком). Эта станция использовалась также в активном режиме для изучения сигналов, отраженных от каналов молний.

Р. Харви и Е. Льюис [204] для изучения излучения облаков в диапазонах 250 и 925 МГц использовали приемные устройства с шириной полосы пропускания 4 МГц (в диапазоне 925 МГц) и 0,5 МГц (в диапазоне 250 МГц) и остронаправленные антенные системы с шириной угла диаграммы направленности 4° (для 925 МГц) и 15° (для 250 МГц). При сканировании пространства, производимом в пределах сектора $90^\circ \times 20^\circ$ (азимутальный угол $\times$ угол места) для диапазона 925 МГц и $360^\circ \times 42^\circ$ для диапазона 250 МГц, обнаруживалось распределение источников радишума в пространстве. Было выявлено НТРИ облаков, хорошо совпадающее по своим угловым координатам с областью наибольшей отражаемости облаков. Отмечено увеличение уровня радишумового излучения облака по мере приближения его к грозовой фазе развития. Данные наблюдений подтвердили, что уровень собственного шумового излучения облаков существенно ниже уровня излучения, возникающего при появлении в пространстве сигналов молний. Количественные оценки принимаемого излучения в [204] не приводились.

В работе [72] сделана попытка объяснить природу непрерывно-шумового радиоизлучения облаков. По мнению авторов [72], коагуляция мелких частиц с падающей крупной каплей сопровождается возбуждением поверхностных колебаний капли. Поскольку капля заряжена, колебания ее формы вызывают генерацию электромагнитного излучения. Рассчитанные мощности радишумового излучения конвективного облака диаметром 5 км, на наш взгляд, слишком завышены. По данным авторов [72], такое облако обладает мощностью излучения порядка $3 \cdot 10^{-2}$ Вт (расчеты проводились на частоте около 120 кГц и около 4 МГц, в зависимости от размеров сталкивающихся капель).

Высокая точность определения местоположения источников излучения достигнута Д. Проктором [240]. Он использовал метод гиперболической пеленгации сигналов, принимаемых пятью пунктами с приемниками, настроенными на частоту 250 МГц. Пункты располагались в точках местности, расстояния между которыми и угловые координаты измерялись с высокой степенью точности. Разность моментов прихода сигналов на разные пункты приема измерялась с точностью до наносекунд. Это позволило рассчитать местоположение источников в пространстве с точностью до $\pm 22,5$ м по координатам x , y и z .

К сожалению, данные относятся только к излучению каналов молний. С помощью этого метода Д. Проктор измерил скорость

распространения ионизированного канала молнии [241], которая оказалась ~ 100 км/с.

В работе [249] также определялись источники излучения грозовых разрядов. Для этого измерялись отношения напряженности горизонтальной и вертикальной составляющих электрического поля разрядов молний на частотах 30, 88 и 200 МГц. Совместный анализ экспериментальных и теоретических результатов привел к выводу, что основными источниками генерации радиоизлучения являются группы мелких случайно ориентированных разрядов в облаках.

Итак, в нашем обзоре мы подошли к методам определения координат молниевых разрядов. Как уже говорилось, на эту тему в разное время опубликовано несколько обобщающих работ, в которых рассматривались особенности методов и устройств пеленгации гроз (см., например, [26, 100]). Недавно вышла монография [102], подробно освещающая современный уровень, достигнутый в области дальнометрии и грозопеленгации, в ней отмечены достоинства и недостатки существующих пассивных радиотехнических систем грозобнаружения, применяемых для различных целей, указаны наиболее, по мнению авторов, перспективные системы. Поэтому мы не будем здесь останавливаться на методах грозопеленгации, в которых используется в основном диапазон сверхдлинных волн. Отметим только, что, несмотря на широкое распространение и большое разнообразие грозопеленгаторов и дальномеров, относительную простоту изготовления и эксплуатации многих однопунктных систем, они не удовлетворяют многих потребителей. Причина этого — невысокая точность определения расстояния до молниевых разрядов. Достаточную точность обеспечивают многопунктные системы грозопеленгации, но они требуют существенного усложнения аппаратуры, в первую очередь — каналов связи и систем жесткой синхронизации работы. Но даже при этом они, как показали сравнительные наблюдения, выполненные в последние годы (о чем будет сказано ниже), позволяют обнаруживать лишь часть возникающих в облаках молний. Повидимому, это связано с тем, что грозопеленгаторы чувствительны в основном к радиоизлучению от вертикальных каналов молний, т. е. от молний типа облако — земля, а значительная часть разрядов во время грозы представляет собой преимущественно горизонтальные молнии типа облако — облако или внутриоблачные разряды.

В послевоенные годы быстро развивается метеорологическая радиолокация облаков и связанных с ними явлений [19, 27, 34, 37, 44, 136, 155, 165, 173]. Появилось много работ, посвященных этим исследованиям в миллиметровом — дециметровом диапазонах длин волн, в которых сравниваются радиолокационные характеристики ливневых и грозовых облаков (см., например, [40, 68, 124, 154]). На основании статистической обработки большого числа данных были разработаны радиолокационные критерии грозоопасности [68, 124, 152, 156], позволяющие с той или иной вероятностью распо-

знавать грозовые облака. По мере накопления результатов исследований выяснилось, что эти критерии не всегда себя оправдывают. Особенно четко это проявилось в процессе управления воздушным движением в районах аэропортов, а также при оперативной работе по предотвращению градобитий. Многочисленные уточнения таких косвенных критериев мало что дали для оценки истинной грозоопасности облачности. Поэтому для повышения надежности штормооповещения стали привлекать в дополнение к информации метеорологических радиолокаторов данные различных грозопеленгаторов-дальномеров (см., например, [103]). Однако и эти методы в последнее время перестали удовлетворять многих потребителей, так как надежность их оказалась не совсем высокой. Развитие авиации, увеличение размеров самолетов и тенденции к всепогодным полетам привели к росту количества летных происшествий, связанных с грозовыми явлениями. Все чаще наблюдаются случаи поражения самолетов молниями в облаках негрозовых форм. На I Всесоюзной научно-технической конференции «Безопасность полета в условиях опасных внешних воздействий» (Киев, 1981 г.) в ряде докладов говорилось о недостаточном метеообеспечении полетов, в первую очередь современными оперативными и надежными средствами грозооповещения (см., например, [36, 170, 171]).

Развитие метеорологической радиолокации привело к появлению комплексных методов исследования грозовых облаков с помощью различных радиолокационных средств. При этом обычно решался широкий круг вопросов, включающих в себя как наблюдения за радиоизлучением молний и мощных конвективных облаков (пассивная радиолокация), так и наблюдения за облаками с помощью радиолокационных станций (активная радиолокация) в разных диапазонах длин волн. Примером таких исследований могут служить упомянутые выше работы [78, 91, 92].

Активно-пассивная радиолокация стала применяться для обнаружения мелкокапельной облачности, определения интенсивности жидких осадков, водности облаков, а также для индикации града. Для этой цели разработаны комплексные методы наблюдений, основанные на одновременном измерении интенсивности собственного теплового радиоизлучения облаков с помощью радиометров (в диапазонах 0,8; 1,35; 1,6; 3,2; 8,5 и 10 см, в зависимости от цели исследования выбирается тот или иной диапазон) и радиолокационной отражаемости облаков с помощью РЛС сантиметрового диапазона (3,2 или 10 см) (см., например, [1, 8, 79, 160]).

В 50-х годах появились сообщения о наблюдениях на экранах радиолокаторов сигналов, отраженных от молниевых разрядов. Б. Мейсон [120] отмечает ряд работ, посвященных этому вопросу [205, 206, 209, 229, 236]. Впервые фотографию радиолокационного отражения от молнии получил М. Лигда [229]. В Советском Союзе первые опыты по обнаружению молний с помощью типовой радиолокационной аппаратуры, работающей на волне 150 см, были поставлены в Институте земного магнетизма и рас-

пространения радиоволн АН СССР [23, 24]. Эти опыты показали возможность радиолокации молний на расстоянии 100—150 км. Впервые систематические целенаправленные наблюдения за грозовой облачностью с помощью радиолокационных станций, способных принимать сигналы, отраженные от каналов молниевых разрядов, начались в СССР в конце 60-х — начале 70-х годов. В работах [39, 47, 48, 165, 166] рассматриваются каналы молний как радиолокационная цель и анализируются условия, при которых сигнал, отраженный от молнии, может быть надежно выделен из общего радиолокационного сигнала, включающего в себя также отражения от частиц облаков и осадков. Показано, что метровый и длинноволновая часть дециметрового диапазона являются оптимальными для обнаружения молний в грозовых облаках. Эффективная площадь рассеяния (ЭПР) каналов молний по данным [39, 46, 83, 141, 165, 193, 197] изменяется в больших пределах и сильно зависит от длины волны. В [47—49, 199] уточнена теоретическая модель разряда молнии как отражателя, установлено, что ЭПР в метровом диапазоне радиоволн может достигать нескольких сот квадратных метров.

В работах [144, 145] показано, что максимальная отражаемость грозовых облаков в сантиметровом диапазоне радиоволн изменяется в широких пределах (10^{-8} — 10^{-4} см⁻¹), к тому же область максимальной грозовой активности, определенная с помощью РЛС_м, часто не совпадает с местоположением зоны максимальной отражаемости от гидрометеоров в сантиметровом диапазоне. Грозовая активность проявляется в основном на периферии облака. Из этого следует вывод, что определение координат грозовых очагов по отражаемости облаков и осадков в сантиметровом диапазоне недостаточно надежно. В работах отмечено, что радиолокационные наблюдения впервые прямым путем подтвердили модель грозового облака как суперпозицию грозовых очагов (ячеек) различных размеров, флуктуирующих во времени (по интенсивности) и в пространстве [64].

В работе [167] также указывается на недостаточную надежность полученных ранее радиолокационных критериев распознавания ливней и гроз по наблюдениям в сантиметровом диапазоне длин волн. Эти критерии разделяют грозы и ливни по косвенным признакам (по отражаемости и геометрическим размерам), к тому же при их разработке данные радиолокационных наблюдений сопоставлялись с визуальными наблюдениями за грозами на метеосети. Здесь возможны ошибки из-за трудности четкой синхронизации наблюдений. Ошибки также могут быть при нахождении в районе метеостанции нескольких кучево-дождевых облаков, одни из которых грозовые, другие — нет. Еще одна принципиальная ошибка метода — существенное ослабление радиоволн в сантиметровом диапазоне в мощных конвективных облаках и интенсивных осадках. Вследствие этого, при нахождении в одном азимуте двух облаков на разных расстояниях, более дальнее может быть вообще не обнаружено, либо его радиолокационные пара-

метры будут сильно занижены. Специально организованные наблюдения с помощью РЛС типа П-12, П-35, ПРВ-10 дали возможность получить более надежные характеристики отражаемости и геометрических размеров ливней и гроз по сравнению с теми же характеристиками в ранних работах.

В процессе совершенствования систематических комплексных исследований радиоизлучения молний и конвективных облаков впервые стал применяться радиолокатор дециметрового диапазона для обнаружения координат молний и приема сигналов НТРИ [94]. В развитие более ранних работ в [133] предложено использовать радиоизлучение кучево-дождевых облаков как способ оценки грозоопасности. Момент наступления грозовой стадии определялся с помощью РЛС_{дм}. Кроме того, в комплект аппаратуры входили флюксметр и грозорегистраторы с радиусом действия 15 и 100 км. Это позволило с большой надежностью определять моменты появления молниевых разрядов в облаке и их координаты. РЛС_{дм} использовалась и для пассивной радиолокации облаков. Наблюдения показали, что предгрозовое излучение в этом диапазоне обнаруживается за 5—15 мин до появления молниевых разрядов. По мнению авторов [133], грозовые разряды возникают лишь тогда, когда верхняя граница радиоэха облака достигает уровня -20°C , при этом максимальная отражаемость (по данным МРЛ) должна быть не менее 10^{-8} см^{-1} . Максимальная частота молниевых разрядов в грозовом процессе, как правило, наблюдается в момент наибольшей скорости роста максимальной радиолокационной отражаемости. В некоторых случаях максимум грозы приходится на то время, когда верхняя граница радиоэха облака начинает опускаться. Были проведены две серии опытов с целью оценки изменения степени грозоопасности при воздействии на конвективные облака кристаллизующими реагентами. Первая серия опытов проводилась на мощных градовых облаках. Во всех случаях обнаруживалось заметное увеличение интенсивности радиоизлучения (частоты появления сигнала), но не изменялась интенсивность молниевых разрядов. Максимум частоты следования пакетов импульсов приблизительно совпал с моментом выпадения града. Вторая серия опытов проводилась с более слабыми облаками, в которых не было ни грозы, ни собственного радиоизлучения. При внесении определенного количества реагента в такие облака обнаруживалось слабое радиоизлучение.

В работе [157] предпринята попытка связать максимальную частоту разрядов с максимальной радиолокационной отражаемостью на уровне нулевой изотермы, а также на 2 и 4 км выше нее. При этом также замечено, что зона максимальной отражаемости не совпадает в пространстве с зоной максимального числа разрядов.

Развитие комплексных исследований грозowych очагов с помощью различных радиотехнических средств (РТС) потребовало разработки специальных методик использования таких РТС. В работе [122] предлагается одна из таких методик для изучения пара-

356 160
метров радиоэха атмосферных разрядов (АР) и их электромагнитного излучения при более достоверном определении удаления АР от пункта наблюдений, чем это могут сделать на метеостанциях. В комплект аппаратуры входили РЛС_{см} типа П-35 для обнаружения облаков, РЛС_м типа П-12, определявшая координаты атмосферных разрядов и местоположение их в облаках. Производилась также регистрация атмосфериков в непрерывном диапазоне частот 0,3—60 кГц, а также собственного излучения атмосферных разрядов дискретно на частотах от 150 до 600 кГц. Для этого использовался регистратор формы импульсов (РФИ), а также три-четыре приемника с полосой пропускания около 1 кГц. Для привязки сигналов радиоизлучения к соответствующему им атмосферному разряду применялось стробирование по дальности видеосигналов АР на выходе детектора РЛС П-12. Если появление радиоэха АР в стробе совпадало с записью его электромагнитного излучения (ЭМИ), считалось, что данное ЭМИ принято с расстояния, на котором находится стробирующий импульс. С помощью созданного комплекса РТС было определено, что время существования радиоэха АР на выходе РЛС метрового диапазона в среднем в 1,5 раза больше времени существования разряда, установленного ранее оптическими средствами наблюдения. Промежуток времени между соседними возвратными ударами в одной молнии в 80 % случаев оказался менее 100 мс. Это совпадает с ранее полученными значениями в работе [188]. Многочисленные наблюдения за АР с помощью активных и пассивных РТС, как утверждают авторы [122], позволили установить, что радиоэхо РЛС_м во времени всегда совпадает с ЭМИ атмосферных разрядов, принимаемым на частотах 200—600 кГц при чувствительности приемников (с полосой пропускания 1 кГц) порядка нескольких микровольт и в случаях, если грозы удалены от пункта наблюдений на расстояние менее 200 км. Именно это дает основание считать, что эхосигналы грозовых разрядов, обнаруживаемые РЛС_м, всегда обуславливаются электрическими процессами в облаках.

Длительность излучения АР в метровом диапазоне радиоволн рассматривается в работе [137]. Исследование такого излучения, по мнению авторов [137], представляет интерес для оценки электрического состояния грозовых облаков с использованием только пассивных РТС. При исследовании предгрозового излучения с помощью таких РТС сигналы радиоизлучения разрядов молний позволяют отделить предгрозовую стадию от стадии активной грозы. Для исключения приема наиболее интенсивных сигналов, принимаемых боковыми лепестками антенны, обрабатывались только импульсы, совпадающие во времени с эхосигналами атмосферных разрядов. В работе указано, что длительность собственного излучения АР в метровом диапазоне колеблется от 100 мс до нескольких секунд и зависит от числа возвратных ударов молнии. Отмечено также увеличение длительности излучения АР при увеличении частоты разрядов, что согласуется с результатами, приведенными в [231]. Излучение от разряда представляет собой серии

импульсов, интервалы между сериями в 90 % случаев не превышают 60 мс. Интервал времени между возвратными ударами в 90 % случаев менее 120 мс, отсюда делается вывод, что одному возвратному удару соответствует несколько серий излучения.

Анализу характеристик собственного радиоизлучения кучево-дождевых облаков и атмосферных разрядов в дециметровом и метровом диапазонах посвящены работы [75, 115, 117]. В них отмечено, что характерной особенностью развития грозы является постепенное увеличение линейного размера электрических разрядов. Об этом свидетельствует, как считают авторы, увеличение длительности пакетов импульсов радиоизлучения молниевых разрядов и времени существования сигналов, отраженных от каналов молний. В результате облачных турбулентных пульсаций возникают электрические разряды разного линейного размера, ответственные за радиоизлучение с соответствующей длительностью пакетов импульсов. Разрядные промежутки постепенно увеличиваются по мере приближения следующего разряда.

В [76] указывается, что специально поставленные опыты по исследованию радиоизлучения (РИ) градовых очагов показали большую интенсивность и большую локализованность временных характеристик РИ в таких очагах, чем в грозовых без града.

Исследованию электрической активности градоопасных облаков посвящена работа [116]. В ней отмечено, что во всех случаях во время выпадения града на землю электрическая активность облака максимальна. Авторы [116] считают, что если конвективное облако дает около 20 и более молниевых разрядов в 1 мин, то, как правило, оно является градоопасным. Следовательно, усиление электрической активности (числа импульсов РИ и молниевых разрядов в единицу времени) может служить одним из признаков наличия или выпадения твердых осадков из конвективных облаков, т. е. рост и выпадение твердых осадков (интенсивность градообразования), по мнению авторов, играет решающую роль в продолжительности и интенсивности гроз в конвективном облаке.

В работе [117] отмечено, что управление процессами кристаллизации кучево-дождевых облаков вызывает существенное изменение интенсивности РИ. С другой стороны, указывают авторы, по изменению излучения можно судить об эффективности управления кристаллизационными процессами и другими, которые являются их следствием. В одной из своих следующих работ [70] авторы предприняли попытку использовать радиоизлучение для оценки эффективности кристаллизующего действия реагентов. На основании того, что РИ возникает лишь в случае, если верхняя граница радиоэха облака достигает уровня естественной кристаллизации облачных капель (-20°C) [133], авторы [70] делают вывод, что образование ледяных кристаллов и их взаимодействие с переохлажденными облачными каплями создают условия для возникновения мелкомасштабных электрических разрядов, следствием которых является появление сигналов РИ. Развитие кристаллизационных процессов в кучево-дождевых облаках приводит

к изменению структурных характеристик РИ. Следовательно, искусственная интенсификация кристаллизационных процессов в облаке, зависящая от эффективности кристаллизующего действия реагентов, приведет к изменению амплитудно-частотных и временных характеристик РИ. Если же воздействие на облако не приводит к изменению характеристик РИ, то либо вклад искусственной кристаллизации ничтожно мал по сравнению с естественной, либо льдообразующая активность реагента в данных конкретных условиях низка. Приведены примеры увеличения интенсивности излучения (амплитуды и частоты следования импульсов РИ) после внесения реагента.

В качестве примера одной из методик, разработанных для контроля результатов активного воздействия на конвективные облака в целях предотвращения грозовой активности, может служить работа [55]. В ней предлагается метод обнаружения и исследования РИ конвективных облаков в метровом диапазоне радиоволн, описывается необходимый для этого комплекс аппаратуры и приводятся некоторые предварительные результаты наблюдений, проведенных по этой методике. Рассматриваются несколько случаев наблюдений за предгрозовым излучением, отмечается сравнительно плавное нарастание шумов в предгрозовой стадии и значительные пульсации числа импульсов РИ в активной стадии грозы.

В работе [257] с целью оценки роли осадков в области грозового облака изучалось относительное положение источников УКВ-излучения и областей с повышенной радиолокационной отражаемостью. Для этого использовалась наземная система с разрешающей способностью 600 м, включающая сеть УКВ-приемников и радаров. Предварительные результаты показали, что источники УКВ-излучения локализуются не в области с максимальной радиолокационной отражаемостью, а в области, где $10 \lg z < 20$ дБ. В. Тейлор [251] провел одновременные наблюдения за электрической активностью, отражаемостью и полем ветра в нескольких сильных и умеренных грозах в Оклахоме. Положение разрядов определялось по данным широкополосных УКВ-приемников, размещенных на расстоянии 40 км, с точностью $\pm 0,5$ км. Динамика грозы контролировалась доплеровскими радиолокаторами. Автор обнаружил, что разряды располагаются в непосредственной близости, но не в пределах области высокой отражаемости. Большинство разрядов начиналось вблизи области восходящего потока или слабой отражаемости и распространялось в другие области грозы с нарастающей скоростью порядка 10^5 м/с. Источники УКВ-излучения, связанные с разрядами на Землю, находились ниже, чем при разрядах типа облако — облако. Область наибольшей молниевой активности располагалась между изотермами $-10 \dots -20^\circ\text{C}$.

В работе [231] также использовалась система определения разрядов по РИ в диапазоне частот 20—80 МГц, состоявшая из двух радиоприемников, расположенных в 40 км друг от друга и там же расположенных доплеровских локаторов. Получалась трехмерная картина поля ветра. Исследовались три грозы 1979 г.

Замечено, что молнии часто возникают вблизи конвективных ячеек, но за пределами области повышенной отражаемости на высотах вблизи или выше изотермы 0°C и вблизи наибольшей горизонтальной изменчивости поля горизонтальных составляющих скорости.

В [142] указывается, что вопреки установившемуся мнению РЛС_м в некоторых случаях обнаруживает грозовые облака, а не только каналы молний. Как правило, такие облака связаны с интенсивной грозовой деятельностью, при которой радиоэхо атмосферных разрядов может следовать с интервалом 2,5—3,5 с. Теоретические расчеты показали, что кучево-дождевые облака могут обнаруживаться в метровом диапазоне за счет коронирования и очень сильных дождей (интенсивностью более 50 мм/ч) до расстояний 35—40 км, а также при осадках в виде града до расстояний 70—80 км. Время существования радиоэха таких облаков (в метровом диапазоне радиоволн) от 5 до 52 мин.

В [243] приведены некоторые результаты наблюдений за тремя грозами с помощью уникального комплекса радиотехнической и метеорологической аппаратуры. Изучалась локализация молний в структуре грозовых облаков. Использовалась та же аппаратура, что и в [231, 251, 257], кроме того, РЛС сантиметрового (10 см) и дециметрового (23 см) диапазонов, аппаратура для регистрации изменений электрического поля на земной поверхности, для измерения токов коронирования и токов, переносимых осадками. Производилась регистрация акустических сигналов от грома, теле- и кино съемка облаков и молний. Использовались данные наземной метеосети и радиозондирования. С помощью УКВ-системы пространственно-временного картирования разряда после обработки результатов измерений были воссозданы местоположения в облаке каналов молний и процессы развития этих каналов (в какой части облака появились, куда продвигались в дальнейшем). Анализ показал, что молнии возникали в областях с большим циклоническим сдвигом ветра или рядом с ними. Обнаружены молнии с горизонтальной протяженностью до 90 км. Положительные разряды в землю исходили из нескольких идентифицируемых областей мощного грозового очага. Отраженные от канала молнии сигналы, которые наблюдались с помощью РЛС_{дм}, обычно превышали на 10—25 дБ самое сильное радиоэхо от выпадающих во время грозы осадков.

В последнее время появился ряд работ, в которых приводятся сведения о дальнейшем совершенствовании методики наблюдений, расчетов параметров сигналов РИ облаков, содержатся практические результаты использования методов активной и активно-пассивной радиолокации грозовых облаков (см., например, [5, 6, 9, 10, 21, 76, 134]). Следует отметить книгу [168], в которой сделана одна из первых попыток систематизировать материал по активной радиолокации грозовых облаков. Там же излагаются некоторые методики измерения радиоизлучения молний и совместных наблюдений за разрядами с помощью активных и пассивных радиотехнических средств, обобщаются результаты выполненных в Главной

геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова в течение ряда лет экспериментальных исследований грозовых облаков радиотехническими методами.

В [146] приведены результаты сравнительных наблюдений за близкими грозами с помощью грозорегистраторов СДВ- и УКВ-диапазонов. Их данные сопоставлялись с картами МРЛ и сообщениями метеостанций. Установлены факты наличия разрядов в УКВ-диапазоне, когда по данным метеостанций в радиусе до 150 км грозы не отмечались, а по данным МРЛ отмечалась облачность негрозового характера на расстояниях 50 и 80 км. В этих случаях СДВ-регистрация не показывала наличия каких-либо ближних гроз. Было обнаружено, что отметки о наличии разрядов в диапазоне УКВ появляются за 15—20 мин до того, как метеослужбы дают штормовое предупреждение.

Мы уже упоминали о сравнительных наблюдениях за грозовыми облаками с помощью грозопеленгаторов-дальномеров и средств активной радиолокации молний. Эти исследования показали (см., например, [102, 168]), что грозопеленгаторы-дальномеры обнаруживают примерно 30 % молниевых разрядов из тех, что регистрируются радиолокаторами метрового диапазона.

Одной из последних зарубежных публикаций, посвященных исследованию радиоизлучения молниевых разрядов в УКВ-диапазоне, является работа [224]. В ней по результатам измерений с помощью селективных приемников в области 60—900 МГц получены спектральные и временные характеристики радиоизлучения молний, очень важные для защиты различных современных высокочувствительных радиосистем, а также для понимания тонких механизмов радиоизлучения молний. В эту работу включен обширный обзор материала, касающегося радиоизлучения грозовых облаков в различных диапазонах длин волн. Советские авторы представлены только [92] и [221]. В следующей работе [225] приведены результаты дальнейших исследований радиоизлучения молний в метровом и дециметровом диапазонах.

В монографии [200] показан современный уровень развития метеорологической радиолокации. Надо отметить, что на Западе в настоящее время все более широкое применение находят доплеровские радиолокационные станции. В одной из глав книги представлен краткий обзор работ, посвященных радиолокационному обнаружению молний, характеристикам эхосигналов от каналов молний, а также связи молниевых разрядов со структурой облака и осадками. Туда включена ранее публиковавшаяся работа [242].

В статье [187] приведены сведения о разрушении самолета «Боинг-707» в результате удара молнии на высоте 1500 м, а также описаны случаи инициирования молний ракетами НАСА, проходившими через облака, в которых прежде естественная молния не возникала (с катастрофическими последствиями в одном случае). Там же дается достаточно подробный обзор современных представлений о естественно и искусственно инициированных молниях

и анализ вызываемых молнией повреждений, описываются методы, позволяющие уменьшить негативные последствия молниевых разрядов. Рассматриваются стандарты на методику испытаний, необходимых для оценки эффективности этих методов. Отмечаются недостатки современных подходов к проблеме молниезащиты и даются рекомендации по их совершенствованию.

Выводы

Результаты многолетних наблюдений за грозовыми и ливневыми облаками с помощью МРЛ показали недостаточную надежность в интерпретации данных измерений, которая не удовлетворяет в настоящее время многих потребителей в различных отраслях народного хозяйства. Попытки дополнить сведения об облачности, полученные с помощью МРЛ, данными различных грозопеленгаторов-дальномеров тоже не увенчались успехом, так как однозначной информации о действительной грозоопасности конкретной облачности они не дают. Участвовавшие в последние годы случаи поражений летательных аппаратов молниями в негрозовых облаках требуют совершенствования аппаратуры и методов обнаружения молниеопасных зон. Развитие метода активно-пассивной радиолокации грозовых и грозоопасных очагов в широком диапазоне длин волн показывает большие возможности этого нового способа дистанционного зондирования природной среды.

ГЛАВА 2

АКТИВНАЯ РАДИОЛОКАЦИЯ ГРОЗОВЫХ ОЧАГОВ

Как уже отмечалось, радиоотражение от молний обнаружено в 50-х годах, после чего интерес к радиолокации молний не угасает. В конце 60-х — начале 70-х годов в СССР начались систематические комплексные наблюдения за грозовыми процессами с использованием РЛС_{см} в сочетании с РЛС_м или РЛС_{дм} [48, 94, 122, 145, 167].

Рассмотрим кратко особенности применяемой авторами аппаратуры, предназначенной для обнаружения и регистрации грозовых разрядов.

2.1. Аппаратура активной радиолокации грозовых очагов

В связи с тем что специализированных РЛС для обнаружения грозовых разрядов не существует, для исследований чаще всего используют радиолокаторы метрового или дециметрового диапазонов, предназначенные для других целей, например, для обнаружения самолетов. В эти станции вносятся соответствующие изменения, чтобы приспособить их для наблюдений и регистрации сигналов, отраженных от каналов молний. Требования, предъявляемые к специальным РЛС грозообнаружения, и оптимальные, с точки зрения авторов, параметры этих РЛС представлены в седьмой главе. Здесь же кратко описывается аппаратура, используемая на экспериментальном учебно-научном полигоне (УНП) в Восточной Грузии.

Для обнаружения сигналов, отраженных от каналов молний, использовалась РЛС_м.

Передатчик РЛС_м генерирует импульсы на частоте 155 МГц, длительностью 6 мкс с частотой повторения 213 Гц. Мощность генерируемых импульсов 150—180 кВт.

Антенная система РЛС_м имеет ширину угла диаграммы направленности в горизонтальной плоскости 11°, в вертикальной 38°; коэффициент усиления антенной системы — примерно 140.

Чувствительность радиоприемного устройства — $5 \cdot 10^{-13}$ Вт (при соотношении сигнал/шум, равном 3), ширина полосы пропускаемых частот около 460 кГц. В радиолокаторе имеется система селекции подвижных целей и система накопления сигналов.

Для наблюдения за облаками и осадками, для определения их местоположения и основных характеристик (радиолокационной отражаемости, вертикальной мощности и др.) применялся стандартный метеорологический радиолокатор МРЛ-2 (длина волны $\lambda = 3,2$ см). С 1979 г. использовалось устройство обработки радиолокационной информации, позволяющее получить на индикаторах МРЛ изображения облачности в виде совокупности изолиний радиолокационной отражаемости — устройство многоконтурного изоэха.

Управление работой всего радиотехнического комплекса осуществлялось с командного пункта управления, куда был вынесен контроль всех средств наблюдения за грозовыми процессами. Поскольку при проведении экспериментальных исследований применялось большое число регистраторов различных сигналов, которые будут описаны ниже, для полной взаимной привязки по времени всех экспериментальных данных осуществлялась фиксация моментов включения и выключения всех регистрирующих средств, используемых при исследованиях. Восстановить моменты работы любого регистратора можно было с точностью долей секунды.

Действия всех операторов радиотехнического комплекса координировались системой служебной связи, созданной на основе самолетного переговорного устройства. Переговоры операторов записывались на магнитную ленту. На нее же поступали звуковые сигналы временных меток от электронного датчика единого времени, задающим элементом которого являлся высокостабильный кварцевый генератор.

Важнейшими задачами активной радиолокации грозовых очагов являются: 1) исследование молний как радиолокационной цели, т. е. определение условий, при которых наблюдается сигнал, отраженный от канала молнии, 2) количественная оценка эффективной отражающей поверхности (эффективной поверхности обратного рассеяния) канала, 3) определение длительности существования отраженного от молнии сигнала, 4) поиск способов повышения эффективности выделения сигналов, отраженных от канала молнии. При молниевом разряде возникает радиоизлучение в широком диапазоне частот, в том числе и в спектре частот, пропускаемых приемным трактом РЛС. Это излучение оказывает маскирующее действие, мешающее принимать сигналы, обусловленные отражениями от каналов молний. В связи с этим необходимо определить особенности прохождения излученных сигналов через приемный тракт радиолокационной станции и исследовать возможные способы их подавления.

При исследованиях радиолокационных характеристик молниевых разрядов следовало учитывать, что канал молнии существует очень ограниченное время. Поэтому эксплуатация радиолокационной станции в характерном для нее режиме обзора пространства с вращающейся антенной оказалась невозможной. При относительно малой скорости вращения антенны и узкой диаграмме направленности вероятность того, что в момент возникновения мол-

ниевых разрядов будет выполняться зондирование именно той области пространства, в которой расположен канал молнии, очень невелика. Для радиолокационной станции типа П-12 эта величина примерно равна $1/30$, т. е. при вращающейся антенне в среднем принимается отраженный сигнал лишь от одного из 30 молниевых разрядов. Поэтому радиолокационные измерения выполнялись в основном при неподвижной антенной системе, максимум диаграммы направленности которой ориентировался всегда на ту область пространства, где наиболее вероятно появление молниевых разрядов — на центр грозового очага.

На первом этапе исследований применялся простейший метод регистрации сигналов, отраженных от каналов молний, — обычная киносъемка экрана индикатора дальность — амплитуда (ИДА). Такой метод позволял получить ограниченную информацию об особенностях сигналов, наблюдаемых на выходе приемного тракта РЛС, так как экспозиция фотоматериала составляла $1/30$ с и за это время на один кадр экспонировалось примерно семь отраженных сигналов, наблюдаемых на экране индикатора. Затем за $1/30$ с осуществлялась смена кадра в киноаппарате и примерно семь циклов зондирования не регистрировались. В полученном изображении (рис. 2.1а) затруднительно проследить динамику отраженных сигналов, значительная часть информации не регистрировалась, что приводило к низкой точности оценок временных характеристик отраженных от каналов молний сигналов. Взаимное наложение большого числа излученных сигналов также не позволяло оценить особенности радиоизлучения молниевых разрядов, так как выделить отдельный излученный импульс было практически невозможно.

Тем не менее подобная система регистрации позволила установить, что на частоте 155 МГц уровень сигнала, отраженного от канала молнии, сравним с сигналами нетеплового радиоизлучения (НТРИ), возникающего во время формирования сильноточного атмосферного разряда (молнии). НТРИ, генерируемое молниевым разрядом, имеет значительную интенсивность, и его сигналы в ряде случаев могут даже существенно превышать по амплитуде отражение от канала молнии. Но если радиоэхо молнии характеризуется относительной устойчивостью положения по дальности на индикаторе, то сигналы НТРИ являются несинхронно возникающими, располагающимися в произвольных местах линии развертки. Это позволяет сравнительно просто наблюдать отраженный от канала молнии сигнал на фоне хаотичных излученных сигналов. Ослабить влияние НТРИ можно, если использовать в приемном тракте РЛС_м режим накопления. При этом синхронные сигналы, отраженные каналом молнии, начинают более отчетливо выделяться на фоне помех. Для сравнения на рисунке 2.1а показаны сигналы, наблюдаемые на выходе приемника РЛС_м, и на рис. 2.1б — на выходе двукратного динамического накопителя на ртутной линии задержки. Видно, что излученные сигналы сопоставимы по амплитуде с сигналами, отраженными от канала молнии,

и при обычном суммировании на ИДА может наблюдаться заметная маскировка полезного сигнала. На выходе экспоненциального динамического накопителя излученные сигналы резко ослаблены и практически незаметны на ИДА. Полезный же сигнал хорошо выделяется. В начале развертки виден мощный сигнал радиоэха

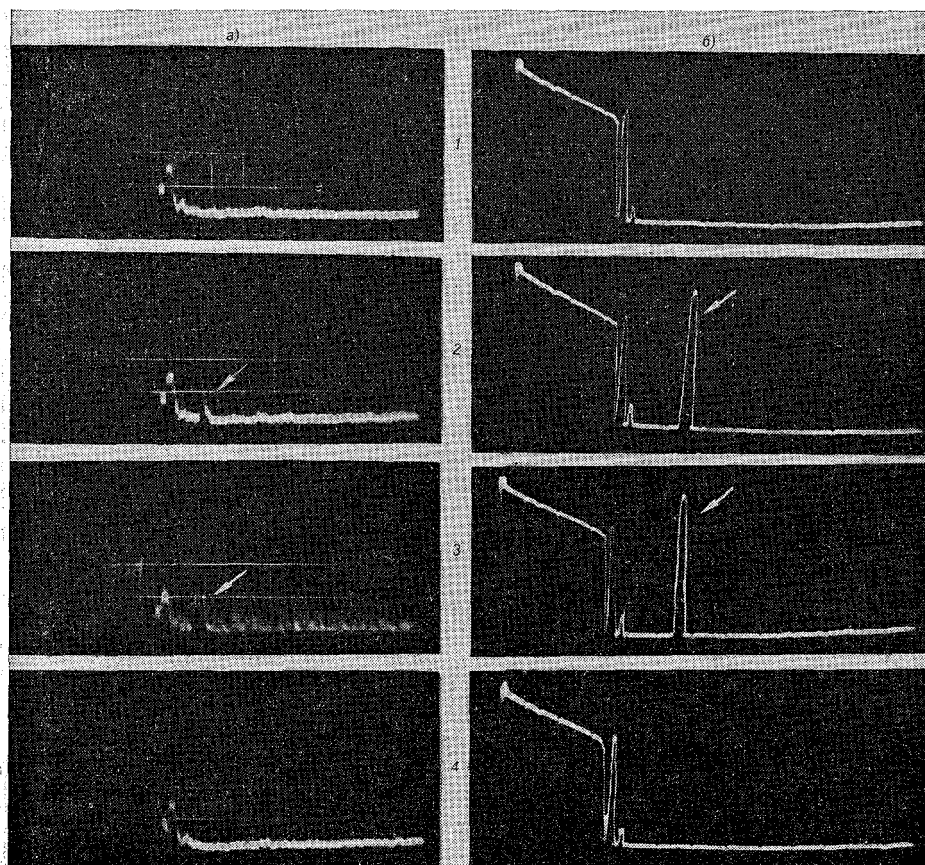


Рис. 2.1. Пример изображения радиолокационного сигнала, отраженного от канала молнии, на ИДА.

а — без накопления сигналов, *б* — с накоплением сигналов; 1 — картина до появления молний, 2, 3 — кадры с хорошо развитым радиоэхом от молний, 4 — картина после окончания молниевых разрядов.

Стрелкой отмечены сигналы, отраженные от молний.

от так называемых местных предметов — находящихся близко строений, холмов и т. п.

Некоторое усложнение системы регистрации в 1973 г. позволило получить более полную информацию о сигнале, наблюдаемом на выходе приемника РЛС. Видеосигнал с выхода приемного устройства РЛС_м через узел сопряжения подавался на вход У осцилло-

графа и после ограничителя амплитуды по минимуму — на вход частотомера. Импульс запуска РЛС_м подавался на вход синхронизации осциллографа. Использовалось табло, на котором отмечалась дата проведения эксперимента, текущее время, азимут установки антенной системы РЛС и трехзначный порядковый номер молниевых разряда, регистрируемого на киноплёнку. Для того чтобы все три оптических сигнала (от осциллографа, частотомера и табло) совместить на одном кадре киноплёнки, использовалась система зеркал.

При отсутствии молнии в пространстве обзора РЛС_м на частотомер и осциллограф поступает совокупность сигналов, отражаемых от местных предметов и излучаемых при мелкомасштабных атмосферных разрядах. В этом случае показания частотомера увеличиваются от кадра к кадру на число импульсов, поступающих на вход частотомера за $1/15$ с. При появлении молниевых разряда в пространстве обзора РЛС на вход осциллографа и частотомера поступают дополнительно импульсы, обусловленные отражением от канала молнии, и импульсы радиоизлучения атмосферных разрядов. Отраженные от каналов молний сигналы характеризуются относительной периодичностью и на линии развертки ИДА располагаются примерно в одном месте, определяемом расстоянием до канала разряда. Излученные сигналы, возникающие в случайные моменты времени и не связанные с периодом посылки в пространство зондирующих импульсов, наблюдаются в случайных местах линии развертки. Поскольку на один участок фотоплёнки экспонируются несколько линий развертки, изображение излученных сигналов зачастую представляет собой хаотичную смесь различных по дальности и амплитуде импульсов, значительная доля которых частично совмещена друг с другом.

Такая система регистрации позволила определить распределение числа импульсов, сопровождающих молниевый разряд. Кроме того, установлено, что в некоторых случаях наблюдаются излученные сигналы, не сопровождающиеся отраженными от каналов молний сигналами. Эти импульсы, возникающие в паузах между молниевыми разрядами, названы импульсами нетеплового немолниевых радиоизлучения.

В то же время подобная система регистрации имела серьезные недостатки. Так, например, время существования сигнала, отраженного от канала молниевых разряда, и длительность излучения атмосферного разряда могут быть измерены с точностью, не превышающей $1/15$ с, что не всегда приемлемо. Нет возможности проследить трансформацию формы сигнала за время, равное периоду повторения зондирующих импульсов. И, наконец, зарегистрированные сигналы радиоизлучения не могут быть выделены из смеси сигналов и нет возможности исследовать тонкую структуру радиоизлучения молниевых разрядов.

Эти недостатки устранены в системе регистрации, в которой изображение с экрана ИДА проецировалось на равномерно перемещающуюся киноплёнку. Для того чтобы исключить размытость

изображений на киноплёнке, в индикаторе используется электронно-лучевая трубка со сверхкоротким временем послесвечения (за 0,8 мкс яркость послесвечения снижалась на 90 %, а через 2 мкс — на 98 %). В результате этого на равномерно движущейся плёнке формируется изображение, подобное представленному на рис. 2.2.

При таком способе регистрации необходимо обеспечить достаточно высокую скорость перемещения плёнки. Если получить но-

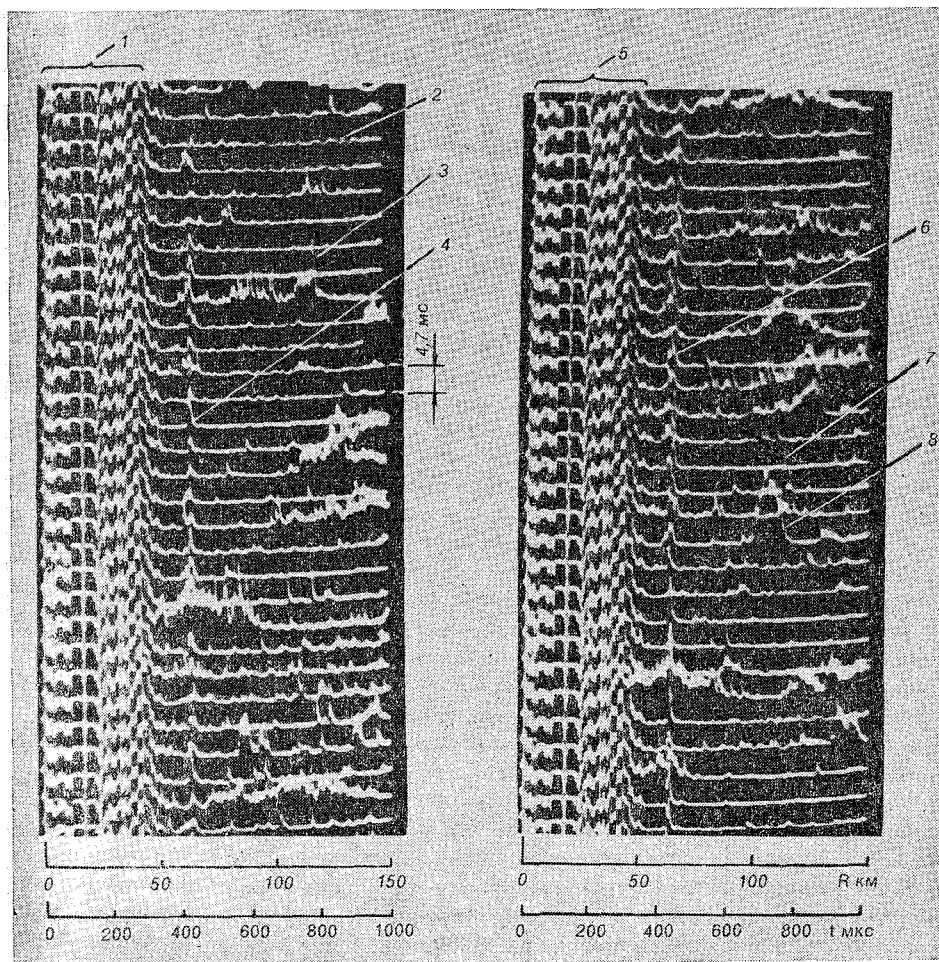


Рис. 2.2. Типовой образец сигналов, зарегистрированных при проецировании на равномерно перемещающуюся киноплёнку изображения с экрана ИДА (активная радиолокация).

1, 5 — радиозэх местных предметов, 2 — шумовое напряжение приемника, 3, 7, 8 — сигналы радиоизлучения молниевых разрядов, 4, 6 — сигналы, отраженные от каналов молний; R — расстояние от РЛС_м до цели.

вую линию развертки, ни в одной точке не пересекающуюся ни с одним элементом изображения предыдущей развертки, то минимальная скорость перемещения равномерно движущейся пленки должна быть не меньше, чем $v_{\min} = A_{\max} F_n$, где $A_{\max}$ — максимальный по амплитуде сигнал, зарегистрированный на киноплёнке, F_n — частота повторения зондирующих импульсов РЛС. Поскольку такая скорость оказалась чрезмерной, приводящей к большому расходу пленки и к малой длительности непрерывного наблюдения, то скорость была уменьшена по сравнению с $v_{\min}$ примерно в 4 раза.

В результате сигналы, связанные с отражением от близлежащих местных предметов, образовали, совмещаясь и пересекаясь друг с другом в начале развертки, сложную картину (рис. 2.2, области 1, 5), по которой невозможно однозначно определить амплитуду отраженных сигналов.

Если разряд возникает на небольшом расстоянии от радиолокационной станции, в области сильных отражений от местных предметов, то, как правило, выделить составляющую сигнала, связанную с отражением от канала молнии, невозможно. Однако за пределами области отражения от местных предметов на линии развертки наблюдаются (при отсутствии молниевых разрядов) обычно только шумовые напряжения приемника (рис. 2.2, область 2). На фоне шумовых напряжений сигналы, отраженные от каналов молнии, хорошо различимы (рис. 2.2, области 4, 6). Поскольку область, находящаяся за пределами отражений от местных предметов, расположена достаточно далеко (обычно на расстоянии более 40—45 км от РЛС), то при возникновении в этой области молниевых разрядов изображения отраженных сигналов на соседних развертках практически не пересекаются. Это позволяет сравнительно просто определить форму, амплитуду, длительность (пространственную протяженность) и время существования отраженного сигнала.

Также обычно не накладываются друг на друга импульсы, связанные с радиоизлучением молниевых разрядов. Эти импульсы, возникающие в случайные моменты времени и не связанные с режимом посылок в пространство зондирующих импульсов, отображаются на линиях развертки в виде совокупности хаотично расположенных сигналов различной формы, амплитуды и длительности (рис. 2.2, области 3, 7, 8). Поскольку сигналы распределены хаотично, их форма, как правило, легко восстанавливается, даже если амплитуда сигнала велика и сигнал пересекает несколько линий развертки.

Для упрощения идентификации отснятой киноплёнки на экране осциллографа устанавливается табло с часами, а также с табличками, где указывается число, месяц и год проведения эксперимента. При кратковременной остановке пленки это табло довольно хорошо экспонируется. В начале развертки (до 31,5 км) видны отражения от местных предметов (рис. 2.3). Масштаб развертки составляет 150 км (что соответствует длительности развертки

1000 мкс). Между соседними экспонированными линиями развертки проходит 4,7 мс.

Подобная система регистрации позволила получить наиболее детальные данные о сигналах, отраженных от каналов молниевых разрядов, а также о структуре и форме сигналов, излученных во

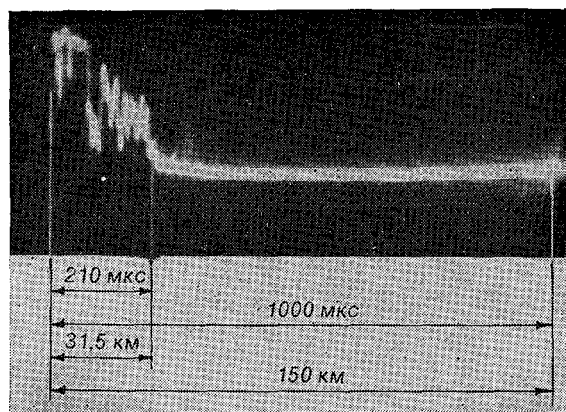


Рис. 2.3. Изображение, получаемое при кратковременной остановке пленки во время регистрации по импульсному методу. 15 сентября 1973 г.

время формирования каналов молний и в паузах между молниевыми разрядами.

Существенным недостатком такой системы регистрации является малое время непрерывной работы. При использовании стандартной 60-метровой кассеты можно непрерывно регистрировать сигналы лишь в течение 2 мин, в то время как наблюдения за грозами иногда могут продолжаться несколько часов. В связи с этим возникают большие трудности при обработке и анализе полученной информации, так как подобная форма представления данных практически делает невозможной автоматизацию процесса обработки результатов экспериментальных исследований.

Можно существенно уменьшить расход фотоматериалов и упростить процесс обработки информации, если ограничиться данными только о моменте появления молниевых разряда, длительности существования отраженного сигнала, расстоянии до ближайшей к РЛС области канала и его пространственной протяженности (проекция части канала молниевых разряда, находящейся в зоне обзора РЛС_м, на линию наклонной дальности). Для этого на электронно-лучевой трубке индикатора формировалась горизонтальная светящаяся линия, яркость свечения точек которой менялась под действием выходного сигнала РЛС_м. В индикаторе использовалась электронно-лучевая трубка со сверхкоротким време-

нем послесвечения люминофора. В результате на равномерно перемещающейся киноплёнке формировалось изображение, подобное представленному на рис. 2.4. В левой части рисунка наблюдается светлая зона, связанная с сигналами, отраженными от местных предметов, которая аналогична областям 1 и 5 на рис. 2.2. В данном случае сигналы отражения от местных предметов простираются на 45 км. Радиоэхо от двух отдельных гор видны на расстоянии 49 и 67—70 км соответственно. При появлении сигнала, отраженного от канала молниевых разрядов, на плёнке возникает полоса, длительность которой определяется длительностью существования сигнала отражения от молнии, ее положение по горизонтали зависит от расстояния до канала разряда. Ширина этой полосы определяется пространственной протяженностью отражающего объекта (в данном случае — молнии).

Если канал молнии ориентирован преимущественно вертикально, что обычно имеет место при разряде облако — земля, то полоса на киноплёнке, соответствующая такому отраженному сигналу, узкая. К сожалению, по ширине полосы невозможно однозначно интерпретировать тип разряда. Полоса на киноплёнке может оказаться узкой и при внутриоблачном разряде, если канал разряда ориентирован преимущественно перпендикулярно направлению зондирующего импульса. И лишь в том случае, когда канал молниевых разрядов (либо какое-нибудь из его ответвлений) оказывается ориентированным вдоль линии распространения зондирующего импульса РЛС, ширина полосы может оказаться значительной, соответствующей нескольким километрам пространства. На рис. 2.4 видно, что радиоэхо молнии имеет протяженность 6 км (точнее, длина проекции канала разряда на линию наклонной дальности составляет 6 км) и наблюдается на расстоянии 57—63 км от радиолокатора. В данном случае молния имела три мощных возвратных удара длительностью: первый — 77 мс, второй — 26 мс, третий — 43 мс, а также четвертый слабый возвратный удар длительностью 22 мс (с 265 до 287 мс от начала первого возвратного удара). Общая длительность существования радиоэха молнии — 287 мс. (Как известно, разряд молнии проходит несколько стадий своего развития: 1) стадию ступенчатого лидера, 2) стадию возвратного или обратного удара, после которой иногда следует стреловидный лидер, предшествующий еще одному возвратному удару. В одной вспышке молнии может содержаться несколько стреловидных лидеров и следующих за ними возвратных ударов. Подробнее об этом см., например, у М. Юмана [188].)

Кроме отраженных сигналов (каналом молнии и местными предметами) на плёнке наблюдается множество сигналов, хаотично распределенных как по временной шкале, так и по шкале расстояний. Эти сигналы связаны с радиоизлучением, возникающим при появлении сильноточных атмосферных разрядов. Среди этих сигналов встречаются длительные импульсы (рис. 2.4, область 1 и соответственно рис. 2.2, область 8). Чаще встречаются многочисленные кратковременные импульсы (рис. 2.4, область 2 и соответ-

методика была изменена. В тех случаях, когда интенсивность грозовых процессов была значительной (число разрядов более 10—15 в 1 мин), управляющей становилась РЛС_м, и данные о координатах зоны максимальной грозовой активности передавались оператору РЛС_{см}, который выполнял вертикальные разрезы облачности в окрестностях этой зоны. Оператор РЛС_м периодически (в зависимости от динамики процесса через 15—20 или 30—40 мин) производил секторное сканирование антенной системы, чтобы выявить перемещение центра грозового очага, после чего вновь устанавливал антенную систему неподвижно в азимуте на скорректированное положение зоны максимальной грозовой активности.

В последние годы для получения пространственной панорамы грозовой активности в облачном поле применялась следующая методика. После нахождения центра грозовой активности последовательно производились наблюдения за разрядами в течение 1—2 мин в азимутах через 5—6° (половина ширины диаграммы направленности антенной системы РЛС_м) вправо и влево от этого центра, а затем, в зависимости от частоты следования разрядов, через 5 или 10° до границ грозового очага. Синхронно с этими наблюдениями операторами РЛС_{см} производились вертикальные радиолокационные разрезы облачности в тех же азимутах. Таким образом получалась информация о параметрах облачного поля и местоположении в нем грозового очага, а также о структуре этого очага.

Последние две методики могли применяться при достаточно интенсивных грозовых процессах с частотой разрядов более 10 мин⁻¹. При меньшей интенсивности грозы определить местоположение максимума грозовой активности с помощью применяемой аппаратуры затруднительно, в таких ситуациях работа проводилась по первой методике.

Перейдем теперь к анализу результатов исследований грозовых процессов с помощью радиолокационных станций метрового и сантиметрового диапазонов.

2.3. Результаты активной радиолокации грозовых очагов

Как уже отмечалось, активная радиолокация в метровом диапазоне позволяет наблюдать за динамикой, структурой и трансформацией грозовых очагов, в то время как активная радиолокация в сантиметровом диапазоне длин волн (стандартные МРЛ, бортовые и диспетчерские РЛС) лишь косвенным образом определяет вероятность существования грозового процесса в данном облаке и не характеризует ни реальную интенсивность грозы, ни тем более грозоопасность облаков.

Проанализируем некоторые результаты синхронных наблюдений за грозовой облачностью с помощью МРЛ и аппаратуры, созданной на базе РЛС_м.

2.3.1. Об эффективной отражающей поверхности канала молнии

Одной из основных радиолокационных характеристик канала молниевых разрядов является эффективная отражающая поверхность (ЭОП). С учетом сложного пространственного распределения отражающего объекта ЭОП канала молнии, состоящего из основного канала разряда и многочисленных его ответвлений, сложным образом зависит от расположения отражающих элементов канала в пространстве и их геометрических характеристик. Одними из первых теоретических работ по расчету ЭОП молнии были работы Ж. А. Дausона [197] и Л. И. Дивинского [47, 48, 199]. Дausон считал, что основной вклад в радиоэхо молнии вносят ионизированные каналы, расположенные перпендикулярно направлению распространения зондирующего импульса. Дивинский произвел расчеты для произвольной ориентации канала разряда. Учитывая важность этого вопроса, мы сочли нужным рассмотреть его в этой книге подробно.

Канал молниевых разрядов представляет собой неоднородность в пространстве, проявляющуюся в том, что в зоне канала наблюдается высокая степень ионизации газа и его температура значительно выше температуры окружающей среды. Как известно [158], отражение электромагнитных волн от канала возможно лишь в том случае, если волновое сопротивление объекта отличается от волнового сопротивления среды. Волновое сопротивление (Z) зависит как от комплексной диэлектрической (ϵ), так и от магнитной (μ) проницаемости:

$$Z = \sqrt{\mu/\epsilon}.$$

Нетрудно показать, что температурный контраст не может быть причиной, обуславливающей заметное отражение радиоволн. Как известно [165], с увеличением температуры газа его диэлектрическая проницаемость уменьшается. (Диэлектрическая проницаемость вакуума $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м, максимальное значение для воздуха $\epsilon_a = (1 + 4,6 \cdot 10^{-4}) \epsilon_0$ Ф/м [165].) Магнитная проницаемость газа независимо от температуры практически равна магнитной проницаемости вакуума $\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6}$ Гн/м. Если исследовать влияние только температурного фактора на отражение радиоволн и предположить, что в канале молнии газ разогрет, но не ионизирован, то наиболее благоприятной ситуацией для формирования отраженного сигнала следует считать такую, при которой канал молнии формируется в среде, имеющей максимальную диэлектрическую проницаемость. Но даже в этом случае коэффициент отражения радиоволн по мощности ($|\rho|^2$) от плоской границы раздела двух сред при перпендикулярном падении волны будет равен всего

$$|\rho|^2 = \left| \frac{Z_1 - Z_0}{Z_1 + Z_0} \right|^2 = 1,38 \cdot 10^{-8}, \quad (2.1)$$

где Z — волновое сопротивление атмосферного воздуха, $Z_1 = \sqrt{\mu_0/(1 + 4,6 \cdot 10^{-4})\epsilon_0} = (1 - 2,3 \cdot 10^{-4})Z_0$; Z_0 — волновое сопротивление вакуума ($Z_0 = 377$ Ом), $Z_0 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0}$.

Таким образом, отражение радиоволн от канала молнии обусловливается не высокой температурой канала, а высокой степенью ионизации — наличием в канале молнии большого числа заряженных частиц.

Как известно [107], наличие в пространстве заряженных частиц приводит к изменению диэлектрической проницаемости и появлению активной проводимости среды. Это является следствием воздействия на заряженные частицы электрической составляющей электромагнитного поля, приводящего к колебательному движению частиц. В простейшем случае (поле линейно поляризовано и изменяется по синусоидальному закону) поле приводит частицы в колеблющееся состояние, и в пространстве начинает протекать ток, плотность которого

$$j_g = \frac{N_r q_r E_m}{m_r} \left(\frac{v}{v^2 + \omega^2} - j \frac{\omega}{v^2 + \omega^2} \right) \exp i\omega t, \quad (2.2)$$

где N_r — концентрация заряженных частиц, q_r — заряд частицы, m_r — масса заряженной частицы, E_m — амплитуда внешнего возбуждения, ω — частота вынужденных колебаний, v — частота столкновения заряженных частиц, $i = \sqrt{-1}$.

Из соотношения (2.2) следует, что плотность тока зависит от удельного заряда частиц q/m . Основной вклад в конвективный ток вносят электроны, обладающие максимальным удельным зарядом: $e/m = 1,76 \cdot 10^{-11}$ Кл/кг, где $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл — заряд электрона, $m = 9,11 \cdot 10^{-31}$ кг — масса электрона. Вкладом других заряженных частиц можно пренебречь. Тогда для ионизированного газа удельная проводимость среды γ_n и ее диэлектрическая проницаемость ϵ_n равны [158]:

$$\gamma_n = \frac{Ne^2 v_e}{m(\omega^2 + v_e^2)}, \quad (2.3)$$

$$\epsilon_n = \epsilon_{cp} - \frac{Ne^2}{m(\omega^2 + v_e^2)}, \quad (2.4)$$

где N — концентрация свободных электронов, v_e — частота столкновения электронов с частицами (молекулами и ионами) газа, ϵ_{cp} — диэлектрическая проницаемость неионизированной среды.

Основной причиной, приводящей к появлению активной проводимости и изменению диэлектрической проницаемости ионизированной среды, является наличие в этой среде свободных электронов (так как они обладают максимальным удельным зарядом $e/m = 1,76 \cdot 10^{-11}$ Кл/кг). Частота столкновения свободных электронов с нейтральными молекулами газа равна

$$v_e = \pi R_m N \sqrt{3kT/m} = 2,4 \cdot 10^7 p \sqrt{T},$$

где R_m — эффективный радиус молекулы газа (для азота $R_m = 1,89 \cdot 10^{-10}$ м, для кислорода $R_m = 1,81 \cdot 10^{-10}$ м); T — температура газа, в К; m — масса электрона; p — давление газа; k — постоянная Больцмана.

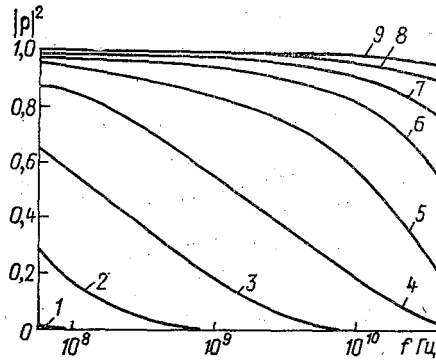
Волновое сопротивление среды, обладающей конечной проводимостью, равно

$$Z_n = \sqrt{\mu / (\epsilon_n - j\gamma/\omega)}.$$

Коэффициент отражения радиоволн по мощности $|\rho|^2$, вычисленный по соотношению (2.1) для различных длин волн электро-

Рис. 2.5. Зависимость коэффициента отражения радиоволн по мощности $|\rho|^2$ от частоты колебаний f при различной концентрации свободных электронов.

Концентрация, м^{-3} : 1) 10^{16} , 2) 10^{17} , 3) 10^{18} , 4) 10^{19} , 5) 10^{20} , 6) 10^{21} , 7) 10^{22} , 8) 10^{23} , 9) 10^{24} . Давление $p = 666,5$ ГПа, температура: 270 К (кривые 1–6), 3600 К (кривые 7–9).



магнитного поля и различных концентраций свободных электронов, представлен на рис. 2.5. При расчете температура газа принималась равной $T = 270$ К при $N \leq 10^{21} \text{ м}^{-3}$ и равной $T = 3600$ К при $N \geq 10^{22} \text{ м}^{-3}$. Действительно, низкая концентрация электронов характерна для холодного разряда, возникающего на этапе формирования ступенчатого лидера. Температура газа в области коронного разряда практически остается равной температуре окружающей среды [12]. Высокая концентрация свободных электронов наблюдается в сильнооточном, разогретом до высоких температур канале дугового разряда. В начальный период формирования дугового канала его температура измеряется десятками тысяч градусов (обычно 24 000—35 000 К) [51, 56, 111]. Но после завершения импульса тока, длительностью в несколько десятков микросекунд (в среднем 50—70 мкс), температура канала быстро (в течение нескольких десятков миллисекунд) снижается до 3000—6000 К [253]. Приведенные на рис. 2.5 зависимости справедливы, если отражение волн происходит от плоской границы раздела двух полугограниченных сред при нормальном падении радиоволн на плоскость раздела. Применение полученных значений $|\rho|^2$ допустимо в случае, если размеры ионизированной зоны существенно превышают глубину проникновения электромагнитного поля.

Глубина проникновения электромагнитного поля δ обратна действительной части коэффициента распространения

$$1/\delta = \operatorname{Re} k = \operatorname{Re} \sqrt{\mu_0 (\epsilon_n - j\gamma/\omega)},$$

где Re — действительная часть комплексного коэффициента распространения, k — комплексный коэффициент распространения.

Зависимость глубины проникновения электромагнитного поля в ионизированную среду от частоты колебаний при различной концентрации свободных электронов представлена на рис. 2.6.

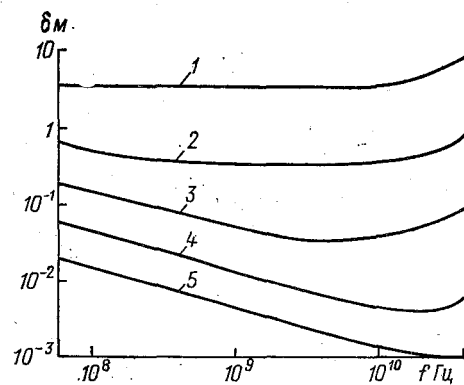


Рис. 2.6. Зависимость глубины проникновения электромагнитного поля δ в ионизированный слой от частоты колебаний f при различной концентрации свободных электронов.

Концентрация, м^{-3} : 1) 10^{15} , 2) 10^{17} , 3) 10^{18} , 4) 10^{19} , 5) 10^{20} .

Если размеры ионизированного пространства сравнимы с глубиной проникновения радиоволн, для определения характеристик отраженного сигнала необходимо учитывать рассеяние радиоволн отдельными свободными электронами. Здесь ограничимся исследованием процесса отражения электромагнитных волн от каналов молний, у которых глубина проникновения электромагнитного поля существенно меньше размеров канала. Назовем такие каналы насыщенными. Если насыщенный канал имеет коэффициент отражения $|\rho|^2$, близкий к единице, то без существенной погрешности его можно рассматривать как идеальный отражающий объект. Если $|\rho|^2$ заметно отличается от единицы, но канал непрозрачен для радиоволн (они в нем затухают и глубина проникновения невелика), то справедливо соотношение

$$\sigma_p = |\rho|^2 \sigma_m,$$

где σ_p — эффективная отражающая поверхность канала молнии с коэффициентом отражения радиоволн, равным $|\rho|^2$; σ_m — эффективная отражающая поверхность идеально отражающего объекта с геометрической структурой, идентичной структуре канала молнии.

Учитывая осевую симметрию канала молнии, его можно считать цилиндрическим отражателем. Однако известные соотноше-

ния [25, 148, 158], определяющие эффективную отражающую поверхность цилиндрического отражателя через длину L^* и радиус r :

$$\sigma = \begin{cases} |\rho|^2 \frac{2\pi r L^{*2}}{\lambda} & \text{при } r \geq \lambda \\ |\rho|^2 \pi L^{*2} \left(\frac{1}{\ln \frac{2\pi r}{\lambda}} \right)^2 & \text{при } r \ll \lambda, \end{cases} \quad (2.5)$$

$$(2.6)$$

дают существенно завышенную величину σ , достигающую сотен тысяч квадратных метров для каналов с размерами $L^* = 1$ км и $r = 10 \dots 15$ см.

Завышение величины σ объясняется тем, что соотношения (2.5) и (2.6) справедливы только для случая нормального падения на цилиндрический отражатель плоской электромагнитной волны, у которой вектор напряженности электрического поля параллелен оси цилиндра.

При анализе эффективной отражающей поверхности необходимо учитывать особенности геометрической структуры молнии, а именно ее существенную изломанность, относительную произвольность ориентации отдельных ее отрезков в пространстве и разветвленность.

Более справедливой представляется модель, в которой отраженный от молнии сигнал рассматривается как некогерентная совокупность независимых сигналов, отраженных отдельными произвольно ориентированными в отражающем объеме Δv прямолинейными участками канала. Под отражающим объемом Δv понимается область пространства, из которой одновременно от всех находящихся в ней целей приходит отраженный сигнал на вход приемника РЛС. Если угол диаграммы направленности антенной системы РЛС в горизонтальной и вертикальной плоскостях соответственно равен Θ и φ и поток энергии, излучаемый антенной системой РЛС за пределы указанных углов, пренебрежимо мал, то отражающий объем пространства равен

$$\Delta v = \pi R^2 \Theta \varphi c \tau / 2,$$

где R — расстояние от отражающего объекта, τ — длительность зондирующего импульса РЛС, c — скорость распространения радиоволн.

Обратное рассеяние радиоволн цилиндрическими отражателями изучалось в работах [25, 148, 162].

Ограничим исследование характеристик отраженных сигналов случаем отражения от насыщенных каналов молний, у которых радиус ионизированной зоны $r \geq \lambda$. В этом случае эффективная отражающая поверхность равна [148]

$$\sigma = \frac{2\pi r L^{*2} \cos \beta}{\lambda} \left[\frac{\sin \left(\frac{2\pi L^*}{\lambda} \sin \beta \right)}{\frac{2\pi L^*}{\lambda} \sin \beta} \right]^2, \quad (2.7)$$

где L^* — длина цилиндрического отражателя, β — угол между плоскостью, нормальной к оси цилиндра, и направлением распространения электромагнитных волн.

Из выражения (2.7) следует, что величина σ является осциллирующей функцией, достигающей максимума, соответствующего выражению (2.5), лишь при $\beta = 0$. При $\beta > \lambda/4l$ величина σ существенно меньше максимального значения.

Если канал молнии и его ответвления представить в виде отдельных прямолинейных участков, независимо отражающих электромагнитные волны, то результирующая эффективная отражающая поверхность n независимых отражателей, находящихся в отражающем объеме Δv , равна

$$\sigma = \left[\sum_{i=1}^n \sqrt{\sigma_i} \exp \left(j \frac{4\pi R_i}{\lambda} \right) \right]^2, \quad (2.8)$$

где σ_i — эффективная отражающая поверхность i -го отражателя, R_i — расстояние от фазового центра антенны до середины i -го прямолинейного цилиндрического отражателя.

Произвольность ориентации отдельных отражающих элементов обуславливает статистический характер величины σ , которая подчиняется экспоненциальному закону распределения

$$p(\sigma) = \frac{1}{\bar{\sigma}_{\text{общ}}} \exp \left(-\frac{\sigma}{\bar{\sigma}_{\text{общ}}} \right), \quad (2.9)$$

где $p(\sigma)$ — функция распределения величины σ , $\bar{\sigma}_{\text{общ}}$ — средняя ЭОП канала молнии.

Средняя эффективная отражающая поверхность канала молнии с учетом теоремы Чебышева равна

$$\bar{\sigma}_{\text{общ}} \approx \sum_{i=1}^n \sigma_i \approx n \bar{\sigma}_i, \quad (2.10)$$

где $\bar{\sigma}_i$ — средняя эффективная отражающая поверхность отдельного прямолинейного участка канала молнии.

Чтобы найти $\bar{\sigma}_i$ предположим, что $p(L^*)$ и $p(r)$ — функции распределения длины L^* отдельного прямоугольного участка канала и его радиуса r соответственно. В этом случае, предполагая, что величина β с равной вероятностью может принимать любые значения в интервале $0 < \beta < \pi/2$, имеем

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_i = |\rho|^2 \int_{L_{\text{мин}}}^{L_{\text{макс}}}^* p_1(L^*) dL^* \int_{r_{\text{мин}}}^{r_{\text{макс}}} p_2(r) dr \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi/2} \frac{2\pi r \cos \beta}{\lambda} \times \\ \times L^{*2} \left[\frac{\sin \left(\frac{2\pi L^*}{\lambda} \sin \beta \right)}{\frac{2\pi L^*}{\lambda} \sin \beta} \right]^2 d\beta, \end{aligned} \quad (2.11)$$

где $L_{\text{макс}}^*$ и $L_{\text{мин}}^*$ — соответственно максимальная и минимальная длина отдельных прямолинейных участков канала молнии, $r_{\text{макс}}$ и $r_{\text{мин}}$ — соответственно максимальный и минимальный радиус отдельных участков канала молнии.

После введения переменной $u = 2\pi L^*/\lambda \sin \beta$ получим

$$\bar{\sigma}_i = |\rho|^2 \int_{L_{\text{мин}}^*}^{L_{\text{макс}}^*} p_1(L^*) dL^* \int_{r_{\text{мин}}}^{r_{\text{макс}}} p_2(r) dr \frac{2rL^*}{\pi} \int_0^{\frac{2\pi L^*}{\lambda}} \frac{\sin^2 u}{u^2} du. \quad (2.12)$$

Представим выражение (2.12) в виде

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_i = |\rho|^2 \int_{L_{\text{мин}}^*}^{L_{\text{макс}}^*} p_1(L^*) dL^* \int_{r_{\text{мин}}}^{r_{\text{макс}}} p_2(r) dr \frac{2rL^*}{\pi} \times \\ \times \left[\int_0^{\infty} \frac{\sin^2 u}{u^2} du - \int_{\frac{2\pi L^*}{\lambda}}^{\infty} \frac{\sin^2 u}{u^2} du \right]. \end{aligned} \quad (2.13)$$

Из (2.13) следует неравенство

$$\begin{aligned} |\rho|^2 \int_{L_{\text{мин}}^*}^{L_{\text{макс}}^*} p_1(L^*) dL^* \int_{r_{\text{мин}}}^{r_{\text{макс}}} p_2(r) dr \frac{2rL^*}{\pi} \left[\int_0^{\infty} \frac{\sin^2 u}{u^2} du - \int_{\frac{2\pi L^*}{\lambda}}^{\infty} \frac{du}{du^2} \right] < \\ < \bar{\sigma}_i < |\rho|^2 \int_{L_{\text{мин}}^*}^{L_{\text{макс}}^*} p_1(L^*) dL^* \int_{r_{\text{мин}}}^{r_{\text{макс}}} p_2(r) dr \frac{2rL^*}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\sin^2 u}{u^2} du. \end{aligned} \quad (2.14)$$

После преобразования (2.14) получаем

$$\begin{aligned} |\rho|^2 \int_{L_{\text{мин}}^*}^{L_{\text{макс}}^*} p_1(L^*) dL^* \int_{r_{\text{мин}}}^{r_{\text{макс}}} p_2(r) dr \left(rL^* - \frac{r\lambda}{\pi^2} \right) dr < \bar{\sigma}_i < |\rho|^2 \times \\ \times \int_{L_{\text{мин}}^*}^{L_{\text{макс}}^*} p_1(L^*) dL^* \int_{r_{\text{мин}}}^{r_{\text{макс}}} p_2(r) rL^* dr. \end{aligned} \quad (2.15)$$

Учитывая, что

$$\bar{L}^* = \int_{L_{\text{мин}}^*}^{L_{\text{макс}}^*} p_1(L^*) L^* dL^*, \quad \bar{r} = \int_{r_{\text{мин}}}^{r_{\text{макс}}} p_2(r) r dr, \quad (2.16)$$

имеем

$$|\rho|^2 (\bar{r}\bar{L}^* - \bar{r}\lambda/\pi^2) < \bar{\sigma}_i < |\rho|^2 \bar{r}\bar{L}^*. \quad (2.17)$$

Данные фотометрических исследований молний показывают, что в пределах отдельной ступени лидера, средняя длина которой 30—70 м, канал молнии достаточно прямолинеен и может рассматриваться как отдельный прямолинейный цилиндрический отражатель. Поскольку длина волны РЛС существенно меньше средней длины отдельного участка канала молнии, справедливо неравенство

$$\bar{r}L^* \gg \bar{r}\lambda/\pi^2.$$

Так, при $\bar{L}^* \gg 10L^*$ имеем $\bar{r}\lambda/\pi^2 \leq 0,01\bar{r}L^*$ и неравенство (2.17) записывается в виде

$$0,99|\rho|^2\bar{r}L^* < \bar{\sigma}_i < |\rho|^2\bar{r}L^*,$$

т. е. практически

$$\bar{\sigma}_i \approx |\rho|^2\bar{r}L^*. \quad (2.18)$$

Средняя эффективная отражающая поверхность канала молнии, исходя из выражений (2.10) и (2.18), равна

$$\bar{\sigma}_{\text{общ}} \approx n|\rho|^2\bar{r}L^*. \quad (2.19)$$

Здесь n — число отдельных прямолинейных участков канала в отражающем объеме пространства Δv .

Преобразуем выражение (2.19):

$$\bar{\sigma}_{\text{общ}} = n|\rho|^2\bar{r} \frac{L_1^* + L_2^* + \dots + L_n^*}{n} = |\rho|^2\bar{r} \sum_{i=1}^n L_i^*. \quad (2.20)$$

Из (2.20) следует, что средняя эффективная отражающая поверхность канала молнии при полном отражении электромагнитных волн ($|\rho|^2 = 1$) равна произведению полной длины канала молнии и его ответвлений, расположенных в отражающем объеме пространства, на средний радиус прямолинейных участков канала.

Задаваясь конкретными характеристиками канала молний, оценим среднюю эффективную отражающую поверхность канала молнии.

Как известно [188], формирование канала молнии начинается с возникновения ступенчатого лидера, прокладывающего канал последовательными ступенями длиной 30—70 м. Диаметр ионизированной зоны, по данным различных авторов [230, 247], составляет 1—10 м. Ступенчатый лидер формирует разветвленный канал длиной несколько километров. Канал сильно ионизирован, концентрация свободных электронов в нем достигает 10^{18} — 10^{19} м⁻³ [12, 230].

Зависимость средней эффективной отражающей поверхности от длины волны электромагнитных колебаний при различной концентрации свободных электронов представлена на рис. 2.7. Предполагалось, что суммарная длина канала и его ответвлений, расположенных в отражающем объеме пространства, равна 1 км, а радиус с равной вероятностью принимает значения от 1 до 10 м. При увеличении суммарной длины канала и его ответвлений в окружаю-

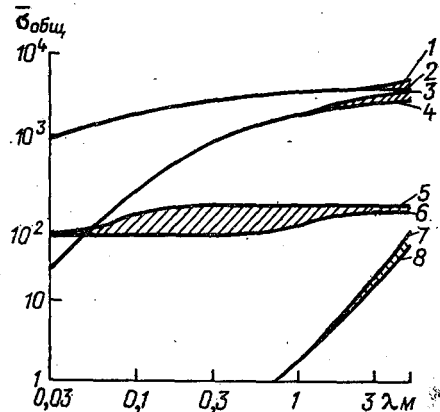
щем объеме пространства, как следует из (2.20), линейно увеличивается $\bar{\sigma}_{\text{общ}}$.

Формирование ступенчатого лидера длится около 20 мс и завершается возникновением внутри канала ступенчатого лидера возвратного удара радиусом 5—12 см. Газ в канале возвратного удара практически полностью ионизирован, а некоторая часть атомов ионизирована двукратно [111]. Концентрация свободных электронов в канале возвратного удара достигает 10^{23} — 10^{24} м⁻³ [158,

Рис. 2.7. Зависимость средней эффективной отражающей поверхности $\bar{\sigma}_{\text{общ}}$ канала молнии длиной 1 км от длины волны λ , при различной концентрации свободных электронов.

Кривые 1—4, 7, 8 — ступенчатый лидер с концентрацией свободных электронов в канале $N=10^{19}$ м⁻³: 1 — $\bar{\sigma}_{1\text{макс}}$, 2 — $\bar{\sigma}_{1\text{мин}}$; $N=10^{18}$ м⁻³: 3 — $\bar{\sigma}_{2\text{макс}}$, 4 — $\bar{\sigma}_{2\text{мин}}$; $N=10^{17}$ м⁻³: 7 — $\bar{\sigma}_{4\text{макс}}$, 8 — $\bar{\sigma}_{4\text{мин}}$. Кривые 5, 6 — возвратный удар с $N=10^{23}$ м⁻³: 5 — $\bar{\sigma}_{3\text{макс}}$, 6 — $\bar{\sigma}_{3\text{мин}}$ ($\bar{\sigma}_{i\text{мин}} < \sigma_i < \sigma_{i\text{макс}}$).

Для ступенчатого лидера радиус канала $r_{\text{мин}}=1$ м, $r_{\text{макс}}=9$ м; для возвратного удара $r_{\text{мин}}=1,5$ см, $r_{\text{макс}}=11,5$ см ($r_{\text{мин}} < r < r_{\text{макс}}$).



188]. Если результирующая длина канала возвратного удара и его ответвлений в окружающем объеме пространства равна 1 км, а средний радиус канала возвратного удара — 6,5 см ($r_{\text{мин}}=1$ см, $r_{\text{макс}}=12$ см при равномерной плотности распределения величины r), то средняя эффективная отражающая поверхность канала молнии, как это следует из (2.20), будет составлять примерно 65 м². Поскольку соотношение (2.18) выведено для случая $r \geq \lambda$, полученное среднее значение эффективной отражающей поверхности канала возвратного удара ($\bar{\sigma}_{\text{общ}}$) справедливо для РЛС_{см}.

В РЛС метрового и длинноволновой части дециметрового диапазонов канал возвратного удара обычно экранирован внешней ионизированной оболочкой канала ступенчатого лидера. Поэтому уровень выходного сигнала в таких РЛС может не измениться при возникновении возвратного удара. Это подтверждается результатами экспериментальных наблюдений. Для РЛС сантиметрового и коротковолновой части дециметрового диапазона характерны малая длительность зондирующего импульса и малый угол диаграммы направленности антенной системы, что приводит к малому значению отражающего объема пространства (Δv). В пределах ограниченного отражающего объема находится небольшая часть канала молнии и поэтому $\bar{\sigma}_{\text{общ}}$ мала. При возникновении молнии в облаках с большой водностью мощность сигнала, отраженного от частиц облаков и осадков в диапазоне сантиметровых волн, может оказаться сравнимой с мощностью сигнала, отраженного

от канала молнии, или даже превзойти ее. В таких случаях явление молнии остается незамеченным на выходе приемного устройства РЛС [46].

После возвратного удара процесс молниевых разрядов может завершиться. При этом канал молнии постепенно остывает, в нем понижается концентрация свободных электронов и уменьшается до нуля среднее значение ЭОП. Распад канала, как показывают наблюдения с помощью РЛС_м, происходит в течение 0,1—0,2 с при одноимпульсной вспышке молнии. Иногда после возвратного удара по каналу в течение 20—500 мс продолжает протекать непрерывный ток силой 40—130 А (отмечались токи до 280 А [192, 220]). В этом случае канал продолжает светиться после завершения возвратного удара, концентрация свободных электронов в нем уменьшается с меньшей скоростью, и время существования отраженного сигнала может быть большим (до 0,5—0,6 с).

Если существуют условия для подвода дополнительного заряда из других зон облака к сформировавшемуся каналу, то после небольшой паузы (обычно 50—70 мс) возникает стреловидный лидер. Последний представляет собой непрерывно перемещающуюся с высокой скоростью (в среднем $5 \cdot 10^6$ м/с) по каналу разряда светящуюся область длиной 30—50 м и диаметром — около 4,5 м. Стреловидный лидер повышает температуру канала молнии и увеличивает его проводимость. Концентрация свободных электронов в канале молнии после прохождения стреловидного лидера повышается до 10^{18} — 10^{19} м⁻³, т. е. становится такой же, как в канале ступенчатого лидера [188].

Такие чередования пауз, стреловидных лидеров и следующих за стреловидными лидерами возвратных ударов могут многократно повторяться (отмечались молнии, в которых число возвратных ударов превышало 20). После каждого стреловидного лидера и возвратного удара условия отражения электромагнитных волн восстанавливаются, средняя эффективная отражающая поверхность увеличивается, возрастает продолжительность существования сигнала, отраженного от канала молний (до 1,5—1,8 с в диапазоне метровых волн иногда даже более 2 с). Типичной для средней эффективной отражающей поверхности канала молнии длиной 1 км можно считать величину, доходящую до нескольких сот метров в диапазоне метровых волн и в длинноволновой части дециметрового диапазона.

2.3.2. Пространственно-временная структура грозových очагов

Для получения наглядной и достоверной информации о пространственно-временном распределении грозových очагов авторами данной монографии было введено в [145, 182] понятие «двумерного тренда» [163] интенсивности грозовой деятельности, под которым понимается пространственно-временное распределение интенсивности потока событий (в данном случае молний), т. е. поле

изолиний частоты молниевых разрядов, построенное по данным РЛС_м в координатах текущее время — расстояние до разряда. Для построения искомого распределения сигналы, отраженные от каналов молниевых разрядов, регистрировались, как это уже описано выше, на равномерно перемещающуюся киноплёнку методом яркостной модуляции линии развертки индикатора. Такой метод регистрации дает малую погрешность (4—6 %) и высокое разрешение по времени (0,05 с) и дальности (1 км) [66]. Зная пространственно-временные характеристики каждого разряда, можно перейти к распределению числа разрядов вдоль линии наклонной дальности РЛС_м (в пределах ширины диаграммы направленности антенной системы) в течение 1 мин наблюдений. Определив для всего хода грозового процесса число разрядов в каждую минуту на каждом километре, можно получить изображение грозового поля в виде системы изолиний частоты разрядов молний. С помощью такого распределения были выявлены зоны неоднородности грозовой деятельности (электрически активные ячейки) — локальные области грозового поля, организованные замкнутыми изолиниями. На примере интенсивных грозовых процессов удалось показать явно выраженный ячеистый характер внутренней структуры грозового очага. Электрически активные ячейки, существующие более короткое время (10—15 мин) и имеющие меньшие масштабы (2—10 км), чем весь очаг, возникая, исчезая и взаимодействуя друг с другом, и составляют ту область пространства, где происходят (возникают, генерируются) разряды молний и которая определяется нами как грозовой очаг.

На рис. 2.8 дан пример пространственно-временного распределения грозовой активности. Рисунок иллюстрирует структуру грозового очага и его эволюцию в течение 2 ч наблюдений. Видно, что очаг удаляется от пункта наблюдения, флуктуируя по площади и интенсивности, становясь то более размытым, то более выраженным, с локальными центрами грозовой активности (электрически активными ячейками). Гроза достигла максимальной интенсивности около 21 ч, когда образовалась единственная электрически активная ячейка большой протяженности, в центре которой (на расстоянии 76—78 км от РЛС_м) зафиксировано около 30 разрядов в 1 мин на 1 км наклонной дальности. Затем грозовая деятельность, испытывая некоторые всплески активности (например, в 21 ч 25 мин), стала резко затухать.

Для сравнения покажем изменение основных радиолокационных параметров облачности (по данным МРЛ) и некоторых параметров грозового очага (по данным РЛС_м) в течение этих 2 ч наблюдений (рис. 2.9). Было зарегистрировано развитие нескольких мощных облачных зон (зон максимальной радиолокационной отражаемости в сантиметровом диапазоне, или, как сейчас принято говорить, конвективных ячеек, т. е. локальных областей облачного поля, замкнутых изолиниями отражаемости [164, 168]). Радиолокационные параметры этих зон за время наблюдений были примерно одинаковыми, т. е. в среднем практически не изменялись.

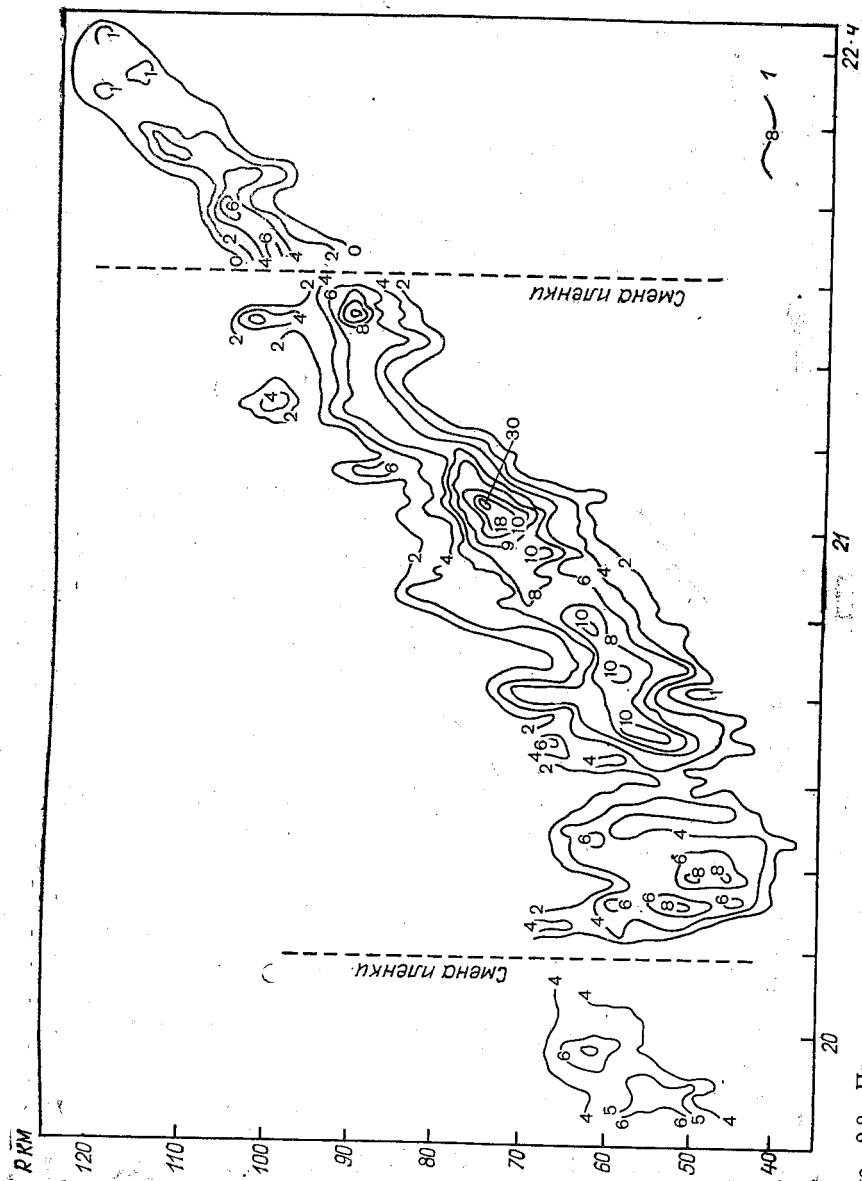


Рис. 2.8. Пространственно-временное распределение грозовой активности 7 июня 1980 г. (по данным РЛС_м).

1 — изолинии частоты разрядов ($N = 4 \text{ мин}^{-1}$); R — расстояние от РЛС_м до молнии.

Если судить только по частоте разрядов (кривая 1), то грозовой процесс, как уже было сказано, имел резко выраженный максимум около 21 ч, когда в тыловой части облака (позади центров конвективных ячеек) $\dot{N} = 47 \text{ мин}^{-1}$. В этот момент существовали четыре локальные зоны максимальной отражаемости: зоны 7, 7-13, 9, 11 (рис. 2.9 б), в центре которых $\dot{N} = 6 \dots 10 \text{ мин}^{-1}$; параметры радиозоха этих зон были практически одинаковыми ($H_{\text{вг}} = 10 \text{ км}$, $H_{z_{\text{макс}}} = 7,5 \text{ км}$, $\lg z_{\text{макс}} = 2$, только в зоне 7 $\lg z_{\text{макс}} = 1$). Затем

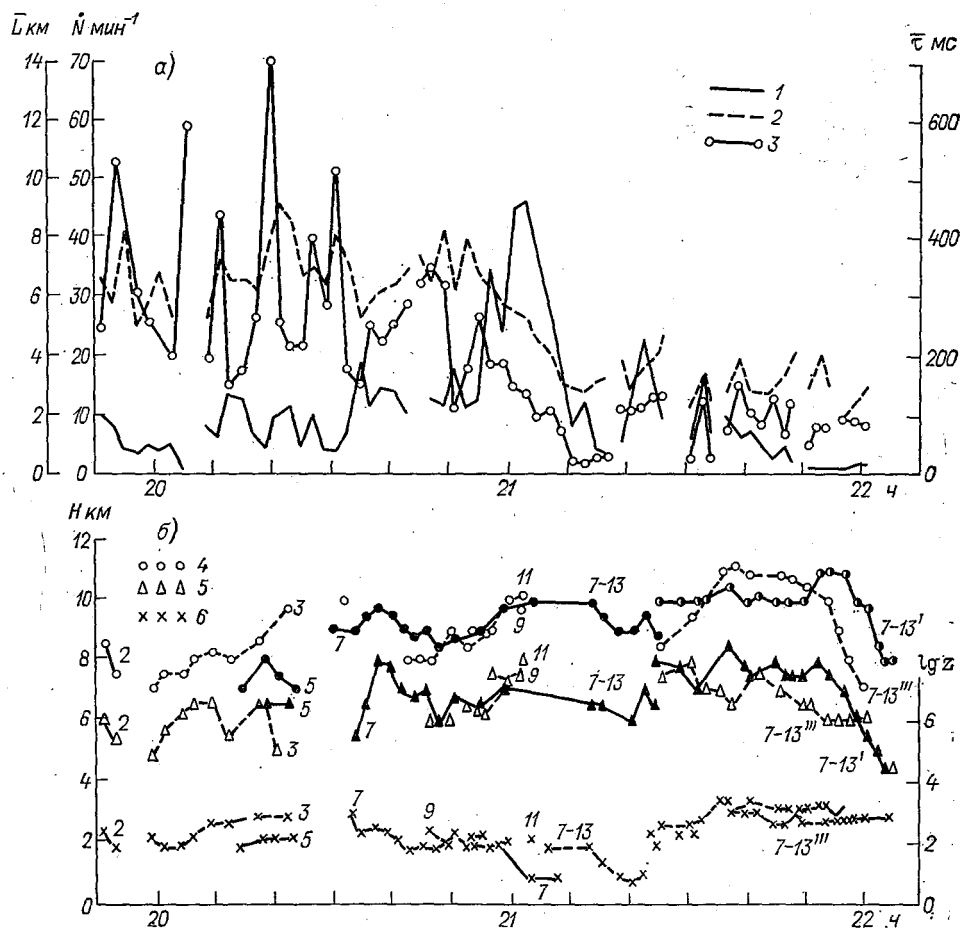


Рис. 2.9. Трансформация облачности (по данным РЛС_м) (а) и параметров радиозоха облачности (по данным МРЛ) (б) 7 июня 1980 г.

1 — частота молниевых разрядов $\dot{N}$, 2 — средняя (за 1 мин) длина проекции канала молнии на линию наклонной дальности $\bar{L}$, 3 — средняя (за 1 мин) длительность существования сигнала, отраженного от канала молнии $\bar{\tau}$, 4 — высота верхней границы радиозоха облака, 5 — высота зоны максимальной радиолокационной отражаемости, 6 — логарифмы максимальной радиолокационной отражаемости. Цифры на нижнем рисунке означают порядковый номер локальной зоны максимальной радиолокационной отражаемости (по МРЛ), для которой построена данная кривая.

частота разрядов стала уменьшаться, а радиолокационные параметры облака продолжали оставаться высокими.

Если привлечь к анализу другие параметры, характеризующие грозовую активность облака, например, среднюю длину проекции канала молнии на линию наклонной дальности ($\bar{L}$) и среднюю длительность существования сигнала, отраженного от канала молнии ($\bar{\tau}$), можно отметить следующее. В начале наблюдений (примерно 40 мин) при сравнительно небольшой частоте разрядов ($\sim 10\text{--}15 \text{ мин}^{-1}$) $\bar{L}$ и $\bar{\tau}$ имели относительно высокие значения. Далее с монотонным ростом $\dot{N}$ параметры $\bar{L}$ и $\bar{\tau}$ стали уменьшаться. После 21 ч грозовая активность облака по всем трем параметрам снизилась, хотя по данным МРЛ облако было очень мощное (например, в 21 ч 50 мин $H_{\text{вг}} = 10\text{--}11 \text{ км}$, $H_{z_{\text{макс}}} = 7\text{--}7,5 \text{ км}$, $\lg z_{\text{макс}} = 3$). Таким образом, интенсивность электрических процессов была весьма высока от начала наблюдений до 21 ч 10 мин, после чего резко уменьшилась.

Сравним еще раз рис. 2.8 и 2.9, к примеру, выберем моменты времени 20 ч 20 мин и 20 ч 40 мин. Видно, что в первом случае грозовой очаг имел протяженность 25 км (примерно 40—65 км от РЛС_м, см. рис. 2.8), при этом частота разрядов по всему очагу составляла $\dot{N} = 8 \text{ мин}^{-1}$ (рис. 2.9), из них шесть разрядов «проби-вали» (перекрывали) область от 44 до 50 км (см. рис. 2.8), т. е. здесь располагалось ядро очага. Масштабы разрядов и их длительность были сравнительно велики (рис. 2.9). Это означает, что в данный момент времени в грозовом очаге существовали в основном редкие, но мощные протяженные разряды. В 20 ч 40 мин грозовой очаг, занимая те же 25 км, несколько отдалился и находился уже на расстоянии 47—72 км от РЛС_м. Интенсивность его возросла и число молний по всему очагу составило 15 в 1 мин, причем 8 из них происходили в зоне от 57 до 60 км (ядро грозового очага). Масштабы разрядов и их длительность уменьшились. Сразу же вслед за этим на короткое время появились еще две электрически активные ячейки на периферии очага: одна — на расстоянии 48—50 км от РЛС_м, а другая — на расстоянии 65—70 км.

Таким образом, в отличие от активной радиолокации облаков в сантиметровом диапазоне, активная радиолокация молний позволяет достаточно надежно и четко выявлять структуру грозового очага, его интенсивность и эволюцию.

2.3.3. Взаимное расположение в кучево-дождевых облаках областей максимальной отражаемости гидрометеоров и грозовых очагов

Анализ результатов активной радиолокации грозовых очагов показал, что ядро грозового очага (электрически активная ячейка с максимальной для данного очага в данный момент времени частотой разрядов), как правило, расположено вне зоны максималь-

ной радиолокационной отражаемости данного облака. Кроме того, грозовые разряды могут наблюдаться в периферийных частях облачных систем — в областях относительно малой радиолокационной отражаемости гидрометеоров (например, при $\eta_{3,2} = 10^{-10} \text{ см}^{-1}$). Было замечено также [168, 182], что иногда разряды выходят за область выпадения осадков.

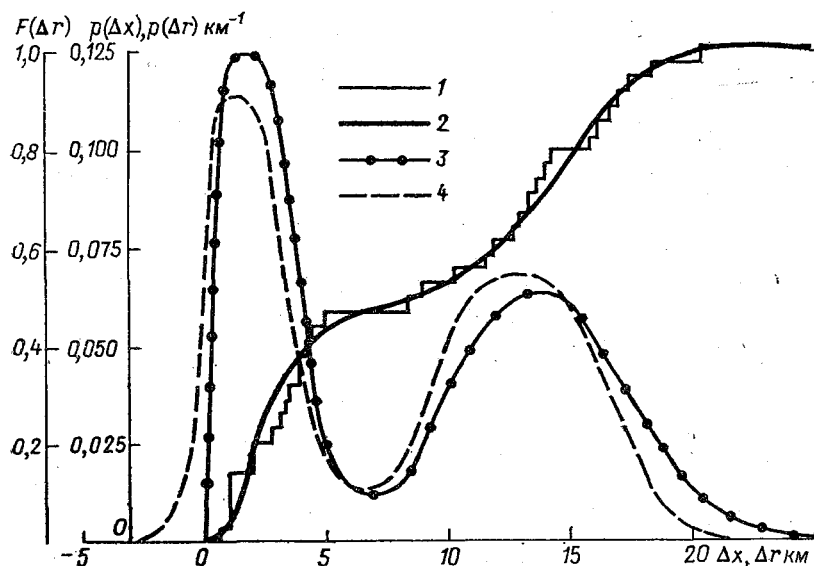


Рис. 2.10. Статистические характеристики Δr и Δx .

1 — полигон накопленных частот Δr , 2 — эмпирическая интегральная функция распределения $\Delta r - F(\Delta r)$, 3 — эмпирическая функция плотности распределения $\Delta r - p(\Delta r)$, 4 — эмпирическая функция плотности распределения $\Delta x - p(\Delta x)$.

Поскольку для решения задач обеспечения безопасности полета ЛА факт несовпадения положения в пространстве указанных зон является очень важным, были исследованы статистические характеристики величины Δr , определяющей расстояние между центрами зоны максимальной отражаемости и ядром грозового очага. Результаты представлены на рис. 2.10. Функция плотности распределения Δr (кривая 3) рассчитана по интегральной функции распределения Δr (кривая 2). Видно, что функция плотности бимодальна. Первая мода равна ~ 2 км, а вторая ~ 14 км. Максимально наблюдавшееся значение $\Delta r = 20,5$ км. Бимодальность распределения пока своего объяснения не нашла. Можно предположить, что она связана с двумя видами наблюдаемых процессов. Один вид — грозы, в которых облачные поля относительно мало подвижны. Это в основном внутримассовые грозы и незначительная часть гроз фронтального типа. В процессах такого вида наблюдаются сравнительно небольшие расхождения в пространстве центров интересующих нас зон. Среднее эмпирическое значение

$\Delta \bar{r}^{(1)} = 2,7$ км со средним квадратическим отклонением $\sigma_{\Delta r}^{(1)} = 2,6$ км. В Восточной Грузии число таких процессов составляет примерно половину (точнее 47 %) от общего числа наблюдаемых. Второй вид — грозовые процессы, возникающие в облачных полях, характеризующихся быстрыми перемещениями в пространстве. В этом случае наблюдается заметное расхождение между положением центров зоны максимальной отражаемости гидрометеоров и ядра грозового очага. Среднее значение $\Delta \bar{r}^{(2)} = 14,2$ км при среднем квадратическом отклонении $\sigma_{\Delta r}^{(2)} = 14$ км.

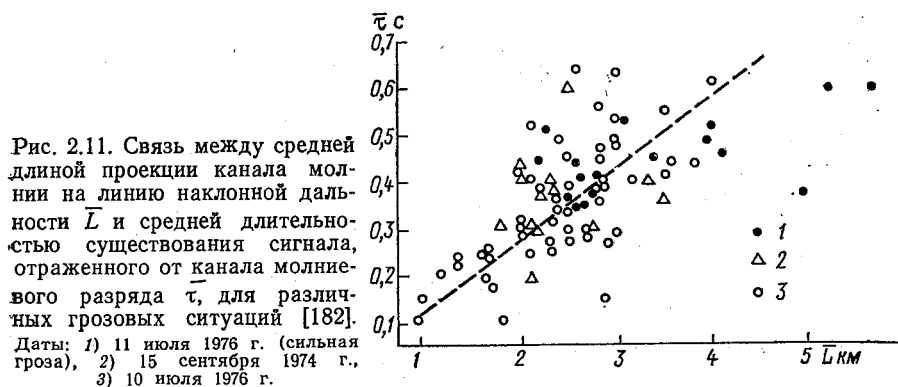
Наблюдения показали, что молнии возникают в основном в тыловой части облака (относительно направления его перемещения) и ядро грозового очага расположено позади зоны максимальной в данном облаке радиолокационной отражаемости. Для иллюстрации этого факта на рис. 2.10 приведена функция плотности распределения величины Δx (кривая 4) — проекции на ось $O\Delta x$ радиус-вектора, начало которого совпадает с точкой максимальной отражаемости данного облака, а конец — с центром грозового очага. На рисунке начало координат совмещено с точкой максимальной отражаемости грозового облака, а ось $O\Delta x$ направлена в сторону, противоположную направлению перемещения облака. Из 34 случаев наблюдений лишь в двух ядро грозового очага располагалось впереди зоны максимальной отражаемости. Функция плотности распределения Δx тоже бимодальна. Среднее отклонение для процессов первого вида $\Delta \bar{x}^{(1)} = 2$ км при среднем квадратическом отклонении $\sigma_{\Delta x}^{(1)} = 2$ км. Для процессов второго вида эти величины соответственно равны $\Delta \bar{x}^{(2)} = 12,5$ км и $\sigma_{\Delta x}^{(2)} = 12,5$ км. Мода Δx для процессов первого вида равна ~ 2 км, а для процессов второго вида ~ 13 км.

Дальнейшие исследования динамики грозовых процессов с помощью активно-пассивной радиолокации позволят уточнить эволюцию взаимного расположения зон генерации молний и зон максимальной радиолокационной отражаемости гидрометеоров.

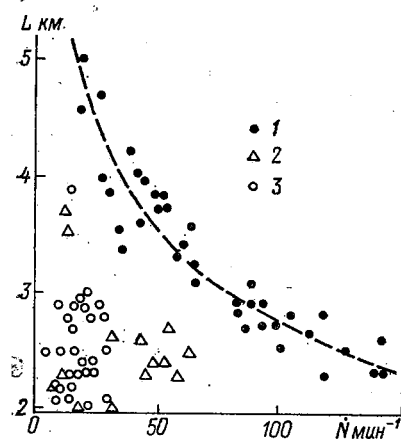
2.3.4. Определение интенсивности грозового процесса

Критерием интенсивности (мощности) грозового процесса обычно считается число молниевых разрядов в единицу времени для всей облачной массы в целом или количество молний за всю грозу. С появлением данных не только о частоте разрядов, но и о времени существования сигнала, отраженного от канала молнии (практически равного продолжительности самой молнии, см., например, [66, 168, 188]), а также о длине проекции канала разряда на линию наклонной дальности (которая в значительной степени зависит от ориентации канала молнии относительно луча РЛС_м, но, в какой-то мере все же характеризует масштаб разряда) стало возможным уточнить понятие «интенсивность грозового процесса», дать ему более полную количественную оценку.

Для определения более полного критерия интенсивности грозы нами была исследована [182] связь между частотой разрядов ($\dot{N}$), средней длиной проекции канала разряда на линию наклонной дальности ($\bar{L}$) и средней длительностью существования сигнала, отраженного от канала молниевых разряда ($\bar{\tau}$). Как и сле-



довало ожидать, между $\bar{L}$ и $\bar{\tau}$ существует тесная связь: чем больше длина канала молнии и ее масштаб, тем продолжительнее разряд (рис. 2.11). Очевидно, если бы измерялась не проекция длины канала разряда, а сама длина, то связь оказалась бы более тесной.



Между $\dot{N}$ и $\bar{L}$ связь оказалась более сложной, проявляющейся в полной мере только в сильных грозах (при большом числе молний). Для сильной грозы 11 июля 1976 г. (см. рис. 2.12) обнаружена довольно тесная связь: при высокой частоте разрядов средняя длина проекции канала разряда небольшая. В этом случае, по-видимому, следует ожидать увеличения вероятности искусственного инициирования (провокации) разрядов при попадании в такое облако летательного аппарата. При ослаблении грозового

процесса, т. е. при уменьшении $\dot{N}$, масштабы разрядов ($\bar{L}$) увеличивались. Для менее интенсивных гроз устойчивой корреляции между $\dot{N}$ и $\bar{L}$ не наблюдалось, несмотря на то что величина $\dot{N}$ изменялась в широких пределах. В частности, таким примером может являться гроза 10 июля 1976 г. Хотя в ней в течение ~ 1 ч наблюдалось трехразовое последовательное возрастание и спад интенсивности процесса от 8—10 до 35—40 разрядов в 1 мин. Отметим, однако, что в завершающей фазе грозового процесса величины $\bar{L}$ и $\bar{\tau}$ возрастали. Так, $\bar{\tau} \approx 0,25 \dots 0,3$ с в начале грозы достигло 0,6—0,7 с в конце, а $\bar{L} \approx 2,5 \dots 3$ км в течение почти всей грозы в конце возросло до 4,2 км.

Дальнейшие исследования показали, что связь между $\dot{N}$ и $\bar{L}$ еще более сложная, чем предполагалось ранее. Оказалось, что при $\dot{N} < 30$ мин⁻¹ наблюдается большой разброс значений $\bar{L}$ (рис. 2.13, область II). Даже во время одной и той же грозы, например 7 июня 1980 г., при одинаковой частоте разрядов их протяженность изменяется от 2 до 12 км. При очень большом числе молний ($\dot{N} > 100$ мин⁻¹) разброс значений $\bar{L}$ гораздо меньший: от 1,8 до 5 км (область I). Следует сказать, что в процессе эволюции грозы, как правило, более мощные разряды (имеющие сравнительно большую пространственную протяженность и длительность существования) наблюдаются на стадии диссипации грозового процесса. Но бывают и исключения, так, например, в упоминавшейся грозе 7 июля 1980 г. самые большие по масштабу разряды наблюдались в начальной стадии при малом числе молний. Учитывая случайность положения молний в пространстве относительно луча РЛС_м, можно считать, что при большом числе разрядов выводы о динамике проекций окажутся справедливыми и для фактических длин каналов молниевых разрядов.

Все сказанное выше еще раз подтверждает, что величина $\dot{N}$ недостаточно характеризует интенсивность грозового процесса. Понятно, что разряды молний различных масштабов (например, 10 или 1 км) отличаются друг от друга не только пространственной протяженностью, но и временем существования, и количеством реализуемого в них электричества. Их опасность для летательных аппаратов и наземных объектов, а также результат их действия на само облако различны. Опасность поражения молнией, очевидно, резко возрастает с увеличением размеров и длительности разрядов. Для авиации необходимо знать протяженность молний или, по крайней мере, области пространства, в которых наблюдается гроза. Для повышения надежности определения вероятности возникновения лесных пожаров от гроз необходимо знать длительность воздействия молнии (время существования молнии). Ясно, что обычный параметр — количество молний — не достаточно показателен и не удовлетворяет многих потребителей. Поэтому в качестве дополнительных количественных характеристик интенсивности грозы (на основании наблюдений с помощью активной радиолокации в метровом диапазоне длин волн) были введены следующие два параметра:

1) интегральная длина проекций каналов разрядов на линию наклонной дальности

$$\mathcal{L} = \int_{L_{\min}}^{\infty} L \dot{N}(L) dL,$$

где L — текущая длина проекции канала разряда на линию наклонной дальности, $\dot{N}(L)$ — относительная частота разрядов данной длины.

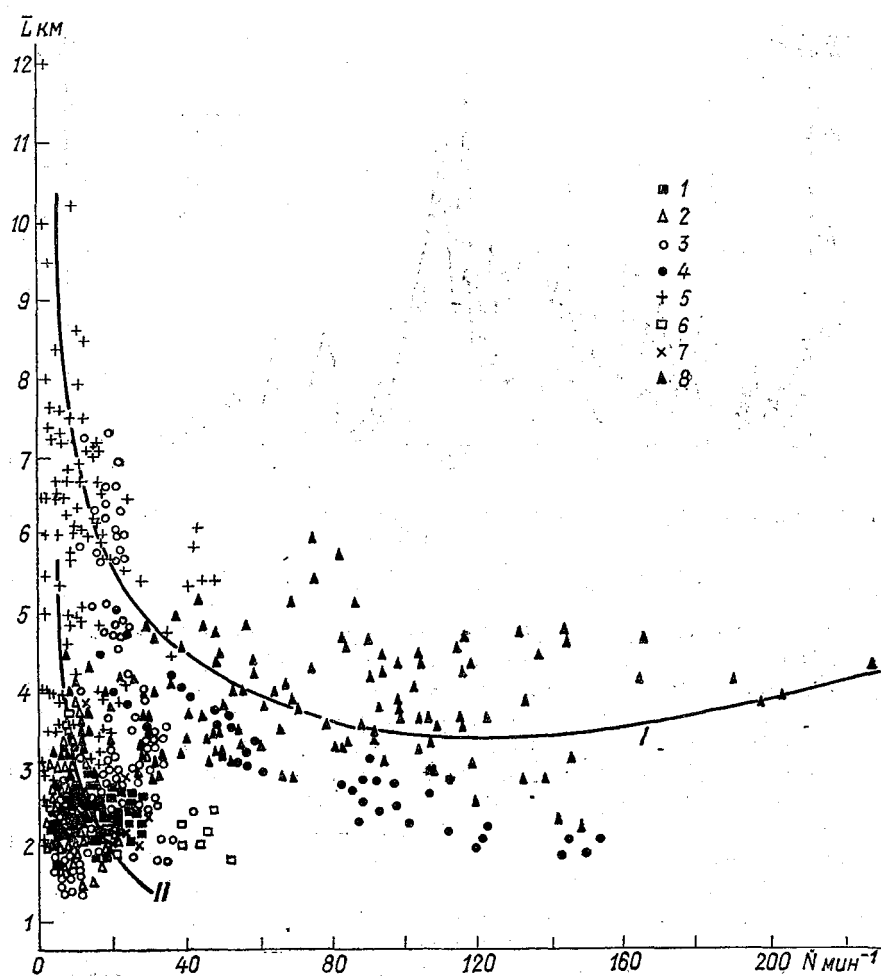


Рис. 2.13. Связь между средней длиной проекции канала молнии на линию наклонной дальности $\bar{L}$ и частотой разрядов $\dot{N}$ для различных грозовых ситуаций.

$I - \dot{N} > 100 \text{ мин}^{-1}$, $II - \dot{N} < 30 \text{ мин}^{-1}$. Даты: 1) 23 мая 1979 г., 2) 9 июня 1979 г., 3) 28 мая 1978 г., 4) 11 июля 1976 г., 5) 7 июля 1980 г., 6) 10 июля 1976 г., 7) 15 сентября 1974 г., 8) 17 июня 1983 г.

2) интегральное время существования сигнала, отраженного от канала разряда

$$T = \int_{\tau_{\min}}^{\infty} \tau \dot{N}(\tau) d\tau,$$

где τ — текущая длительность существования сигнала, отраженного от канала разряда, $\dot{N}(\tau)$ — относительная частота разрядов данной длительности.

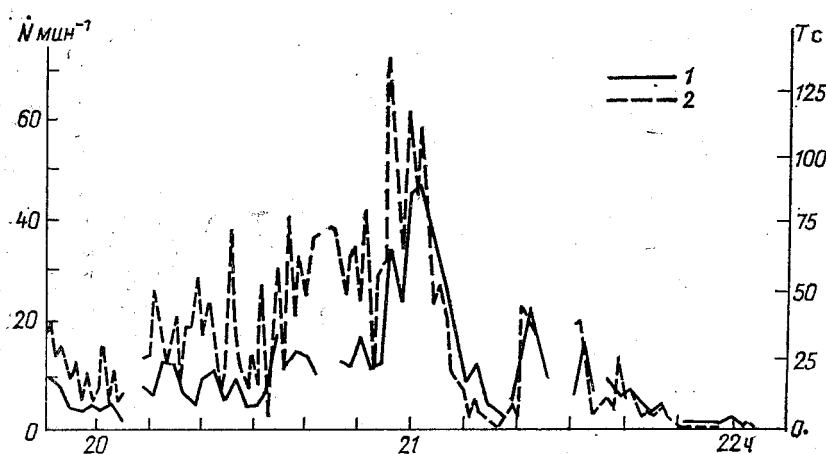


Рис. 2.14. Трансформация во времени грозовой активности 7 июня 1980 г. (по данным РЛС_м).

1 — частота молниевых разрядов $\dot{N}$, 2 — интегральное время существования сигнала, отраженного от канала молниевых разряда T (значения T следует уменьшить в 10 раз).

Несколько условно были приняты следующие значения: $L_{\min} = 2$ км, $\tau_{\min} = 20$ мс, период осреднения — 60 с.

На рис. 2.9 было показано, как изменяются в течение грозы 7 июня 1980 г. частота разрядов, средняя длина проекции канала молнии на линию наклонной дальности и средняя длительность сигнала, отраженного от канала молнии. На рис. 2.14 наряду с величиной $\dot{N}$ показано изменение интегрального параметра T во время этой грозы. На нем более четко, чем на рис. 2.9, выделяется период максимальной интенсивности данного грозового процесса: 20 ч 55 мин — 21 ч 05 мин (когда значения $\dot{N}$ и T были максимальны). Видно также, что одинаковым значениям $\dot{N}$ в различные моменты грозы соответствуют различные значения T , т. е. интенсивность этих моментов неодинакова (например, гроза в 20 ч 50 мин была интенсивнее, чем в 21 ч 32 мин).

Для иллюстрации того, как изменяются в ходе той же грозы (7 июня 1980 г.) средняя ($\bar{L}$) и интегральная ($\mathcal{L}$) длины проекций каналов молний на линию наклонной дальности, приведен рис. 2.15. Видно, своеобразие изменений $\dot{N}$ и $\bar{L}$ в данном грозовом

процессе: при небольшой частоте сильноточных разрядов масштабы их велики, а при возрастании N размеры молний уменьшаются. Но сами по себе эти параметры не совсем точно характеризуют интенсивность грозы. В этом отношении интегральная длина проекций каналов разрядов ($\mathcal{L}$) более точная характеристика, так как учитывает соотношение параметров N и $\bar{L}$.

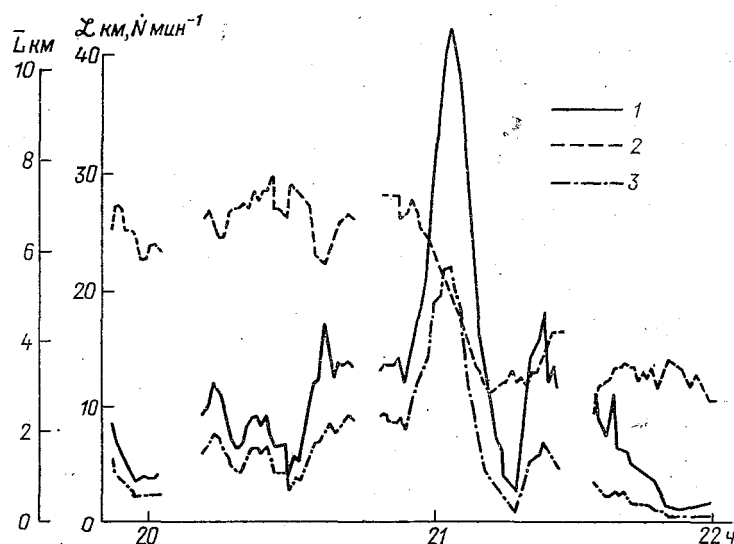


Рис. 2.15. Трансформация во времени грозовой активности 7 июня 1980 г. (по данным РЛС_м).

1 — частота молниевых разрядов N , 2 — средняя длина проекции канала молнии на линию наклонной дальности $\bar{L}$, 3 — интегральная длина проекции канала молнии на линию наклонной дальности $\mathcal{L}$.

Кроме этих характеристик разработан более полный показатель степени грозовой опасности — комплексный критерий грозоопасности, учитывающий также параметры радиоэха облаков и данные пассивной радиолокации — параметры собственного нетеплового излучения конвективных облаков (более подробно этот вопрос рассматривается в гл. 5).

Выводы

Метод активной радиолокации молниевых разрядов позволил конкретизировать понятие «грозовой очаг» как ту область пространства, в которой возникают (генерируются) молнии.

Установлено, что разряды происходят в обширной части облака, захватывая зоны максимальной отражаемости от гидрометеоров; площадь, охватываемая разрядами, значительно больше в тыловой части облака (по отношению к направлению перемеще-

ния облачной массы) зона с максимальным числом разрядов, как правило, наблюдается позади зон максимальной радиолокационной отражаемости.

С помощью РЛС метрового диапазона можно детально исследовать структуру и эволюцию грозовых очагов в течение длительного времени в радиусе до 200 км.

Наблюдения за грозовыми облаками с помощью стандартного метеорологического радиолокатора сантиметрового диапазона не дают достаточно полного представления о реальной грозоопасности облаков, об интенсивности грозового процесса, в то время, как активная радиолокация в метровом диапазоне радиоволн позволяет прямым способом выделять области: в которых происходят разряды молний, определять интенсивность грозы — частоту разрядов, их масштаб и длительность существования.

Активная радиолокация молний позволяет строить пространственно-временное распределение (панорамы) грозовой активности, указывать зоны, особенно опасные (или наоборот, наименее опасные) для полета летательных аппаратов в условиях грозовой облачности.

ГЛАВА 3

ПАССИВНАЯ РАДИОЛОКАЦИЯ ГРОВОВЫХ И ГРОВОПАСНЫХ ОЧАГОВ

Исследования показали, что радиоизлучение наблюдается как при возникновении молниевых разрядов, так и на предгрозовой стадии развития облаков, а также в паузах между отдельными молниевыми разрядами в стадии активной грозы [89, 91, 128, 129]. Наблюдения за нетепловым радиоизлучением облаков (пассивная радиолокация) в СВ- и УКВ-диапазонах в сочетании с активной радиолокацией облаков в сантиметровом диапазоне позволяет определять потенциальную грозоопасность облачности, выявлять облака, находящиеся в предгрозовом (послегрозовом) состоянии. Параметры сигналов нетеплового радиоизлучения могут служить информативной основой для диагноза электрического состояния облаков.

3.1. Аппаратура пассивной радиолокации грозовых и грозоопасных очагов

На первом этапе исследований нетеплового радиоизлучения (НТРИ) мощных конвективных облаков и молниевых разрядов использовалось приемное устройство РЛС_м высокой чувствительности (см. гл. 2). Сравнительно узкая диаграмма направленности в горизонтальной плоскости антенной системы этой станции позволяла проводить наблюдения за отдельными облаками, а регистрация радиоэха от каналов молниевых разрядов давала возможность четко разделить сигналы НТРИ, сопровождающего разряд, и немолниевых НТРИ облаков. Параметры исследуемых облаков (вертикальная мощность, отражаемость и т. д.) определялись с помощью РЛС_{см}. Для регистрации сигналов НТРИ, а также сигналов, отраженных от каналов молний, использовалась аппаратура, установленная в командном пункте (см. гл. 2), в частности, — выносной ИДА РЛС_м и кинокамера с равномерным движением пленки, осуществляющая поимпульсную регистрацию. Как уже сообщалось, такой способ регистрации позволял исследовать форму и параметры (амплитуду, длительность и пр.) принимаемых сигналов, что в свою очередь дало возможность определить спектральные и энергетические характеристики источников излучения.

В дальнейшем было решено увеличить частотный диапазон измерений НТРИ как в область высоких, так и более низких частот с целью выявления оптимального диапазона для изучения предгрозового НТРИ. Для этого был оборудован приемный центр, в котором установлены несколько радиоприемных устройств, настроенных на разные частоты в пределах 1—300 МГц, так как предполагалось, что именно в этом диапазоне (а возможно — и еще более высокочастотном) предгрозовое излучение проявляет

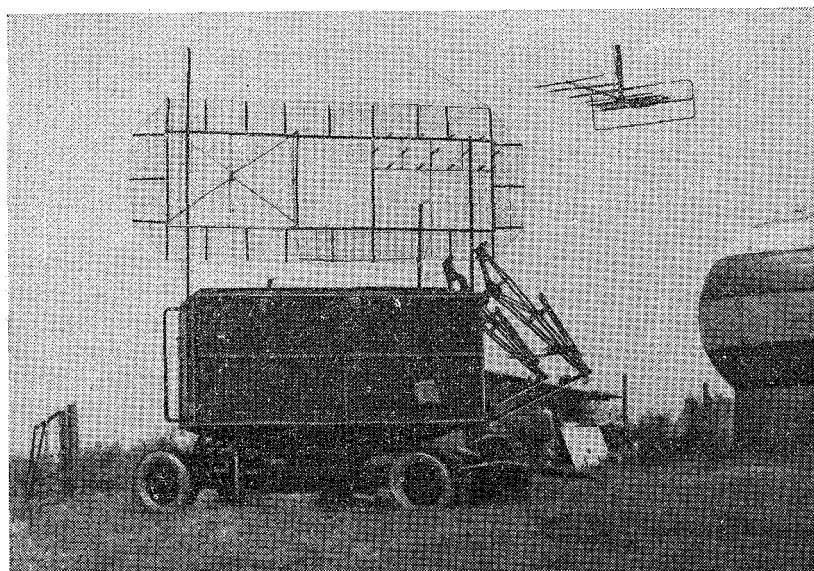


Рис. 3.1. Внешний вид радиоприемного центра.

себя наиболее ярко [204, 260]. Выбор конкретной частоты внутри диапазона происходил в основном из соображений равномерности распределения по спектру частот, с учетом наличия помех от радиостанций. Обычно регистрировались сигналы, принимаемые на частотах 1,7 МГц (длина волны $\lambda = 176,5$ м), 30 МГц ($\lambda = 10$ м), 80 МГц ($\lambda = 3,75$ м) и 300 МГц ($\lambda = 1$ м). Приемные устройства имели чувствительность в интервале 4—8 мкВ (при соотношении уровней сигнал/шум = 3). Ширина полосы пропускаемых частот — регулируемая, от 0,3 до 8 кГц.

Приемный центр был оборудован в экранированной кабине, имеющей возможность вращаться вокруг вертикальной оси; на крыше кабины смонтированы антенные системы (рис. 3.1). В диапазоне средних ($\lambda = 176,5$ м) и коротких ($\lambda = 10$ м) волн использовались вертикальные штыревые антенны, имеющие круговую диаграмму направленности в горизонтальной плоскости. В УКВ-диапазоне ($\lambda = 3,75$ м и $\lambda = 1$ м) применялись направленные антенны с шириной угла диаграммы направленности 60 и 20° со-

ответственно. Приемники, имеющие ненаправленные антенны, давали информацию об интегральной по району (в радиусе до 200 км) грозовой активности. С помощью приемников с направленными антеннами определялась электрическая активность (наличие и интенсивность радиоизлучения) отдельного облака (в тех случаях, когда в пределах ширины диаграммы направленности антенны имелся только один грозовой очаг).

Для того чтобы исключить потерю постоянной составляющей в выходном сигнале, в приемном тракте каждого радиоприемного устройства был исключен усилитель низкой частоты. Исследуемые сигналы с выходов детекторов поступали в согласующее устройство, а затем на регистраторы, в качестве которых использовались многоканальные самописцы с верхней граничной частотой 8 и 100 Гц, а также измерительная система «Мир-3», обеспечивающая регистрацию быстродействующих процессов на магнитной ленте в цифровом виде. Эта система позволяет автоматизировать обработку экспериментальных исследований и проводить всесторонний анализ зарегистрированных сигналов.

Для регистрации формы сигналов НТРИ и исследования их параметров использовался широкополосный осциллограф с запоминающей электронно-лучевой трубкой, экран которого фотографировался специальной кинокамерой типа РФК.

На один из каналов самописцев и системы «Мир-3» подавался сигнал с приемного устройства РЛС_м. Для этого с выхода детектора РЛС, через согласующий катодный повторитель, сигнал поступал на устройство обработки информации, в котором сигнал проходил через управляющую ключевую схему и из него исключались отражения от местных предметов и каналов молний. Оставшийся сигнал, содержащий импульсы радиоизлучения, через интегрирующую цепь поступал на усилитель постоянного тока, а затем на регистраторы.

В приемном центре были установлены также генераторы стандартных сигналов, используемые для калибровки радиоприемников и построения их амплитудных характеристик.

При использовании только пассивной радиолокации частота возникновения разрядов молний и моменты их появления определялись по сигналам НТРИ, так как разряд молнии сопровождается излучением группы характерных импульсов (пакетов импульсов), принимаемых синхронно всеми используемыми в экспериментах приемными устройствами, настроенными на разные частоты.

3.2. Методика измерений

Как уже сообщалось, на первом этапе исследований характеристик сигналов НТРИ облаков в работе использовались РЛС_м и РЛС_{см}. Были предприняты попытки проследить за трансформацией облаков на возможно более ранней фазе развития. Для этого

при синоптической ситуации, благоприятной для возникновения внутримассовых гроз, производился поиск развивающихся облаков с помощью РЛС_{см}. Предпочтение отдавалось отдельным изолированным облакам. При нахождении такого облака его координаты сообщались оператору РЛС_м, который устанавливал антенную систему этого радиолокатора в направлении на зону максимальной отражаемости найденного облака. После этого проводились наблюдения и регистрация сигналов, принимаемых РЛС_м, а также фотографирование экранов индикаторов РЛС_{см}. При такой методике часто длительные наблюдения заканчивались безрезультатно, так как находящееся под наблюдением облако не переходило в грозовую фазу, в то время как в соседних облаках начинали появляться разряды молний. Это делало невозможным проведение корректных, репрезентативных наблюдений за предгрозным излучением данного облака, так как, во-первых, интенсивность излучения, сопровождающего разряд молнии, значительно превышала интенсивность предгрозного излучения, во-вторых, при наличии близких грозных зон был возможен прием сигналов, связанных с разрядами из смежных с исследуемой областью азимутов, по боковым лепесткам диаграммы направленности РЛС_м.

В связи с этим методика наблюдений была перестроена: исследовалось излучение, возникающее в паузе между отдельными разрядами молний, в предположении, что облако при этом находится в состоянии, которое можно расценить как близкое к предгрозному. Действительно, в конвективном облаке по мере приближения его к стадии активной грозы (при которой наблюдаются разряды молний) происходят процессы электризации гидрометеоров и разделения зарядов. Однако этих зарядов еще недостаточно для поддержания пробоя и формирования сильноточного канала молнии. Очевидно, аналогичное состояние наблюдается в облаке в паузе между разрядами. Непосредственно после очередной молнии часть объемных зарядов в облаке оказывается нейтрализованной, а оставшейся части недостаточно для формирования нового канала молнии. В грозном облаке, так же как и в предгрозном, в этот период продолжают происходить процессы электризации и разделения зарядов, и оно постепенно приближается к состоянию, при котором возникает очередной разряд. В этом смысле можно утверждать, что пауза между сильноточными молниевыми разрядами в какой-то мере эквивалентна предгрозному состоянию и электрические процессы, связанные с излучением радиоволн в паузе между разрядами, сходны с аналогичными в предгрозном облаке. Естественно, что эта эквивалентность состояний наиболее отчетливо проявляется в облаках, имеющих один локализованный максимум электрической активности, так как при наличии нескольких грозных ячеек могут возникать более сложные комбинации процессов, происходящих в различных частях облака и не поддающихся однозначной интерпретации. Все это учитывалось при выборе ситуаций для анализа немолниевых радиоизлучений конвективных облаков. В дальнейшем, по мере накопления опыта

работы, это предположение подтвердилось: НТРИ, наблюдаемое до появления первого разряда молнии, действительно оказалось аналогичным тому, что наблюдалось в паузах между разрядами.

При исследовании характеристик НТРИ, связанного с разрядом молнии, методика наблюдений была такой же, как описано выше, за исключением тех случаев, когда гроза была интенсивной и на достаточном расстоянии, чтобы отражения от местных предметов не маскировали сигналов, отраженных от каналов молний. В этих случаях РЛС_м становилась ведущей и с ее помощью определялись координаты грозовых очагов, а оператор РЛС_{см} выполнял вертикальные разрезы облачности в окрестностях зоны максимальной грозовой активности.

В дальнейшем, после создания приемного центра, методика проведения наблюдений изменилась, поскольку экспериментами было установлено, что радиоизлучение обнаруживается задолго (иногда за несколько часов) до начала грозы. Было разработано два варианта режима работы: дежурный и оперативный. При работе в дежурном режиме включались только приемный центр, многоканальные самописцы, осуществляющие длительную непрерывную запись сигналов, поступающих с выходов приемников. Это позволяло выполнять оперативный экспресс-анализ хода экспериментальных исследований. Включалась также система привязки к единому времени, установленная на командном пункте. При этом работа практически была полностью автоматизирована и требовала лишь кратковременного периодического контроля со стороны оператора за работой радиоприемной аппаратуры и регистрирующих систем. В начале работы производилась калибровка приемных трактов, включающая систему регистрации. В дежурном режиме проводились наблюдения за эволюцией НТРИ на ранних стадиях развития облачности, предшествующих возникновению активных грозовых процессов, до появления разрядов молний. Антенные системы радиоприемных устройств ориентировались в направлении, в котором начинали формироваться облака. Периодически включалась РЛС_{см} и производились наблюдения за развитием облачности.

При увеличении уровня сигналов радиоизлучения и росте параметров облачности принималось решение о переходе в оперативный режим работы. Включались радиолокационные станции, переговорные устройства и т. п., т. е. практически все оборудование полигона. Обычно эксперименты проводились с участием 10—12 операторов, обеспечивающих нормальное функционирование различной аппаратуры.

РЛС_{см} использовалась для поиска областей повышенной отражаемости облаков, все данные о структуре облачности регистрировались с экранов ИКО и ИДВ. При наличии нескольких развитых облачных зон антенны приемного центра и РЛС_м устанавливались последовательно в азимуты обнаруженных облаков и в течение 3—5 мин за ними велись наблюдения. После анализа данных, полученных всем радиотехническим комплексом, выбирался

объект наблюдения — отдельно расположенное облако, в азимуте на которое было обнаружено НТРИ. Момент появления первого молниевых разряда (перехода от предгрозового состояния в стадию активной грозы) фиксировался либо по отраженному сигналу на индикаторах РЛС_м, работающей с включенным передатчиком, либо по характерным сигналам радиоизлучения молниевых разрядов, синхронно принимаемым всеми приемными устройствами, используемыми в эксперименте.

3.3. Результаты пассивной радиолокации грозовых и грозоопасных очагов

Нетепловое радиоизлучение облаков имеет сложную структуру — параметры излучаемых сигналов существенно различны на разных стадиях развития облака и весьма изменчив частотный спектр сигналов. В [92] отмечено, что начальная стадия развития грозового облака сопровождается появлением непрерывно-шумового радиоизлучения, существующего все время, пока в облаке происходит разделение зарядов и наблюдаются достаточно сильные электростатические поля. Спектральная плотность этого излуче-

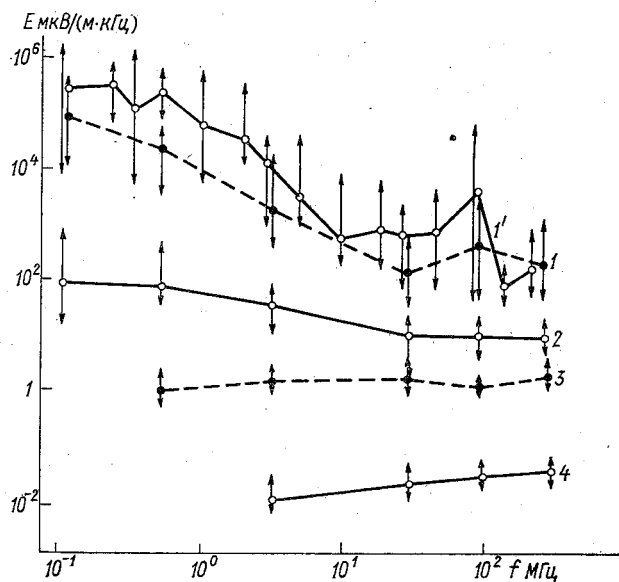


Рис. 3.2. Амплитудно-частотные характеристики НТРИ молний (1, 1'), предгрозового НТРИ (2), непрерывно-шумового НТРИ грозового облака (3), условной шумовой напряженности поля приемников, эквивалентной мощности их внутренних шумов (4) [92].

E — напряженность электромагнитного поля, f — частота колебаний.

ния относительно невелика (рис. 3.2, кривая 3), и оно может обнаруживаться лишь в тех случаях, когда облако располагается в непосредственной близости к чувствительной приемной аппаратуре, у которой условная спектральная плотность напряженности поля (эквивалентная мощность внутренних шумов приемника) порядка 10^{-2} мкВ/(м·кГц). Мощность непрерывно-шумового радиоизлучения достаточно равномерно распределена по спектру частот и наблюдается вплоть до сотен мегагерц.

При переходе облака в предгрозовое состояние начинается излучение кратковременных пакетов импульсов, и уровень излучаемых сигналов на всех частотах заметно увеличивается (кривая 2). Это излучение наблюдается одновременно с непрерывно-шумовым.

При молниевых разрядах наблюдаются наиболее интенсивные сигналы (кривая 1). В фазе активных грозовых процессов присутствуют и наблюдаются все три компонента излучаемых облаком сигналов — все время существует непрерывно-шумовое излучение, наблюдается радиоизлучение, не связанное с молниями, а также при возникновении молнии генерируются сигналы, обусловленные сильноточным атмосферным разрядом, при этом уровень излучения резко (на порядок и более) возрастает. На рис. 3.2 кривая 1 иллюстрирует амплитудно-частотную зависимость излученного молниями сигнала, которую привел на основе ограниченного числа наблюдений А. Кимпара [217]. Кривая 1' построена с использованием большего числа случаев наблюдений и является более достоверной.

3.3.1. Особенности сигналов нетеплового радиоизлучения, связанного с разрядной деятельностью облаков

Для практических нужд наиболее значимы сигналы, получаемые в момент возникновения молниевых разрядов, а также пакеты импульсов немолниевое радиоизлучения. Непрерывно-шумовое излучение имеет очень малую мощность и его трудно обнаружить на большом удалении от приемных устройств. В связи с этим многие авторы (см., например, [5, 92, 104, 137, 217]) исследовали особенности сигналов, связанных с разрядной деятельностью облаков. Было обнаружено [92], что на разных этапах развития облака пакеты импульсов, генерируемых облаком, имеют различные временные характеристики и функции распределения. Это хорошо иллюстрирует рис. 3.3.

Дальнейшие исследования [5] показали, что для частоты 830 МГц функция плотности распределения длительности пакетов импульсов зависит от расстояния между приемником и молниевым разрядом (рис. 3.4). Средняя длительность пакетов импульсов излучения, связанного с молниевыми разрядами, для разных расстояний составляет 128,5; 138,0; 147,4 мс для интервалов 50—80, 30—50 и 10—30 км соответственно. С уменьшением расстояния увеличивается доля пакетов импульсов малой длительности, что

авторы [5] объясняют увеличением доли сигналов, связанных с немолниевым радиоизлучением, которое существует вместе с молниевым и характеризуется значительно меньшей длительностью пакетов импульсов и заметно меньшей мощностью излучаемых сигналов. В [5] также определены функции плотности распределения числа импульсов в отдельном пакете, излучаемом

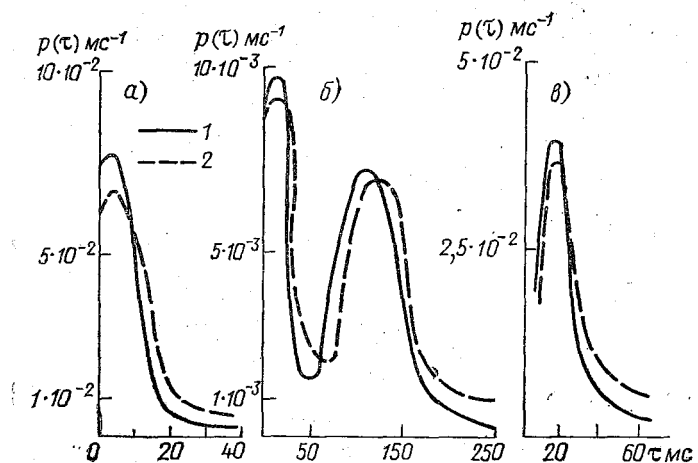


Рис. 3.3. Функции плотности распределения длительности пакетов импульсов излучения облака $p(\tau)$ на частоте 0,5 МГц (1) и 100 МГц (2) [92].

a — предгрозовая стадия, b — стадия активной грозы, v — стадия диссипации.

при молниевом разряде. Эти функции (рис. 3.5) тоже зависят от расстояния до молниевых разрядов, и с его увеличением доля пакетов, содержащих малое число импульсов, возрастает.

Аналогичные зависимости для молниевых разрядов для частоты 150 МГц были получены авторами [137]. Они установили, что длительность пакета излученного сигнала $\tau_{\text{ш}}$ (шумовой сигнал) хорошо коррелирует ($0,75 < \rho < 0,94$) с длительностью существования эхосигнала $\tau_{\text{э}}$, отраженного от канала молниевых разрядов. Полученные интегральные функции распределения $F(\tau_{\text{э}})$ и $F(\tau_{\text{ш}})$ (рис. 3.6) показывают, что на частоте 150 МГц длительность пакетов импульсов заметно больше (примерно в 2,5 раза) длительности пакетов на частоте 830 МГц. Практически не наблюдались пакеты импульсов, длительность которых была бы менее 200 мс. Установлено, что интегральные функции распределения $\tau_{\text{ш}}$ зависят от интенсивности грозового процесса: с увеличением частоты разрядов длительность излучения пакетов возрастает. Как видно из рис. 3.7, даже при самой слабой интенсивности грозового процесса лишь около 25 % наблюдаемых пакетов излученных сигналов на частоте 150 МГц имеют длительность менее 200 мс, в то

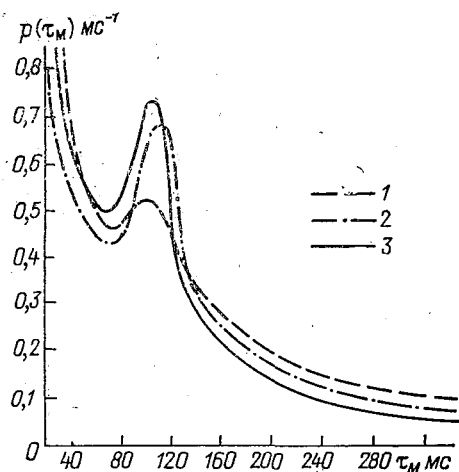


Рис. 3.4. Функции плотности распределения длительности пакетов импульсов НТРИ молнии $p(\tau_m)$ для различных расстояний между источником и приемником [5].

1 — расстояние 10—30 км, объем выборки 1499 случаев; 2 — расстояние 30—50 км, объем выборки 1755 случаев; 3 — расстояние 50—80 км, объем выборки 899 случаев.

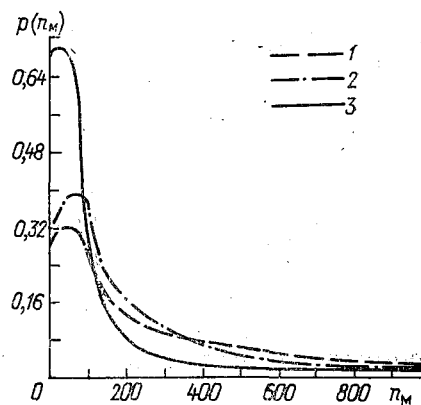


Рис. 3.5. Функции плотности распределения числа импульсов в пакете НТРИ молнии $p(n_m)$ для различных расстояний между источником и приемником [5].

1 — расстояние 10—30 км, объем выборки 1811 случаев; 2 — расстояние 30—50 км, объем выборки 1709 случаев; 3 — расстояние 50—80 км, объем выборки 464 случая.

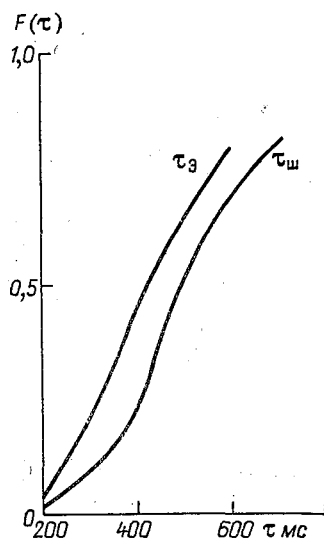


Рис. 3.6. Интегральные функции распределения длительности пакета излучения $F(\tau_{ш})$ и экосигналов молниевых разрядов $F(\tau_{э})$ [137].

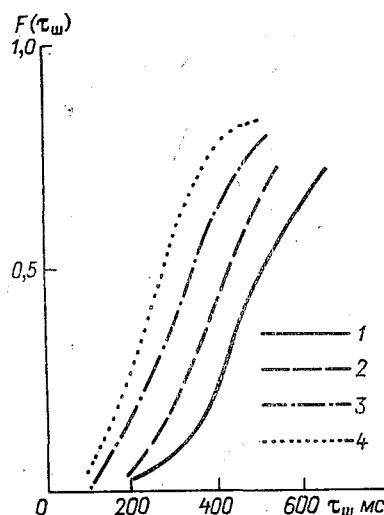


Рис. 3.7. Интегральные функции распределения длительности пакета излучения $F(\tau_{ш})$ в зависимости от интенсивности грозы [137].

1 — $\dot{N} = 17 \text{ мин}^{-1}$, 2 — $\dot{N} = 2,7 \text{ мин}^{-1}$, 3 — $\dot{N} = 2 \text{ мин}^{-1}$, 4 — $\dot{N} = 1 \text{ мин}^{-1}$.

время как на частоте 830 МГц на их долю приходится 80 %. Не исключено, что повышенная длительность излучения пакета импульсов связана с особенностями гроз, наблюдаемых в северном районе страны.

В [137] выполнены оценки количества импульсов, приходящихся на 100 мс длительности излучения. Установлено, что эта величина существенно зависит от особенностей процесса и за 0,1 с излучается от нескольких десятков до нескольких сотен импульсов.

3.3.2. Особенности сигналов немолниевое нетеплового радиоизлучения

Как уже говорилось, немолниевое НТРИ наблюдается в широком диапазоне частот как на стадии предшествующей активным грозовым процессам (до появления первых молний), так и в пау-

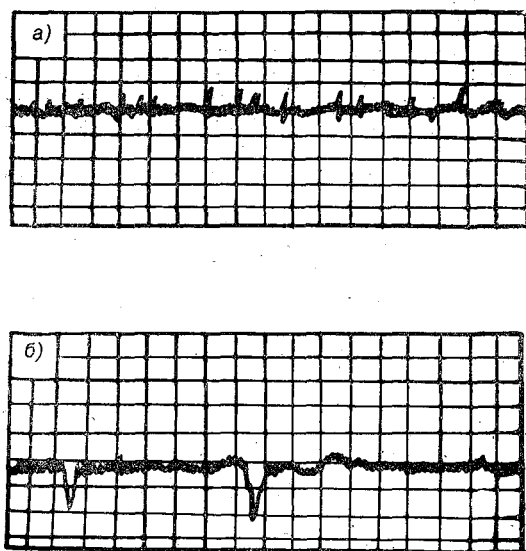


Рис. 3.8. Типовая форма сигналов немолниевое (предгрозного) НТРИ [91].

Время съемки: а — 16 ч 15 мин, б — 16 ч 40 мин.
Масштаб: по вертикали — 13 мкВ/дел., по горизонтали — 15 мкс/дел. (опыт 21 августа 1969 г.).

зах между молниевыми разрядами, а также после прекращения молний.

На рис. 3.8 показаны типовые сигналы предгрозного радиоизлучения на частоте 0,5 МГц, записанные с помощью магнитофона и воспроизведенные затем на экране электронного осциллографа. Сигналы немолниевое НТРИ, зарегистрированные многоканальным самописцем, имеют форму кратковременных импульсов длительностью десятки доли секунды. На рис. 3.9 приведен образец записи на самописце сигналов НТРИ на различных частотах во время развившегося грозового процесса. Импульсы большой амплитуды, зарегистрированные синхронно во всех трех частотных диапазонах, являются сигналами НТРИ молниевых разрядов

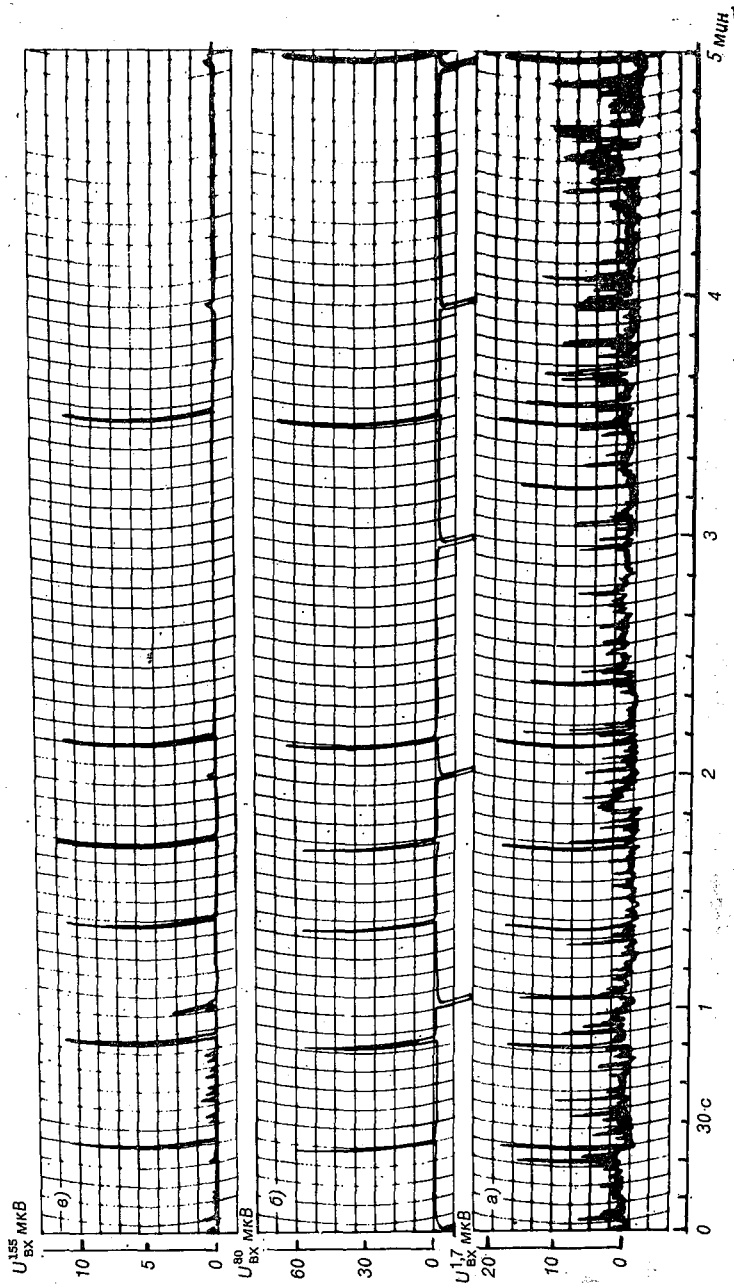


Рис. 3.9. Пример записи сигналов НТРИ на частотах 1,7 МГц (а), 80 МГц (б) и 155 МГц (в) с помощью многоканального самописца.
 U_{BX} — напряжение на входе приемника.

в исследуемом облаке. Такие же по амплитуде импульсы, наблюдаемые только на частоте 1,7 МГц, являются сигналами от молний в других облаках, так как антенная система приемника имеет круговую диаграмму направленности. В промежутках между этими импульсами на частоте 1,7 МГц наблюдаются сигналы немолниевых НТРИ. С помощью широкополосного осциллографа с запоминающей электронно-лучевой трубкой удалось выяснить, что каждый одиночный импульс такого излучения на ленте самописца представляет собой объединенные в группы кратковременные импульсы (пакеты импульсов). Длительность одиночного импульса в пакете примерно обратна ширине полосы частот, пропускаемых приемным трактом аппаратуры ($F_{\text{пр}}$). При $F_{\text{пр}} = 10$ кГц минимальная длительность импульсов, пропускаемых приемником, составляет 0,1 мс. Внутри пакета временной интервал между отдельными импульсами измеряется единицами, реже — десятками миллисекунд. Длительность излучения всего пакета импульсов достигает десятых долей секунды. Частота пакетов импульсов немолниевых НТРИ изменяется в зависимости от стадии развития грозового процесса: на ранней стадии и в стадии диссипации грозового облака она составляет несколько пакетов в минуту, на стадии максимального развития грозы — может достигать до десятков в минуту (в исключительных случаях наблюдались грозовые процессы, во время которых число пакетов достигало 140—160 в 1 мин).

Амплитуда пакета импульсов, зарегистрированного самописцем, не позволяет оценить однозначно временные и мощностные характеристики принимаемого сигнала, так как зависит не только от амплитуды входных импульсов, но также от их длительности и среднего временного интервала между отдельными импульсами внутри пакета. Сигналы немолниевых НТРИ по сравнению с молниевыми имеют меньшую длительность и амплитуду, их отличает отсутствие синхронности появления на всех используемых в эксперименте частотах. Излучение разрядов молний возникает на фоне непрерывающегося немолниевых НТРИ и по своим характеристикам резко отличается от него значительно большей мощностью и тем, что наблюдается в широком диапазоне частот, т. е. сигналы молниевых НТРИ регистрируются синхронно на всех каналах приема (рис. 3.9).

При активизации грозы поток импульсов немолниевых радиоизлучения растет и становится столь интенсивным, что на выходе самописца появляется постоянная составляющая сигнала в виде смещения пера от нулевого уровня. Такое смещение наблюдается несколько раз в сигнале зарегистрированном на частоте 1,7 МГц (рис. 3.9 а), особенно четко это видно на участке ленты в районе 4 мин 30 с. В стадии максимальной грозовой активности иногда (примерно 2—3 % времени наблюдений) отмечается такое монотонное нарастание интенсивности немолниевых НТРИ в диапазоне 1,7—30 МГц, что отклонение пера от нулевого уровня становится весьма значительным (рис. 3.10). При наблюдении за структурой

такого сигнала с помощью широкополосного осциллографа отмечается импульсный характер излучения, причем скважность потока импульсов невелика и постепенно уменьшается, что обуславливает рост постоянной составляющей сигнала. Радиоизлучение, вызванное молниевыми разрядами, отчетливо наблюдается и на

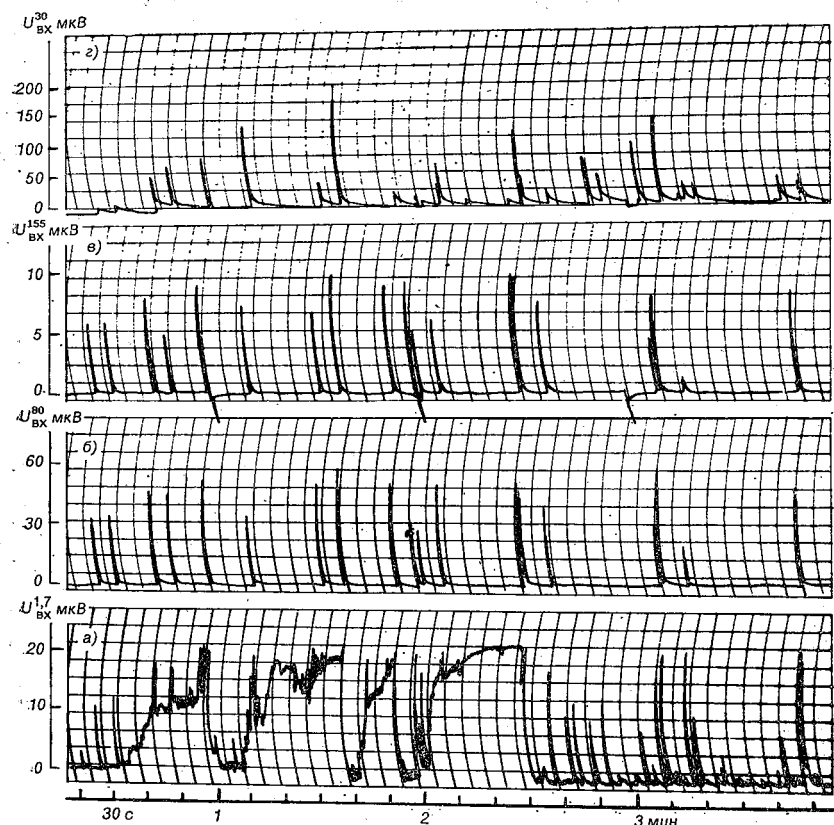


Рис. 3.10. Сигналы НТРИ конвективных облаков на частотах 1,7 МГц (а), 80 МГц (б), 155 МГц (в) и 30 МГц (г) в стадии максимального развития грозового процесса.

$U_{вх}$ — напряжение на входе приемника.

фоне немолниевых НТРИ, так как при разряде возникает еще один поток импульсов, что приводит к дальнейшему уменьшению скважности и повышению уровня сигнала на выходе самописца.

Иногда появление молниевых разрядов не сказывается на тенденции во времени немолниевых НТРИ, и оно продолжает монотонно нарастать. Так, например, молниевые разряды на 32, 43 и 50-й секундах от начала отсчета (рис. 3.10) не изменили суще-

ственно временного хода излучения, не связанного с молниями. Молниевые же разряды, зарегистрированные на 58, 98, 115, 152-й с, вызвали резкое прекращение немолниевых НТРИ, которое спустя несколько секунд вновь стало нарастать. Такое радиоизлучение может продолжаться несколько минут (рис. 3.10).

3.3.3. Немолниевое нетепловое радиоизлучение конвективных облаков в метровом диапазоне радиоволн

Как уже было показано в главе 2, в сигнале, наблюдаемом на выходе приемника РЛС_м, можно выделить квазипериодическую составляющую, обусловленную отражением от различных объектов, так называемых местных предметов (высоких деревьев, домов, холмов, гор и т. п.), а также составляющую в форме импульсов различной амплитуды и длительности, обусловленную хаотично излучаемыми сигналами. Сигналы отражения от ионизированных областей каналов сильноточных атмосферных разрядов (молний) характеризуются ограниченным временем существования, в среднем 0,05—0,6 с (см. [66, 168] и гл. 2 и 7), и интенсивным излучением, сопровождающим формирование канала молнии. Такие особенности сигнала позволяют сравнительно легко выделить их из совокупности принятых сигналов и определить расстояние до канала разряда. Типичные сигналы, наблюдаемые на ИДА РЛС_м, приведены на рис. 3.11. Среди представленных сигналов выделяется область отражений от местных предметов (1) и хаотичных сигналов немолниевых радиоизлучения облаков (3). Об уровне собственного шумового напряжения приемника можно судить по сигналу 2, наблюдаемому при кратковременном спаде интенсивности облачного излучения. Сигналы излучения, непосредственно не связанного с молниевыми разрядами и названного немолниевым (3), имеют форму импульсов различной амплитуды, которые в данном примере в 3—5 раз превышают уровень собственных шумов приемника. На рис. 3.11 б представлен процесс возникновения сигнала 4, отраженного от ионизированной области, появляющейся в начальной стадии формирования канала молнии. Сигнал 6 — отражение от сформировавшегося канала разряда, показан на рис. 3.11 в. Изображения сигналов, приведенных на рис. 3.11 б и 3.11 в, разделены временным интервалом 0,35 с (на рисунке пропущено 74 линии развертки). Рисунок 3.11 г иллюстрирует фазу распада канала молнии и исчезновение сигнала 8, отраженного от оболочки канала. Рисунки 3.11 в и 3.11 г разделяет интервал 0,17 с (пропущено 37 линий развертки). Возникновение разряда молнии сопровождается появлением сигналов радиоизлучения, имеющих большую интенсивность в сравнении с немолниевым излучением облаков (сигнал 5 на рис. 3.11 б). Это излучение наблюдается в форме хаотично возникающих групп импульсов различной амплитуды и длительности и имеющих различное число импульсов в составе группы. Оно может возникать до появления сигнала, отраженного от канала молнии, и почти всегда

наблюдается после исчезновения отражения от канала. В ряде случаев излучение в виде отдельной группы импульсов может продолжаться в течение десятых долей секунды. Отметим, что молниевое НТРИ наблюдается на фоне непрекращающегося излучения немолниевоего типа.

Как правило, излученные молнией сигналы имеют форму кратковременных импульсов длительностью порядка 30 мкс и менее.

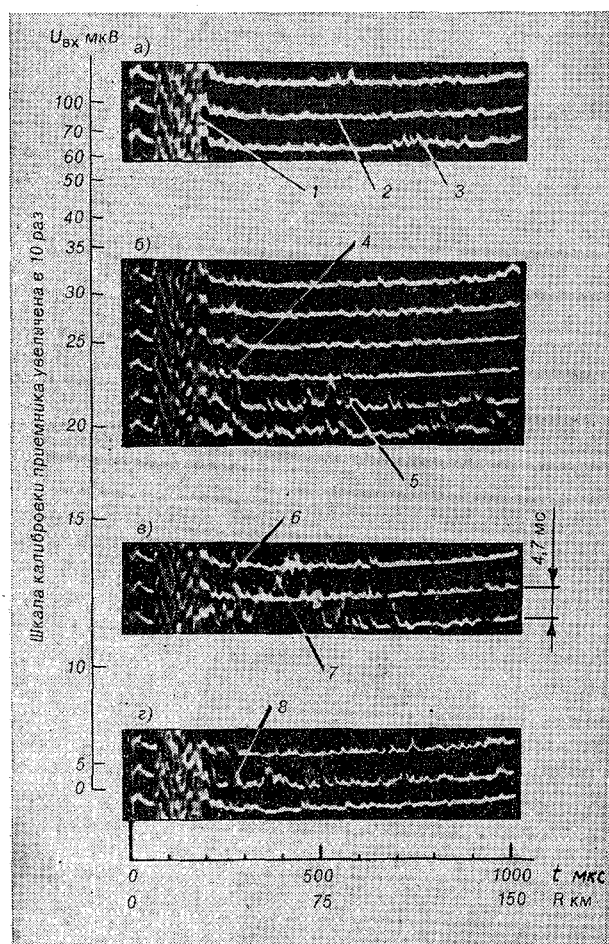


Рис. 3.11. Типовой образец построчной регистрации сигналов с экрана ИДА РЛС_м.

а — до возникновения разряда, б — начало разряда, в — середина, г — прекращение разряда; 1 — область отражений от местных предметов, 2 — собственные шумы приемника, 3 — немолниевое НТРИ облаков, 4, 6, 8 — сигнал отражения от канала молниевоего разряда, 5, 7 — НТРИ разряда молнии; $U_{вх}$ — напряжение на входе приемника, R — расстояние от РЛС_м до цели.

Такие импульсы называют сигналами первого типа, или сигналами широкополосного излучения. Наряду с ними существуют импульсы радиоизлучения, отличающиеся значительной длительностью (см. импульс 7 на рис. 3.11 в), сотни микросекунд и более. Это сигналы узкополосного излучения, или сигналы второго типа.

Для определения характеристик немолниевых НТРИ облаков регистрировались сигналы, излучаемые в предгрозовой фазе раз-

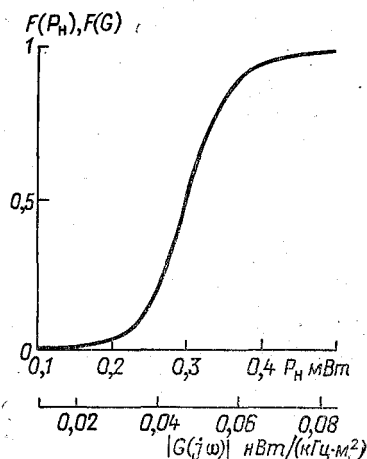


Рис. 3.12. Интегральные функции распределения максимальной мощности $F(P_n)$ и модуля спектральной плотности максимального потока мощности $F(G)$ источников немолниевых НТРИ.

Предполагается, что источники излучения изотропны. Приведено к расстоянию 1 км от источника. Объем выборки — 237 случаев.

вития, во время пауз между отдельными молниевыми разрядами и на фазе распада облака. Было отобрано 303 независимых образца сигналов немолниевых НТРИ, каждый из которых представлял совокупность примерно 500—600 линий развертки, сфотографированных с экрана ИДА (рис. 3.11 а). Немолниевое НТРИ облаков характеризуется относительно постоянной интенсивностью и имеет форму кратковременных хаотично возникающих импульсов.

Предположив, что это НТРИ обусловлено действием точечных изотропных источников сигнала, можно определить максимальную мощность источника и ее интегральную функцию распределения. Расстояние от РЛС до источников для предгрозовых и распадающихся (послегрозовых) облаков принималось условно равным расстоянию до точки максимальной радиолокационной отражаемости гидрометеоров облака, а для грозовых облаков — расстоянию до центра ядра грозового очага. Допускалась погрешность, обусловленная неточностью определения истинного расстояния до источников излучения, которая, как показали расчеты, не превышает 15—20 % для используемых при анализе ситуаций. Интегральная функция распределения максимальной мощности излучения представлена на рис. 3.12. Эта кривая характеризует также интегральную функцию распределения модуля спектральной плотности максимального потока мощности источников немолниевых НТРИ в предположении, что источники излучения изотропны и условно приведены к расстоянию 1 км от точки наблюдения, а энергия сиг-

нала равномерно распределена по спектру в пределах полосы частот, пропускаемых приемником.

Средняя максимальная мощность источников немолниевых НТРИ с вероятностью 0,8 равна $0,30 \pm 0,03$ мВт при среднем квадратическом отклонении 0,23 мВт.

Импульсы немолниевых НТРИ следуют с характерным временным интервалом 10—20 мкс. В паузах между молниевыми разрядами средний временной интервал, разделяющий импульсы, в ряде случаев зависит от частоты молний в облаке: с увеличением частоты временной интервал уменьшается, однако эта связь неустойчивая. По-видимому, большое значение имеет не только частота разрядов, но и объем облачной массы в зоне обзора.

Для исследования характеристик НТРИ молниевых разрядов были зарегистрированы 80 образцов сигналов. Каждый сигнал представлял 1500—2000 линий развертки, на которых можно наблюдать сигналы радиоизлучения, предшествующие (обычно на 1,5—2 с) появлению отражения от канала молний, сопутствующие отражению и появляющиеся после исчезновения радиоэха молнии. Такой отбор сигналов позволил зафиксировать процессы излучения, включая начальные и завершающие фазы развития разряда, на которых не наблюдается сигналов, отраженных от оболочки канала молнии.

Как уже указывалось, молниевое НТРИ наблюдается на фоне немолниевых НТРИ, которое сохраняет свои характеристики в процессе разряда. Средняя максимальная мощность источников молниевых НТРИ первого типа с вероятностью 0,8 равна $1,40 \pm 0,17$ мВт при среднем квадратическом отклонении 1,40 мВт. Источники НТРИ второго типа характеризуются еще большей средней величиной. Как показал анализ, в 93 % случаев наблюдаемые длительные сигналы НТРИ с вероятностью 0,8 имеют среднюю максимальную мощность $1,77 \pm 0,10$ мВт при среднем квадратическом отклонении около 1 мВт. В оставшихся 7 % случаев наблюдаются сигналы, средняя максимальная мощность которых с вероятностью 0,8 равна 27 ± 5 мВт при среднем квадратическом отклонении 10,2 мВт. Функции распределения этих величин представлены на рис. 3.13.

Для решения задачи селекции сигналов НТРИ облаков определена суммарная плотность потока энергии (Π_Σ) в предположении, что источники излучения условно приведены к расстоянию 1 км от точки наблюдения. Расчет этой величины производится по соотношению

$$\Pi_\Sigma = \left(\frac{D}{D'} \right)^2 \cdot \frac{1}{S_{\text{пр}}} \int_0^{t_{\text{изл}}} \frac{U_{\text{вх}}^2(t)}{R_{\text{вх}}} dt,$$

где $D = \frac{D_{\text{мин}} + D_{\text{макс}}}{2}$, $D_{\text{мин}}$ и $D_{\text{макс}}$ — расстояние от точки наблюдения до наиболее близкой и наиболее удаленной точки канала молнии соответственно; D' — расстояние, к которому приводится

наблюдаемая плотность потока энергии (здесь $D' = 1$ км); $S_{\text{пр}}$ — эффективная площадь приема антенны РЛС_м ($S_{\text{пр}} \approx 50$ м²); $t_{\text{изл}}$ — длительность существования излученного сигнала; $U_{\text{вх}}(t)$ — напряжение, наблюдаемое на входе приемника РЛС_м; $R_{\text{вх}}$ — входное сопротивление приемника ($R_{\text{вх}} \approx 0,75$ Ом).

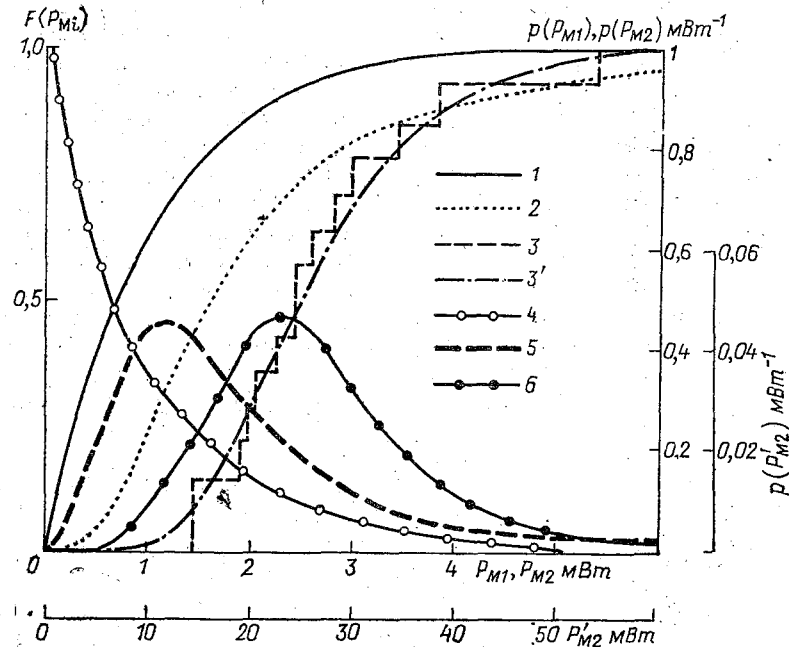


Рис. 3.13. Интегральные функции распределения $F(P_{Mi})$ (1, 2, 3) и функции плотности распределения $p(P_M)$ (4, 5, 6) максимальной мощности источников молниевых НТРИ.

1, 4 — функции распределения мощности источников первого типа P_{M1} ; 2, 5 — функции распределения мощности источников второго типа P_{M2} ; 3, 6 — функции распределения мощности источников второго типа P'_{M2} ; 3' — полигон накопленных частот максимальной мощности источников P'_{M2} .
Объем выборки для источников первого типа — 251 случай, для источников второго типа — 349 случаев.

Интегральная функция распределения суммарной плотности потока излученной энергии сигналов обоих типов молниевых разрядов представлена на рис. 3.14. Средняя суммарная плотность потока указанной энергии с вероятностью 0,8 равна $150 \pm \pm 15$ мкДж/м² при среднем квадратическом отклонении 125 мкДж/м².

Как уже отмечалось, существенный интерес представляют сигналы второго типа, характеризующиеся большой длительностью излучаемых импульсов. Средняя продолжительность излучения этих сигналов с вероятностью 0,8 составляет 120 ± 17 мкс при

среднем квадратическом отклонении 150 мкс. Средняя энергия, излученная источником сигналов второго типа, с вероятностью 0,8 равна $0,50 \pm 0,02$ мкДж при среднем квадратическом отклонении 0,25 мкДж. Средняя спектральная плотность излученной энергии относительно велика: 370 ± 6 мкДж/кГц при среднем квадратическом отклонении 61 мкДж/кГц. Это объясняется узкополосностью спектра сигналов второго типа. Средняя эквивалентная ши-

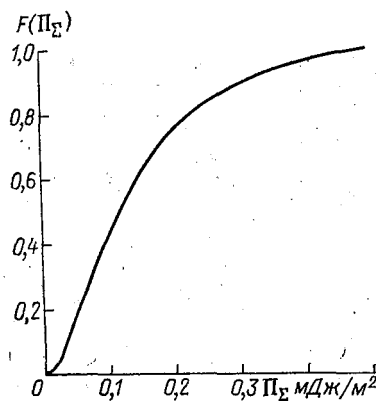


Рис. 3.14. Интегральная функция распределения суммарной плотности потока энергии $F(\Pi_\Sigma)$, излученной источниками сигналов двух типов молниевых разрядов. Приведено к расстоянию 1 км от источника. Объем выборки — 85 случаев.

рина полосы частот, в пределах которой сосредоточено 90 % энергии сигнала, составляет $10,5 \pm 0,8$ кГц с дисперсией 5,3 кГц. За появление импульсов второго типа могут быть ответственны процессы резонансного излучения молниевых разрядов. На наличие узкополосного излучения в дециметровом диапазоне радиоволн указывается в работе Е. Л. Косарева и Ю. Г. Сержкина [105]. Однако описываемые нами сигналы узкополосного излучения не соответствуют по параметрам сигналам, приведенным в [105]. Действительно, сигналы радиоизлучения, в среднем продолжающегося 120 мкс, могут быть зарегистрированы при использовании методики, описанной в [105], всего лишь (в лучшем случае) на двух линиях развертки, что делает невозможным их выделение как узкополосных.

Вызывает интерес представленная на рис. 3.15 зависимость максимальной мощности сигнала и спектральной плотности мощности источников сигналов второго типа от длительности импульсов излучения. В среднем наблюдается рост математического ожидания максимальной мощности источников с увеличением длительности импульса. Для сигналов первого типа столь явной зависимости не наблюдается. Следствием такой связи является наблюдаемое быстрое увеличение спектральной плотности энергии источника излучения при увеличении длительности импульса (рис. 3.16).

Было также проанализировано распределение энергии сигналов второго типа по стадиям развития канала разряда. Выделялись три стадии: 1) стадия, предшествующая появлению различного отражения от канала молнии; 2) стадия, в которой наблюдается

сформировавшийся сигнал, отраженный от канала молнии; 3) стадия, связанная с распадом канала, когда уже не наблюдается радиоэхо молнии. Наибольшее количество энергии (54 % суммар-

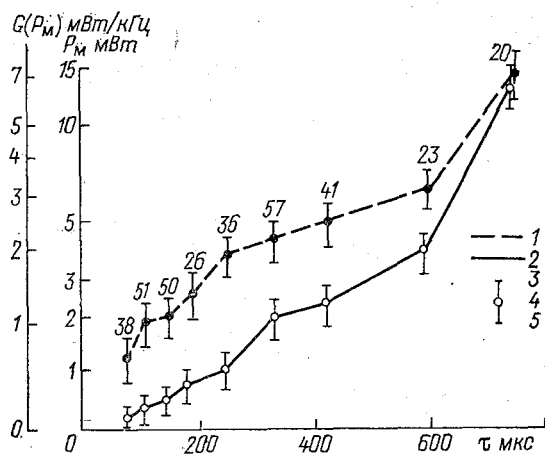


Рис. 3.15. Регрессионная зависимость мощности P_m (1) и спектральной плотности мощности $G(P_m)$ (2) источников молниевых НТРИ второго типа от длительности импульсов излучения τ . 3 — верхняя граница доверительного интервала среднего значения, 4 — среднее значение, 5 — нижняя граница доверительного интервала. Доверительная вероятность 0.8. Объем выборки — 342 случая. Числа над верхней границей доверительного интервала (38, 51, 50...) — число случаев.

ной излученной энергии сигналов второго типа) приходится на вторую стадию развития каналов молнии. На долю первой стадии в среднем приходится лишь 12 %, а на третью — 34 % суммарной излученной энергии.

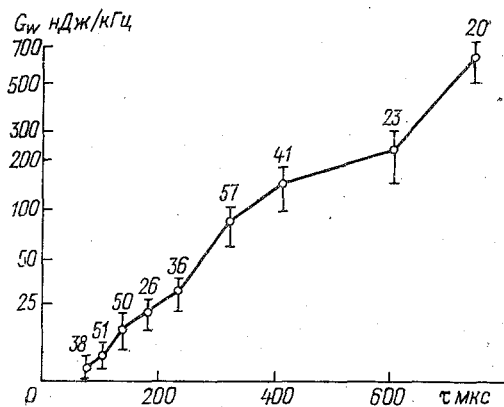


Рис. 3.16. Регрессионная зависимость спектральной плотности энергии G_w источников молниевых НТРИ от длительности импульсов излучения τ . Усл. обозначения см. рис. 3.15.

Расчеты показали, что обнаружить немолниевое НТРИ в метровом диапазоне длин волн при использовании приемных устройств чувствительностью 10^{-12} — 10^{-13} Вт при соотношении уровней сигнал/шум, равном 3, и остроуправленных антенных систем с коэффициентом усиления 100—200 можно лишь на расстоянии до 50 км. Но наряду с этим несомненным недостатком немолниевое НТРИ обладает тем достоинством (с точки зрения его информа-

тивности о наличии электрически активных облаков), что оно продолжительно существует и имеет достаточно стационарный характер.

Нетепловое радиоизлучение молниевых разрядов сравнительно легко обнаруживается приемными устройствами с вышеприведенными техническими характеристиками на расстояниях до 180 км.

3.3.4. Характеристики немолниевое нетеплового радиоизлучения конвективных облаков в средневолновом диапазоне

Дальнейшие исследования связаны с изучением особенностей сигналов, излучаемых в частотной области на границе средневолнового и коротковолнового диапазонов. Эта область характеризуется тем, что поверхностная волна распространяется в ней с сильным затуханием и сигналы от дальних гроз практически не наблюдаются [147]. В то же время волна, связанная с отражением от ионосферных образований, на этих пограничных частотах еще не обеспечивает достаточно эффективного распространения радиоволн на большие расстояния. Поскольку источники радиоизлучения конвективных облаков располагаются на относительно больших высотах (2—6 км), то этим обеспечивается большая дальность прямого распространения радиоволн (до 300 км при высоте источника 3 км) от источника к установленной на земле антенне. Поэтому в пограничной области частот (1,6—2,3 МГц) практически все принятые сигналы НТРИ конвективных облаков связаны с облаками, находящимися в ближней зоне, в радиусе не более 250—300 км от пункта наблюдения. Это расстояние примерно совпадает с границами области обзора МРЛ. Естественно, что дальность обнаружения зависит также от излучаемой источником мощности, чувствительности приемника, параметров приемной антенной системы.

Исследования характеристик сигналов, излучаемых облаками в этом диапазоне частот, представляют относительно сложную задачу в связи с тем, что приемная антенна имеет круговую диаграмму направленности в горизонтальной плоскости, и поэтому возникают трудности в отборе ситуаций, пригодных для анализа. Необходимо, чтобы наблюдения выполнялись, когда в радиусе 160—180 км от пункта приема будет только одно облако. Наиболее желательной, но крайне редко наблюдаемой, является ситуация, когда облако имеет одно локальное и достаточно компактное ядро либо, что хуже, — ограниченное число близко расположенных зон повышенной отражаемости. При приеме сигналов во всех случаях остается неизвестным расстояние до источника излучения и можно лишь предполагать, что наиболее активные процессы разделения зарядов, формирования локальных неоднородностей объемных зарядов и мелкомасштабных внутриоблачных разрядов происходит в зоне крупнокапельных структур облака, т. е. в зоне высокой радиолокационной отражаемости. Поэтому лишь тогда, когда в пространстве обзора имеется единственная

облачная система с одиночной зоной повышенной отражаемости, пространственная протяженность которой заметно меньше расстояния до нее, можно получить приемлемо точные количественные оценки параметров сигналов. Однако такие ситуации практически не встречаются. Менее точные оценки могут быть получены, если облачная система содержит ограниченное число близко расположенных зон повышенной радиолокационной отражаемости. Примером такой ситуации может служить грозовой процесс, наблюдавшийся 4 июля 1989 г.

По синоптическим данным 3 и 4 июля 1989 г. юг Закавказья находился в области глубокого циклона, ложбина которого располагалась над районом наблюдения. К началу эксперимента отмечалось развитие волнового возмущения в зоне атмосферного фронта, что привело к формированию грозовых процессов фронтального характера.

Комплекс аппаратуры для наблюдений периодически включался, выполнялся обзор пространства и, если не обнаруживались облака в радиусе 300 км, аппаратура выключалась. При очередном включении в 17 ч 50 мин была обнаружена облачность на северо-западе на расстоянии 135—160 км от пункта наблюдения. Анализ параметров, характеризующих эту облачную зону, и тенденций их изменений позволил сделать вывод, что в наблюдаемой облачности возможно развитие грозовых процессов. На это указывало также возрастание числа импульсов радиоизлучения, которое началось в 17 ч 48 мин (рис. 3.17, кривая 1). Если ранее наблюдавшиеся облачные зоны обладали низкой отражаемостью, характеризовались малым временем жизни и создавали небольшой фоновый уровень немолниевых НТРИ, меняющийся в интервале 4—12 пакетов импульсов в 1 мин, то начиная с 17 ч 48 мин происходит устойчивое нарастание интенсивности излучения, которое в 18 ч 00 мин достигает до 37 импульсов в 1 мин и продолжает увеличиваться. Зарегистрированное в 18 ч 25 мин поле облачности представлено на рис. 3.18. Наблюдается четыре облака, два из которых, мысленно обозначенных как облако 1 и облако 2, имеют сравнительно высокий уровень отражаемости. Более мощное облако 1 имеет максимум отражаемости ($\eta_1 = 1,1 \cdot 10^{-8} \text{ см}^{-1}$) в азимуте 320° на удалении 160 км от пункта наблюдения. Облако 2 расположено восточнее, его отражаемость $\eta_2 = 8,3 \cdot 10^{-9} \text{ см}^{-1}$, координаты точки максимальной отражаемости 140 км и 335° . Облака перемещаются в юго-восточном направлении, и их отражаемость возрастает. На начальном этапе наблюдений облако 1 перемещается со скоростью примерно 45 км/ч . Облако 2 довольно быстро увеличивается, его периферийная часть (восточная) перемещается примерно с такой же скоростью, однако область максимальной отражаемости изменяет свое положение в пространстве относительно медленно — она малоподвижна.

В 18 ч 46 мин облако 1 приблизилось (координаты точки максимальной отражаемости — 140 км , 325°), его отражаемость возросла до $1,48 \cdot 10^{-7} \text{ см}^{-1}$. Отражаемость облака 2 практически не

изменилась ($\eta_2 = 8,6 \cdot 10^{-9} \text{ см}^{-1}$), и незначительно сместилось положение центра области максимальной отражаемости (142 км, 335°). Площадь облака 2 существенно возросла вследствие его

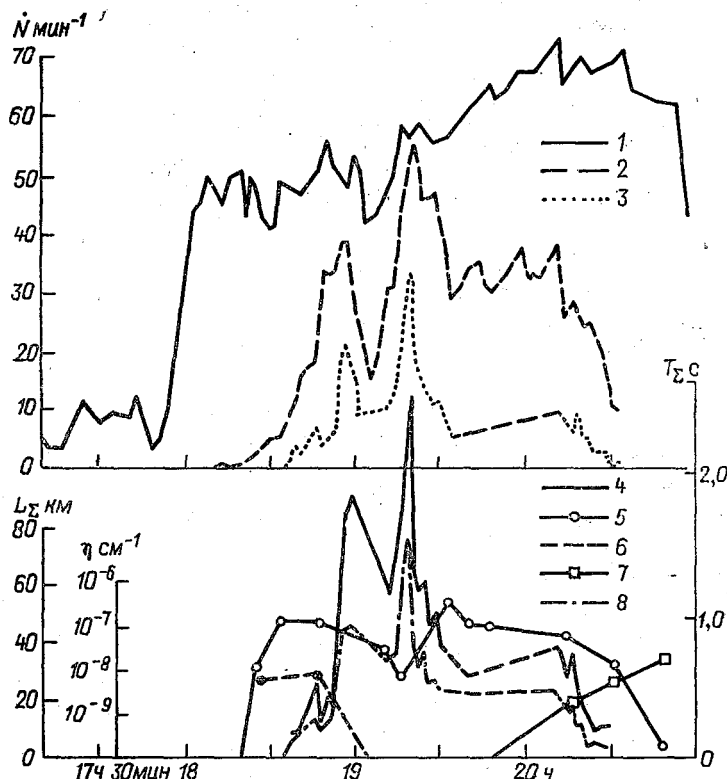


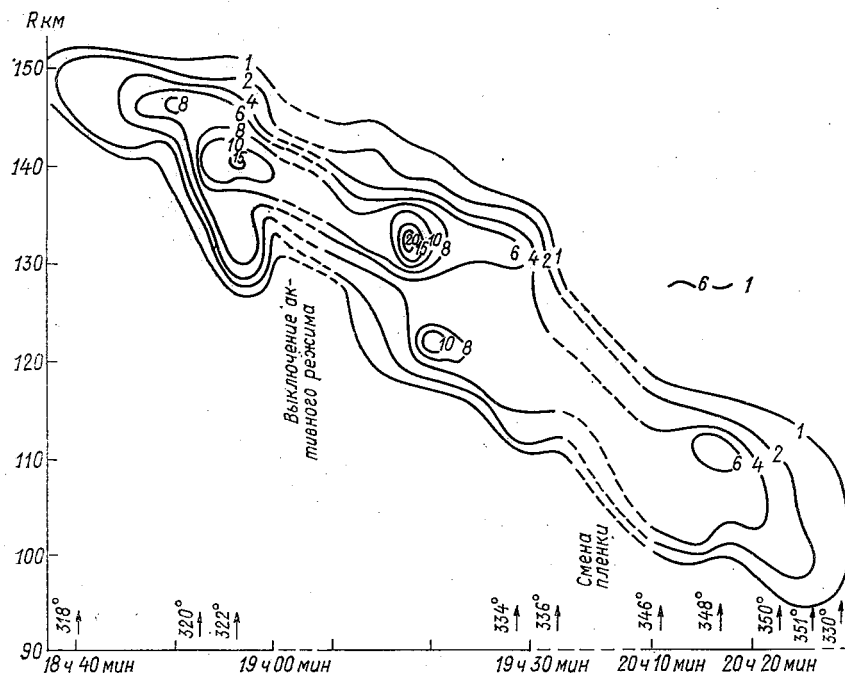
Рис. 3.17. Трансформация во времени грозовой активности ($\dot{N}$, L_{Σ} , T_{Σ}) и радиолокационной отражаемости облачности (η) 4 июля 1989 г.

1, 2 — частота пакетов импульсов НТРИ соответственно в СВ-диапазоне $\dot{N}_{2,182}$ и в метровом диапазоне $\dot{N}_{155}$, 3 — частота молниевых разрядов $\dot{N}$, 4 — суммарная (за 1 мин) длительность сигналов, отраженных от каналов молний T_{Σ} , 5, 6, 7 — максимальная радиолокационная отражаемость облаков по данным МРЛ η (5 — облако 1, 6 — облако 2, 7 — облако 3 на рис. 3.18), 8 — суммарная (за 1 мин) длина проекции канала молнии на линию наклонной дальности L_{Σ} .

слияния с облаками, имевшими в 18 ч 25 мин низкую отражаемость.

Увеличение отражаемости облаков сопровождается ростом интенсивности происходящих в них электрических процессов. Частота пакетов импульсов НТРИ, наблюдаемых на выходе радиоприемного устройства, возрастает до 45—50 мин⁻¹, начиная с 18 ч 10 мин отмечено появление излученных сигналов на выходе приемного

Нарастание интенсивности молниевых разрядов продолжалось до 18 ч 55 мин, одновременно грозовой очаг смещался в юго-восточном направлении, постепенно приближаясь к пункту наблюдения. Это отчетливо видно на двумерном тренде грозовой активности (рис. 3.19). К 18 ч 55 мин в центре (ядре) грозового очага,



I — изолинии частоты разрядов (мин⁻¹); R — расстояние от РЛС_м до цели.
 Стрелки определяют момент изменения азимутального угла установки антенны РЛС_м,
 а числа возле стрелок — азимут установки в градусах.

который находился на расстоянии 141 км, частота разрядов составляла 15 мин^{-1} , а протяженность очага превышала 20 км. В целом по очагу в апогее грозовой активности частота молний достигла 21 мин^{-1} , а частота пакетов импульсов радиоизлучения на длине волны $\lambda = 2 \text{ м}$ ($f = 155 \text{ МГц}$) — 39 мин^{-1} , на выходе СВ-приемника ($f = 2,182 \text{ МГц}$) число пакетов импульсов в 1 мин доходило до 55.

Примерно с 18 ч 50 мин наблюдается существенное возрастание скорости перемещения радиоэха облаков, сопровождаемое заметным уменьшением их отражаемости. В интервале 19 ч 09 мин — 19 ч 15 мин скорость перемещения достигла примерно

115 км/ч, при этом облако 2 практически распалось (рис. 3.18, 19 ч 09 мин), а его остатки слились с облаком 1 (рис. 3.18, 19 ч 15 мин). Отражаемость облака 1 снизилась до $7 \cdot 10^{-9}$ см⁻¹. Этим трансформациям поля облачности сопутствовало уменьшение электрической активности облаков: частота молниевых разрядов составляет уже 10 мин⁻¹, частота пакетов импульсов радиоизлучения 42 мин⁻¹ в СВ-диапазоне и 16 мин⁻¹ в метровом диапазоне. Однако вскоре смещение облаков замедляется (скорость — 84 км/ч для интервала 19 ч 15 мин — 19 ч 32 мин), существенно возрастает его отражаемость, которая достигает в этот период максимума $4 \cdot 10^{-7}$ см⁻¹. Этапу нарастания отражаемости соответствует заметный рост электрической активности. К 19 ч 18 мин — 19 ч 20 мин частота пакетов импульсов радиоизлучения доходит до 58 мин⁻¹ в СВ-диапазоне и до 56 мин⁻¹ в метровом диапазоне, а частота молниевых разрядов — до 34 мин⁻¹ (рис. 3.17, кривые 1—3). Наибольшая грозовая активность совпала с начальным периодом роста отражаемости облака 1. В это время наблюдаются два локальных максимума грозовой активности — электрически активные ячейки (рис. 3.19). Один — на расстоянии примерно 135 км, в котором наблюдается до 20 молниевых разрядов в 1 мин, второй — на расстоянии примерно 122 км с частотой молниевых разрядов 10 мин⁻¹.

Для того чтобы косвенно судить об энергетике разрядной деятельности в грозовом очаге, за каждую минуту наблюдения были вычислены суммарное время существования сигналов, отраженных от каналов молниевых разрядов T_{Σ} (рис. 3.17, кривая 4) и суммарная длина проекции каналов молниевых разрядов на линию наклонной дальности L_{Σ} (рис. 3.17, кривая 7). Эти величины достигают максимальных значений в 19 ч 18 мин, в момент максимума частоты молниевых разрядов.

После 19 ч 18 мин интенсивность электрических процессов в облаке 1 уменьшается, скорость его перемещения падает. Длительное время (примерно с 19 ч 30 мин до 20 ч 10 мин) наблюдается режим, близкий к стационарному, характеризующийся относительно медленным перемещением облака (со скоростью около 45—50 км/ч) в юго-восточном направлении и небольшим уменьшением отражаемости, от $4 \cdot 10^{-7}$ до $7,7 \cdot 10^{-8}$ см⁻¹. Интенсивность электрических процессов в облаке флуктуирует, и частота пакетов импульсов, наблюдаемых на выходе приемника РЛС_м ($f = 155$ МГц), колеблется от 30 до 45 мин⁻¹, а частота молниевых разрядов — от 6 до 10 мин⁻¹.

В то же время на выходе приемника, настроенного на частоту 2,182 МГц, продолжается нарастание числа пакетов импульсов. Это связано с появлением еще одного облака, которое обозначено как облако 3 (см. рис. 3.18). Первое радиоэхо облака 3 зарегистрировано в 19 ч 09 мин, когда его центральная часть находилась в точке с координатами 81 км, 320°. Отражаемость облака в это время невелика — $1,5 \cdot 10^{-11}$ см⁻¹, его вклад в общий сигнал, наблюдаемый на выходе приемника СВ-диапазона, прак-

тически незаметен. Но увеличение с 19 ч 35 мин частоты пакетов импульсов в СВ-диапазоне связано с увеличением интенсивности электрических процессов в облаке 3.

С 20 ч 10 мин грозовые процессы в облаке 1 ослабевают, и после 20 ч 30 мин молниевых разрядов в нем не наблюдается (рис. 3.17, кривая 3). Несколько дольше (примерно до 20 ч 40 мин) регистрируются импульсы НТРИ на выходе приемника РЛС_м (рис. 3.17, кривая 2). Облако 1 распадается на ряд пространственно разделенных ячеек, имеющих повышенную отражаемость (рис. 3.18, 20 ч 49 мин) и быстро диссипирует. Однако НТРИ в СВ-диапазоне после распада облака 1 сохраняет значительный уровень (около 60—65 пакетов импульсов в 1 мин). Это связано с ростом отражаемости облака 3 (рис. 3.17, кривая 7) и его приближением к пункту наблюдения. В 20 ч 49 мин центр облака 3 находился в точке с координатами 62 км, 337°, а отражаемость возросла до $2,5 \cdot 10^{-8}$ см⁻¹.

Таким образом, 4 июля 1989 г. наблюдался сравнительно редко встречающийся в Восточной Грузии случай, когда в радиусе 300 км длительное время существовало всего одно грозовое облако. Оно имело пространственную протяженность, заметно меньшую, чем расстояние до него (от пункта наблюдения). Отметим, что на начальной и завершающей стадиях развития облака наряду с исследуемым облаком были еще облака. На начальной стадии кроме облака 1 наблюдалось распадающееся облако 2, которое располагалось примерно на таком же расстоянии от пункта наблюдения, но имело существенно меньшую отражаемость. На завершающей стадии развития облака 1 увеличилась отражаемость облака 3, которая с 20 ч 33 мин превысила отражаемость облака 1, но еще раньше (с 19 ч 35 мин) это облако оказывало влияние на поток импульсов, принимаемых на частоте 2,182 МГц.

Для подробного анализа характеристик сигналов, наблюдавшихся на выходе приемного устройства СВ-диапазона, эти сигналы регулярно выводились на экран запоминающего осциллографа и производилось фотографирование экрана. Обычно в течение нескольких минут фотографировались десятки кадров, на каждом из которых фиксировалось выходное напряжение приемника в течение 20 мс. Съемка нескольких десятков кадров выполнялась достаточно быстро, и за временной интервал, необходимый для фотографирования, характеристики исследуемого процесса практически не менялись — процесс мог считаться квазистационарным в пределах ограниченного временного интервала. В результате была получена совокупность фотоснимков напряжения на выходе СВ-приемника для временных интервалов: 17 ч 43 мин — 17 ч 49 мин (стадия, предшествующая развитию облака 1), 18 ч 07 мин — 18 ч 16 мин (начальная стадия активизации электрических процессов в облаке 1, сопровождающаяся заметным ростом числа пакетов излученных импульсов), 18 ч 41 мин — 18 ч 43 мин (начальная стадия развития грозового процесса), 19 ч 02 мин —

19 ч 05 мин (стадия активной грозы), 19 ч 30 мин — 19 ч 34 мин (стадия перехода грозового процесса к длительной стадии стационарности, предшествующей спаду). Более поздние серии фотосъемок сигналов не использовались при анализе, так как разделить сигналы, поступающие от облаков 1 и 3 после 19 ч 35 мин, оказалось невозможно.

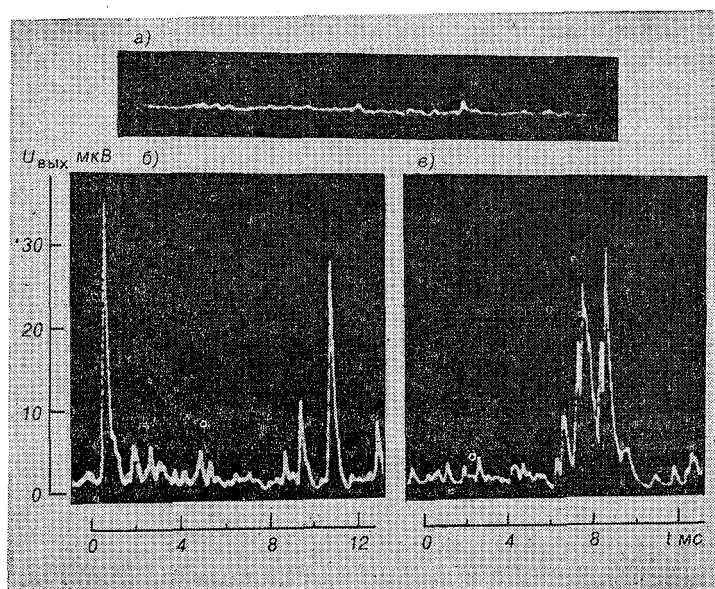


Рис. 3.20. Типичные сигналы, наблюдаемые на экране запоминающего осциллографа.

а — шумовое напряжение приемника, б — широкополосное НТРИ, в — узкополосное НТРИ; $U_{\text{вых}}$ — напряжение на выходе приемника.

На рис. 3.20 представлены типичные сигналы на выходе детектора приемного устройства, сфотографированные с экрана запоминающего осциллографа. Эти сигналы имеют, как правило, форму кратковременного импульса, длительностью $1/F_{\text{пр}}$ ($F_{\text{пр}}$ — ширина полосы частот, усиливаемых приемником). Это свидетельствует о том, что спектр частот, излученных при генерации такого кратковременного импульса, превышает $F_{\text{пр}}$. Сигналы такой формы являются широкополосными, и по известным параметрам приемного устройства можно судить только о функции спектральной плотности сигнала на частоте настройки приемника.

Наряду с кратковременными среди излученных сигналов встречаются импульсы, длительность которых существенно превышает $1/F_{\text{пр}}$. Такие импульсы, как правило, можно разложить на две составляющие: относительно монотонно меняющийся длительный импульс (с плавными передним и задним фронтами, а также вер-

шиной) и обычную совокупность кратковременных импульсов. Первая составляющая представляет собой сигнал, эффективная ширина полосы частот которого $\Delta f_{\text{эф}} \approx 1/T_{\text{имп}}$ ($T_{\text{имп}}$ — длительность «гладкого» импульса). Величина $\Delta f_{\text{эф}}$ может быть существенно меньше полосы частот, усиливаемых приемным устройством. Такой сигнал является узкополосным. Вторая составляющая — обычный широкополосный сигнал.

Узкополосные сигналы представляют существенный интерес, так как энергия этих сигналов превышает энергию широкополосного излучения в полосе частот, усиливаемых приемником, и, следовательно, условия приема и выделения такого сигнала оказываются более благоприятными. Такие сигналы могут быть обнаружены на более дальних расстояниях от источника излучения.

Для анализа характеристик импульсов узкополосного НТРИ в ЭВМ вводились данные, позволяющие восстановить временную функцию напряжения $U(t)$, соответствующую анализируемому импульсу. Уменьшение объема вводимой в ЭВМ информации достигалось за счет отказа от эквидистантного по времени ввода данных о функции напряжения в дискретные моменты времени. В ЭВМ вводились данные о координатах точек функции $U(t)$, соответствующих ее экстремальным значениям, точкам перегиба и незначительному числу точек, произвольно выбираемых и обеспечивающих в совокупности возможность восстановления с использованием методов сплайн-интерполяции аппроксимирующей функции $U^*(t)$, близкой к исходной функции. В ЭВМ (на основании введенных данных) для каждого импульса определялись: его длительность, максимальное напряжение и максимальная мощность. Затем находились коэффициенты сплайн-функции и вычислялась энергия, принятая приемником. Это позволяло определить среднюю мощность импульса и его эффективное напряжение. Следующий этап расчета был связан с вычислением 100 значений модуля функции спектральной плотности на эквидистантной сетке частот в области полосы частот, усиливаемых приемником. Найденные величины использовались для вычисления максимального модуля функции спектральной плотности, максимальной спектральной плотности энергии и эффективной полосы частот анализируемого импульса.

Предполагая, во-первых, что расстояние до источника излучения равно расстоянию до точки максимальной отражаемости облака, во-вторых, что распространение радиоволн происходит в свободном пространстве и считая источник излучения изотропным, можно определить среднюю и максимальную мощность источника излучения, эффективную и максимальную напряженность поля и спектральную плотность потока мощности (приведенные к 10-километровому расстоянию от источника), энергию и спектральную плотность мощности излучения.

После вычисления указанных параметров для каждого анализируемого импульса проводилась статистическая обработка информации по всей выборке и определялись средние значения каж-

дого параметра, его дисперсия, центральные и начальные моменты (до четвертого включительно), асимметрия и эксцесс распределения. Отдельно для совокупности параметров, характеризующих сигналы на входе приемного устройства, и для параметров, характеризующих источник излучения, получены матрицы нормированных коэффициентов корреляции. При вычислении основных статистических параметров — среднего значения, среднего квадратического отклонения и нормированных коэффициентов корреляции — определены доверительные интервалы оценок при доверительной вероятности 0,8.

В табл. 3.1 и 3.2 приведены обобщающие результаты анализа характеристик сигналов узкополосного радиоизлучения. В последней графе таблиц указано число случаев, по которым проводился анализ.

Из таблиц видно, что в данной ситуации на ранней стадии развития облачности поступающие на вход приемника сигналы молниевых узкополосного излучения характеризовались малыми уровнями напряжения и мощности. Незначительной была энергия, поступающая на вход приемного устройства, а также мощность и энергия источников излучения. Эффективная полоса частот излучаемого сигнала в среднем составляла 420 ± 55 Гц, что примерно в 10—12 раз меньше полосы частот, усиливаемых приемным устройством.

По мере развития облака и повышения его электрической активности наблюдался рост уровня напряжения и мощности сигнала, поступающего на вход радиоприемного устройства. Особенно возросла максимальная мощность и энергия поступающего на вход сигнала. Так, еще до появления молниевых разрядов, на этапе увеличения частоты следования пакетов импульсов, максимальная мощность сигналов узкополосного излучения возросла в среднем примерно в 6 раз, а энергия принимаемого сигнала — в 5,5 раз. Во столько же раз возросли максимальная мощность и энергия источников излучения. Практически не произошло заметного изменения эффективной полосы частот спектра излучения узкополосного сигнала.

Менее существен был рост таких параметров, как напряжение на входе приемного устройства (в 2—2,3 раза) и максимальный модуль функции спектральной плотности (2—2,2 раза). Приведенная к расстоянию 10 км напряженность электромагнитного поля возросла примерно в 2—2,5 раза, а спектральная плотность потока мощности увеличилась в 4—4,5 раза. Во столько же раз возрос максимальный модуль спектральной плотности энергии источника излучения.

При появлении в облаке молниевых разрядов наблюдается дальнейшее, но не очень заметное увеличение уровня мощности сигналов на входе приемника. В последующем уровень сигнала (по напряжению и особенно по мощности) на входе приемника увеличивается. Это связано не только с изменениями мощности излучения источника, но и с приближением облака к пункту наб-

Таблица 3.1

Средние значения параметров узкополосного радиоизлучения
в различные временные интервалы. 4 июля 1989 г.

Параметр	17 ч 43 мин— 17 ч 49 мин	18 ч 07 мин— 18 ч 16 мин	18 ч 41 мин— 18 ч 43 мин	19 ч 02 мин— 19 ч 05 мин	19 ч 30 мин— 19 ч 34 мин
Входной сигнал радиоприемника					
$U_{эф}$ мкВ	$3,5 \pm 0,2$	$6,6 \pm 0,6$	$7,3 \pm 0,8$	$8,9 \pm 0,5$	$9,9 \pm 0,9$
$U_{макс}$ мкВ	$7,7 \pm 0,4$	$18,0 \pm 2,5$	$18,0 \pm 2,5$	$22,0 \pm 2,0$	$24,0 \pm 2,5$
$P_{ср} \cdot 10^{13}$ Вт	$1,3 \pm 0,15$	$5,2 \pm 1,0$	$6,8 \pm 1,5$	$9,8 \pm 2,0$	$13,0 \pm 2,8$
$P_{макс} \cdot 10^{13}$ Вт	$6,6 \pm 0,5$	$39,0 \pm 7,0$	$46,0 \pm 11,0$	$69,0 \pm 13,0$	$76,0 \pm 16,0$
$W \cdot 10^{16}$ Дж	$6,0 \pm 0,7$	$33,0 \pm 10,0$	$32,0 \pm 10,0$	$40,0 \pm 8,0$	$44,0 \pm 9,0$
$F_{эф}$ Гц	420 ± 40	420 ± 55	550 ± 85	590 ± 70	580 ± 55
$T_{имп}$ мс	$4,5 \pm 0,4$	$5,4 \pm 0,8$	$4,1 \pm 0,6$	$3,9 \pm 0,3$	$3,6 \pm 0,3$
$G \cdot 10^8$ В/Гц	$1,6 \pm 0,2$	$3,5 \pm 0,8$	$3,3 \pm 0,8$	$3,1 \pm 0,5$	$2,8 \pm 0,4$
Источник излучения					
$P'_{ср}$ мВт	$2,5 \pm 0,2$	$9,7 \pm 1,8$	$12,0 \pm 2,5$	$16,0 \pm 2,7$	$18,0 \pm 4,0$
$P'_{макс}$ мВт	$19,0 \pm 0,3$	$72,0 \pm 14,0$	$80,0 \pm 20,0$	112 ± 21	110 ± 22
$E'_{эф}$ мкВ/м	$26,0 \pm 1,2$	$50,0 \pm 4,5$	$53,0 \pm 6,0$	$61,0 \pm 5,0$	$65,0 \pm 6,0$
$E'_{макс}$ мкВ/м	$50,0 \pm 4,0$	130 ± 14	130 ± 18	155 ± 15	155 ± 15
$S' \cdot 10^{14}$ Вт/(Гц · м ²)	$1,0 \pm 0,2$	$4,3 \pm 1,3$	$4,9 \pm 1,9$	$4,0 \pm 1,0$	$3,2 \pm 0,8$
$W' \cdot 10^5$ Дж	$1,1 \pm 0,13$	$6,2 \pm 1,8$	$5,6 \pm 1,7$	$6,6 \pm 1,3$	$6,2 \pm 1,3$
$p(F) \cdot 10^5$ Вт/Гц	$1,3 \pm 0,2$	$5,4 \pm 1,6$	$6,5 \pm 2,4$	$5,1 \pm 1,3$	$4,0 \pm 1,0$
Количество им- пульсов	82	37	37	68	60

Примечание. Здесь $U_{эф}$ и $U_{макс}$ — соответственно эффективное и максимальное напряжение импульсов на входе приемника, $P_{ср}$ и $P_{макс}$ — соответственно средняя и максимальная мощность импульсов на входе приемника, W — энергия входного импульса, $F_{эф}$ — эффективная полоса энергетического спектра импульса, $T_{имп}$ — длительность импульса на входе приемника, G — максимальный модуль спектральной плотности импульса на входе приемника, $P'_{ср}$ и $P'_{макс}$ — соответственно средняя и максимальная мощность источника излучения, $E'_{эф}$ и $E'_{макс}$ — соответственно эффективная и максимальная напряженность электромагнитного поля на расстоянии 10 км от источника излучения, S' — спектральная плотность потока мощности электромагнитного поля на расстоянии 10 км от источника излучения, W' — излученная источником энергия, $p(F)$ — максимальный модуль спектральной плотности энергии источника излучения.

людения и улучшением вследствие этого условий приема излученных сигналов.

Из рис. 3.21, иллюстрирующего интегральные функции распределения длительности импульсов узкополосного НТРИ для различных стадий развития грозового процесса, видно, что в этом эксперименте на всех стадиях длительность единичного акта излучения почти одинакова и составляет 3—4 мс. Только на начальном этапе активизации электрических процессов в облаке более чем

Таблица 3.2

Средние квадратические отклонения параметров узкополосного радиоизлучения в различные временные интервалы, 4 июля 1989 г.

Параметр	17 ч 43 мин— 17 ч 49 мин	18 ч 07 мин— 18 ч 16 мин	18 ч 41 мин— 18 ч 43 мин	19 ч 02 мин— 19 ч 05 мин	19 ч 30 мин— 19 ч 34 мин
Входной сигнал радиоприемника					
$U_{эф}$ мкВ	$1,1 \pm 0,13$	$2,9 \pm 0,5$	$3,8 \pm 0,5$	$4,8 \pm 0,5$	$5,6 \pm 1,0$
$U_{макс}$ мкВ	$2,5 \pm 0,2$	$8,5 \pm 1,2$	$11,5 \pm 1,4$	$14,0 \pm 1,2$	$14,0 \pm 2,0$
$P_{ср} \cdot 10^{13}$ Вт	$0,85 \pm 0,15$	$4,5 \pm 1,1$	$7,1 \pm 1,4$	$10,9 \pm 1,7$	$16,7 \pm 3,9$
$P_{макс} \cdot 10^{13}$ Вт	$3,8 \pm 0,3$	$35,0 \pm 9,0$	$54,0 \pm 8,0$	$81,0 \pm 11,0$	$96,0 \pm 23,0$
$W \cdot 10^{16}$ Дж	$4,9 \pm 0,8$	$46,0 \pm 18,0$	$46,5 \pm 13,0$	$50,0 \pm 8,0$	$56,0 \pm 11,0$
$F_{эф}$ Гц	280 ± 25	260 ± 28	400 ± 45	460 ± 90	345 ± 60
$T_{имп}$ мс	$2,6 \pm 0,3$	$3,9 \pm 0,9$	$2,6 \pm 0,4$	$1,95 \pm 0,25$	$1,5 \pm 0,25$
$G \cdot 10^8$ В/Гц	$1,5 \pm 0,3$	$3,7 \pm 0,7$	$3,9 \pm 0,8$	$3,1 \pm 0,6$	$2,3 \pm 0,9$
Источник излучения					
$P'_{ср}$ мВт	$1,6 \pm 0,3$	$2,4 \pm 1,7$	$12,5 \pm 2,4$	$18,0 \pm 2,1$	$23,5 \pm 5,5$
$P'_{макс}$ мВт	$7,2 \pm 0,5$	$67,0 \pm 16,0$	$94,0 \pm 14,0$	181 ± 19	135 ± 33
$E_{эф}$ мкВ/м	$8,1 \pm 1,0$	$21,0 \pm 3,4$	$28,0 \pm 4,0$	$33,5 \pm 3,6$	$36,5 \pm 6,3$
$E_{макс}$ мкВ/м	$19,0 \pm 1,5$	$64,0 \pm 9,5$	$83,0 \pm 10,0$	$97,5 \pm 9,0$	$90,0 \pm 14,0$
$S' \cdot 10^{14}$ Вт/(Гц · м ²)	$1,4 \pm 0,3$	$6,1 \pm 1,5$	$9,0 \pm 1,2$	$6,5 \pm 1,6$	$4,9 \pm 1,9$
$W' \cdot 10^5$ Дж	$0,9 \pm 0,1$	$8,6 \pm 3,3$	$8,1 \pm 2,3$	$8,15 \pm 1,3$	$7,85 \pm 1,65$
$p(F) \cdot 10^5$ Вт/Гц	$1,7 \pm 0,3$	$7,7 \pm 1,9$	$11,3 \pm 3,8$	$8,2 \pm 3,0$	$6,2 \pm 1,4$
Количество импульсов	82	37	37	68	60

в 20 % случаев длительность импульсов радиоизлучения превышает 9 мс.

На рис. 3.22 и 3.23, где приведены интегральные функции распределения эффективной напряженности поля и мощности источников узкополосного радиоизлучения, видно, что если до начала активных электрических процессов в облаке преобладали источники излучения, создающие незначительные по напряженности радиочастотные поля (около 60 мкВ/м), характеризующиеся малой мощностью (от 10 до 20 мВт), то по мере развития грозы поля, естественно, возрастали и увеличивалась мощность источников излучения. Так, эффективная напряженность поля возросла с 30 до 50—70 мкВ/м (во время перехода грозового процесса к длительной стадии стационарности, предшествующей спаду грозовой активности), а средняя мощность источника увеличилась до 50—100 мВт (рис. 3.22, кривая 5). В 30 % случаев максимальная мощность источников излучения превышает 120 мВт. Для сравнения отметим, что мощность, излучаемая аэрологическим радиозондом типа РКЗ равна 80—120 мВт.

Интегральные функции распределения спектральной плотности потока мощности узкополосных источников НТРИ представлены на рис. 3.24. В данном эксперименте, как показал анализ, на стадии предгрозовой активности эффективная ширина полосы частот спектра импульсов в среднем менялась мало. При переходе к гро-

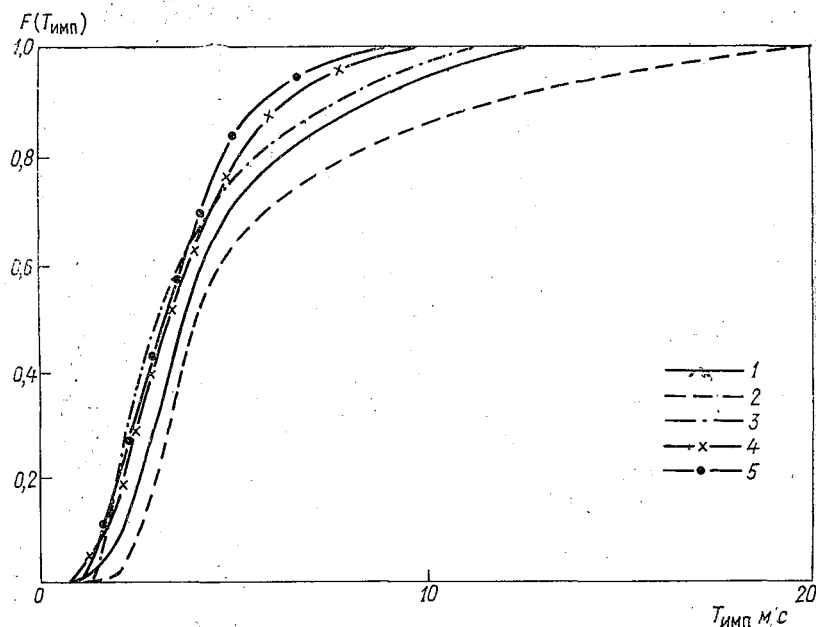


Рис. 3.21. Интегральные функции распределения длительности импульсов узкополосного НТРИ $F(T_{\text{имп}})$ на разных стадиях развития грозового процесса.

1 — предгрозовая стадия развития облака (с 17 ч 43 мин по 17 ч 49 мин), 2 — начальная стадия активизации электрических процессов в облаке (с 18 ч 07 мин по 18 ч 16 мин), 3 — начальная стадия развития грозового процесса (с 18 ч 41 мин по 18 ч 43 мин), 4 — стадия активной грозы (с 19 ч 02 мин по 19 ч 05 мин), 5 — переход грозового процесса к длительной стадии стационарности, предшествующей спаду (с 19 ч 30 мин по 19 ч 34 мин).

зовой стадии эта величина возросла примерно на 30—35 %, после чего практически не менялась при изменении интенсивности грозы. Спектральная плотность потока мощности увеличилась с (4—5) $\times 10^{-15}$ Вт/(Гц·м²) в начальной стадии исследуемого процесса до (1—2) $\cdot 10^{-14}$ Вт/(Гц·м²) на стадии активной грозы.

Была исследована корреляция между отдельными параметрами сигналов узкополосного НТРИ на разных стадиях грозового процесса. Результаты исследований приведены в табл. 3.3. Обозначения параметров в этой таблице соответствуют используемым в табл. 3.1 и 3.2. Здесь приводятся три значения коэффициента корреляции: 1) для нижней границы 80 %-ного доверительного интервала, 2) для номинального значения, 3) для верхней границы 80 %-ного доверительного интервала.

На рис. 3.25 показан ход среднего модуля функции спектральной плотности огибающей напряжения источника узкополосного радиоизлучения на разных стадиях развития грозового процесса. Видно, что эта величина на начальной стадии развития облака в несколько раз меньше, чем на стадиях, соответствующих развившемуся грозовому процессу.

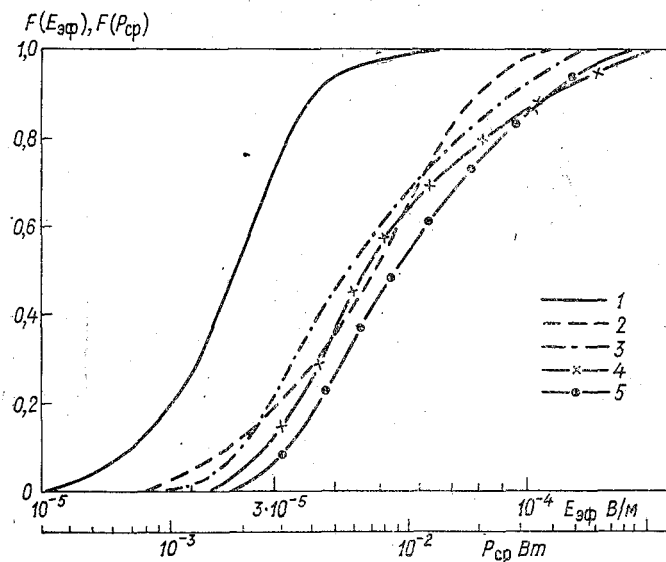


Рис. 3.22. Интегральные функции распределения эффективной напряженности поля $F(E_{эф})$ и средней мощности $F(P_{ср})$ источников узкополосного НТРИ, приведенные к расстоянию 10 км от источников, на разных стадиях развития грозового процесса.

Усл. обозначения см. рис. 3.21.

На рис. 3.26 представлены интегральные функции распределения длительности пауз между импульсами широкополосного излучения, а на рис. 3.27 — интегральные функции распределения амплитуды импульсов широкополосного излучения на разных стадиях развития грозового процесса (исключая начальную стадию развития облака). На начальной стадии активизации электрических процессов в облаке, сопровождающейся заметным ростом числа пакетов излученных импульсов, длительность пауз между импульсами широкополосного излучения составляет в среднем 1 мс. Затем, на начальной стадии развития грозового процесса, она несколько уменьшается, а во время развившейся грозы вновь увеличивается до 1,5—3 мс и в дальнейшем почти не меняется, причем в 20 % случаев эта величина превышает 3,5 мс. Что касается распределения амплитуды импульсов широкополосного излучения, то на первых двух стадиях развития грозы амплитуда

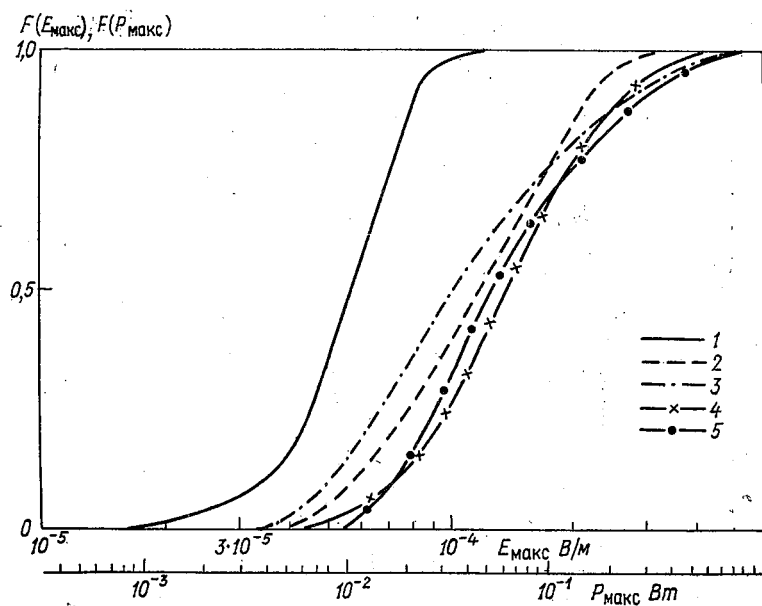


Рис. 3.23. Интегральные функции распределения максимальной напряженности поля $F(E_{\max})$ и максимальной мощности $F(P_{\max})$ источников узкополосного НТРИ, приведенные к расстоянию 10 км от источников, на разных стадиях развития грозового процесса. Усл. обозначения см. рис. 3.21.

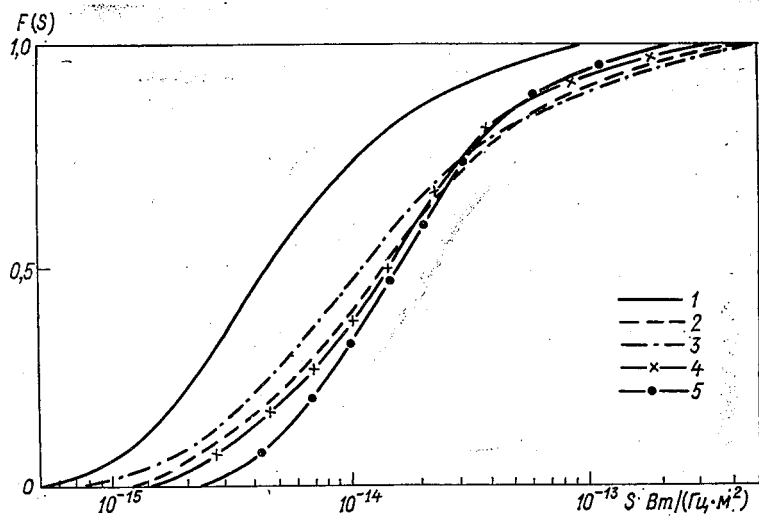


Рис. 3.24. Интегральные функции распределения спектральной плотности $F(S)$ потока мощности электромагнитного поля узкополосных источников НТРИ, приведенные к расстоянию 10 км от источников, на разных стадиях развития грозового процесса. Усл. обозначения см. рис. 3.21.

Таблица 3.3

Коэффициенты корреляции между отдельными параметрами узкополосного радиоизлучения в различные временные интервалы, 4 июля 1989 г.

Параметры	17 ч 43 мин— 17 ч 49 мин	18 ч 07 мин— 18 ч 16 мин	18 ч 41 мин— 18 ч 43 мин	19 ч 02 мин— 19 ч 05 мин	19 ч 30 мин— 19 ч 34 мин
$U_{эф}$	0,78	0,93	0,84	0,93	0,92
$U_{макс}$	0,83	0,96	0,89	0,95	0,94
	0,87	0,97	0,93	0,96	0,96
$U_{эф}$	0,78	0,89	0,77	0,90	0,89
$P_{макс}$	0,83	0,93	0,85	0,93	0,92
	0,87	0,96	0,90	0,95	0,94
$U_{эф}$	0,63	0,69	0,59	0,79	0,87
W	0,71	0,79	0,72	0,84	0,90
	0,77	0,86	0,81	0,88	0,93
$U_{макс}$	0,54	0,65	0,71	0,76	0,83
W	0,64	0,76	0,80	0,83	0,88
	0,72	0,84	0,87	0,87	0,91
$P'_{ср}$	0,73	0,89	0,76	0,90	0,91
	0,79	0,93	0,84	0,92	0,93
$P'_{макс}$	0,84	0,95	0,89	0,94	0,95
$P'_{ср}$	0,66	0,73	0,63	0,77	0,88
W'	0,73	0,81	0,75	0,83	0,91
	0,79	0,87	0,83	0,87	0,93
$E'_{эф}$	0,78	0,90	0,77	0,90	0,89
	0,83	0,93	0,84	0,93	0,92
$P'_{макс}$	0,87	0,96	0,90	0,95	0,94
$E'_{эф}$	0,63	0,69	0,59	0,79	0,87
W'	0,71	0,79	0,71	0,84	0,90
	0,77	0,86	0,81	0,88	0,93

Примечание. Среднее число — номинальное значение коэффициента корреляции, верхнее и нижнее числа — соответственно нижняя и верхняя границы 80 %-ного доверительного интервала.

импульсов почти не изменяется, составляя в среднем 3—4 мкВ, а при развившемся грозовом процессе она несколько увеличивается и достигает 5—7 мкВ, при этом в 20 % случаев эта величина превышает 10 мкВ.

Следует отметить, что в грозах, связанных с развитием внутримассовых атмосферных процессов, характеристики источников

немолниевое нетепловое радиоизлучения имеют несколько меньшие значения, чем приведенные выше.

На рис. 3.28 приведены амплитудно-частотные характеристики напряженности поля немолниевых НТРИ конвективных облаков, а также НТРИ, возникающего при разряде молнии, по данным

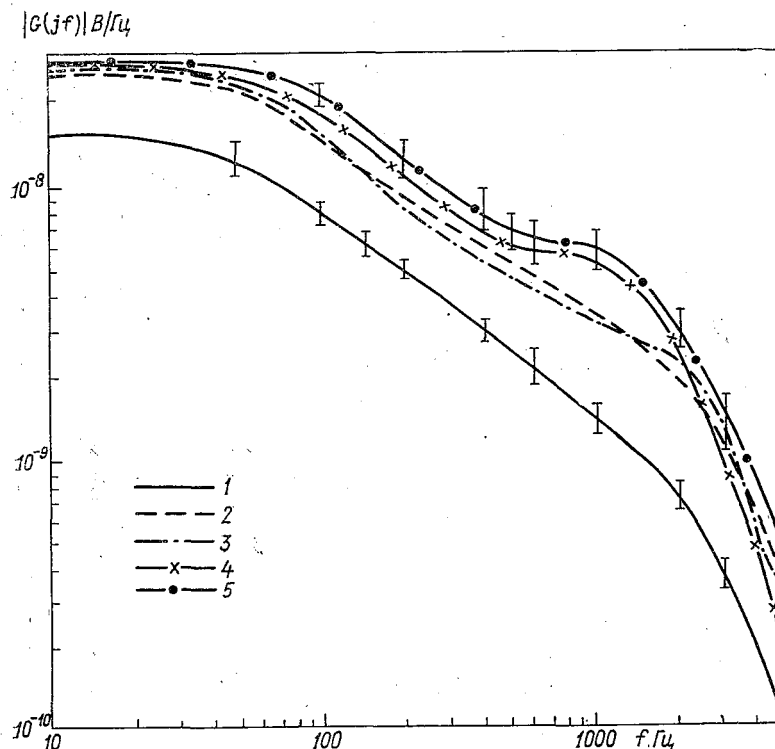


Рис. 3.25. Средний модуль спектральной плотности огибающей напряжения $|G(jf)|$ узкополосного НТРИ на разных стадиях развития грозового процесса.

Усл. обозначения см. рис. 3.21; f — частота колебаний.

разных авторов. На этом рисунке точка 7 имеет такой большой разброс значений потому, что в работе [135] расчеты проводились без разделения на стадии развития грозового процесса. Данные, представленные в этой главе, укладываются в интервальные оценки, соответствующие 0,8 доверительной вероятности.

Таким образом, можно отметить, что НТРИ, не связанное с молниевыми разрядами, имеет на границе средневолнового и коротковолнового диапазонов достаточную интенсивность для уверенного выделения сигналов соответствующими радиоприемными средствами.

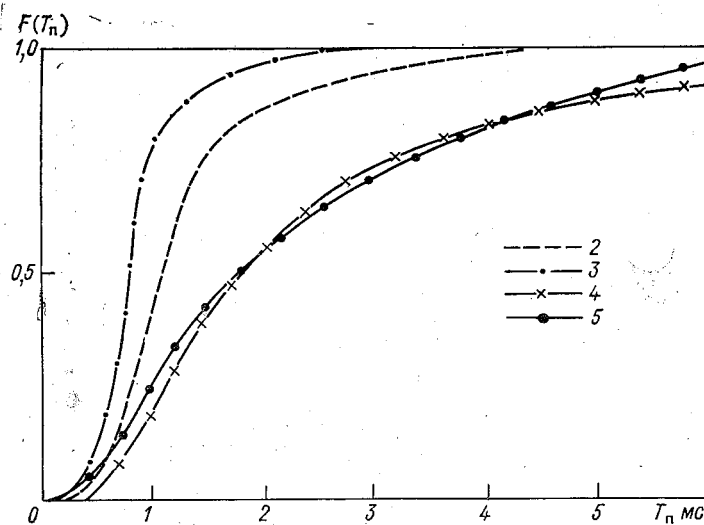


Рис. 3.26. Интегральные функции распределения длительности пауз между импульсами $F(T_n)$ широкополосного НТРИ на разных стадиях развития грозового процесса (исключая предгрозную стадию).

Усл. обозначения см. рис. 3.21.

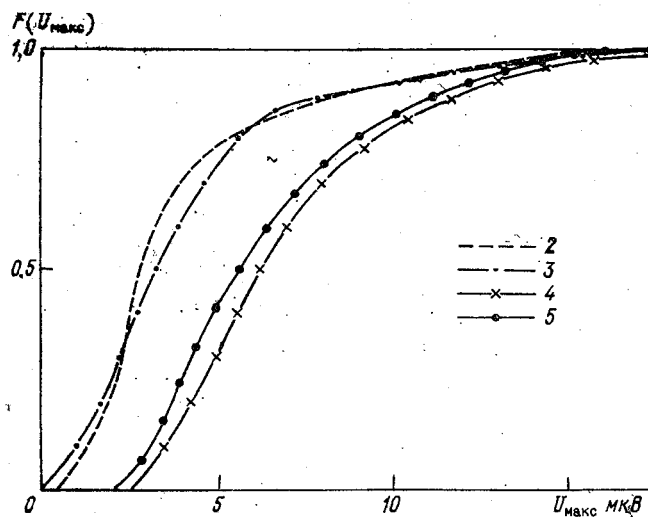


Рис. 3.27. Интегральные функции распределения амплитуды импульсов $F(U_{\text{max}})$ широкополосного НТРИ на разных стадиях развития грозового процесса (исключая предгрозную стадию).

Усл. обозначения см. рис. 3.21.

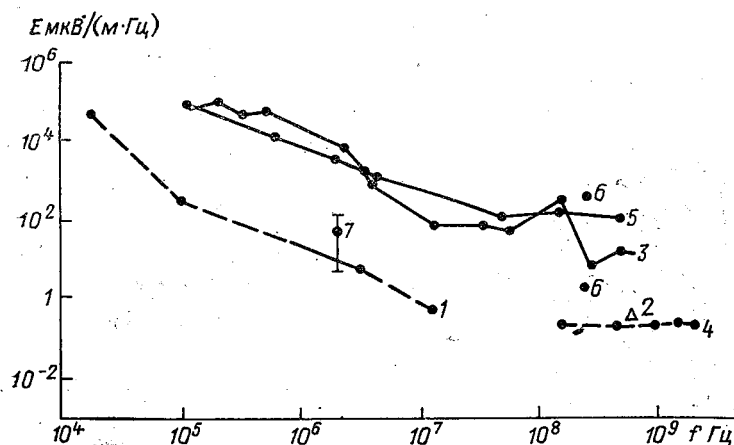


Рис. 3.28. Амплитудно-частотные характеристики напряженности поля (E) немолинового НТРИ конвективных облаков (1, 7), а также НТРИ разряда молний (2—6) по данным разных авторов. 1 — [260], 2 — [192], 3 — [92], 4 — [104], 5 — [217], 6 — [89], 7 — [135]; f — частота колебаний.

3.3.5. Пространственная панорама характеристик грозовой облачности по данным пассивной радиолокации

Грозовую активность следует различать как в целом по району, так и для отдельных конвективных облаков. Разумеется, представляет интерес знание и того, и другого. Как уже отмечалось в разделе 3.1, для определения интегральной грозовой активности по району (в радиусе до 200 км) использовались приемники, снабженные ненаправленными антеннами. Применение направленных антенн позволяло оценить характеристики процесса в конкретном облаке. При этом, конечно, учитывалось взаимное расположение и тенденции развития остальных облаков в этом районе. Для этого с помощью РЛС_{см} выполнялись вертикальные радиолокационные разрезы облачности через 10—12° по азимуту, одновременно устанавливались в тех же азимутах антенные системы РЛС_{см} и приемного центра и производилась регистрация НТРИ. Периодически выполнялись также горизонтальные разрезы облачности. В качестве характеристик грозовой активности были выбраны: число пакетов импульсов радиоизлучения на фиксированной частоте f за минуту (N_f) и интегральная (суммарная за минуту) длительность существования пакетов импульсов радиоизлучения молниевых разрядов.

($T_1 = 1/M \sum_{i=1}^M \tau_i$, где τ_i — длительность существования пакета импульсов молниевых радиоизлучения, M — число пакетов импульсов радиоизлучения на интервале осреднения).

Для примера приведем пространственные панорамы характеристик грозовой облачности 6 июня 1982 г. (рис. 3.29). В правой

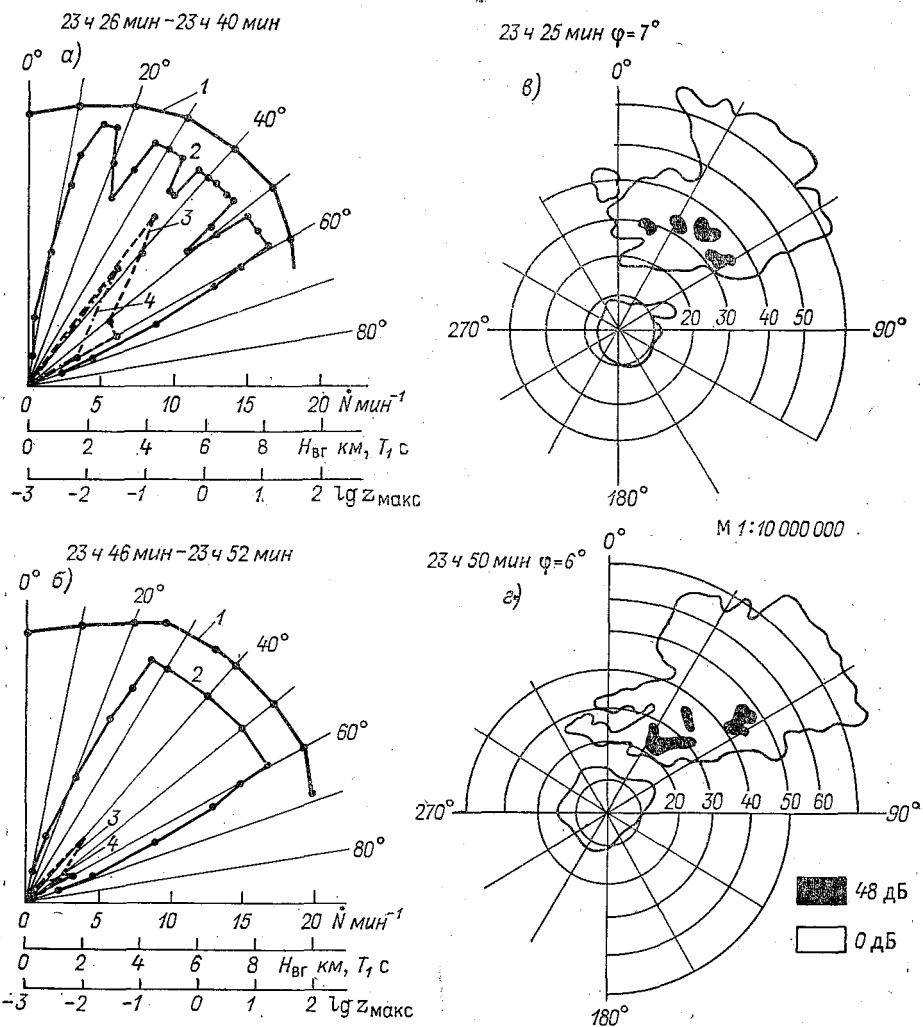


Рис. 3.29. Пространственная панорама характеристик грозовой облачности 6 июня 1982 г. по данным пассивной радиолокации (на частоте $f = 155$ МГц) и МРЛ.

а, б — радиолокационные характеристики грозового процесса: 1 — высота верхней границы облачности $H_{вг}$, 2 — логарифм максимальной радиолокационной отражаемости $\lg z_{\text{макс}}$, 3 — частота пакетов импульсов НТРИ в диапазоне 155 МГц N_{155} , 4 — интегральная длительность существования пакетов импульсов НТРИ молниевых разрядов T_1 ; в, г — горизонтальные разрезы облачности; φ — угол места.

части рисунка (в, г) представлены горизонтальные разрезы облачности. Радиолокационные характеристики грозового процесса (а, б) показывают, что высота верхней границы облачности $H_{вг}$ практически не изменяется в широком секторе по азимуту (от 5 до 60°), в то время как параметры N_f и T_1 имеют резко выраженный максимум в более узком секторе (а, б). В этом облаке вначале существовало четыре локальных конвективных ячейки на расстоянии от 25 до 40 км от РЛС (см. 3.29 в), а максимальная частота пакетов импульсов НТРИ ($\dot{N}_{155} = 12 \text{ мин}^{-1}$) и, следовательно, наибольшая опасность для летательных аппаратов связана лишь с одной из этих ячеек (азимут 40°, дальность 36 км). Пространственная панорама, представленная в нижней части рисунка (б, г) и выполненная через несколько минут после первой, показывает, что произошла трансформация облака и вместо четырех ячеек наблюдается три. Облачность занимает теперь сектор 25—60°, в то время как параметры $\dot{N}_{155}$ и T_1 имеют два максимума в более узких секторах. Одна из конвективных ячеек располагается на расстоянии от 20 до 30 км от РЛС в секторе 30—50°, а $\dot{N}_{155} = 7 \text{ мин}^{-1}$ наблюдается в азимуте 40°. Другая конвективная ячейка, расположенная в азимуте 55° на расстоянии 45 км, имеет меньшую частоту пакетов импульсов НТРИ ($\dot{N}_{155} = 3 \text{ мин}^{-1}$) и меньшую длительность существования пакетов, а значит, и меньшую опасность для летательных аппаратов.

Таким образом, пространственные панорамы, полученные с помощью пассивной радиолокации в сочетании с данными РЛС_{см}, позволяют выделить наиболее грозоактивные направления (азимуты) в районе наблюдений.

Выводы

Немолниевое нетепловое радиоизлучение наблюдается в широком диапазоне длин волн как до появления первых молниевых разрядов, так и в стадии активной грозы, а также на стадии диссипации грозового облака.

Это излучение в СВ-диапазоне появляется, как правило, задолго до первых молниевых разрядов и служит сигналом возможного приближения грозовой ситуации.

В СВ-диапазоне излучение представляет собой пакеты кратковременных импульсов длительностью сотни микросекунд. Длительность всего пакета импульсов составляет десятые доли секунды, а число пакетов может достигать до нескольких десятков в минуту.

Мощность источников немолниевого НТРИ в СВ-диапазоне в предгрозовой стадии составляет единицы милливатт, а во время грозы — десятки мВт, достигая в отдельных случаях 100—120 мВт.

Немолниевое НТРИ в метровом диапазоне обладает относительной стационарностью интенсивности и имеет форму кратковременных импульсов, следующих друг за другом с характерным временным интервалом 10—20 мкс. Максимальная мощность

источников немолниевых НТРИ в метровом диапазоне составляет десятые доли милливатт.

НТРИ молниевых разрядов наблюдается на фоне непрерывающегося немолниевых НТРИ и отличается от него значительно большей интенсивностью. В метровом диапазоне радиоволн мощность источников этого излучения составляет единицы милливатт, достигая в некоторых случаях десятков милливатт.

Данные пассивной радиолокации и наблюдений с помощью МРЛ могут использоваться для определения тенденции и стадии развития грозового процесса, потенциальной грозоопасности, по ним можно строить пространственно-временные панорамы характеристик грозовой облачности.

ГЛАВА 4

АКТИВНО-ПАССИВНАЯ РАДИОЛОКАЦИЯ ГРОВОВЫХ И ГРОЗООПАСНЫХ ОЧАГОВ

В процессе исследований по мере накопления опыта работы и материалов эксперимента появлялись новые задачи, изменялся и модернизировался состав аппаратуры, совершенствовалась методика проведения наблюдений. В последние годы сложилась единая система активно-пассивной радиолокации грозовых и грозоопасных очагов, создан большой радиотехнический комплекс, включающий в себя несколько радиолокационных станций, радиоприемную аппаратуру, агрегаты электропитания, систему служебной связи и прочее.

4.1. Аппаратура и методика измерений

Структурная схема учебно-научного полигона ЛГМИ приведена на рис. 4.1. Полигон был создан в Алазанской долине (Восточная Грузия) в едином комплексе с экспедицией Института геофизики АН Грузии, а также с Военизированной службой активного воздействия на гидрометеорологические процессы Грузинского республиканского управления по гидрометеорологии. Внешний вид части полигона показан на рис. 4.2.

Для наблюдений за облаками, определения и регистрации их радиолокационных параметров вначале использовалась РЛС_{см} типа ПРВ-10, которая затем была дополнена стандартным метеорологическим радиолокатором типа МРЛ.

Для наблюдений за грозовыми разрядами и определения параметров радиоэха молний применялась аппаратура, созданная на базе радиолокационных станций метрового (РЛС_м) и дециметрового (РЛС_{дм}) диапазонов типа П-12 и П-15 соответственно.

Для наблюдений за радиоизлучением облаков помимо радиоприемного центра был создан передвижной радиоприемный комплекс с аппаратурой, аналогичной аппаратуре радиоприемного центра. При мощных фронтальных грозах с помощью одной из РЛС_м осуществлялись наблюдения за эволюцией зон грозовой активности, при этом вторая РЛС_м использовалась для построения пространственных панорам грозовой деятельности. Эта же РЛС_м в совокупности с передвижным радиоприемным комплексом применялась для дополнительных наблюдений за НТРИ при наличии

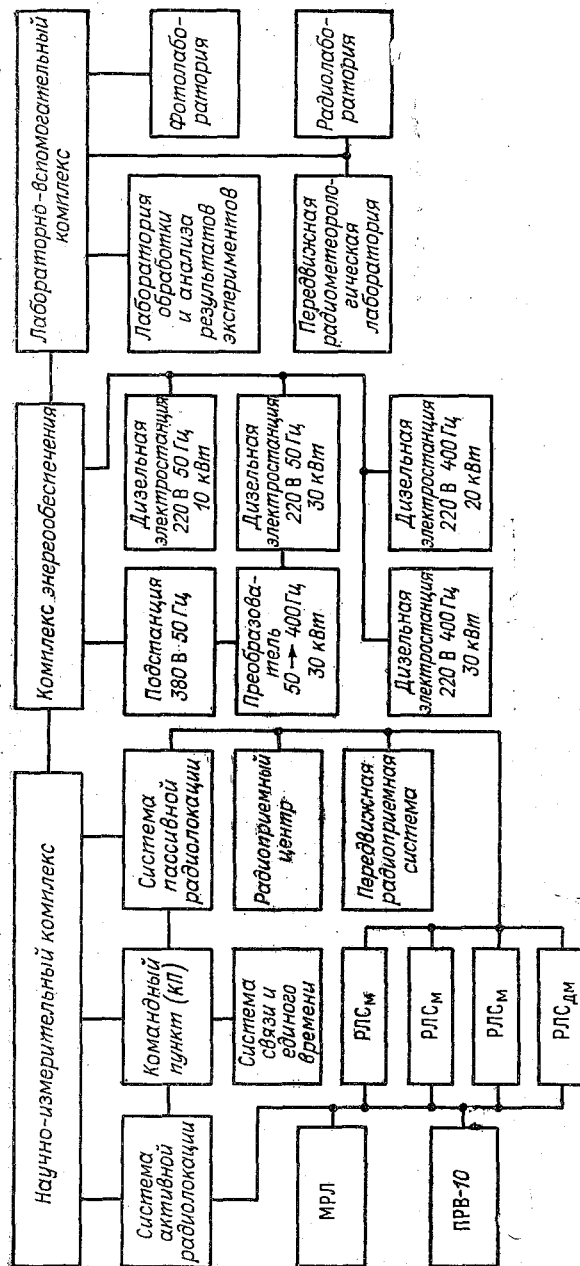


Рис. 4.1. Структурная схема учебно-научного полигона ЛГМИ в Алазанской долине (Восточная Грузия).

нескольких мощных конвективных облаков, расположенных в разных азимутах. На передвижном радиоприемном комплексе отрабатывались оптимальные конструкции антенн, различные способы регистрации и проводились некоторые другие измерения. Этот комплекс совместно с третьей РЛС_м использовался также для создания выносного полигона (второго пункта наблюдений, в 100 км от основного).

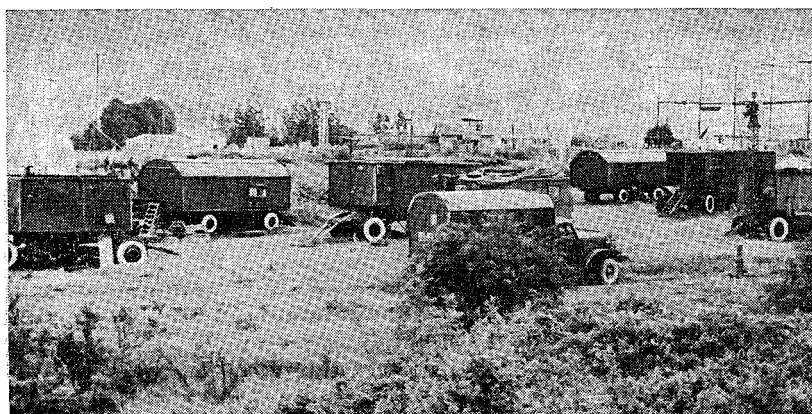


Рис. 4.2. Вид части учебно-научного полигона ЛГМИ — ИГ АН Грузии.

На учебно-научном полигоне (УНП) имелись также дизельные электростанции для автономного электропитания аппаратуры, полевая фотолаборатория, радиолaborатория для ремонта и настройки электронной техники, передвижная радиометеорологическая лаборатория, в состав которой входили комплект радиоприемников, панорамных приставок и радиорелейная станция. На УНП имелись еще два комплекта радиорелейных станций, с помощью которых осуществлялась прямая радиосвязь между основным и выносным полигонами. Общее руководство проведением экспериментальных исследований осуществлялось с командного пункта управления радиотехническим комплексом, на котором располагались выносные индикаторы, блоки привязки к единому времени, радиорелейная станция, магнитофон для записи стенограмм экспериментов. В процессе работы осуществлялась связь через местную АТС с командным пунктом Военизированной службы активного воздействия, экспедицией ИГ АН Грузии. Кроме того, имелись еще и другие лаборатории и помещения, указанные на схеме.

В последнее время была сконструирована система автоматизированной регистрации и оперативной обработки параметров радиолокационных сигналов, отраженных от каналов молниевых разрядов. Блок-схема этой системы приведена на рис. 4.3. Сиг-

нал с выхода приемника РЛС_м подается на блок предварительной обработки информации (ПОИ), в котором осуществляется последовательное сложение сигналов РЛС_м по градациям дальности (через каждый километр), а затем последовательное вычитание этих же сигналов из общей суммы. Тем самым производится предварительная селекция полезного сигнала от помех. Затем эта

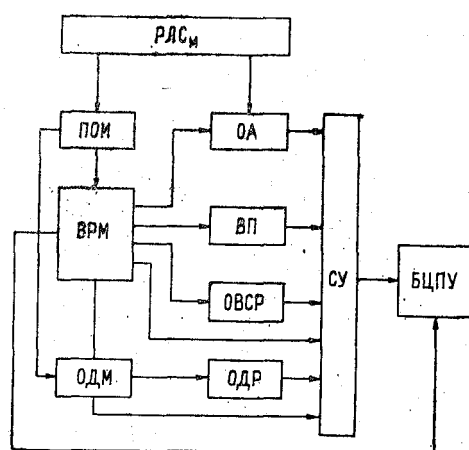


Рис. 4.3. Блок-схема системы автоматической регистрации и оперативной обработки параметров радиолокационных сигналов, отраженных от каналов молниевых разрядов.

информация поступает на блок выделения радиосигнала молнии (ВРМ), в котором она анализируется и в котором происходит окончательное выделение сигналов, отраженных от каналов молниевых разрядов, из всей совокупности сигналов, принимаемых РЛС_м (сигналов радиоизлучения, помех от радиостанций, радиоотражений от местных предметов и т. п.). С блока ВРМ выводятся на печать данные об интенсивности разряда, точнее об амплитудах радиосигнала молний. Этот блок управляет работой всей автоматической системы. Блок определения дальности до молниевых разрядов (ОДМ) по сигналам, поступающим с ПОИ и ВРМ, формирует данные о расстоянии до разряда. По информации с РЛС_м и по данным ВРМ в блоке определения азимута (ОА) формируются данные об азимуте, в котором работает РЛС_м. В блоке временной привязки (ВП) по команде с блока ВРМ формируются данные о времени возникновения разряда. Блок определения времени существования разряда (ОВСР) вырабатывает информацию о длительности сигнала, отраженного от ионизированного канала молнии. По данным, поступающим с ОДМ, в блоке определения длины разряда (ОДР) формируются данные о длине проекции канала разряда на линию наклонной дальности. Полезная информация с блоков ВРМ, ОДМ, ОА, ВП, ОВСР и ОДР через согласующее устройство (СУ) поступает на быстродействующее цифropечатающее устройство (БЦПУ), которое ре-

гистрирует данные о молниевом разряде в цифровом виде по мере их поступления с СУ.

Система автоматической регистрации и оперативной обработки параметров радиолокационных сигналов, отраженных от каналов молниевых разрядов, решает вопрос об автоматизации процесса обработки результатов эксперимента. Эта система может работать в ждущем режиме, позволяет автоматически сигнализировать о появлении грозоопасной ситуации и очень эффективна при слабых грозах с малой интенсивностью процессов.

Как уже было сказано в предыдущих главах, при проведении экспериментальных исследований применялись различные методики наблюдений, в зависимости от конкретной аэросиноптической обстановки и поставленной задачи. В одних случаях исследовалась эволюция зон электрической активности после того, как эта активность обнаруживалась на ранней стадии (согласовано по сигналам НТРИ конвективных облаков на частоте 1,7 МГц и по данным МРЛ). В других случаях основное внимание уделялось изучению пространственно-временного распределения грозовых очагов в районе полигона. Во время наблюдений в зависимости от ситуации методики могли незначительно изменяться или сменять друг друга. Выбор конкретной методики и объекта измерений производился руководителем эксперимента. Работа проводилась, как уже было сказано в главе 3, в двух режимах: дежурном и оперативном. Дежурный режим применялся при наблюдении за развитием облака на стадии, предшествующей появлению молний (см. гл. 3). При увеличении интенсивности НТРИ, а также при возрастании таких радиолокационных параметров облачности, как отражаемость и вертикальная мощность, радиотехнический комплекс переходил в оперативный режим работы, при котором включалась вся измерительная аппаратура. Для получения пространственно-временного распределения грозовой активности в облачности применялась методика, описанная в главе 2, кроме того, непрерывно производилась регистрация НТРИ. После прекращения разрядов молний антенные системы РЛС_м и радиоприемного центра ориентировались на зону максимальной отражаемости данного облака, определенную с помощью МРЛ. Одновременно продолжалась регистрация радиолокационных параметров облачности и радиоизлучения до распада облака и прекращения НТРИ либо до удаления облака на слишком большое расстояние.

При анализе результатов использовались данные радиозондирования атмосферы на полигоне, а также сведения о погодных условиях на большой территории (синоптические карты «кольцовки»).

4.2. Результаты активно-пассивной радиолокации грозовых и грозоопасных очагов

Совместные наблюдения за облачностью с помощью МРЛ, за НТРИ конвективных облаков и молниевых разрядов с помощью

средств пассивной радиолокации и за сигналами, отраженными от каналов молниевых разрядов, с помощью РЛС являются шагом вперед в развитии методов дистанционного зондирования атмосферы.

Возможности активно-пассивной радиолокации лучше всего можно проиллюстрировать на конкретном примере. Для этого подробно опишем один из уникальных экспериментов, проведенных 17 июня 1983 г. во время сильной грозы. Аппаратура была включена в дежурном режиме в 11 ч 30 мин местного декретного времени, но только после 14 ч стало наблюдаться очень слабое НТРИ на частоте 1,7 МГц. Облачности в радиусе до 300 км обнаружено не было (не наблюдалось засветок на экранах МРЛ). На рис. 4.4 показаны изменения во времени радиолокационных параметров облачности, сигналов радиоэха молниевых разрядов и сигналов НТРИ. Возникновение радиоизлучения в СВ-диапазоне (на частоте 1,7 МГц) послужило сигналом приближения грозовой ситуации. Начиная с 14 ч 50 мин частота пакетов импульсов НТРИ обрела устойчивую тенденцию роста (кривая 1). В 15 ч 40 мин появилось радиоизлучение в УКВ-диапазоне (на частоте 80 МГц), его интенсивность нарастала, поэтому вскоре к наблюдениям были подключены средства активной радиолокации сантиметрового и метрового диапазонов. В 16 ч 20 мин на расстоянии $R = 148$ км от РЛС_м в азимуте $A^* = 286^\circ$ был обнаружен грозовой очаг с частотой разрядов $\dot{N} = 50$ мин⁻¹ (приведены координаты точки, в которой наблюдалась максимальная частота грозовых разрядов, т. е. координаты центра ядра грозового очага). На рис. 4.5 показаны траектории центров зон максимальной отражаемости от гидрометеоров и зон максимальной частоты молний. Облачность смещалась с запада на восток, пройдя в непосредственной близости к пункту наблюдения. Гроза наблюдалась в облачной системе, в которой выделялись две конвективные ячейки (А и Б). Центр (точка максимальной отражаемости) одной из них (А) в 16 ч 55 мин имел координаты $R = 109$ км, $A^* = 275^\circ$, отражаемость в центре $\eta = 4 \cdot 10^{-8}$ см⁻¹ и наблюдалась тенденция ее роста. Центр второй конвективной ячейки (Б), с которой был связан грозовой процесс, находился на расстоянии 121 км ($A^* = 278^\circ$, $\eta = 3,3 \cdot 10^{-8}$ см⁻¹). В это время ядро грозового очага имело координаты $R = 139$ км, $A^* = 275^\circ$ и частота молниевых разрядов в нем достигла $\dot{N}_m = 50$ мин⁻¹. Около 18 ч 00 мин интенсивность грозы заметно увеличилась. К этому времени в облачной системе возникли еще две конвективные ячейки В и Г. Наиболее развитой из четырех ячеек осталась зона А. В 18 ч 00 мин центры этих зон имели следующие координаты: $R = 80$ км, $A^* = 280^\circ$ (зона А); $R = 104$ км, $A^* = 295^\circ$ (зона Б); $R = 123$ км, $A^* = 266^\circ$ (зона В); $R = 93$ км, $A^* = 264^\circ$ (зона Г). В ядре грозового очага ($R = 86$ км, $A^* = 281^\circ$) частота молниевых разрядов достигла $\dot{N}_m = 80$ мин⁻¹.

Рост интенсивности грозы проявился в увеличении частоты молний и, что не менее важно, в увеличении частоты мощных

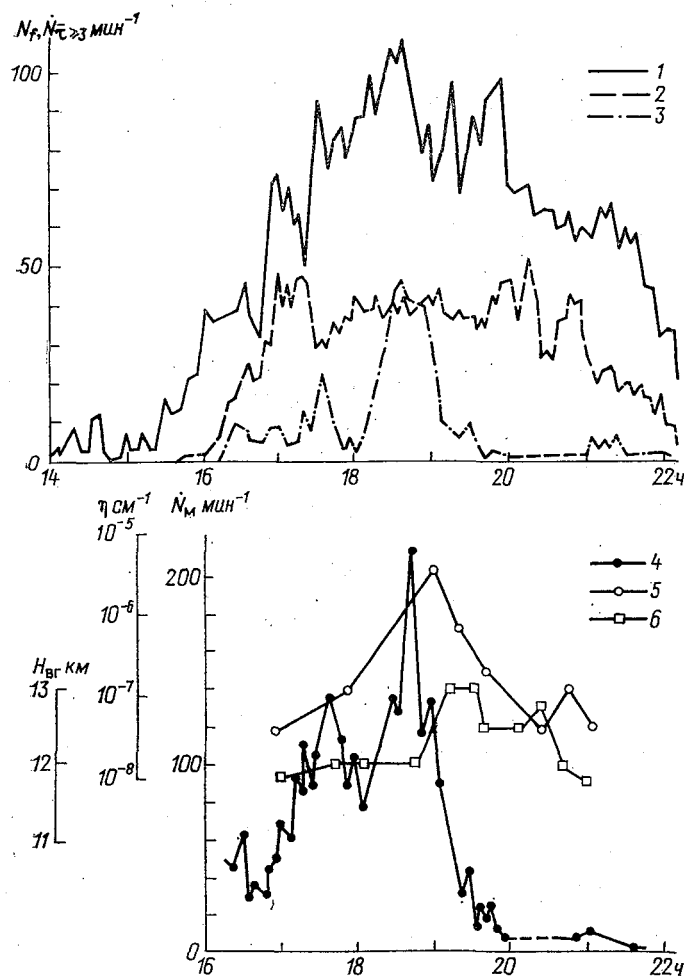


Рис. 4.4. Трансформация во времени грозового процесса 17 июня 1983 г. по данным наблюдений средствами активно-пассивной радиолокации.

1, 2 — частота пакетов импульсов радиоизлучения соответственно в СВ-диапазоне $\dot{N}_{1,7}$ и УКВ-диапазоне $\dot{N}_{80}$, 3 — частота молниевых разрядов с длительностью радиоэха более 0,3 с $\dot{N}_{\tau \geq 3}$, 4 — частота молниевых разрядов $\dot{N}_M$, 5 — максимальная радиолокационная отражаемость облачности η , 6 — высота верхней границы радиоэха облака $H_{вг}$.

Пунктирная часть кривых 3 и 4 означает отсутствие данных о частоте молниевых разрядов из-за маскировки полезных сигналов мешающими отражениями от местных предметов.

молниевых разрядов, характеризующихся большой длительностью. Это иллюстрируется кривой 3 на рис. 4.4, отображающей изменение во времени частоты молний, длительность радиоэха которых более 0,3 с. Отметим, что время, в течение которого ионизированный газ в канале молниевых разрядов способен отражать радиоволны, косвенно связано с энергетическими характеристиками раз-

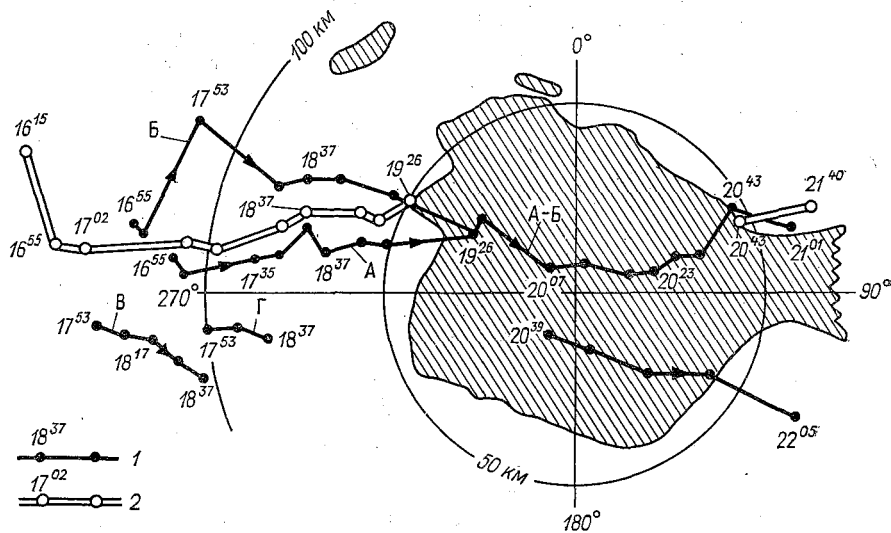


Рис. 4.5. Траектории зон максимальной отражаемости облаков (1) и ядра грозового очага (2).

А, Б, В, Г — конвективные ячейки. Числа у кривых означают местное декретное время (ч мин). Штриховкой обозначена область значительного радиоэха (в метровом диапазоне) от местных предметов, где обнаружение каналов молний затруднено.

ряда. Наиболее длительные отражения связаны с многоударными молниевыми разрядами, характеризующимися большим количеством заряда, протекающего по каналу, и нейтрализацией значительного электрического момента в облаках [66, 188].

На рис. 4.6 представлен фрагмент пространственно-временного распределения интенсивности потока событий (в данном случае — молний) в период максимального развития грозового процесса и начала его ослабления. Наблюдавшийся в этот период грозовой очаг характеризовался наличием очень мощной электрически активной ячейки (ядра грозового очага) протяженностью 50—60 км. В 18 ч 37 мин гроза достигла апогея своего развития: в ее ядре $\dot{N}_m = 120 \text{ мин}^{-1}$, а в целом по очагу $\dot{N}_m = 213 \text{ мин}^{-1}$ (см. рис. 4.4, кривая 4). По мере приближения облачности для нахождения местоположения максимума разрядов производилось дискретное сканирование антенной системы РЛС_м, после чего эта система устанавливалась неподвижно в направлении на центр ядра грозо-

вого очага. Моменты смены азимута наблюдений указаны стрелками над осью абсцисс.

На рис. 4.7 представлены наблюдавшиеся в момент максимума грозового процесса поле облачности (сплошные линии) и поле грозовой активности (пунктирные линии). Видно, что в это время по-прежнему наблюдались четыре зоны повышенной отражаемо-

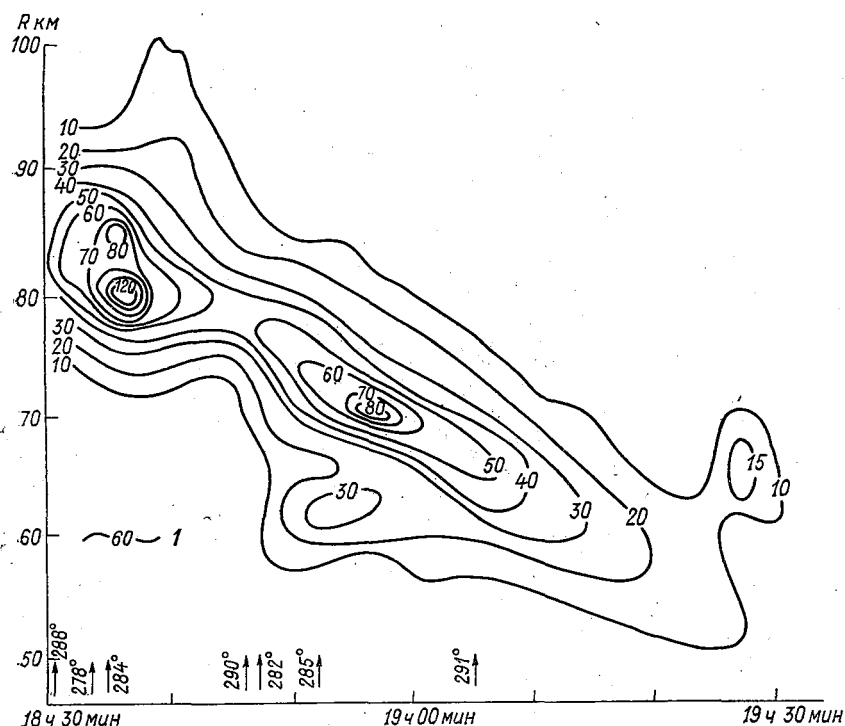


Рис. 4.6. Пространственно-временное распределение грозовой активности. I — изолинии частоты молниевых разрядов (мин^{-1}); R — расстояние от РЛС_М до канала молнии.

Стрелки определяют момент изменения азимутального угла установки антенны РЛС_М, а числа возле стрелок — азимут установки в градусах.

сти, отмеченные на рис. 4.5 как зоны А, Б, В и Г. Их характеристики приведены в табл. 4.1 (здесь R — расстояние от МРЛ до точки максимальной отражаемости облака).

Отражаемость зон А и Б имела в момент наблюдения (18 ч 37 мин) тенденцию роста и достигла максимума ($2,3 \cdot 10^{-6} \text{ см}^{-1}$) в 19 ч 26 мин, когда сближающиеся зоны А и Б слились в одну, обозначенную на рис. 4.5 как зона А—Б. Зоны В и Г быстро диссипировали. Грозовая деятельность наблюдалась в значительной (в основном в тыловой) части облака. Ядро грозового очага располагалось на расстоянии 77 км в азимуте 284° между двумя локальными максимумами отражаемости (между зонами А и Б).

Отклонение центра грозового очага от максимума отражаемости зоны А составляло 9 км, а от зоны Б — 14 км. Наблюдался также локальный максимум грозовой активности на периферии облака, в 14 км от зоны Г (позади нее), однако интенсивность грозового процесса в этой электрически активной ячейке была существенно (в 12 раз) меньше, чем в ядре грозового очага.

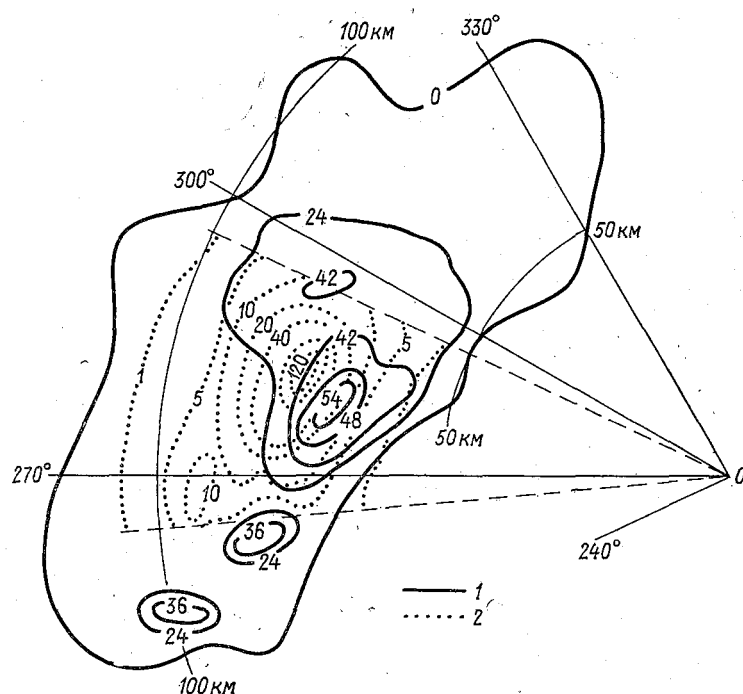


Рис. 4.7. Радиолокационный разрез облака (под углом места $\varphi = 3^\circ$) и местоположение в этом облаке грозового очага 17 июня 1983 г. 17 ч 37 мин.

1 — изолинии мощности отраженного сигнала (дБ), 2 — изолинии частоты молниевых разрядов (мин⁻¹).

На рис. 4.8 показаны профили отражаемости, частоты разрядов и времени существования сигналов, отраженных от каналов молний, в азимуте максимума частоты молний. Видно (кроме расхождения в пространстве максимумов N_m и η), что наибольшая частота следования разрядов находится в области, где отражаемость меняется довольно плавно, т. е. расположена не там, где велик горизонтальный градиент отражаемости. Это расходится с данными [165, 167, 168]. Интересно, что максимальные по длительности существования разряды находятся на периферии облака, число их в единицу времени невелико (около 5 в 1 мин), но эти разряды выходят даже за внешнюю границу радиозахв

Таблица 4.1

Характеристики зон повышенной отражаемости.
17 июня 1983 г.

Зона	Дальность, R км	Азимут, A^* град.	Отражаемость, η см $^{-1}$
А	71	280	$1,2 \cdot 10^{-6}$
Б	79	295	$2,2 \cdot 10^{-7}$
В	83,5	273	$6,3 \cdot 10^{-8}$
Г	100	257	$9,1 \cdot 10^{-8}$

лака. Приведем еще вертикальный радиолокационный разрез облака, выполненный с помощью МРЛ в 19 ч 19 мин (рис. 4.9). Рядом показано распределение по дальности частоты разрядов. Здесь также видно, что максимум разрядов происходит в тылу облака и разряды выходят далеко за границу зоны радиоэха осадков и

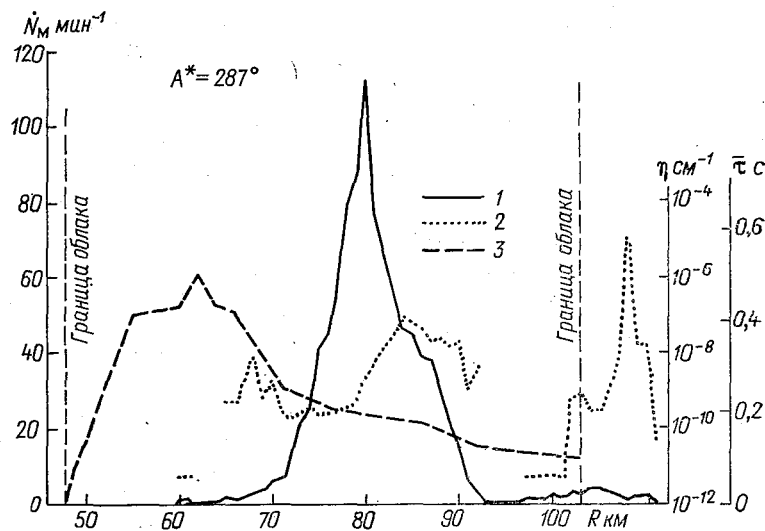


Рис. 4.8. Распределение (по дальности R) частоты разрядов молний $\dot{N}_m$ (1), средней длительности сигналов, отраженных от каналов молний $\bar{\tau}$ (2) и радиолокационной отражаемости η (3) в облаке, представленном на рис. 4.7.

вообще радиоэха облака. Последнее обстоятельство, по-видимому, объясняется тем, что зона максимальной радиолокационной отражаемости, расположенная в ближней к пункту наблюдений части облака, экранирует тыловую часть настолько сильно, что радиолокационная граница облака оказывается ближе, чем действительная, т. е. МРЛ определяет геометрические размеры облака с ошибкой.

После 18 ч 37 мин интенсивность грозового процесса уменьшилась, несмотря на продолжающийся рост (до 19 ч 00 мин) максимальной отражаемости и (до 19 ч 15 мин) высоты верхней границы облака. Апогей электрической активности совпал в данном случае с максимальной скоростью нарастания отражаемости в зоне локального максимума. Спад грозовой активности происходил сравнительно быстро, и в течение 10 мин частота разрядов

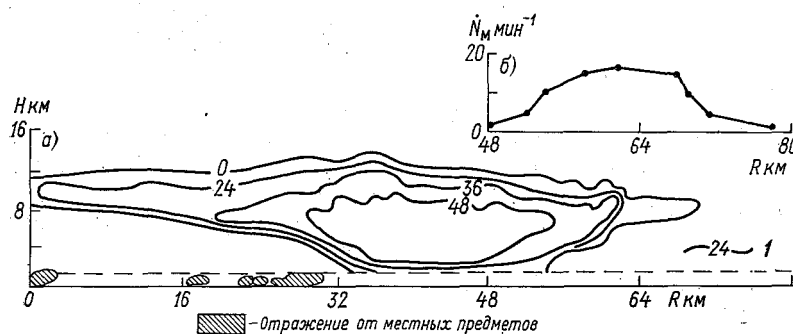


Рис. 4.9. Вертикальный разрез облака H (а) и распределение (по дальности R) в этом облаке частоты молний $\dot{N}_m$ (б).
 I — изолинии мощности отраженного сигнала (дБ).

в целом по очагу снизилась примерно в 2 раза (до 108 мин^{-1}). Около 19 ч наблюдалось кратковременное увеличение $\dot{N}_m$, при этом отражаемость облака уменьшилась, но отмечалось некоторое увеличение высоты верхней границы облака.

Данный эксперимент является хорошей иллюстрацией того, что в случае сложного рельефа местности (Восточная Грузия) активно-пассивная радиолокация оказывается более информативной, чем активная или пассивная по отдельности. Действительно, после 19 ч ядро грозового очага постепенно входило в зону, в которой сигналы, отраженные от «местных предметов», начинали сильно экранировать радиоэхо от молний (см. рис. 4.5). Как следствие этого, снизилось количество разрядов, регистрируемых РЛС_м. На самом деле грозовая активность уменьшалась гораздо медленнее, что подтверждается малой изменчивостью интенсивности НТРИ, как это видно на рис. 4.4. Около 21 ч, когда вновь появилась возможность регистрировать молнии с помощью активной радиолокации (облачность, пройдя над пунктом наблюдения, удалилась на достаточное расстояние), гроза в исследуемом облаке почти затихла, но ослабление электрической активности наступило гораздо позднее. Интенсивность НТРИ продолжала оставаться сравнительно высокой, хотя и отмечалось ее резкое ослабление. По-видимому, в это время облако продолжало оставаться грозоопасным для летательных аппаратов (в смысле провокации разряда). Заметим, что после прекращения молний спад интенсив-

ности НТРИ происходил быстрее на более высоких частотах, в последнюю очередь исчезло радиоизлучение в СВ-диапазоне.

Как уже указывалось, на рис. 4.4 представлено также изменение частоты разрядов с длительностью радиоэха более 0,3 с. Во время этой грозы разряды большой длительности (длительность грозы, как правило, пропорциональна количеству главных или возвратных ударов в одной вспышке молнии, см., например, [188]) наблюдались на всех стадиях грозовой деятельности. В других грозах они появлялись лишь в заключительной стадии, когда общее число разрядов заметно уменьшалось. Частота длительных разрядов на протяжении всей рассматриваемой грозы менялась незначительно, и основной вклад в увеличение общего количества разрядов в единицу времени внесли мелкомасштабные разряды относительно малой длительности.

Когда разряды перестали регистрироваться, облачность занимала еще довольно большую площадь, но постепенно размывалась. Высота верхней границы к концу наблюдений составляла 11 км, а максимальная отражаемость облака $\eta = 1,8 \cdot 10^{-7} \text{ см}^{-1}$.

4.3. Использование численного моделирования грозо-градового процесса при анализе результатов активно-пассивной радиолокации облачности

Подробные экспериментальные данные о трансформации характеристик грозового процесса (полученные 17 июля 1983 г.) позволили сопоставить результаты наблюдений с численной моделью облака и сделать некоторые обобщения.

Модель конвекции, использованная для расчета, была неоднократно апробирована при анализе ряда других ситуаций, в основном градовых [44, 87, 179, 214, 215]. Схема включает в себя расчет квазистационарной стадии развития ячейки конвекции на основе струйных представлений о процессе. Параллельно с конвекцией на основе кинетических уравнений коагуляции для трехфазной среды подробно рассчитываются спектры облачных капель и кристаллов. Последние рассматриваются как потенциальные зародыши капель и градин, при расчете траекторий и размеров которых формируются поля радиолокационной отражаемости и осадков на земле.

Для расчета необходимы данные радиозондирования атмосферы и скорость движения облака, которая обычно отождествляется со скоростью смещения локальных максимумов радиолокационной отражаемости. В данном случае скорость смещения в период наблюдений (с 16 ч 50 мин до 20 ч 00 мин) колебалась от 20 до 60 км/ч. Соответственно она варьировалась и при моделировании. Использовались также данные температурно-ветрового радиозондирования атмосферы за 15 ч в районе полигона.

Результаты расчетов некоторых параметров конвективных ячеек при скоростях 30 и 60 км/ч представлены на рис. 4.10 (ось x совпадает с направлением движения облака). Для облака, дви-

жущегося со скоростью 30 км/ч, представлены распределения с высотой осредненных по сечению струи вертикальной составляющей скорости воздушного потока и удельной водности при естественном развитии процесса (кривая $S_w^{(1)}$) и при внесении кристаллизующего реагента с концентрацией 10^2 г^{-1} (кривая $S_w^{(2)}$). Здесь

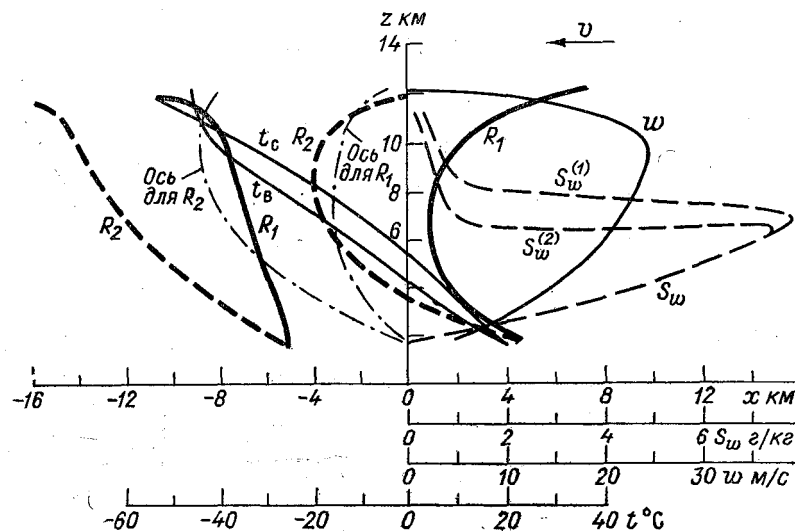


Рис. 4.10. Результаты расчета некоторых термодинамических характеристик облака для грозового процесса 17 июня 1983 г. при скоростях движения (v) облака 30 км/ч (сплошные кривые) и 60 км/ч (пунктирные кривые).

t_c — температура в струе, t_a — температура в среде, w — вертикальная составляющая скорости воздушного потока, S_w — удельная водность (при естественном развитии процесса — $S_w^{(1)}$, при внесении кристаллизующего реагента — $S_w^{(2)}$), R_1 и R_2 — соответственно границы облака для скорости v , равной 30 и 60 км/ч; геометрические контуры восходящего потока (ось и границы) даны в проекции на плоскость xOz .

же показана стратификация воздуха в окружающей среде и в облаке. Несмотря на большой горизонтальный сдвиг ветра с высотой (более $5 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$), имела место интенсивная конвекция и вертикальная составляющая скорости воздушного потока достигла $w = 25 \text{ м/с}$. Отмечается большая водность (до $8 \cdot 10^{-3} \text{ г/кг}$, или до $4,5 \text{ г/м}^3$), которая явилась следствием высокой температуры на высоте уровня конденсации. Следствием же большой водности является высокая скорость коагуляционных и кристаллизационных процессов, что в свою очередь ведет (помимо роста частиц осадков) к интенсивному разделению зарядов и нарастанию грозовой активности. Сказанное подтверждается структурой расчетного поля радиолокационной отражаемости (рис. 4.11), которая соответствует классической схеме для суперъячейкового грозо-градового

облака: имеются зона повышенной отражаемости и навес радиоэха с областью слабого радиоэха под ним. Максимум расчетной радиолокационной отражаемости (для $\lambda = 3,2$ см) $\eta = 5,5 \cdot 10^{-7}$ см $^{-1}$, что практически совпадает с результатами наблюдений. Оценка НТРИ с помощью методов, описанных в работах [71, 99], приводит к величинам, в разумных пределах соответствующим данным экспериментальных наблюдений в предгрозовом и грозовом облаке.

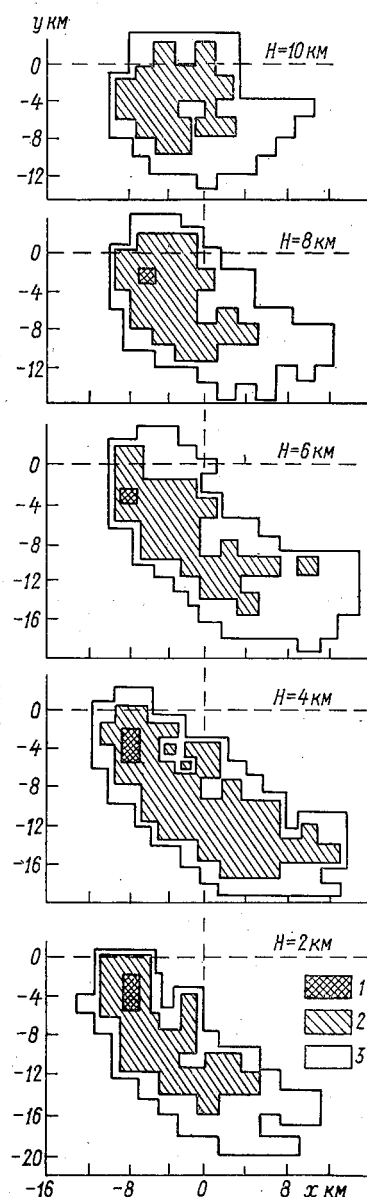
Выводы

Активно-пассивная радиолокация позволяет заблаговременно предупреждать о приближении грозы, в течение длительного времени вести непрерывные наблюдения за грозой в радиусе до 200 км, подробно прослеживать структуру грозовых очагов, их трансформацию, определять интенсивность грозового процесса в целом по всему очагу и в отдельных его частях.

Комплексное использование средств активной и пассивной радиолокации существенно повышает эффективность контроля электрического состояния облаков по сравнению с косвенными методами оценки, использующими только данные об отражаемости гидрометеоров. Особенно заметны преимущества комплексного использования средств наблюдения в случае сильно пересеченного рельефа местности.

Рис. 4.11. Расчетное поле радиолокационной отражаемости 17 июня 1983 г.: горизонтальные сечения на разных высотах H для варианта естественного развития процесса при скорости движения облака $v = 30$ км/ч.

Отражаемость, см $^{-1}$: 1) $\eta \geq 10^{-7}$, 2) $10^{-7} > \eta \geq 10^{-9}$, 3) $10^{-9} > \eta > 10^{-11}$.



Подобные наблюдения более репрезентативны, чем выполненные с помощью стандартного метеорологического радиолокатора. Применение МРЛ даже в комплексе с грозопеленгаторами-дально-

мерами не дает такой надежной, достоверной и достаточно полной информации об электрической активности облачности.

Активно-пассивную радиолокацию можно с успехом использовать для контроля электрической активности облаков при отработке методов и средств искусственного регулирования грозовой активности.

Сравнение результатов численного моделирования процессов развития конвективных облаков с результатами активно-пассивных радиолокационных наблюдений показывает достаточно удовлетворительное совпадение расчетных и натурных данных.

ГЛАВА 5

КОМПЛЕКСНЫЙ КРИТЕРИЙ ГРОЗООПАСНОСТИ (ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ)

Как показано в предыдущих главах, радиотехническим средствам активно-пассивной радиолокации доступна информация, в наибольшей степени отвечающая современным требованиям по обеспечению оперативного грозооповещения различных отраслей, в особенности авиации и космонавтики. Однако практическая реализация перспективных систем оперативного грозооповещения (т. е. систем автоматического представления мгновенного и прогностического полей грозовой опасности обзореваемого района) на базе активно-пассивной радиолокации требует разрешения ряда вопросов принципиального характера, касающихся методов обработки и анализа результатов измерений.

Каждая из измеряемых средствами активно-пассивной радиолокации характеристик в определенной мере отражает степень и тенденцию развития грозовой опасности наблюдаемого облака, но ни одна из них не может быть принята в качестве единственного показателя и опасности встречи с молниевыми разрядами, и опасности их искусственного инициирования (провокации). Более того, доли вносимой каждой из измеряемых характеристик информации о степени грозовой опасности существенно неравноценны и меняются по мере развития грозового процесса. Потребитель информации может оперировать лишь одной величиной, количественно характеризующей степень грозоопасности обзореваемого района, причем потери в ее информативности по сравнению с полным набором измеряемых параметров должны быть минимальными. В связи с этим возникает задача построения обобщающей функции измеряемых параметров, значения которой характеризуют степень грозовой опасности в каждой точке наблюдаемого пространства на уровне максимального количества информации, содержащегося в комбинации измеряемых параметров. Подобная функция (назовем ее комплексным критерием грозоопасности) должна учитывать различие в степени информационного вклада каждой из измеряемых характеристик и отслеживать ее перераспределение по мере развития грозового процесса (т. е. быть адаптивной).

Измерительная аппаратура комплекса активно-пассивной радиолокации имеет определенную разрешающую способность по дальности ΔR и азимуту ΔA , поэтому результаты измерений дис-

кретны в пространстве. Этот факт может быть интерпретирован следующим образом: задание поля комплексного критерия грозоопасности (если он будет построен) возможно только на дискретной сетке (в полярной системе координат) с соответствующими значениями критерия в узлах сетки с шагом, не меньшим, чем ΔR по дальности и ΔA по углу. Опрос узловых точек осуществляется последовательно, что приводит к дискретности измерений во времени в каждой из узловых точек. При этом шаг дискретизации Δt не меньше, чем период опроса (2—3 мин). Процессы, происходящие в грозоопасных облаках, имеют значительную временную изменчивость, и за время Δt измеряемые характеристики могут претерпеть существенную трансформацию. Потребителю информации для принятия оперативного решения желательно иметь постоянное представление о грозовой ситуации в обозреваемом пространстве в данный момент и о тенденции ее развития в самое ближайшее время.

Эти обстоятельства приводят к необходимости прогноза измеряемых характеристик как с упреждением 2—3 мин в каждой узловой точке сети на время отсутствия измерений для создания непрерывной картины при последовательных асинхронных измерениях, так и с упреждением до 10 мин для формирования прогностического поля грозоопасности. Интервал 10 мин приблизительно соответствует времени пролета современных ЛА расстояния от дальней границы зоны наблюдения комплекса активно-пассивной радиолокации до точки его установки на аэродроме (т. е. равного максимальному радиусу наблюдения). Подобная задача по своему характеру относится к классу задач текущего сверхкраткосрочного прогноза по результатам измерений «Ноукастинг» (Nowcasting).

Известные методы прогнозирования не могут быть использованы в нашем случае. Результаты активно-пассивных радиолокационных измерений характеристик облаков представляют собой реализации нестационарных случайных процессов. Случайными в рассматриваемых временных масштабах они являются как по своей природе (в силу обилия неконтролируемых и случайных факторов, участвующих в их формировании, влияния турбулентности и др.), так и в результате измерений со случайными ошибками (неизбежно присущими любой измерительной системе). Поэтому предвычисление с помощью детерминированных методов неправомерно. Рандомизация (введение случайного фактора в известную физическую модель) также невозможна из-за отсутствия теоретических моделей, описывающих поведение во времени измеряемых характеристик. Единственная информация, на которую можно рассчитывать при предвычислении измеряемых величин в текущий момент времени, — это предшествующие значения (предыстория). Известные методы экстраполяции случайных процессов, базирующиеся на подобной информации, работают лишь при условии стационарности случайных процессов, т. е. непригодны в нашем случае. В связи с этим возникает задача разработки метода прогнозирования рассматриваемого класса процес-

сов. При этом практический смысл подобный метод может иметь лишь при условии его работы в реальном масштабе времени (в темпе поступления измерительной информации).

Таким образом, стремление к оперативному отражению мгновенного и прогностического полей показателя степени грозовой опасности по результатам активно-пассивных радиолокационных измерений выдвигает на передний план две наиболее общие задачи:

- 1) создание и отработка методики построения комплексного критерия грозоопасности, количественно выражающего потенциальную опасность встречи и провокации молниевых разряда ЛА в обозреваемом пространстве;

- 2) создание и отработка методики прогнозирования на короткие временные интервалы измеряемых параметров грозоопасных облаков, сохраняющей работоспособность в условиях априорной неопределенности, нестационарности и наличия измерительных ошибок.

При этом предполагается использование мини- и микро-ЭВМ, (а в дальнейшем — специализированного микропроцессорного устройства) в комплексе с измерительными устройствами с организацией выдачи результатов в темпе измерений.

Целью настоящей и следующей глав является физико-математическое обоснование и алгоритмическая реализация методов решения указанных задач, а также проверка разработанных методик на модельных расчетах по данным наблюдений за реальными грозowymi ситуациями.

5.1. Характеристики грозоопасности

Рассмотрим понятие грозоопасности в связи с задачей оперативного обеспечения безопасности и экономичности полетов.

При нахождении ЛА в зоне повышенной грозовой активности теоретически могут возникнуть два наиболее общих типа опасных ситуаций:

- 1) встреча ЛА с молниевыми разрядами по трассе полета, когда пересекаемая область пространства находится в стадии активной грозовой деятельности и независимо от присутствия ЛА происходят естественные молниевые разряды;

- 2) провокация (иницирование) ЛА молниевых разрядов, когда пересекаемая область пространства находится в предгрозовой (послегрозовой) стадии и молниевые разряды еще (уже) не происходят, однако имеют место процессы электризации и разделения зарядов в облачной массе и возможно локальное усиление поля вследствие внесения проводника — ЛА — и сильного заряжения ЛА при полете в облаках и осадках.

Назовем эти возможности ОВМ (опасность встречи с молниями) и ОПМ (опасность провокации молний).

Кроме этих крайних ситуаций возможны и смешанные (по-видимому, еще более опасные) варианты, когда велика и ОПМ, и ОВМ. Например, если в некоторой области пространства процесс генерации облачных зарядов динамически преобладает над процессом сильноточных атмосферных разрядов, то оказавшийся поблизости объект может и встретиться, и спровоцировать молниевый разряд (ОВМ + ОПМ).

Естественно, такое деление на типы опасностей весьма условно. Однако с точки зрения анализа полноты описания грозового процесса различными измеряемыми параметрами подобная дифференциация представляется целесообразной.

Характер поражения ЛА молнией определяется, во-первых, степенью развития (стадией) грозового процесса, во-вторых, свойствами самого ЛА (типом, конструкцией, формой, материалом, скоростью и др.). Решение задач, связанных со вторым фактором, требует еще значительных экспериментальных и теоретических исследований и в настоящей работе не рассматривается. На данном же этапе (исключив из рассмотрения второй фактор) будем оценивать опасность, потенциально заложенную в самом грозовом процессе, взятом в «чистом виде», для любого типа ЛА. Чтобы подчеркнуть факт абстрагирования от свойств ЛА, опасности встречи с молниями и провокации молний при дальнейшем рассмотрении будем называть потенциальными опасностями: ПОВМ, ПОПМ. Подобное ограничение не является слишком жестким, так как при условии построения количественного показателя степени ПОВМ и ПОПМ задача о влиянии свойств самого объекта на характер поражения его грозой может решаться в рамках такого показателя. Для этого достаточно, например, нахождения предельно допустимых значений показателя степени ПОВМ, ПОПМ, ПОВМ + ПОПМ для каждого конкретного типа ЛА, при которых еще не происходит его поражения (выхода из строя). Возможно и определение областей значений количественного показателя, соответствующих определенному характеру поражения для каждого типа ЛА. Следует отметить, что в рамках подобного показателя могут решаться и другие задачи, в частности, оценка и контроль эффекта активных воздействий на грозовые процессы.

Задача количественного описания степени грозоопасности облачности (в смысле ПОВМ, ПОПМ, ПОВМ + ПОПМ) в районах аэропортов и космодромов весьма актуальна, так как ее решение должно способствовать повышению безопасности и экономичности полетов и служить одним из важнейших факторов, учитываемых при выборе траекторий и трасс полетов.

Рассмотрим, в какой степени отвечают требованиям подобной задачи существующие радиолокационные критерии грозоопасности.

Способность критериев характеризовать грозоопасность в первую очередь определяется способностью отражать грозовое состояние измеряемыми параметрами, на основе которых строятся критерии. Недостатки, присущие методу наблюдения, в полной мере

проявляются в соответствующем ему критерию. Поэтому к существующим в настоящее время критериям грозоопасности, являющимся функциями параметров радиоэха облака в сантиметровом диапазоне, можно отнести сказанное о недостатках грозообнаружения с помощью МРЛ с точки зрения нашей задачи. Такие критерии носят статистически альтернативный характер: по косвенным признакам с некоторой вероятностью утверждается лишь факт наличия или отсутствия грозы, оценка интенсивности процесса не производится.

Иначе говоря, высказывается предположение, есть ПОВМ или нет, а степень этой опасности не определяется. Критерии «не чувствуют» ПОПМ, так как в пред- и послегрозовой стадии параметры радиоэха облака могут быть весьма низкими и пороговое значение критерия не достигается. Границы критических областей параметров радиоэха и зон истинной грозовой активности, как правило, не совпадают во времени и в пространстве. Это означает, что местоположение области и момент возникновения (или ликвидации) ПОВМ может не совпадать с предполагаемыми по критерию.

Под термином «грозоопасность» в имеющихся радиолокационных критериях обычно понимается возможность существования грозы в данной области пространства. В перспективных же системах грозооповещения требуется более широкий смысл термина «грозоопасность» — степень ПОВМ, ПОПМ и ПОВМ + ПОПМ в данной области пространства.

Таким образом, существующие радиолокационные критерии грозоопасности не в полной мере отвечают новым требованиям оценки грозового состояния облачности.

Как уже отмечалось, наиболее полную информацию о грозовом состоянии облачности можно получить с использованием средств активно-пассивной радиолокации. При этом вопрос о наличии или отсутствии грозы решается однозначно благодаря возможности прямой регистрации молниевых разрядов и их параметров. Интенсивность НТРИ на пред- и послегрозовой стадии позволяет на уровне современных представлений судить о степени подготовленности данной области обозреваемого пространства к активной грозовой деятельности.

Естественно, что появление новой, более полной физической информации требует новых критериев грозоопасности, использующих эту информацию.

С этой целью необходимо ввести числовой показатель — некоторую обобщающую функцию измеряемых параметров грозоопасного облака, количественно характеризующую степень грозовой активности каждой точки обозреваемого пространства, — комплексный критерий грозоопасности (ККГ).

Для построения ККГ следует:

1) выбрать параметр или набор параметров из числа измеряемых средствами активно-пассивной радиолокации, несущих информацию о грозоопасности (в указанном выше смысле);

2) подобрать наиболее информативное преобразование (функцию) значений отобранных измеряемых параметров.

Рассмотрим доступные активно-пассивным радиолокационным измерениям параметры с точки зрения вносимой ими информации о грозоопасности.

Вполне естественной и наглядной характеристикой интенсивности грозы может служить частота молниевых разрядов ($\dot{N}$). Однако эта характеристика не может считаться исчерпывающей без учета масштабов $\bar{L}$ (или длительности $\bar{t}$) разрядов (см. гл. 3). Интегральные характеристики, учитывающие частоту и масштабы, физически полностью отражают ПОВМ и могли бы использоваться в качестве критерия ПОВМ. Однако эти величины не отражают ПОПМ (когда $\dot{N} = 0$) и ПОВМ + ПОПМ. Индикатором ПОПМ является собственное НТРИ облачности в различных диапазонах частот ($\dot{N}_f$, где f — частота колебаний в МГц), так как оно сопровождает процессы электризации и разделения зарядов до перехода облачности в грозовое состояние, во время активной грозовой деятельности, а также спустя некоторое время после завершения грозы. Привязать же характеристики НТРИ к конкретным областям пространства в пределах диаграмм направленности антенн приемных устройств без привлечения поля радиозахвата облаков не удастся. Кроме того, параметры сантиметрового радиозахвата ($H_{вг}$, $\lg z_{\max}$) несут информацию о термодинамических характеристиках облачности, развитие которых коррелирует с развитием грозовой активности.

Таким образом, каждый из рассмотренных параметров несет свою долю информации о степени грозовой опасности, потенциально заложенной в самом облаке (причем, в среднем, чем больше значение каждого параметра, тем выше степень опасности), но ни один из них не может быть принят в качестве единственного показателя и ПОВМ, и ПОПМ, и ПОВМ + ПОПМ. Требуемым свойством может обладать взвешенная сумма (линейный агрегат) нормированных значений всех рассмотренных параметров, если весовые коэффициенты (ядро агрегата) выбираются пропорциональными доле вносимой каждым параметром информации о состоянии грозоопасного облака. Подобную функцию можно называть комплексным критерием грозоопасности (ККГ). Следует отметить, что приведенный перечень параметров грозового процесса, подлежащих включению в ККГ, не является окончательным и исчерпывающим. Его нынешний состав обусловлен, с одной стороны, опытом экспериментальных работ на УНП, с другой — аппаратурными возможностями макета комплекса активно-пассивной радиолокации. По мере развития методов активно-пассивной радиолокации грозовых очагов могут быть найдены и другие информативные характеристики, которые должны будут учитываться в ККГ. Однако сам принцип построения ККГ остается неизменным. В настоящей работе (для конкретности) в ККГ включены вышеперечисленные параметры в связи с наличием значительного архива данных их синхронных измерений.

5.2. Математическое обоснование и методика построения комплексного критерия грозоопасности

Математическая задача формулируется следующим образом [31]. В многомерном пространстве наблюдений $R^{(n)}$ имеется случайный вектор наблюдений U (компоненты вектора наблюдений u_i — результаты измерений параметров $\dot{N}$, $\bar{\tau}$, $H_{\text{вг}}$, $\lg z_{\text{макс}}$, $\dot{N}_{1,7}$, $\dot{N}_{30}$, $\dot{N}_{80}$). Вектор наблюдений U характеризуется выборочной оценкой ковариационной матрицы $\hat{Q} = (q_{ij})_n^{(n)}$ и вектора средних $\hat{U} = (\hat{u}_i)_n$. В качестве несмещенных оценок их элементов используются

$$\hat{u}_i = (1/N) \sum_{k=1}^N u_{ik}, \quad i = 1, \dots, n, \quad (5.1)$$

$$\hat{q}_{ij} = \frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N (u_{ik} - \hat{u}_i)(u_{jk} - \hat{u}_j), \quad i, j = 1, \dots, n, \quad (5.2)$$

где N — объем выборок.

Необходимо построить количественный показатель ККГ на классе линейных агрегатов компонент вектора наблюдений, обладающий максимальной информативностью.

Целесообразность такого показателя косвенно обосновывает тот факт, что изменение любой компоненты вектора наблюдений связано с изменением степени грозоопасности конвективного облака.

Известно [7, 15, 52], что максимально информативным является линейный агрегат компонент вектора наблюдений, имеющий в качестве ядра собственный вектор ковариационной матрицы, отвечающий максимальному собственному числу. Поэтому в качестве ККГ (обозначим его буквой K) выбран

$$K = \bar{b} \operatorname{diag} \{(q_{11})^{-1/2}, \dots, (q_{nn})^{-1/2}\} (U - \hat{U}) \quad (5.3)$$

или в скалярной форме

$$K = \sum_{i=1}^n (\bar{b}_i / \sqrt{\hat{q}_{ii}}) (u_i - \hat{u}_i), \quad (5.4)$$

где $\bar{b} = (\bar{b}_1, \dots, \bar{b}_n)$ — собственный вектор ковариационной матрицы $\hat{Q}$, отвечающий максимальному собственному числу (первая строка модальной матрицы $\operatorname{mod} \hat{Q}$).

Диагональная матрица $\operatorname{diag} \{\dots\}$ используется для нормирования компонент по средним квадратическим значениям.

Схема вычислительной процедуры определения элементов сводится к следующему. Осуществляется начальное приближение выборочных оценок ковариационной матрицы $\hat{Q}(t)$ и вектора средних $\hat{U}(t)$ после t дискретных наблюдений в соответствии

с (5.1), (5.2). Затем определяются собственные числа $\hat{\lambda}_i(t)$, $i = 1, \dots, n$ путем решения характеристического уравнения матрицы $\hat{Q}(t)$

$$\det [\hat{\lambda}I - \hat{Q}(t)] = 0, \quad (5.5)$$

где I — единичная матрица размера $n \times n$.

Выбирается максимальное собственное число

$$\hat{\lambda}_m(t) = \max \{\lambda_i(t)\} \quad (5.6)$$

и находится соответствующий ему собственный вектор $\hat{b}(t)$ из уравнения

$$\hat{\lambda}_m(t) \hat{b}^T(t) = \hat{Q}(t) \hat{b}^T(t) \quad (5.7)$$

с учетом условий нормировки

$$\hat{b}(t) \hat{b}^T(t) = 1. \quad (5.8)$$

По мере поступления новых данных измерений оценки корректируются с помощью рекуррентных процедур с конечной памятью

$$\begin{aligned} \hat{Q}(t+1) = & \hat{Q}(t) + \gamma \{ [U(t+1) - \hat{U}(t+1)] \times \\ & \times [U(t+1) - \hat{U}(t+1)]^T - \hat{Q}(t) \}, \end{aligned} \quad (5.9)$$

$$\hat{U}(t+1) = \hat{U}(t) + \gamma [U(t+1) - \hat{U}(t+1)], \quad |\gamma| \leq 1. \quad (5.10)$$

Здесь и далее символ T обозначает транспонирование матрицы. Параметр γ определяет глубину памяти. Его значение может быть оценено величиной $2/(t^* + 1)$, где t^* — характерный период изменчивости искомых статистических характеристик.

Для вычисления новых значений $\hat{\lambda}_m(t+1)$ и $\hat{b}(t+1)$ можно повторить (5.5)–(5.8), однако это невыгодно, так как процедура нахождения собственных чисел и векторов требует значительного машинного времени и выполнять ее на каждом временном шаге нерационально.

Более экономичный алгоритм может быть организован с использованием методов теории возмущения. Возмущение элементов ковариационной матрицы $\Delta \hat{Q}(t)$ после очередного измерения

$$\hat{Q}(t+1) = \hat{Q}(t) + \Delta \hat{Q}(t) \quad (5.11)$$

приводит к возмущению собственных чисел и векторов

$$\hat{\lambda}_m(t+1) = \hat{\lambda}_m(t) + \Delta \hat{\lambda}_m(t), \quad (5.12)$$

$$\hat{b}(t+1) = \hat{b}(t) + \Delta \hat{b}(t), \quad (5.13)$$

которые представляют собой

$$\Delta \hat{\lambda}_m(t) = \xi \hat{\lambda}_1(t) + \xi^2 \hat{\lambda}_2(t) + \dots, \quad (5.14)$$

$$\Delta \hat{b}(t) = \xi \hat{b}_1(t) + \xi^2 \hat{b}_2(t) + \dots, \quad |\xi| < 1. \quad (5.15)$$

При этом соответствующие коэффициенты возмущения определяются следующими выражениями:

$$\lambda_s(t) = (1/\xi) \delta(t) \Delta \hat{Q}(t) \bar{b}_{s-1}^T(t), \quad (5.16)$$

$$\bar{b}_s^T(t) = P \left[(1/\xi) \Delta \hat{Q}(t) \bar{b}_{s-1}^T(t) - \sum_{j=1}^{s-1} \hat{\lambda}_j(t) \bar{b}_{s-j}^T(t) \right], \quad s = 1, 2, \dots, \quad (5.17)$$

где $\delta(t)$ — левый собственный вектор матрицы $\hat{Q}(t)$, P — матрица, определяемая выражением:

$$P = [I - \bar{b}^T(t) \delta(t)]^T [I \hat{\lambda}_m(t) - \hat{Q}(t)]^{-1} [I - \bar{b}^T(t) \delta(t)]. \quad (5.18)$$

Практически расчет ККГ может быть выполнен в реальном масштабе времени на ЭВМ, работающей в комплексе с измерительными устройствами. Нестационарность, проявляющаяся в дрейфе статистических характеристик и, следовательно, весовых коэффициентов в линейном агрегате, отражающая перераспределение доли вносимой информации о состоянии между измеряемыми параметрами на разных стадиях развития грозового процесса, отслеживается с помощью рекуррентных адаптивных процедур.

ККГ, построенный предложенным способом, является огибающей (суммой) критериев ПОПМ и ПОВМ и позволяет судить о потенциальной опасности вообще без детализации на ОПМ и ОВМ. Можно ожидать, что чем выше значение ККГ в данной области пространства, тем выше вероятность поражения (или естественными, или спровоцированными, или теми и другими молниевыми разрядами) находящегося там объекта в данный момент наблюдений. Степень участия каждого параметра в ККГ пропорциональна доле вносимой этим параметром информации о состоянии облака. В среднем на предгрозовой стадии развития более высокий ККГ будет у облака, являющегося источником НТРИ; в стадии активной грозовой деятельности ККГ возрастает за счет вклада $\dot{N}$ и НТРИ, а также роста других параметров; на послегрозовой стадии ККГ уменьшается по мере уменьшения параметров грозоопасности и прекращения НТРИ. При этом, например, на активной стадии из двух облаков большими ККГ будет характеризоваться то, у которого при прочих равных условиях больше $\dot{N}$, при равных же $\dot{N}$, — у которого больше $\bar{t}$, при равных $\bar{t}$, — у которого больше интенсивность НТРИ и т. д.

Необходимо отметить также, что разница между ККГ, рассчитанным по данным активно-пассивной (т. е. приемные устройства, РЛС и МРЛ) и пассивной (т. е. приемные устройства и МРЛ) радиолокации, сводится к тому, что во втором случае ККГ будет скалярной функцией одной координаты: азимутального угла наблюдения, в первом — скалярным полем, т. е. функцией двух координат: азимутального угла и дальности. В случае пассивной радиолокации данные МРЛ позволяют сделать с некоторой погрешностью привязку ККГ к дальности.

5.3. Примеры расчетов комплексного критерия грозоопасности

На рис. 5.1 представлено изменение во времени ККГ грозового облака средней интенсивности, наблюдавшегося в Алазанской долине (Восточная Грузия) 4 июня 1982 г. На этом же рисунке показан ход во времени частоты молниевых разрядов $\dot{N}$

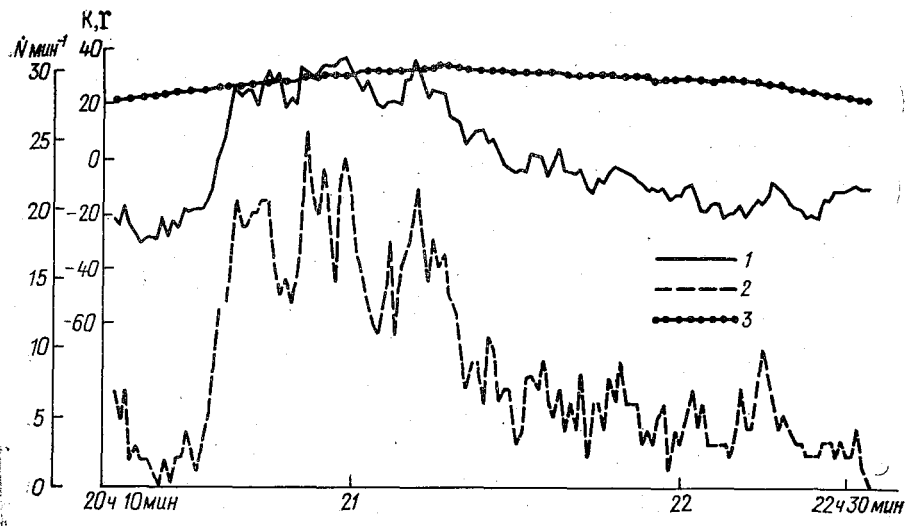


Рис. 5.1. Изменение во времени комплексного критерия грозоопасности $K(1)$, частоты молниевых разрядов в наблюдаемом облаке $\dot{N}$ (2) и радиолокационного критерия грозоопасности Γ (3). Грозовой процесс 4 июня 1982 г.

в наблюдаемом облаке как наиболее наглядной (хотя и не исчерпывающей) характеристики интенсивности грозы и известный радиолокационный критерий грозоопасности Γ [152]. ККГ по своему характеру в данной грозовой ситуации близок к процессу изменения частоты молниевых разрядов, тогда как критерий Γ практически не изменяется и не отражает существенных вариаций $\dot{N}$. Однако ККГ не копирует $\dot{N}$. Например, в случае слабой грозы 25 сентября 1982 г. (рис. 5.2) поведение во времени K и $\dot{N}$ заметно различается: равным значениям $\dot{N}$ в отдельные моменты времени соответствуют разные K , начиная с 19 ч 40 мин ККГ показывает в среднем устойчивое снижение грозовой опасности, в то время как $\dot{N}$ с этого момента начинает возрастать. Кроме того, из сравнения грозовых ситуаций 4 июня и 25 сентября 1982 г. следует, что уровень ККГ (следовательно, и степень опасности) 25 сентября в целом существенно ниже, чем 4 июня, хотя в некоторые моменты в обеих ситуациях происходило одинаковое количество молниевых разрядов. Отметим также, что по критерию Γ в облаке,

наблюдавшемся 25 сентября, грозы вообще не должно было быть (максимальное значение $Y = 15$).

Проследим за ходом во времени ККГ, рассчитанного по данным активно-пассивных радиолокационных измерений мощнейшего грозового процесса, наблюдавшегося 17 июня 1983 г. (см. рис. 6.5, кривая 1). На начальном этапе (16 ч 20 мин — 17 ч 40 мин) К

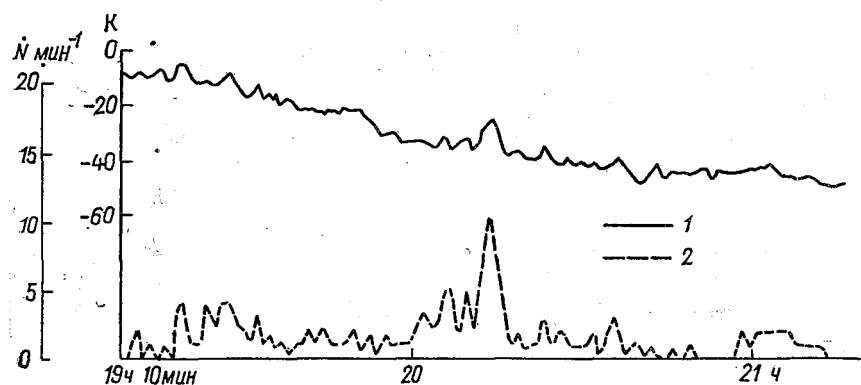


Рис. 5.2. Изменение во времени комплексного критерия грозоопасности K (1), частоты молниевых разрядов в наблюдаемом облаке N (2). Грозовой процесс 25 сентября 1982 г.

растет (т. е. возрастает ПОПМ + ПОВМ) вслед за ростом параметров электрической активности (N и интенсивности НТРИ) на фоне малых вариаций параметров радиоэха облачности ($H_{вг}$, $\lg z_{\max}$). При этом характер поведения K мало отличается от N . С 17 ч 40 мин до 18 ч 00 мин частота разрядов снижается, однако K продолжает расти за счет вклада возрастающих характеристик НТРИ и радиолокационной отражаемости и достигает своего максимума в 18 ч 34 мин (одновременно с N). В дальнейшем поведение K и N опять различается: N уменьшается быстро, K — медленно, так как характеристики НТРИ и параметры радиоэха по-прежнему сохраняют высокие значения. Далее ККГ, будучи очень большим по уровню, продолжает уменьшаться, сохраняя относительно высокий уровень после прекращения молниевых разрядов, пока еще имеются сигналы НТРИ (и, напомним, высока ПОПМ), и становится малым после прекращения НТРИ. В тех случаях, когда регистрация в активном режиме не велась, соответствующие параметры, входящие в ККГ, определялись по данным пассивной радиолокации (но уже без привязки к дальности).

На рис. 5.3 приведено изменение во времени ККГ (кривая 3) в течение грозы 7 июня 1980 г. Значения K отражают вариации интегрального времени существования сигнала, отраженного от канала молниевых разрядов T (пропорционального текущему среднему масштабу разрядов). Абсолютный максимум значений K (а следовательно, и самая высокая степень опасности) насту-

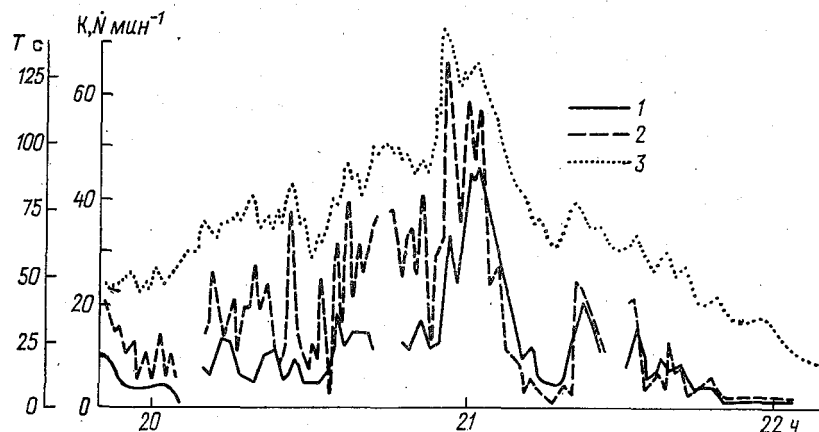


Рис. 5.3. Изменение во времени частоты молниевых разрядов в наблюдаемом облаке $\dot{N}$ (1), интегрального времени существования сигнала, отраженного от канала молниевых разряда T (2) и комплексного критерия грозоопасности K (3). Грозовой процесс 7 июня 1980 г.

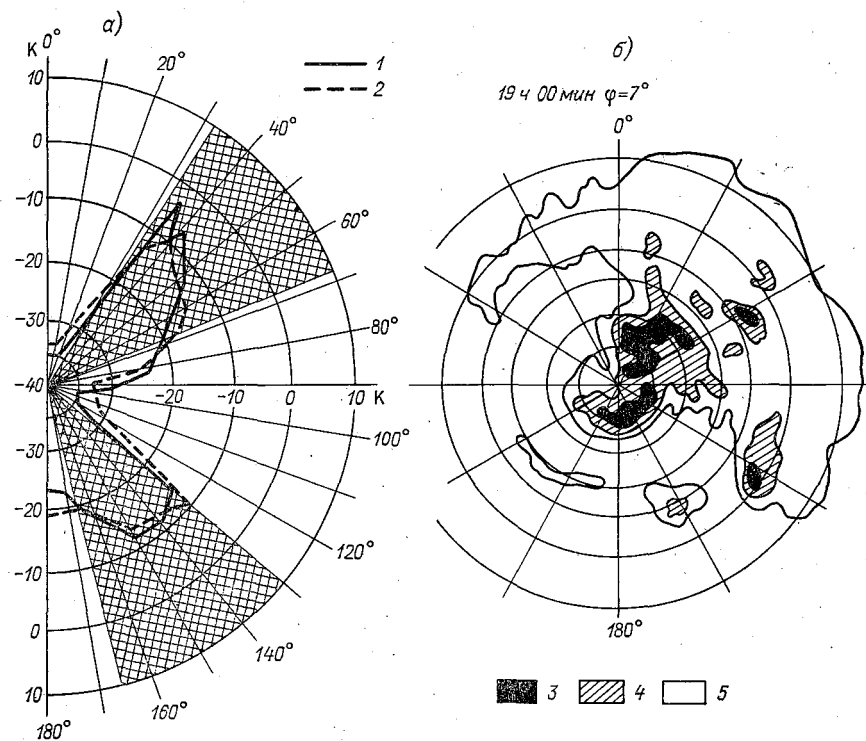


Рис. 5.4. Панорама комплексного критерия грозоопасности K (а) и горизонтальный разрез облачности (б). Грозовой процесс 10 июня 1982 г.

1) ККГ в 19 ч 00 мин, 2) прогноз ККГ на 2 мин, сделанный в 18 ч 58 мин; затухание в приемном тракте: 3) 3 дБ, 4) 24 дБ, 5) 0 дБ; φ — угол места. Секторы повышенной грозовой опасности на рис. а) заштрихованы.

пает в данном случае одновременно с максимумом T и не совпадает с максимумом $\dot{N}$.

Рисунки 5.1, 5.2, 5.3 и 6.5 показывают временной ход ККГ. Пространственное распределение этого критерия в фиксирован-



Рис. 5.5. Азимутальное распределение грозоопасности и основных радиолокационных характеристик облачности 7 июня 1980 г.

а — панорама ККГ и основных радиолокационных характеристик облачности, б — прогностическая экстраполяция распределения ККГ; 1 — высота верхней границы радиоэха $H_{\text{вг}}$, 2 — логарифм максимальной радиолокационной отражаемости $\lg z_{\text{макс}}$, 3 — частота молниевых разрядов $\dot{N}$, 4 — комплексный критерий грозоопасности K , 5, 6 — прогноз кривой 4, выполненный соответственно 8 и 4 мин ранее.

ный момент времени (19 ч 00 мин), полученное по данным пассивной радиолокации 10 июня 1982 г., иллюстрируется рис. 5.4 (кривая 1). ККГ при этом является функцией угла наблюдения. Имеются два сектора повышенной грозовой опасности: 32—68° и 130—166° (штриховка). Угловые границы зон повышенной грозовой опасности не совпадают с границами зон повышенной радиолокационной отражаемости по данным МРЛ (рис. 5.4). Кроме того, зона повышенной отражаемости в азимуте 120° характеризуется весьма низким K .

На рис. 5.5 показана панорама ККГ и основных радиолокационных характеристик облачности 7 июня 1980 г. Из рисунка видно, что параметры сантиметрового радиоэха ($H_{\text{вг}}$, $\lg z_{\text{макс}}$) незначительно изменяются в широком секторе (110—145°), в то время как $\dot{N}$, а также K занимают более узкий сектор (125—130°). В этой области пространства существует максимальная ПОВМ. В области, где $\dot{N}$ существенно снижается (120—125°), а значения K остаются относительно высокими, велика ПОПМ. Менее быстрое снижение K по сравнению с $\dot{N}$ в секторе 124—127° связано с возрастанием масштабов разрядов в этом секторе. На этом же рисунке приведено прогностическое экстраполяционное распре-

деление K , полученное в темпе измерений с использованием адаптивных стохастических моделей (см. гл. 6) 8 и 4 мин ранее. Рисунки 5.4 и 5.5 показывают, какой оперативной информацией и в какой форме могут быть обеспечены потребители в случае пассивных радиолокационных измерений. Так, например, для управления воздушным движением (УДВ) эта информация может

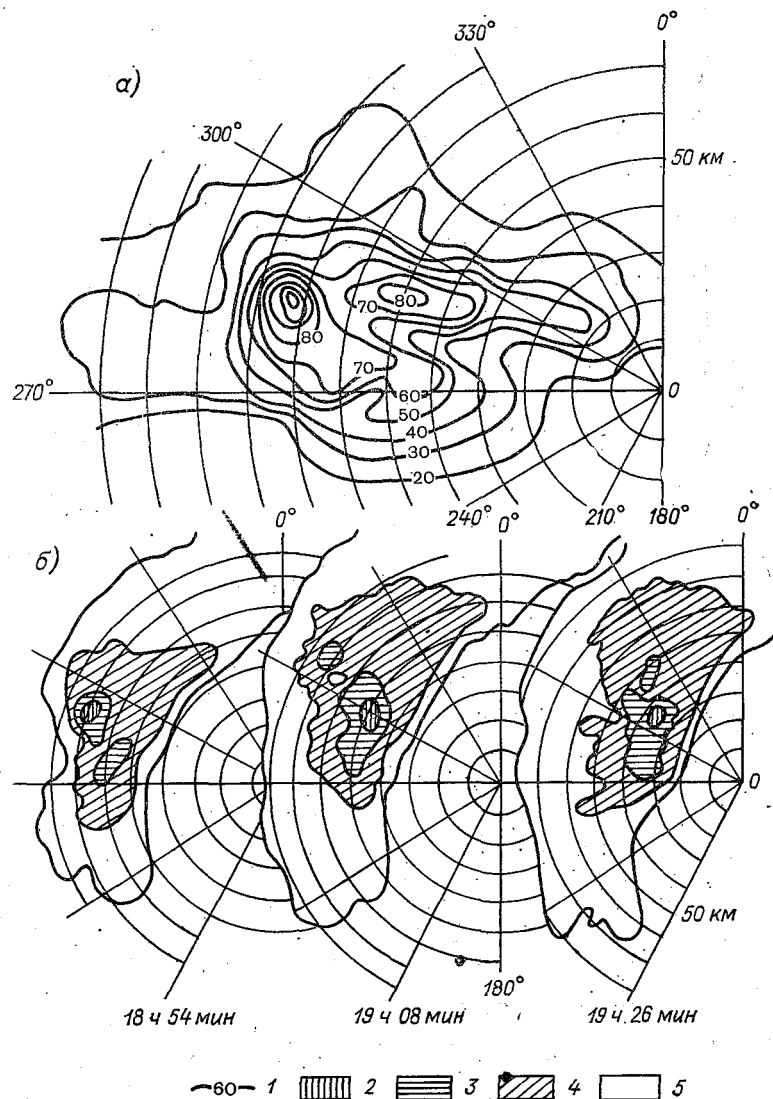


Рис. 5.6. Поле комплексного критерия грозоопасности (а) и серия горизонтальных разрезов облачности (б) 17 июня 1983 г. 18 ч 54 мин — 19 ч 26 мин.
1) линии равных значений ККГ; затухание в приемном тракте: 2) 54 дБ, 3) 48 дБ, 4) 24 дБ, 5) 0 дБ.

явиться основой при выборе безопасных азимутов и секторов полета (на рис. 5.4 сектора повышенной опасности заштрихованы).

Дополнительное использование данных активной радиолокации метрового диапазона позволяет получить более подробную картину степени потенциальной опасности обзореваемого пространства. В этом случае ККГ можно представить как функцию двух координат: азимутального угла и дальности. На рис. 5.6 показано поле ККГ грозового процесса 17 июня 1983 г., полученное по данным активно-пассивной радиолокации в секторе $250-340^\circ$. Имеются два локальных максимума ККГ, хотя и весь обзореваемый сектор характеризуется очень высокой степенью грозовой опасности. На рис. 5.6 б приведена серия горизонтальных разрезов облачности, полученных с помощью МРЛ в том же интервале времени наблюдений. Области максимальной грозоопасности и максимальной радиолокационной отражаемости не совпадают. Поле ККГ может явиться основой для выбора не только безопасных азимутов и секторов, но и безопасных траекторий облета областей повышенной грозовой активности.

Выводы

Имеющиеся в настоящее время критерии грозоопасности по данным МРЛ статистически альтернативно отражают возможность наличия ПОВМ на стадии активной грозы без количественной оценки степени этой опасности и не чувствуют пред- и послегрозового состояния облачности, когда высока ПОПМ.

Каждый параметр, измеряемый средствами активно-пассивной радиолокации, несет свою долю информации о степени потенциальной грозовой опасности облачности, но ни один из них не может быть принят в качестве единственного показателя и ПОПМ, и ПОВМ, и ПОПМ + ПОВМ.

Для оперативной оценки степени грозовой опасности обзореваемого пространства по результатам активно-пассивной радиолокации достаточно информативной и чувствительной характеристикой может служить линейный агрегат компонент вектора наблюдений, ядром которого является собственный вектор ковариационной матрицы наблюдений, отвечающий максимальному собственному числу. При таком выборе ядра извлекается максимальное количество информации, содержащееся в комбинации компонент. Эта характеристика — комплексный критерий грозоопасности — является количественным показателем степени потенциальной опасности, объективно существующей в самом грозовом облаке, и объединяет ПОВМ (в стадии активной грозовой деятельности) и ПОПМ (в пред- и послегрозовой стадиях), а также ПОВМ + ПОПМ.

Пространственная панорама ККГ в случае пассивной радиолокации может явиться основой для выбора наименее опасных азимутов и секторов полета, в случае активно-пассивной радиолокации — наименее опасных траекторий полета.

ГЛАВА 6

МЕТОДЫ ОПТИМАЛЬНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ И ПРОГНОЗА КОМПЛЕКСНОГО КРИТЕРИЯ ГРОЗООПАСНОСТИ

6.1. Предварительное обсуждение

При решении задачи прогнозирования ККГ (т. е. при построении алгоритма обработки измерительной информации с целью ее временной экстраполяции) необходимо учитывать следующее.

1. Временные ряды результатов активно-пассивных радиолокационных измерений параметров облачности в рассматриваемых временных масштабах представляют собой реализацию нестационарных случайных процессов. По своей природе случайный фактор в этих временных рядах можно разделить на «внутренний», органически присущий изучаемому процессу (из-за влияния на него большого количества неконтролируемых и случайных величин), и «внешний», привносимый измерительными средствами (из-за неизбежного наличия случайных ошибок измерения). Внутренний фактор является полезным носителем информации, внешний — фактором, мешающим восприятию полезной информации, засоряющим ее. При дальнейшем рассмотрении значение измеряемой величины, обусловленное только внутренним фактором будем называть истинным значением, вклад внешнего фактора — помехой. Метод обработки измерительной информации должен подавлять влияние помех, минимально искажая истинные значения, а также учитывать нестационарность процессов.

2. В настоящее время нет физической модели, более или менее адекватно описывающей поведение во времени измеряемых характеристик. Единственная информация, на которую можно рассчитывать в ходе прогнозирования — это данные измерений, предшествующие текущему значению (т. е. предыстория). Все необходимые для прогнозирования характеристики и связи должны определяться, исходя из этой информации, преодолевая априорную неопределенность.

3. Прогнозирование ККГ в системах оперативного грозооповещения будет иметь практический смысл лишь при условии организации вычислительных процедур в реальном масштабе времени с выдачей результатов в темпе поступления данных измерений.

Детерминированные методы прогнозирования здесь не могут быть использованы из-за отсутствия динамических физических моделей измеряемых процессов. По этой же причине невозможна рандомизация (введение случайного фактора в известную физическую модель). Задача такого рода решается в рамках теории

случайных процессов. По своему характеру она относится к классу задач сверхкраткосрочного прогноза результатов измерений «Нюу-кастинг» (Nowcasting) — текущее прогнозирование. Бурное развитие методов текущего прогнозирования в самое последнее время обусловлено развитием авиации и космонавтики и повышением требований к их сиюминутному метеорологическому обеспечению. В то же время математический арсенал методов текущего прогнозирования пока еще ограничен, ограничена и область их распространения. Разработка успешного метода прогнозирования характеристик грозовых процессов расширит арсенал средств текущего прогнозирования.

Математическое прогнозирование случайных процессов заключается в использовании данных о физических процессах, обработке этих данных с целью получения зависимостей, связывающих измеряемые параметры в различные моменты времени, и вычислении с помощью найденных зависимостей значений этих параметров с заданным временным упреждением. Математическое прогнозирование можно условно разделить на следующие этапы:

- а) выбор и обоснование структуры математической модели прогнозируемого процесса;
- б) обработка статистических данных для определения неизвестных параметров модели (идентификация модели);
- в) собственно прогнозирование, т. е. вычисление количественных характеристик процесса с заданным упреждением при заданной предыстории.

Рассмотрим эти этапы последовательно применительно к задаче прогнозирования ККГ.

6.2. Математическое обоснование и методика прогнозирования комплексного критерия грозоопасности с использованием адаптивных моделей

6.2.1. Стохастические модели

Рассмотрим два наиболее часто используемых при прогнозировании семейства математических моделей.

Первое семейство моделей представления прогнозируемого процесса y может быть описано в общем виде следующим выражением [161]:

$$y = f(a, t) + \eta, \quad (6.1)$$

где $f(a, t)$ — некоторая детерминированная функция; a — вектор неизвестных параметров, подлежащих определению; t — время; η — случайный процесс с нулевым математическим ожиданием.

Модели (6.1) представляют подлежащий прогнозированию случайный процесс в виде наложения на детерминированную

основу $f(a, t)$ случайного фактора. Простейшим вариантом детерминированной основы может быть линейная функция

$$f(a, t) = a_0 + a_1 t, \quad (6.2)$$

более общим — полином степени m

$$f(a, t) = \sum_{i=0}^m a_i t^{(i)}. \quad (6.3)$$

Весьма распространенными являются также экспоненциальная

$$f(a, t) = a_0 a_1^{(a_2 t)} \quad (6.4)$$

и гармоническая

$$f(a, t) = a_0 + \sum_{i=1}^l (a_i \cos a^{(i)} t + b_i \sin b^{(i)} t) \quad (6.5)$$

детерминированные основы.

Использование моделей вида (6.1) эквивалентно, по существу, аппроксимации временной реализации процесса y аналитической кривой $f(a, t)$. Основным недостатком метода является жесткость задания класса аппроксимирующих кривых и узость такого класса. Кроме того, если нет никаких физических оснований, выбор того или иного вида детерминированной основы осуществляется с известной долей произвола, субъективно на конечном (уже реализованном) интервале наблюдений и может оказаться неправомерным для последующих временных интервалов.

Другое значительно более универсальное семейство моделей основано на ином представлении прогнозируемого случайного процесса. Прогнозируемый временной ряд, в котором соседние значения сильно зависимы, считается генерируемым последовательностью независимых импульсов $\{\varepsilon(t)\}$. Эти импульсы — реализации случайных величин с фиксированным распределением, нулевым средним и известной дисперсией.

Такая последовательность случайных величин $\{\varepsilon(t)\}$ называется белым шумом. Предполагается, что белый шум $\varepsilon(t)$ можно трансформировать в процесс $y(t)$ при помощи линейного фильтра (формирующей системы). Уравнение состояния формирующей системы называют стохастическим уравнением моделируемого случайного процесса или его стохастической моделью. Идея представления случайного процесса в виде белого шума, трансформированного формирующей системой, восходит к классическим работам Колмогорова, Винера и в настоящее время широко используется в математической теории управления, при синтезе оптимальных измерительных систем, статистическом анализе временных рядов. Выбор модели случайного процесса в рамках такого подхода — это подбор дифференциального уравнения формирующей системы. Для дискретных процессов соответствующие стохастические уравнения будут разностными.

В общем случае стохастическое уравнение процесса $y(t)$, задающее второе семейство моделей, имеет вид

$$y(t) + \sum_{i=1}^p a_i y(t-i) = \varepsilon(t) + \sum_{i=1}^r b_i \varepsilon(t-i), \quad (6.6)$$

где $\{\varepsilon(t)\}$ — дискретный белый шум с нулевым средним и дисперсией σ_ε^2 ; (a_i) — векторы неизвестных параметров, подлежащих определению.

Рассмотрим это уравнение в частотной (операторной) области. Для этого к уравнению (6.6) применим z -преобразование:

$$A(z) y(z) = B(z) \varepsilon(z), \quad (6.7)$$

где $\varepsilon(z)$, $y(z)$ — z -образы соответственно входной $\{\varepsilon(t)\}$ и выходной $\{y(t)\}$ последовательностей формирующей системы; $A(z)$, $B(z)$ — операторные полиномы, представляющие собой

$$A(z) \triangleq 1 + \sum_{i=1}^p a_i z^{-i}, \quad (6.8)$$

$$B(z) \triangleq 1 + \sum_{i=1}^r b_i z^{-i}. \quad (6.9)$$

Передающая функция формирующей системы (6.6) определяется выражением

$$R(z) = B(z)/A(z). \quad (6.10)$$

Для устойчивости модели необходимо, чтобы все нули операторного многочлена

$$z^{(p)} A(z) = z^{(p)} + \sum_{i=1}^p a_i z^{(p-i)} \quad (6.11)$$

лежали внутри единичной окружности. В таком случае спектральная плотность процесса $\{y(t)\}$ имеет вид

$$S(f) = \sigma_\varepsilon^2 R(\exp -j2\pi f \Delta t) R(\exp j2\pi f \Delta t), \quad (6.12)$$

где Δt — период дискретизации процесса $\{y(t)\}$.

Модели вида (6.6) (в литературе их иногда называют моделями авторегрессии — скользящего среднего (АРСС)) весьма универсальны. Так, с точки зрения аналитической аппроксимации моделируемого процесса класс аппроксимирующих (прогнозирующих) функций — это множество решений линейного разностного уравнения, т. е. полиномы, экспоненты, тригонометрические функции и их комбинации. При этом выбор вида функций осуществляется объективно — он определяется соотношением параметров a_i и b_i (или положением нулей и полюсов передающей функции $R(z)$). Таким образом, любая упомянутая из семейства моделей (6.1) является частным случаем (6.6).

Аппроксимация процесса $\{y(t)\}$ моделью вида (6.6) во временной области эквивалентна аппроксимации спектральной плотности процесса аналитическим выражением (6.12) [111]. Следовательно, физически модели вида (6.6) воспроизводят спектральные свойства прогнозируемых процессов.

Прогноз с использованием моделей типа (6.6) означает прогноз функции с соответствующим учетом ее производных $\{y(t-i)\}$ вплоть до p -го порядка.

Перечисленные обстоятельства в сочетании с простотой реализации обусловили использование подобных моделей при прогнозировании различных типов временных рядов, в том числе и в метеорологических задачах. При всех достоинствах моделей, использующихся в этих работах, есть одно обстоятельство, делающее их непригодными для решения задачи прогнозирования ККГ. Это — стационарность моделей, их неизменность во времени. Известно обобщение модели АРСС на класс нестационарных процессов, имеющих стационарные приращения q -го порядка [101]. Достигается оно путем использования модели (6.6) относительно q -й конечной разности прогнозируемого процесса, т. е. добавления к (6.6) уравнения

$$y(t) = \nabla^q u(t). \quad (6.13)$$

Здесь, по существу, допускается наличие у моделируемого процесса полиномиального тренда порядка q . Однако это лишь частный (хотя и практически важный) случай проявления нестационарности. Общего же подхода к проблеме моделирования нестационарности в настоящее время не существует.

И тем не менее преодоление этой проблемы возможно. Наиболее конструктивным шагом в этом направлении представляется использование адаптивных (самоорганизующихся) моделей.

Адаптивные методы — быстро развивающееся в настоящее время направление технической кибернетики для исследования систем с полностью или частично неизвестной динамикой, функционирующих в стохастической обстановке. Адаптивные системы — это фактически системы с элементами искусственного интеллекта.

Под адаптацией в нашем случае, следуя [177], будем понимать процесс изменения параметров модели на основе текущей информации с целью достижения оптимальной адекватности при наличии априорной неопределенности и изменяющихся свойствах моделируемого процесса. Адаптивная стохастическая модель должна постоянно подстраиваться к изменениям (дрейфу) статистических свойств прогнозируемого временного ряда. Это может достигаться путем непрерывной целенаправленной коррекции параметров модели. Параметры модели в этом случае становятся функциями времени.

В качестве базовой для адаптации будем использовать модель семейства (6.6) с учетом (6.13), имея в виду ее универсаль-

ность. Факт придания ей адаптивных свойств формально выразится в том, что параметры модели будут переменны во времени:

$$y(t) + \sum_{i=1}^p a_i(t) y(t-i) = \varepsilon(t), \quad (6.14)$$

$$y(t) = \nabla^q u(t). \quad (6.15)$$

В модели (6.14) в отличие от (6.6) положено $b_i = 0$ (модель авторегрессии (АР)). Это не приводит к потере общности, так как АР-моделью можно аппроксимировать АРСС-модель со сколь угодно высокой точностью путем соответствующего выбора порядка АР-модели. В то же время АР-модели предпочтительнее АРСС-модели с точки зрения экономичности дальнейших процедур.

Естественно, что самое нетривиальное в модели (6.14) — метод оценки и настройки ее параметров. Этим вопросам посвящен следующий раздел.

6.2.2. Идентификация моделей

После выбора и обоснования структуры модели, характеризующей прогнозируемый процесс, возникает задача определения ее неизвестных параметров (параметрическая идентификация). Очевидно, указанные параметры можно определить различным образом, в зависимости от критерия, принятого для характеристики «наилучших» (оптимальных) значений параметров. Критерий оптимальности в свою очередь должен быть в каком-то смысле наилучшим. Поэтому выбор критерия оптимальности заслуживает специального обсуждения.

Естественной характеристикой, с помощью которой можно оценить результаты прогнозирования, является ошибка прогноза. Ошибка прогноза в значительной степени зависит от того, с какой точностью определяются неизвестные параметры модели. Таким образом, следует определять неизвестные параметры модели (6.14), (6.15) так, чтобы ошибка прогноза была минимальной. Наиболее мощным решением подобной задачи является метод максимального правдоподобия (ММП) [190]. Максимизируемым критерием оптимальности в ММП является функция правдоподобия. Оценки параметров, при которых критерий достигает максимума, являются несмещенными и эффективными. Однако ММП требует знания точного значения плотности вероятности $p(\varepsilon)$ белого шума $\varepsilon(t)$, что весьма сложно. Во-первых, априорно эта плотность неизвестна, более того, нет никаких оснований считать ее неизменной во времени не только по параметрам, но и по форме. Во-вторых, если заняться оцениванием $p(\varepsilon)$ по эмпирическим данным, то мы столкнемся с задачей, не менее сложной, чем собственно идентификация модели, что, безусловно, нерационально. В-третьих, оценки ММП чувствительны к малым отклонениям от предполагаемой формы, т. е. не обладают свойством робастности.

То же относится и к оценкам, получаемым методом максимума апостериорной вероятности (ММАВ) [17].

Альтернативным к оцениванию параметров модели является подход, основанный на использовании в качестве критерия оптимальности математического ожидания функции потерь. Функция потерь (штрафа) $\mathcal{L}[e(t)]$ — это, как правило, выпуклая, четная, монотонная функция ошибки прогноза $e(t)$. Минимального значения функция потерь достигает при $e(t) = 0$, с увеличением $e(t)$ функция возрастает со скоростью, определяемой конкретным видом функции $\mathcal{L}$. Оптимальными значениями параметров модели считаются значения, при которых критерий (функционал) качества достигает минимума:

$$J(a_i, \dots, a_p, p) = M\{\mathcal{L}[e(t)]\}, \quad (6.16)$$

т. е. значения, приводящие к наименьшим средним потерям. Здесь $M\{\dots\}$ — символ математического ожидания. Конкретный вид функции потерь определяется уровнем априорной информации о свойствах белого шума $\varepsilon(t)$. Так, при минимальном уровне априорной информации, когда $p(\varepsilon)$ принадлежит классу распределений с конечной дисперсией (в нашем случае это заведомо выполняется), наилучшей в минимаксном смысле функцией потерь является квадратичная функция $\mathcal{L}[e(t)] = e^2(t)$. Тем самым в задаче оценки мы приходим к минимизации функционала

$$J(a_i, \dots, a_p, p) = M\{e^2(t)\}, \quad (6.17)$$

$$(\hat{a}_i)_p = \arg \min_{a_i} J(a_i, \dots, a_p, p), \quad (6.18)$$

т. е. к методу наименьших квадратов (МНК). Оценки МНК, хотя и несколько уступают оценкам ММП и ММАВ (используя большую априорную информацию), являются тем не менее несмещенными оценками с минимальной дисперсией и не зависят от вида распределения $\varepsilon(t)$, а следовательно, и от распределения прогнозируемой величины $y(t)$. В случае нормального распределения $y(t)$ оценки МНК, ММП и ММАВ совпадают.

После выбора критерия оптимальности следующим шагом является построение алгоритма его минимизации.

Условия минимальности функционала (6.17):

$$\text{grad } J(a_i, \dots, a_p, p) = 0, \quad (6.19)$$

$$\text{grad}^2 J(a_i, \dots, a_p, p) > 0, \quad (6.20)$$

где оператор $\text{grad} = (\partial/\partial a_1, \dots, \partial/\partial a_p)$ является вектором-столбцом. Векторное уравнение (6.19) эквивалентно системе уравнений относительно a_i . Различные методы решения системы (6.19) определяют, по существу, все многообразие процедур идентификации [161]. Здесь можно выделить два наиболее общих случая: 1) градиент средних потерь в точности известен; 2) градиент средних потерь неизвестен.

Первый случай предполагает наличие полной априорной информации о плотности вероятностей прогнозируемой величины $y(t)$ (для определения математического ожидания функции потерь).

Второй случай характеризуется априорной неопределенностью. В этой ситуации решение ищется с помощью рекуррентных алгоритмов, не требующих знания градиента средних потерь, а использующих текущую информацию, содержащуюся в наблюдениях [151]. Рекуррентные алгоритмы минимизации функционалов тесно связаны с методом стохастической аппроксимации. Их особенность состоит в том, что вместо градиента средних потерь в них на каждом временном шаге фигурируют соответствующий градиент функции потерь $\text{grad } e^2(t)$, который непосредственно зависит от наблюдений $y(t)$. Математически это эквивалентно использованию вместо средних потерь (6.17) эмпирических средних потерь — среднего арифметического функций потерь от ошибок для всех наблюдений, полученных к моменту

$$J_t(a_1, \dots, a_p, p) = (1/t) \sum_{s=1}^t e^2(s) \quad (6.21)$$

и стремящихся к $J(a_1, \dots, a_p, p)$ при $t \rightarrow \infty$.

Главное достоинство рекуррентных алгоритмов с точки зрения решения нашей задачи — это возможность последовательной обработки данных наблюдений по мере их поступления. Такая возможность, во-первых, является фундаментом адаптивного подхода, во-вторых, позволяет реализовать процедуру идентификации в реальном масштабе времени. Рекуррентные методы весьма экономичны и в вычислительном отношении.

Однако в нестационарном случае, когда оцениваемые параметры модели переменны во времени, т. е. решение уравнения (6.19) дрейфует во времени, задача усложняется. Рекуррентные алгоритмы должны «успевать» за дрейфом искомых параметров. По этой причине непригодны алгоритмы стохастической аппроксимации из-за их очень медленной сходимости даже в стационарном случае. Наиболее существенным шагом в преодолении этого недостатка в последнее время явилась разработка метода динамической стохастической аппроксимации [81]. Этот метод, сохраняя простоту стохастической аппроксимации, гарантированно отслеживает, «догоняет» полиномиальный дрейф экстремума функционала типа (6.17). Однако полином, который задают при аппроксимации временного дрейфа параметров модели, со временем неизбежно начинает принимать большие значения, что может привести к неустойчивости модели. Поэтому он должен использоваться для аппроксимации лишь на заранее оговоренных конечных интервалах. В нашей задаче прогноза параметров грозового процесса нельзя заранее определить длительность наблюдения, она может быть очень большой, а количество временных отсчетов — практически неограниченным. Поэтому для адаптивной идентификации модели (6.14) — (6.15), т. е. для решения уравнения (6.19),

приходится использовать специально разработанный метод, исключающий неустойчивость модели при $t \rightarrow \infty$ [32, 33].

Методика идентификации моделей (6.14)–(6.15) при этом разделяется на два этапа:

- 1) получение начальных приближений параметров;
- 2) использование начальных приближений в рекуррентных адаптивных процедурах оценивания, работающих в реальном масштабе времени.

Наличие первого, предварительного этапа оценки параметров объясняется желанием ускорить сходимость последующего рекуррентного этапа за счет определения более или менее разумных начальных условий [180]. На этом же этапе оценивается порядок модели p и разности q .

Начальные приближения параметров получаются путем подгонки модели к реальному процессу изменения соответствующей компоненты вектора наблюдений за некоторый фиксированный временной интервал (число временных отсчетов — N). На этом этапе параметры модели (6.14) считаются неизменными во времени. Ошибка (невязка) прогноза представляет собой разность между фактическим $y(t)$ и спрогнозированным $\hat{y}(t)$ значениями

$$e(t) = y(t) - \hat{y}(t). \quad (6.22)$$

Из уравнения (6.14) вытекает естественный предсказатель на один шаг

$$\hat{y}(t) = - \sum_{i=1}^p a_i y(t-i). \quad (6.23)$$

С учетом (6.22)–(6.23) функционал качества (6.21) преобразуется к виду

$$\begin{aligned} J_N(a_1, \dots, a_p, p) &= (1/N) \sum_{t=p+1}^N \{[y(t) - \hat{y}(t)]^2\} = \\ &= (1/N) \sum_{t=p+1}^N \left[y(t) + \sum_{i=1}^p a_i y(t-i) \right]^2. \end{aligned} \quad (6.24)$$

Набор коэффициентов $(\hat{a}_i)_p$, при которых функционал качества (6.24) достигает минимума, определяется из системы нормальных уравнений, к которой сводится (6.19)

$$\sum_{i=1}^p \hat{a}_i c_{im} = -c_{0m}, \quad m = 1, \dots, p, \quad (6.25)$$

где

$$c_{im} = (1/N) \sum_{t=p+1}^N y(t-i) y(t-m).$$

Система уравнений (6.25) является дискретным вариантом уравнения Винера—Хопфа.

Введем обозначения: $\Theta^T \triangleq (a_1, \dots, a_p)$ — вектор параметров модели, $d^T \triangleq (c_{01}, \dots, c_{0p})$ — выборочный ковариационный вектор, $D \triangleq (c_{im})_p^{(p)}$ — выборочная ковариационная матрица. Тогда система уравнений (6.25) запишется в матричном виде

$$D\hat{\Theta} = -d, \quad (6.26)$$

при этом матрица D — тёплицевая матрица.

Наиболее экономичным с точки зрения организации вычислительных процедур решением (6.26) является алгоритм Левинсона — Робинсона — Дэрбина (ЛРД). Алгоритм ЛРД позволяет устанавливать требуемый порядок модели и согласовывать ее с результатами наблюдений за некоторый временной интервал. Итеративная процедура ЛРД для уравнения (6.26) представляет собой

$$\begin{cases} E_0 = c_{11}, \\ g_k = - \left[c_{1+k,1} + \sum_{i=1}^{k-1} \hat{a}_i^{(k-1)} c_{1+k-i,1} \right] / E_{k-1}, \\ \hat{a}_k^{(k)} = g_k, \\ \hat{a}_i^{(k)} = \hat{a}_i^{(k-1)} + g_k \hat{a}_{k-1}^{(k-1)}, \quad i = 1, \dots, k-1, \\ E_k = [1 - g_k^2] E_{k-1}, \end{cases} \quad (6.27)$$

где $k = 1, 2, \dots, p$ — номер итерации. Условие окончания процедуры:

$$\hat{a}_i = \hat{a}_i^{(p)}, \quad i = 1, \dots, p. \quad (6.28)$$

При этом в процессе отыскания решения для модели порядка p получаются (как промежуточные) решения для всех моделей, порядок которых меньше p . Необходимым и достаточным условием устойчивости моделей является

$$|g_k| < 1, \quad k = 1, \dots, p. \quad (6.29)$$

Оценкой дисперсии σ_e^2 для модели порядка p является E_p .

Существенным является вопрос о выборе порядка модели. С одной стороны, увеличение порядка модели ведет к повышению точности прогноза на обучающей последовательности, т. е. к снижению σ_e^2 , а следовательно, и к дисперсии ошибки прогноза. С другой стороны, с ростом числа параметров снижается статистическая значимость оценки каждого параметра, так как одно и то же количество информации расходуется на большее число оцениваемых величин. Компромисс может быть найден путем структурной минимизации среднего риска, сводящейся в данном случае к информационному критерию Акаике: p выбирается таким образом, чтобы величина $N \lg E_p + 2p$ была минимальной.

Для определения порядка q в (6.15) процесс $\{u(t)\}$ подвергается операции взятия конечной разности до тех пор, пока выбороч-

ная корреляционная функция q -й разности не будет быстро затухать.

Таким образом, порядок модели и начальные оценки параметров определяются с использованием алгоритма ЛРД.

Перейдем ко второму этапу идентификации.

Для построения адаптивных процедур оценивания параметров модели в реальном масштабе времени нормальные уравнения (6.26) запишем в рекуррентном виде

$$\left[\sum_{s=1}^t Y(s-1) Y^T(s-1) \right] \hat{\Theta}(t) = \sum_{s=1}^t Y(s-1) y(s), \quad (6.30)$$

где $Y^T(s-1) \triangleq (-y(t-1), \dots, -y(t-p))$ — вектор данных.

Индекс t означает, что оценка $\hat{\Theta}(t)$ включает данные вплоть до временного индекса t .

Для того чтобы параметры модели могли изменяться, предположим что $\hat{\Theta}(t)$ определяется марковским процессом первого порядка

$$\hat{\Theta}(t) = \Theta(t-1) + \beta T(t), \quad (6.31)$$

где β определяет среднюю скорость изменения. Вектор $T(t)$ имеет нулевое математическое ожидание и единичную ковариационную матрицу.

Требуемую рекуррентную форму решения уравнения (6.30) с учетом (6.31) можно реализовать с использованием фильтра Калмана—Бьюси [35]. При этом модифицированная процедура оценки вектора параметров модели имеет вид

$$\hat{\Theta}(t) = \hat{\Theta}(t-1) + W(t) [y(t) - Y^T(t-1) \hat{\Theta}(t-1)]. \quad (6.32)$$

Здесь невязка фактического $y(t)$ и предсказанного $\hat{y}(t) = Y^T(t-1) \hat{\Theta}(t-1)$ значений, т. е. текущий градиент квадратичной функции потерь, корректирует оценку вектора параметров, полученную на предыдущем шаге. В некотором смысле здесь осуществляется обратная связь. Вектор передачи $W(t)$, обеспечивающий изменение оценки в оптимальной степени в «нужном» направлении (т. е. в сторону антиградиента функции потерь), определяется выражениями:

$$W(t) = \Omega(t-1) Y(t-1) [\hat{\sigma}_e^2(t) + Y^T(t-1) \Omega(t-1) Y(t-1)]^{-1}, \quad (6.33)$$

$$\Omega(t) = [I - W(t) Y(t)] \Omega(t-1) + \beta^2 I, \quad (6.34)$$

где $\Omega(t) = \left[\sum_{s=1}^t Y(s-1) Y^T(s-1) \right]$ — выборочная оценка обратной ковариационной матрицы, I — единичная матрица размера $p \times p$.

Рекуррентная оценка дисперсии белого шума $\varepsilon(t)$ идентифицируемой модели строится в соответствии с алгоритмом

$$\sigma_{\varepsilon}^2(t) = \sigma_{\varepsilon}^2(t-1) + 1/(t+1) \{ [y(t) - Y^T(t-1)\hat{\Theta}(t-1)]^2 - \sigma_{\varepsilon}^2(t-1) \}. \quad (6.35)$$

Уравнения (6.32) — (6.35) определяют рекуррентную адаптивную процедуру оценивания параметров модели (6.14) — (6.15), работающую в реальном масштабе времени по мере поступления измерительной информации о соответствующей компоненте вектора наблюдений. В качестве начальных оценок параметров используются полученные на первом этапе идентификации. За счет последнего члена уравнения (6.34) $\beta^2 I$ значения $\Omega(t)$ всегда будут отличны от нуля, а, следовательно, вектор передачи $W(t)$ в (6.32) будет придавать дополнительный вес текущим данным измерений, причем тем больший, чем больше значение β . Поэтому параметр β управляет скоростью адаптации к реальным данным.

В случае, если начальные оценки параметров неизвестны, можно в качестве их использовать произвольные значения (например, нулевые), однако при этом для ускорения сходимости следует задать

$$\Omega(0) = \alpha I,$$

где $\alpha \gg 1$, чтобы наибольший вес (равный единице) был придан первым же измерениям.

После идентификации модели можно приступить непосредственно к прогнозированию моделируемого с ее помощью временного ряда.

Математическое прогнозирование представляет собой разомкнутую систему, на вход которой поступает информация о процессе, а на выходе выдается его прогноз. Из-за разомкнутости системы все ошибки на входе непосредственно сказываются на точности прогноза, несмотря на то что модель процесса выбрана правильно и все вычисления проводятся с необходимой точностью. Следовательно, задание входных данных (начальных условий прогнозирующего уравнения) требует особого рассмотрения.

Начальными условиями прогнозирующего разностного уравнения (6.14) в текущий момент t являются значения $y(t)$, $y(t-1)$, ..., $y(t-p+1)$. Все эти значения — результаты измерений, сопровождающихся помехами. Если их использовать в неизменном виде для прогноза, как это обычно делается в подобных случаях, могут возникнуть дополнительные значительные ошибки, прогноз при этом не оптимален. При идентификации модели используются те же самые результаты измерений с помехами, однако это не приводит к ошибкам в оценках, поскольку здесь работает закон больших чисел: при большом количестве измерений, используемых при оценке параметров, случайные ошибки каждого измерения в среднем взаимно компенсируются (так как математическое ожидание помех равно нулю). Это обстоятельство

лежит в основе всех процедур типа стохастической аппроксимации. Другое дело — малое количество (обычно 2—3) измерений, являющихся текущими начальными условиями для прогноза. Здесь рассчитывать на взаимную компенсацию помех не приходится. Таким образом, возникает необходимость фильтрации ошибок измерений в начальных условиях прогнозирующего разностного уравнения. Так как с течением времени всем измерениям «по очереди» придется оказаться в роли начальных условий, фильтрация ошибок измерений должна произойти во всех измерительных данных.

Задача оптимальной (в смысле МНК) фильтрации ошибок измерений в случайном процессе, порождаемом формирующей системой с известным уравнением состояния, решается с использованием фильтра Калмана—Бьюси в пространстве состояний [17, 35, 119]. В результате идентификации уравнение состояния системы, формирующей процесс $\{y(t)\}$, нам известно — это уравнение (6.14)—(6.15). Для того чтобы использовать теорию Калмана—Бьюси и реализовать процедуру оптимальной фильтрации, запишем уравнение (6.14) в пространстве состояний.

С этой целью осуществим редукцию скалярного разностного уравнения (6.14) к векторному стохастическому уравнению первого порядка

$$Y(t) = \Phi(t, t-1)Y(t-1) + \Gamma\varepsilon(t), \quad t = 1, 2, \dots, \quad (6.36)$$

где $Y^T(t) = (-y(t), \dots, -y(t-p+1))$ — p -мерный случайный вектор состояния [см. обозначения (6.30)];

$$\Phi(t, t-1) \triangleq \begin{bmatrix} -\hat{a}_1(t) & -\hat{a}_2(t) & \dots & -\hat{a}_{p-1}(t) & -\hat{a}_p(t) \\ 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

— переходная матрица состояния размера $p \times p$; $\Gamma^T \triangleq (1, 0, \dots, 0)$ — переходный вектор возмущения размерности p ; $\varepsilon(t)$ — белый шум с нулевым математическим ожиданием и дисперсией $\sigma_\varepsilon^2(t)$.

Процесс измерений недоступного нам вектора состояния $Y(t)$ (мы измеряем лишь одну компоненту вектора состояния $y(t)$) со случайными ошибками описывается моделью

$$y(t) = HY(t) + v(t), \quad (6.37)$$

где $H \triangleq (1, 0, \dots, 0)$ — p -мерный вектор, связывающий вектор состояния и результат измерения; $v(t)$ — последовательность случайных ошибок измерения с нулевым математическим ожиданием и дисперсией σ_v^2 . Дисперсия считается известной, она характери-

зует случайную погрешность конкретного измерительного устройства.

Уравнения (6.36) и (6.37) являются описанием нашей адаптивной стохастической модели в пространстве состояний. Здесь наглядно разделяются внутренние и внешние факторы случайности. Носителем внутреннего полезного фактора является вектор состояния $Y(t)$. Носителем внешней помехи — процесс $v(t)$. Задача фильтрации — по данным измерений сделать наилучшую оценку истинного значения $Y(t)$, т. е. по возможности подавить помехи.

Рассмотрим процедуру оптимальной калмановской фильтрации применительно к нашему случаю.

Оценку истинного (отфильтрованного) значения $Y(t)$, полученную на основе измерений $y(1), \dots, y(k)$, обозначим через $\hat{Y}(t/k)$, она является p -мерной вектор-функцией измерений. Если $t > k$, задача оценки является задачей прогноза, если $t = k$, то это задача чистой фильтрации.

По теории Калмана, оптимальная в смысле МНК текущая оценка порождается рекуррентным алгоритмом

$$\begin{aligned} \hat{Y}(t/t) = & \Phi(t, t-1) \hat{Y}(t-1/t-1) + \\ & + G(t) [y(t) - H\Phi(t, t-1) \hat{Y}(t-1/t-1)], \end{aligned} \quad (6.38)$$

где $G(t)$ — p -мерный вектор передачи, определяемый с помощью следующих соотношений:

$$G(t) = P(t/t-1) H^T [H P(t/t-1) H^T + \sigma_v^2]^{-1}, \quad (6.39)$$

$$P(t/t-1) = \Phi(t, t-1) P(t-1/t-1) \Phi^T(t, t-1) + \sigma_e^2(t) \Gamma \Gamma^T, \quad (6.40)$$

$$P(t/t) = [I - G(t) H] P(t/t-1), \quad t = 1, 2, \dots \quad (6.41)$$

При этом ошибка фильтрации имеет нулевое математическое ожидание и ковариационную матрицу, получаемую в (6.41). $P(t/t-1)$ является ковариационной матрицей ошибки прогноза на один шаг. Она складывается из двух составляющих, связанных с ошибкой фильтрации («неподавленные» ошибки измерений) и с погрешностью прогноза модели.

Алгоритм рекуррентной фильтрации (6.38) — (6.41) называется фильтром Калмана — Бьюси. Общая схема вычислительного цикла имеет следующий вид при переходе от момента $t-1$ к моменту t .

1. Оценка $\hat{Y}(t-1/t-1)$ прогнозируется на шаг вперед путем умножения ее слева на переходную матрицу состояния $\Phi(t, t-1)$, что позволяет получить прогноз $\hat{Y}(t/t-1)$. Этот шаг — динамическая экстраполяция предыдущей оценки.

2. Оценка $\hat{Y}(t/t-1)$ умножается слева на H , что дает предсказанные значения; вычитая их из результата действительного измерения $y(t)$, получаем невязку измерения.

3. Невязка измерения умножается слева на вектор передачи $G(t)$ и суммируется с динамической экстраполяцией предыдущей оценки $\hat{Y}(t/t-1)$ для получения $\hat{Y}(t/t)$.

4. Оценка $\hat{Y}(t/t)$ хранится в памяти до тех пор, пока не будет получено следующее измерение. После этого цикл повторяется.

Описанный фильтр работает по методу коррекции предсказания. Корректирующий член состоит из невязки измерения, взвешенной с помощью вектора передачи $G(t)$. Веса выбираются исходя из степени доверия прогнозу (теории) и измерению (эксперименту). Если ошибки измерения велики, то за счет большого вклада σ_v^2 в (6.39) вектор передачи придаст относительно малый ($\ll 1$) вес невязке измерения, т. е. вклад измерения в оценку ослабнет. Если же точность прогноза по подобранной модели невысока (т. е. велика дисперсия ошибки прогноза $\sigma_e^2(t)$), то при формировании оценки вектор передачи за счет вклада $\sigma_e^2(t)$ в (6.40) [и, следовательно, в (6.39)] отдаст предпочтение результатам измерений (их вес будет ~ 1). В случае безошибочных измерений ($\sigma_v^2 = 0$) вектор передачи всегда будет единичным и в качестве оценок используются результаты измерений.

Алгоритм фильтрации (6.38)–(6.41) начинает свою работу со значений $\hat{Y}(0/0) = 0$, $P(0/0) = \alpha I$, $\alpha \gg 1$.

Оптимальный в смысле МНК прогноз на m шагов $\hat{Y}(t+m/t)$ использует в качестве начальных условий отфильтрованные значения $\hat{Y}(t/t)$ и представляет собой

$$\hat{Y}(t+m/t) = \Phi(t+m, t) \hat{Y}(t/t), \quad (6.42)$$

где $\Phi(t+m, t) = [\Phi(t+1, t)]^m$, причем ошибка прогноза является случайной последовательностью с нулевым математическим ожиданием и ковариационной матрицей, удовлетворяющей соотношению

$$P(t+m/t) = \Phi(t+m, t) P(t/t) \Phi^T(t+m, t) + \sum_{l=t+1}^{t+m} \Phi(t+m, l) \sigma_e^2(l) \Gamma \Gamma^T \Phi^T(t+m, l). \quad (6.43)$$

Таким образом замыкается задача прогноза параметров грозового процесса в условиях нестационарности, априорной неопределенности и наличия измерительных помех.

6.2.3. Взаимодействие алгоритмов

Работа комплекса адаптивных алгоритмов в некоторой точке обозреваемого пространства иллюстрируется укрупненной структурной схемой на рис. 6.1. Значение каждой из компонент вектора наблюдений в текущий момент времени t определяется с помощью соответствующей измерительной системы (ИС). Измерения выполняются со случайными ошибками $v^{(i)}(t)$. Результаты измере-

ний соответствующей конечной разности компонент вектора наблюдений $y^{(i)}(t)$ поступают:

а) на соответствующие адаптивные идентификаторы (АИ), где значения $y(t)$ подстраивают оценки параметров формирующих систем (адаптивных стохастических моделей), полученные к моменту $(t-1)$, в соответствии с алгоритмом (6.32)—(6.35); новые значения параметров $\hat{\Theta}^{(i)}(t)$, полученные в АИ, обновляют струк-

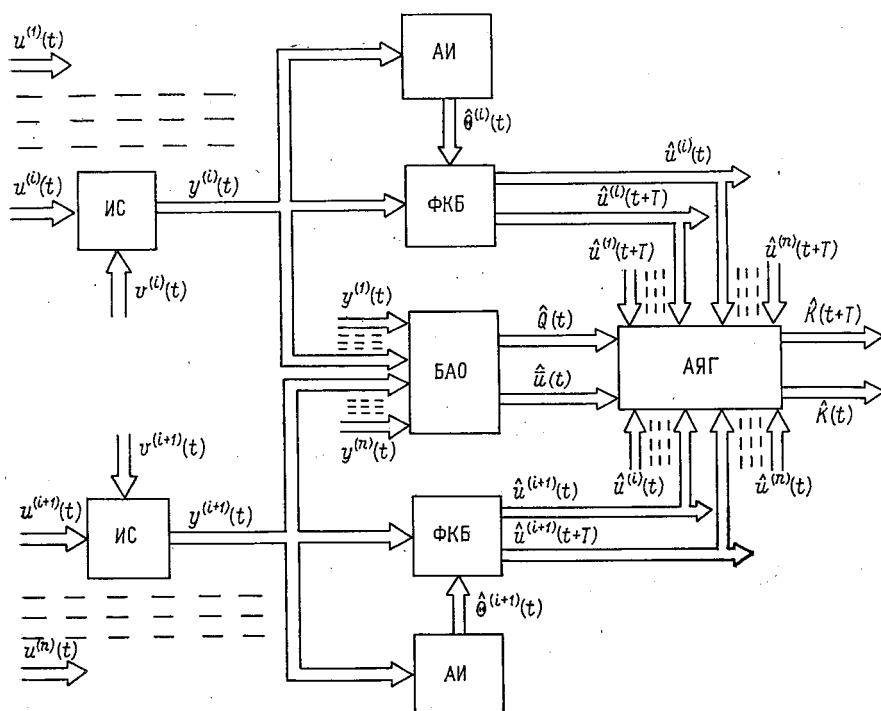


Рис. 6.1. Структурная схема оптимальной фильтрации и прогноза ККГ.

туру соответствующих фильтров Калмана—Бьюси (ФКБ), т. е. меняют их переходную матрицу состояния $\Phi(t, t-1)$ в соответствии с (6.36) и входящие в уравнение для ковариационных матриц ошибок прогноза (6.40) дисперсии белого шума моделей в соответствии с (6.35);

б) на вход ФКБ с обновленной структурой, где по $y(t)$ строится оптимальная оценка истинного значения $\hat{Y}(t/t)$ в соответствии с (6.38)—(6.41) и, следовательно, оценка $\hat{y}(t)$ и оценка процесса $\hat{u}^{(i)}(t)$ (равная $S^q \hat{y}(t)$, где S — дискретный оператор интегрирования); по отфильтрованному значению $\hat{u}^{(i)}(t)$ с использованием новой переходной матрицы состояния осуществляется прогноз с упреждением T : $\hat{u}^{(i)}(t+T)$;

в) на блок адаптивной оценки (БАО) ковариационной матрицы и вектора средних наблюдений, где значения $y(t)$ корректируют оценки ковариационной матрицы и вектора средних, полученные к моменту $(t-1)$, в соответствии с (5.9)—(5.10); изменение значений $\hat{Q}(t)$ и $\hat{u}(t)$ относительно предшествующего момента трансформирует в блоке адаптивной оценки ядра (АЯГ) модальную ковариационную матрицу и, следовательно, ядро ККГ; в АЯГ поступают также оптимальные оценки компонент вектора наблюдений и их оптимальные прогнозы на момент $(t+T)$ из ФКБ, здесь составляется линейный агрегат их значений с обновленным ядром и образуются оценки комплексного критерия безопасности $\hat{K}(t)$ и его оптимальный прогноз $\hat{K}(t+T)$.

С поступлением новых результатов измерений в момент $(t+1)$ процедура повторяется. Полученные таким образом оценки $\hat{K}(t)$ и $\hat{K}(t+T)$ в каждой точке пространства интерполируются для получения мгновенного и прогностического поля степени грозоопасности.

Достоинством рекуррентной обработки информации является то, что не требуется хранить в памяти ЭВМ весь временной ряд с неограниченно возрастающим числом членов, благодаря последовательному режиму обработки следует запоминать только предыдущее значение — «информационный ген» — и несколько переходных матриц. Очередные результаты выдаются сразу же после получения текущего наблюдения.

Адаптация стохастической модели кроме возможности анализа нестационарных процессов привносит еще одно полезное свойство. Дело в том, что фильтр Калмана—Бьюси, устойчивый к изменению вероятностных свойств полезного сигнала и помехам, весьма чувствителен к изменению параметров анализируемого процесса относительно параметров его математической модели, что может в некоторых случаях приводить даже к расходимости фильтра. Кардинальным решением этой проблемы является синтез адаптивных вариантов фильтров Калмана—Бьюси, в которых бы учитывались несоответствия параметров реального процесса параметрам его математической модели. В нашем случае это несоответствие устраняется путем непрерывной подстройки параметров стохастической модели к реальному процессу адаптивным идентификатором. Тем самым использование адаптивной стохастической модели придает оптимальному фильтру свойство робастности.

Следует отметить также универсальность разработанного метода прогнозирования. Грозовые процессы представляют собой достаточно «неудобный» объект прогнозирования из-за неприемлемости упрощающих предположений о стационарности, отсутствии ошибок измерений, нормальности закона распределения, обычно используемых (иногда некритично) при прогнозировании временных рядов. В то же время наиболее распространенные методы

прогнозирования при упрощающих предположениях являются частными случаями предлагаемого метода.

Действительно, пусть:

а) процесс стационарен, ошибками измерения пренебрегать нельзя, закон распределения прогнозируемого процесса неизвестен, тогда, положив в (6.31), (6.34) $\beta = 0$, получим оптимальный в смысле МНК метод прогнозирования для этого случая;

б) процесс нестационарен, ошибками измерения можно пренебречь, закон распределения прогнозируемого процесса неизвестен, тогда, положив в (6.37), (6.39) $\sigma_v^2 = 0$, получим оптимальный в смысле МНК метод прогнозирования для этого случая;

в) процесс стационарен, ошибками измерения можно пренебречь, закон распределения прогнозируемого процесса неизвестен, тогда положив в (6.31), (6.34) $\beta = 0$, в (6.37), (6.39) $\sigma_v^2 = 0$, получим оптимальный в смысле МНК метод прогнозирования для этого случая;

г) процесс стационарен, ошибками измерения можно пренебречь, прогнозируемый процесс имеет нормальное распределение, тогда, положив, как в п. в), $\beta = 0$, $\sigma_v^2 = 0$, получим оптимальный в смысле ММП, ММАН, МНК метод прогнозирования для этого случая.

При этом прогнозирование ведется в реальном масштабе времени, что позволяет использовать для реализации методов серийные мини- и микро-ЭВМ с небольшим объемом оперативной памяти.

Описанный метод может быть реализован в случае, если имеется физическая модель, описывающая поведение во времени измеряемого процесса. Вообще говоря, правильная физическая модель лучше стохастической, так как использует значительно большее количество априорной информации. Однако ее не всегда удается построить.

Если известна точная физическая модель, то структура и параметры формирующей системы определяются по дифференциальным уравнениям модели. В линейном случае для этого необходимо записать исходные уравнения физической модели в пространстве состояний в форме Коши и определить переходные матрицы состояния и возмущения методами теории линейных систем. Полученные характеристики подставляются в матричные уравнения фильтра Калмана—Бьюси. Идентификация модели при этом не нужна. Если же физическая модель известна с точностью до параметров, параметры модели идентифицируются с помощью рекуррентных процедур МНК с учетом текущих наблюдений. В случае нелинейности уравнений физической модели производится их линеаризация путем разложения в ряд Тейлора в окрестности текущей оценки измеряемой переменной с сохранением необходимого количества членов ряда. Полученный в этом случае фильтр называется обобщенным фильтром Калмана—Бьюси.

6.3. Примеры расчетов комплексного критерия грозоопасности

Для контроля работы алгоритма адаптивной идентификации проводилось его тестирование. Адаптивному идентификатору «предъявлялись» последовательности значений временных рядов, порождаемых такими моделями, как:

- 1) детерминированная модель с постоянными параметрами

$$y(t) = 1,73y(t-1) - y(t-2), \quad (6.44)$$

т. е. дискретный гармонический процесс с периодом $t_0 = 12$;

- 2) детерминированная модель с постоянными параметрами

$$y(t) = 1,22y(t-1) - 0,5y(t-2), \quad (6.45)$$

т. е. дискретный затухающий гармонический процесс с периодом и параметром затухания $d = 1/\sqrt{2}$;

- 3) стохастическая модель с переменными параметрами

$$y(t) = a_1(t)y(t-1) + a_2(t)y(t-2) + \varepsilon(t), \quad (6.46)$$

где

$$a_1(t) = a_1(t-1) + \beta_1 T(t),$$

$$a_2(t) = a_2(t-1) + \beta_2 T(t),$$

$T(t)$ — белый шум с единичной дисперсией,

$$\beta_1 = 0,2; \quad \beta_2 = 0,15; \quad a_1(0) = -0,8; \quad a_2(0) = -1; \quad \sigma_\varepsilon^2 = 0,33.$$

По поступающим значениям временных рядов адаптивный идентификатор должен был восстанавливать порождающие их модели. При этом соответствующие оценки параметров последовательно уточнялись по мере предъявления идентификатору очередных значений анализируемых временных рядов.

Процесс адаптации (настройки) параметров моделей идентификатором в случаях 1) и 2) иллюстрируется рис. 6.2. Из рисунка видно, что уже после получения четырех отсчетов временной реализации $y(t)$ (т. е. после «просмотра» менее чем полупериода) оценки параметров соответствующих моделей $\hat{a}_i$ фактически совпадают с истинными значениями a_i , показанными на рисунке прямыми, параллельными оси абсцисс. За начальные оценки параметров произвольно приняты нулевые. Таким образом, идентификация детерминированных моделей происходит очень быстро.

Случай 3) является существенно более сложным. Модель подобного типа — нестационарная, стохастическая, и процесс, порождаемый ею, вполне может встретиться в практической ситуации. Адаптация параметров в этом случае показана на рис. 6.3. Из рисунка видно, что дрейф истинных значений параметров модели (кривые 1) хорошо отслеживается адаптивным идентифика-

тором (дрейф оценок, кривые 2). За начальные значения параметров произвольно приняты $\hat{a}_1(0) = 0$, $\hat{a}_2(0) = -0,5$.

Тестовые расчеты демонстрируют эффективность описанного метода адаптивной идентификации стохастических моделей, что позволяет использовать его для обработки реальных грозовых про-

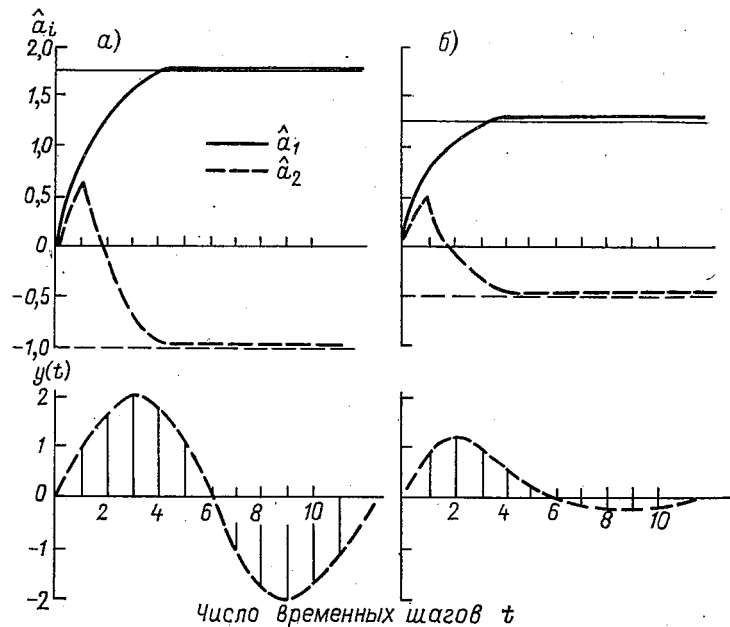


Рис. 6.2. Пример настройки параметров модели $\hat{a}_i$ при поступлении в адаптивный идентификатор значений дискретного гармонического (а) и затухающего гармонического (б) процессов.

Прямые, параллельные оси абсцисс, соответствуют истинным значениям параметров.

цессов с целью их прогнозирования на короткие временные интервалы.

В качестве примера прогнозирования реальной грозовой ситуации на рис. 6.4, 6.5 показаны прогнозы ККГ во время грозы 17 июня 1983 г. с упреждением соответственно в 2 и 10 мин (оптимальный порядок модели $p = 3$, порядок разности $q = 1$) по данным 10-минутных измерений. На рис. 6.5 приведены также траектории дрейфа параметров адаптивной стохастической модели, использованной при прогнозе (кривые 4—6). Для параметров модели были приняты произвольные нулевые начальные условия. В дальнейшем параметры изменялись во времени за счет адаптации к реальным данным. Как видно из рис. 6.4 и 6.5, с увеличением времени упреждения ошибки прогнозирования растут, что вполне естественно (в соответствии с формулой (6.43)).

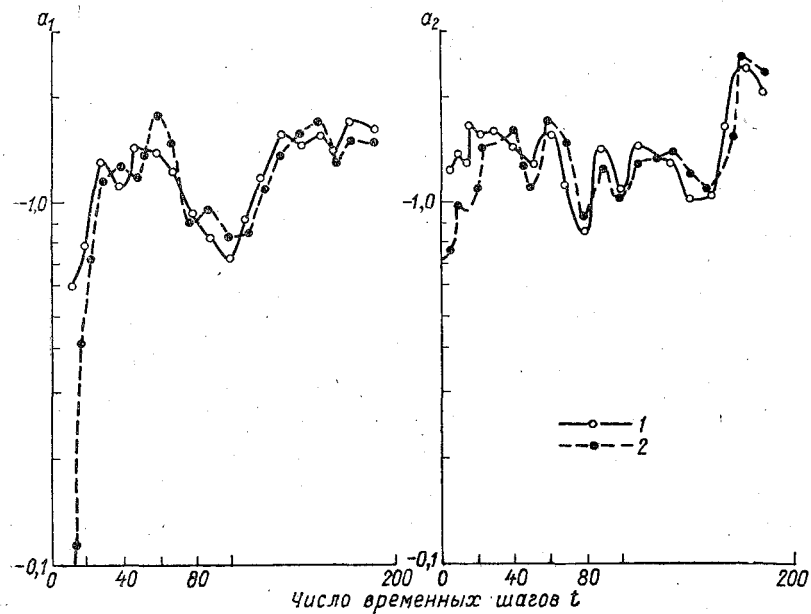


Рис. 6.3. Пример настройки параметров модели $\hat{a}_i$ при поступлении в адаптивный идентификатор значений процесса, порождаемого стохастической моделью со случайно меняющимися параметрами.
1 — истинные значения параметров, 2 — текущие оценки параметров.

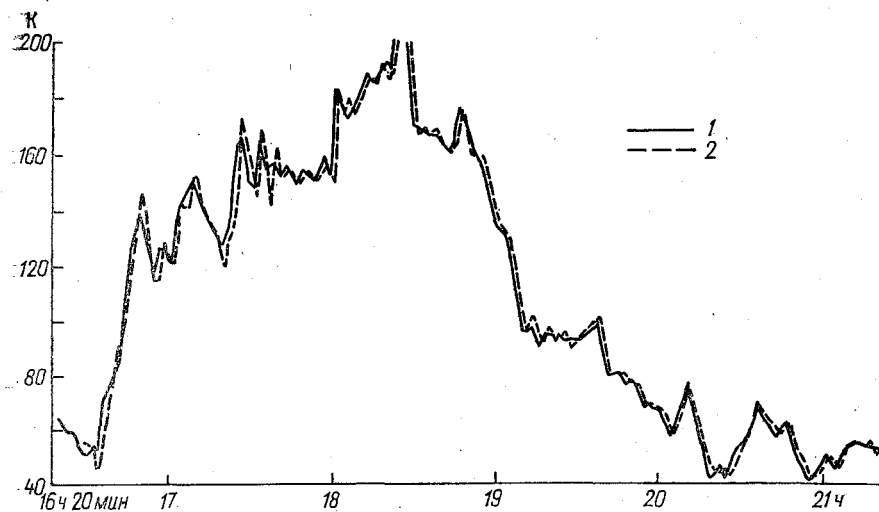


Рис. 6.4. Временной ход комплексного критерия грозоопасности K (1) и его прогноз с упреждением в 2 мин (2). Грозовой процесс 17 июня 1983 г.

Дисперсия ошибок прогноза с наибольшим упреждением в 6 раз меньше дисперсии ККГ и в 2 раза меньше дисперсии ошибки инерционного прогноза, что позволяет признать результаты про-

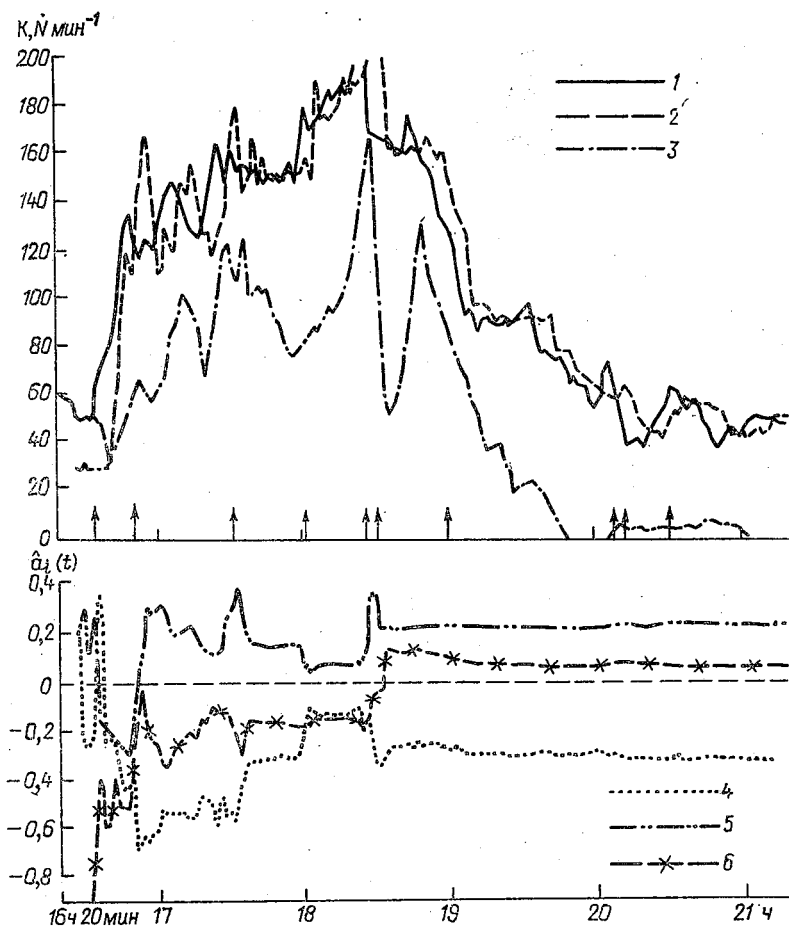


Рис. 6.5. Временной ход комплексного критерия грозоопасности K (1) и его прогноз с упреждением в 10 мин (2). Грозовой процесс 17 июня 1983 г.

3 — частота молниевых разрядов $\dot{N}$; 4, 5, 6 — траектории дрейфа параметров прогнозирующей адаптивной стохастической модели $\hat{a}_i(t)$.

Стрелками указаны моменты смещения азимутов наблюдений комплекса активно-пассивной радиолокации.

гнозирования вполне приемлемыми. Упреждение в 10 мин соответствует времени пролета современными самолетами расстояния, равного радиусу обзора комплекса активно-пассивной радиолокации.

Результаты прогнозирования с упреждением в 10 мин и траектории дрейфа параметров адаптивных стохастических моделей радиолокационной отражаемости грозового процесса 17 июня 1983 г. представлены на рис. 6.6.

Дисперсия ошибки прогноза логарифма радиолокационной отражаемости (оптимальный порядок модели $p = 2$, порядок раз-

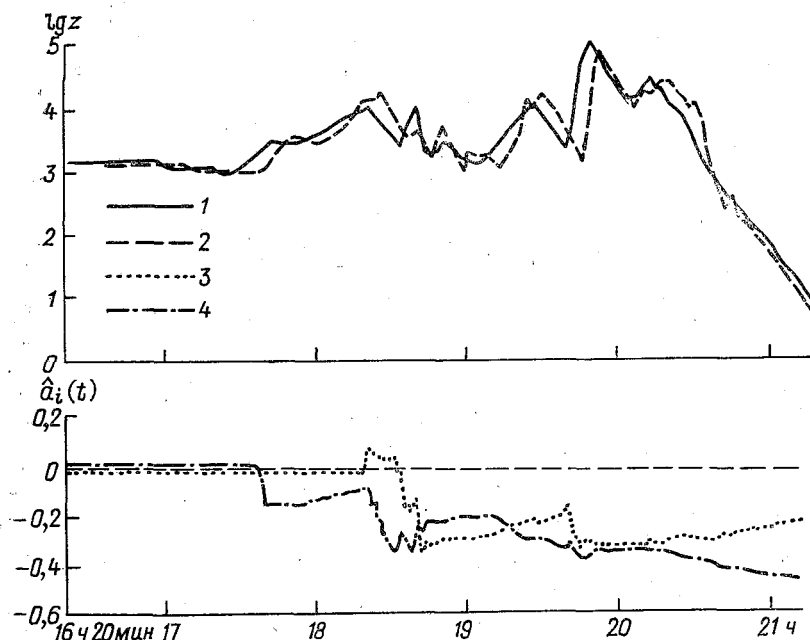


Рис. 6.6. Логарифм радиолокационной отражаемости грозовой облачности 17 июня 1983 г. $\lg z(t)$, его прогноз с упреждением в 10 мин (2) и траектории дрейфа параметров прогнозирующей стохастической модели $\hat{a}_i(t)$ (3, 4).

ности $q = 1$) в 6,8 раза меньше собственной дисперсии $\lg z$ и в 1,5 раза меньше дисперсии ошибки инерционного прогноза.

В целом прогнозирование реальных процессов с использованием описанных методов можно считать эффективным.

6.4. Структурный анализ комплексного критерия грозоопасности

Траектории дрейфа параметров прогнозирующей адаптивной стохастической модели несут важную физическую информацию о временной структуре ККГ. Возможность временного структурного анализа основана на эвристическом представлении о грозовой активности как о процессе, проходящем в своем развитии ряд

стадий, информацию о которых несут отдельные сегменты кривой ККГ. Точки стыка информативных сегментов могут интерпретироваться как моменты смены состояний процесса. Алгоритм сегментации должен разбить кривую на ряд примыкающих друг к другу участков, характеризующихся некоторой однородностью поведения. Так как настраиваемая модель (6.14) — (6.15) является наилучшим линейным приближением к «истинному» неизвестному динамическому закону изменения процесса, естественным критерием однородности является относительно малая изменчивость значений параметров модели в пределах некоторого временного участка квазистационарного состояния. Статистически значимые скачкообразные изменения соответствуют переходам в другую стадию развития, т. е. границам информационных сегментов.

Например, рис. 6.5 может служить иллюстрацией к сказанному: имеются участки относительно спокойного поведения параметров модели, ограниченные достаточно выраженными скачкообразными изменениями, значительно превышающими допустимые выборочные вариации оценок. В данном случае все скачки параметров адаптивной стохастической модели соответствуют временам незначительной (в пределах 11°) смены азимутов наблюдений комплекса активно-пассивной радиолокации (соответствующие моменты времени на рисунке отмечены стрелками). На стадии затухания грозового процесса (после 18 ч 50 мин) смена азимутов наблюдения не приводит к столь значительным изменениям параметров модели, так как грозовой процесс характеризуется большей пространственной и временной однородностью.

Эти результаты говорят о высокой чувствительности адаптивного идентификатора к изменению структуры моделируемого процесса, что позволяет осуществлять его временную сегментацию.

Одним из практических приложений этого свойства может стать возможность оценки эффекта активных воздействий на грозовые процессы по наступившим в результате воздействия изменениям информационно-временной структуры ККГ.

6.5. Выбор наименее опасной траектории полета летательного аппарата в зоне повышенной грозовой активности

Наличие мгновенной и прогностической карты степени потенциальной грозовой опасности (поля ККГ) в перспективных системах автоматического грозооповещения может явиться основой для принятия различных оперативных решений в процессе УВД. В то же время часть подобных решений может приниматься в автоматическом режиме мини-ЭВМ (или специализированным микропроцессором) системы грозооповещения.

В качестве примера использования с этой целью информации о потенциальной степени грозовой опасности обозреваемого

пространства приведем алгоритм решения задачи выбора оптимальной траектории полета летательного аппарата.

В обозреваемом пространстве определяется дискретное поле, в узловых точках которого (i, j) заданы числовые значения ККГ (мгновенные или прогностические) $\hat{K}_{i, j}$; $i = 1, 2, \dots, R$; $j = 1, 2, \dots, \mathcal{L}$.

При этих условиях может быть сформулирована задача автоматического выбора наименее опасной траектории полета между двумя заданными точками.

Математически эта задача может быть рассмотрена как задача сетевой оптимизации и решена методами динамического программирования [18, 211].

Итак, задана ориентированная сеть поля значений ККГ, содержащая $M = R \times \mathcal{L}$ узлов. Необходимо определить наименее опасную траекторию, проходящую через узлы из исходной точки номер 1 в заданную точку номер M , если задана матрица $(D_{l \rightarrow m})$ значений ККГ при переходе из точки номер l в соседнюю точку номер m . Элементы матрицы определяются следующим образом

$$D_{l \rightarrow m} > \hat{K}_{i, j}, \quad (6.47)$$

где $i = 1, 2, \dots, R$; $j = 1, 2, \dots, \mathcal{L}$ — сетевые координаты точки номер m ; $l, m = 1, \dots, M$; $M = R \times \mathcal{L}$.

Пусть $W^*(l)$ — наименее опасная траектория из точки l в точку M . Принцип оптимальности Беллмана гласит, что, каков бы ни был способ достижения точки l , последующие решения должны быть оптимальными для части пути, начинающегося в этой точке. Пусть из точки l произошел переход в соседнюю точку m . Этот переход характеризуется степенью опасности $D_{l \rightarrow m}$. По принципу оптимальности точка m должна быть такой, чтобы путь из m в M был частью наименее опасного пути из l в M . Наименее опасную траекторию из точки m в точку M обозначим через $W^*(m)$. Тогда номер точки m выбирается из условий минимума $\{D_{l \rightarrow m} + W^*(m)\}$. Уравнение Беллмана—Каплабы для выбора оптимальной траектории записывается в виде

$$W^*(l) = \min_{l \neq m} \{D_{l \rightarrow m} + W^*(m)\}. \quad (6.48)$$

Для решения уравнения (6.48) все точки сети условно разделяются на r множеств по числу $1, 2, \dots, r$ шагов. К множеству Ψ_0 относятся точки, из которых можно попасть в точку M не более чем за r шагов, к множеству Ψ_1 — точки, из которых можно попасть в точку M не более чем за $(r-1)$ шагов, и т. д. Если точка $l \in \Psi_{s-1}$ (здесь $s = 1, 2, \dots, r$), то считается что точка $m \in \Psi_s$. Тогда уравнение (6.48) принимает вид

$$W_s^*(l) = \min_{\substack{l \in \Psi_{s-1} \\ m \in \Psi_s}} \{D_{l \rightarrow m} + W_{s+1}^*(m)\}. \quad (6.49)$$

Условным оптимальным решением на s -м шаге является точка m , в которую следует перейти из точки l , оптимальное решение обозначается $C_s^*(l)$. Точка M относится к множеству Ψ_r , тогда $W_{r+1}^*(M) = 0$. Множество Ψ_{r-1} состоит из точек l , из которых можно попасть в точку M не более чем за один шаг, поэтому

$$W_r^*(l) = \min_{\substack{l \in \Psi_{r-1} \\ m=M}} \{D_{l \rightarrow m} + 0\} = D_{l \rightarrow m}; \quad C_r^*(l) = M. \quad (6.50)$$

Для точек $l \in \Psi_{r-2}$

$$W_{r-1}^*(l) = \min_{\substack{l \in \Psi_{r-2} \\ m \in \Psi_{r-1}}} \{D_{l \rightarrow m} + W_r^*(m)\} \text{ и т. д.} \quad (6.51)$$

Таким образом, уравнение Беллмана—Калабы решается с помощью итеративной процедуры последовательных приближений. Окончательным решением будет

$$W_{\min} = W_1^*(1), \quad (6.52)$$

при этом набор оптимальных решений $C_s^*(l)$, $s = 1, \dots, r$ дает последовательность узловых точек, определяющих наименее грозоопасную траекторию.

Задача может быть расширена путем введения ограничения на предельно допустимое значение ККГ в узловой точке для оптимальной траектории конкретного типа ЛА. В рамках методов динамического программирования возможно также вычисление наилучшей замены оптимальной траектории с меньшей длиной, что позволяет построить иерархию траекторий по степени убывания их длины с различной степенью грозоопасности. Путем введения функции потерь можно сформулировать задачу минимизации байесовского риска с ограничениями на длину траектории (ресурс ЛА).

Подводя краткие итоги изложенному в предыдущих главах, можно отметить следующее.

Для обеспечения успешного управления воздушным движением (УВД) в условиях все большего распространения широкофюзеляжных и высокоскоростных ЛА и стремления к всепогодным и длительным полетам возникают особые требования к грозооповещению: в перспективных системах грозооповещения необходимо автоматическое представление оперативного мгновенного и прогностического (с упреждением до 10 мин) полей грозовой опасности в районе аэродромов и космодромов в радиусе 150—200 км. При этом под грозовой опасностью понимается не только опасность встречи с молниевыми разрядами по трассе полета в области активной грозовой деятельности, но и опасность искусственной провокации разрядов в ЛА как в области активной грозовой деятельности, так и в тех облачных зонах, в которых до подхода

ЛА грозовая активность не проявлялась. Информационной основой таких перспективных систем автоматического грозооповещения могут служить данные активно-пассивной радиолокации, так как содержащаяся в них информация о развитии электрических процессов в обозреваемой облачной массе как в стадии активной грозовой деятельности, так и в стадии подготовки к ней в наибольшей степени характеризует грозовое, пред- и послегрозовое состояние облачности.

Методической же основой перспективных систем автоматического грозооповещения, разработке которой посвящены настоящая и предыдущая главы, являются:

а) построение функции измеряемых средствами активно-пассивной радиолокации параметров, значения которой количественно выражают степень потенциальной опасности встречи и провокации молниевых разряда ЛА в каждой точке обозреваемого пространства на уровне максимального количества информации, содержащегося в комбинации измеряемых параметров, т. е. построение комплексного критерия грозоопасности (ККГ) с целью получения мгновенного поля грозовой опасности;

б) разработка метода прогнозирования ККГ на короткие временные интервалы, сохраняющего работоспособность в условиях нестационарности прогнозируемых процессов, наличия в них измерительных шумов, априорной неопределенности статистических свойств процессов и шумов, с целью получения прогностического поля грозовой опасности и обеспечения непрерывности предоставления информации на время отсутствия измерений.

Реализация методической основы предполагает использование мини-ЭВМ (в дальнейшем — специализированного микропроцессорного устройства) в комплексе с измерительными устройствами. При этом вся информация, получаемая активно-пассивным радиолокационным измерительным комплексом, будет поступать на блок автоматической обработки, имеющий выход на два дисплея. На одном из них будет представлена карта степени грозовой опасности обозреваемого пространства в данный момент наблюдений, на другом — ее прогноз на 5—10 мин. Эти данные будут непрерывно обновляться в темпе поступления новой информации и являться основой для принятия оперативных решений потребителем. Серийная реализация устройства подобного типа — задача ближайшего будущего. К настоящему времени же осуществлено математическое обоснование, алгоритмическая и программная реализация оптимальных методов решения задач по пунктам а) и б). Результаты расчетов в реальных грозовых облаках демонстрируют эффективность разработанных методов. Аппаратурно-техническая сторона находится в настоящее время в стадии разработки.

Предметом дальнейших исследований на массовом статистическом материале должно явиться изучение особенностей поражения реальных объектов, имитирующих ЛА (с использованием провокаторов молний), молниевыми разрядами на разных стадиях гро-

зового процесса для выявления градаций степени поражения по соответствующим значениям ККГ.

Выводы

Нестационарность временных рядов данных активно-пассивных радиолокационных измерений, априорная неопределенность и наличие измерительных ошибок, а также необходимость работы в реальном масштабе времени требует разработки специального метода.

Разработка метода прогнозирования в этих условиях включает в себя выбор класса моделей временного ряда, построение процедуры идентификации моделей и собственно прогнозирование.

В качестве класса моделей используется семейство адаптивных стохастических моделей авторегрессии с переменными во времени коэффициентами относительно q -конечной разности анализируемого временного ряда. Это семейство описывает широкий круг нестационарных процессов. Использование подобных моделей во временной области эквивалентно аппроксимации процесса на классе полиномов, экспонент, тригонометрических функций и различных их комбинаций; в частотной области — аппроксимации спектральной плотности моделируемого процесса. Трансформация временных и спектральных свойств стохастической модели диктуется изменениями во времени ее параметров.

При идентификации моделей ищутся оптимальные в смысле минимума средних квадратических ошибок прогноза (т. е. МНК) значения параметров адаптивной стохастической модели. Критерий МНК не требует априорного знания вероятностных свойств прогнозируемого процесса и при выполняемых в нашем случае ограничениях является оптимальным критерием оптимальности (абсолютно оптимальным на классе). Рекуррентная процедура минимизации критерия МНК строится с использованием модифицированного алгоритма Калмана—Бьюси. Оценки параметров модели корректируются по мере поступления текущих данных измерений прогнозируемого процесса в соответствии с изменениями, происходящими в статистической структуре данных.

Оптимальное в смысле МНК прогнозирование осуществляется с использованием рекуррентного фильтра Калмана—Бьюси, подавляющего случайные ошибки измерений в начальных условиях прогнозирующего уравнения. Текущая структура фильтра Калмана—Бьюси задается адаптивно идентифицированной моделью прогнозируемого процесса.

В разработанном методе прогнозирования проблема нестационарности характеристик грозового процесса преодолевается использованием адаптивного подхода; априорная неопределенность — использованием МНК и адаптивного подхода; наличие измерительных ошибок — использованием калмановской фильтрации; необходимость работы в реальном масштабе времени — рекуррентным (последовательным) характером всех процедур.

Результаты расчетов в тестовых и реальных грозовых ситуациях свидетельствуют об эффективности описанного метода.

Поведение адаптирующихся параметров стохастической модели несет дополнительную физическую информацию о происходящих структурных изменениях в наблюдаемых процессах и позволяет осуществлять их информационно-временную сегментацию.

Описанный метод прогнозирования достаточно универсален и может быть использован для прогноза на короткие временные интервалы различных физических величин, информация о которых поступает в ходе измерений. Этот метод рядом упрощающих предположений может быть сведен к известным методам, являющимся его частными случаями, сохранив при этом возможность реализации в реальном масштабе времени.

ГЛАВА 7

ВОЗМОЖНОСТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ АППАРАТУРЫ АКТИВНО-ПАССИВНОЙ РАДИОЛОКАЦИИ ГРОВОВЫХ И ГРОВООПАСНЫХ ОЧАГОВ

Результаты измерений грозового состояния облачности, представленные выше, безусловно более репрезентативны и определены, нежели наблюдения с помощью МРЛ и различных грозо-пеленгаторов, что подтверждается данными и других авторов [54, 168]. Следует сказать, что применяемая сейчас аппаратура довольно громоздка, обработка результатов измерений требует большой затраты сил и времени. Вместе с тем имеется реальная возможность усовершенствовать аппаратуру активно-пассивной радиолокации грозовых очагов, о чем пойдет речь в настоящей главе, автоматизировать процесс обработки и осуществить оперативное построение поля степени грозовой опасности обозреваемого пространства по данным измерений, а также оптимальную адаптивную экстраполяцию этого поля во времени и интерполяцию в пространстве (см. гл. 5, 6).

7.1. Требования к радиолокационной станции, предназначенной для обнаружения молний

На разных стадиях формирования канала молнии его отражающие свойства, определяемые эффективной площадью рассеяния (ЭПР), различны и зависят от множества факторов, таких, как геометрические размеры элементов канала молнии, ориентация основного канала и его ответвлений, степень ионизации газа в канале разряда, область канала, входящая в отражающий объем пространства РЛС, и т. д. ЭПР молний сильно зависит от длины волны РЛС (см. гл. 2). В работах [39, 47, 49, 89] теоретически и экспериментально определены статистические характеристики эффективной отражающей поверхности σ (ЭОП) канала сильно-точного атмосферного разряда. В диапазоне метровых волн ЭОП обычно лежит в интервале $10-10^3$ м². На частоте 155 МГц ($\lambda = 1,95$ м) функция плотности распределения $p(\sigma)$ ЭОП хорошо аппроксимируется выражением

$$p(\sigma) = \frac{0,32}{230} \exp\left(-\frac{\sigma}{230}\right) + \frac{0,68}{4400} \exp\left(-\frac{\sigma}{4400}\right). \quad (7.1)$$

Из (7.1) следует, что в 32 % σ имеет среднее значение 230 м², а в 68 % наблюдаемых ситуаций среднее значение ЭОП канала молнии равно 4400 м²; т. е. канал молниевых разрядов является эффективно отражающим объектом в диапазоне метровых радиоволн. Однако длительность существования сигнала, отраженного от канала разряда (τ), невелика.

Эта величина (τ) также зависит от многих факторов, таких, как сила тока, протекающего по каналу, его длительность, количество возвратных ударов при разряде, скорость рассеяния остывающего канала молнии, зависящая от интенсивности турбулентного переноса воздушной массы в зоне разряда и т. д. Обычно время существования сигнала отражения от канала молнии измеряется десятками долями секунды и лишь в редких случаях может достигать 1,5–2 с. Как показал анализ [66], отраженные сигналы по временным характеристикам могут быть разделены на две группы. К первой, отличающейся монотонным характером нарастания и спада величины ЭОП, относится 71 % общего числа наблюдавшихся сигналов. Ко второй группе, отличающейся флуктуирующим характером нарастания и спада величины ЭОП, относится 29 %. Среднее время существования сигнала отражения от молнии для первой группы $\approx 0,2$ с, для второй группы $\approx 0,43$ с. Для аппроксимации функции плотности распределения $p(\tau)$ может быть использовано гамма-распределение

$$p(\tau) = A\tau^b \exp(-\tau/c). \quad (7.2)$$

Параметры распределения A , b и c для сигналов первой группы равны: $A_1 = 16$; $b_1 = 0,38$; $c_1 = 0,146$ с, а для сигналов второй группы: $A_2 = 332,3$; $b_2 = 2,43$; $c_2 = 0,129$ с.

С учетом процентного соотношения сигналов двух групп обобщенная аппроксимирующая зависимость имеет вид

$$p(\tau) = 11,4\tau^{0,38} \exp\left(-\frac{\tau}{0,146}\right) + 96,4\tau^{2,43} \exp\left(-\frac{\tau}{0,129}\right). \quad (7.3)$$

Как показал анализ, подтвержденный непосредственными наблюдениями [39, 47, 66, 197], ЭОП и τ монотонно убывают с уменьшением длины волны РЛС.

Особенно сильно уменьшаются эти величины в коротковолновой части дециметрового и в сантиметровом диапазоне. Если на длине волны $\lambda = 17$ см наблюдения за отраженными от канала молнии сигналами проводились и эти сигналы еще наблюдались (в августе 1970 г. в Ленинграде в ЛГМИ на радиолокационной станции температурно-ветрового зондирования типа «Метеорит», в которую специально для этого были внесены некоторые изменения), то на $\lambda = 10$ см до самого последнего времени наблюдались только сигналы радиоизлучения молниевых разрядов. Лишь в 1986 г. появились сообщения [21] о регистрации с помощью радиовысотометра ПРВ-10 ($\lambda = 10$ см) разрядов молний по специально разработанной методике. На $\lambda = 3$ см сигналы от молний почти не наблюдались. В значительной мере это объясняется

также тем, что в зону обзора РЛС_{см} попадала малая часть пространства и, не исключено, что в этом пространстве просто не было молниевых каналов.

Соотношения (7.1) и (7.3) дают возможность установить основные характеристики РЛС, предназначенной для обнаружения молний, и основные особенности ее работы. Значительная величина ЭОП канала делает несложным его обнаружение при условии, что в пространство обзора РЛС попадает канал молнии или, по крайней мере, существенная его часть. Последнее обстоятельство является причиной определенных ограничений на характеристики передающей и антенной систем РЛС. Уменьшение длительности зондирующего импульса и сужение диаграммы направленности, с одной стороны, позволяет повысить разрешающую способность РЛС по дальности и увеличивает точность определения угловых координат цели, с другой — способствует уменьшению отражающего объема пространства и ЭОП канала молнии, расположенного внутри отражающего объема. В результате может наблюдаться существенное ослабление сигнала, отраженного от канала разряда, что затрудняет его обнаружение.

Еще одной причиной, осложняющей выделение отраженного молнией сигнала, является его маскировка сигналами отражений от облачных частиц. С уменьшением длины волны сигнал отражения от гидрометеоров возрастает (для частиц малого размера пропорционально λ^{-4}), а сигнал, отраженный каналом разряда, уменьшается и по величине, и по длительности. Как показал анализ [83, 144, 168], эта маскировка незначительна вплоть до длин волн 15—20 см, на более коротких волнах она становится значительной.

Вместе с тем уменьшение длины волны по сравнению с той, на которой проводились наши экспериментальные исследования, является целесообразным, так как при этом можно заметно уменьшить габариты антенной системы, сохраняя или даже улучшая ее направленные свойства.

Рассмотрим вопрос о режиме обзора пространства РЛС, обнаруживающий молниевые разряды. При работе РЛС в режиме кругового обзора часть информации о молниевых разрядах может теряться из-за того, что некоторые каналы молний оказываются вне зоны обзора РЛС (молния возникла в той области пространства, куда в данный момент не излучаются зондирующие импульсы). Тем самым уменьшается вероятность обнаружения молнии.

Анализ показывает, что если РЛС, антенная система которой формирует диаграмму направленности в горизонтальной плоскости шириной ϑ_0 и обеспечивает сканирование в секторе шириной Θ с частотой вращения Ω , то вероятность обнаружения канала молнии $P_{\text{обн}}$ равна

$$P_{\text{обн}} = \sum_{i=1}^2 p_i \left[1 + \frac{M_i^2 + D_i}{\Theta M_i} \Omega I(x_i, y_i) - \left(1 - \frac{\vartheta_0}{\Theta} \right) I(x_i, y_i - 1) \right]. \quad (7.4)$$

Здесь p_i — вероятность появления сигнала i -й группы по временным признакам ($p_1 = 0,71$; $p_2 = 0,29$); M_i — среднее время существования отраженного сигнала i -й группы по временным признакам ($M_1 = 0,2$ с; $M_2 = 0,43$ с); D_i — дисперсия времени существования отраженного сигнала i -й группы ($D_1 = 2,9 \cdot 10^{-2}$ с²; $D_2 = 5,55 \cdot 10^{-2}$ с²);

$$x_i = \frac{\Theta - \vartheta_0}{\Omega D_i} M_i; \quad y_i = \frac{M_i^2}{D_i} + 1;$$

$$I(x_i y_i) = \frac{1}{\Gamma(y_i)} \int_0^{x_i} \exp(-t) t^{y_i-1} dt \text{ — неполная гамма-функция;}$$

$$\Gamma(y_i) = \int_0^{\infty} \exp(-t) t^{y_i-1} dt \text{ — гамма-функция.}$$

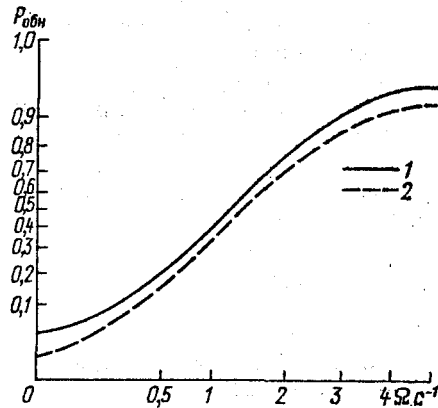


Рис. 7.1. Зависимость вероятности обнаружения канала молнии $P_{обн}$ от частоты вращения антенны Ω .
Ширина угла диаграммы направленности ϑ_0 : 1) 12° , 2) 4° .

Если РЛС работает в режиме кругового обзора, то в соотношении (7.4) $\Theta = 2\pi$. Зависимость вероятности обнаружения канала молнии от скорости обзора пространства для двух разных углов диаграммы направленности ϑ_0 представлена на рис. 7.1. Видно, что при малой частоте вращения антенны потеря информации чрезвычайно велика. Так, при $\Omega \rightarrow 0$ в среднем принимается один отраженный сигнал на 30 молниевых разрядов при ширине угла $\vartheta_0 = 12^\circ$ и один на 90 при $\vartheta_0 = 4^\circ$. Такая потеря информации недопустима. С увеличением скорости обзора пространства вероятность обнаружения возрастает, но практически увеличивать частоту вращения антенны более 3—3,5 с⁻¹ нецелесообразно, так как это не приводит к сколько-нибудь заметному росту $P_{обн}$ (см. рис. 7.1). Если частоту вращения антенны предположить равной 3 с⁻¹, то, исходя из максимальной дальности обнаружения молнии $R_{\max} = 150$ км, можно определить минимальную ширину угла диаграммы направленности $\vartheta_{0\min}$ антенной системы.

Действительно, период следования зондирующих импульсов $T_{\text{имп}}$ при $R_{\text{макс}} = 150$ км должен быть

$$T_{\text{имп}} \approx (1,5 - 1,8) \frac{2R_{\text{макс}}}{c} \approx (3 - 3,6) \cdot 10^{-3} \text{ с},$$

где $c = 3 \cdot 10^5$ км/с — скорость распространения радиоволн. Если предположить, что за такой временной интервал должно быть получено 6—8 сигналов, отраженных от канала молнии (n), то минимальная ширина угла диаграммы направленности антенной системы в горизонтальной плоскости должна быть 18—29° ($v_{\text{оми}} = nT_{\text{имп}} \Omega$). Такая ширина диаграммы не обеспечивает требуемой разрешающей способности радиолокационной станции грозообнаружения по угловым координатам. Это является причиной, по которой режим кругового обзора не обеспечивает получение требуемых параметров системы. Единственным вариантом, позволяющим использовать этот режим, сочетающий малые потери информации с высокой разрешающей способностью и дальностью обнаружения цели 150 км, может явиться многоканальная система с большим числом формируемых антенной лучей, однако это приводит к увеличению количества приемных каналов и усложнению системы индикации. Такой путь представляется неоправданно сложным.

Более целесообразно использовать РЛС грозообнаружения, устанавливая антенную систему неподвижно и ориентируя ее в направлении предполагаемой грозы. В этом случае, используя ИДА, за 1,5—2 мин наблюдений можно установить наличие молний, определить расстояние до грозового очага и оценить его интенсивность. Положение центра грозового очага, как показывают многолетние экспериментальные наблюдения, может быть определено с достаточно высокой точностью по сигналам немолниевых НТРИ [89]. Так, в экспериментах отклонение на 2—3° от центра грозового очага при ширине диаграммы направленности РЛС_м 11° уже дает ощутимое изменение амплитуды сигнала на выходе приемного тракта.

Следовательно, антенная система РЛС грозообнаружения должна иметь управляемое вращение по азимуту. Однако представляется логичным сократить режим кругового обзора с быстрым вращением узкого луча ($\theta_0 \approx 4 \dots 6^\circ$), если учесть, что молния не точечный отражатель, а сложная пространственно распределенная цель с большим числом протяженных ответвлений и длиной основного канала 6—7 км. Значительная часть молний имеет либо горизонтальную ориентацию основного канала, либо (при вертикальной структуре канала) многочисленные горизонтально расположенные ответвления. Если горизонтально ориентированный канал (или его ответвление) расположен перпендикулярно к направлению распространения зондирующего импульса, то при азимутальном вращении антенны полезный сигнал будет состоять из нескольких отраженных от канала импульсов. Учиты-

вая произвольность ориентации канала молнии в пространстве и особенности его структуры (разветвленность, большую протяженность), можно рассчитывать, что в большинстве случаев на экране ИКО будет наблюдаться радиолокационное изображение молнии.

Представляется перспективным также режим быстрого сканирования луча в пределах узкого сектора. Если ограничить сектор обзора углом $35-40^\circ$, то при быстром сканировании можно рассчитывать на получение радиолокационного изображения молнии с малой потерей информации. Быстрое качание в ограниченном секторе должно сочетаться с возможностью плавного перемещения антенной системы по азимуту и изменением положения сектора обзора. Для быстрых поворотов диаграммы направленности в пределах $35-40^\circ$ можно применять либо электронные методы создания сканирующего луча с использованием фазированных антенных решеток (ФАР), либо электромеханические методы резонансного качания антенной системы, при которых в элементах привода этой системы не возникают сколько-нибудь значительные механические нагрузки, несмотря на большую частоту вращения антенны и большую амплитуду ее движения (что существенно облегчает и упрощает систему привода).

Для выбора оптимальной длины волны РЛС грозообнаружения можно руководствоваться следующим:

а) длина волны должна быть более 15 см, так как на более коротких волнах полезный отраженный сигнал слаб и имеет малое время существования [19, 27]; кроме того, возможна сильная экранировка сигналов отражениями от облачных частиц;

б) уменьшение длины волны позволяет уменьшить габариты антенной системы при сокращении ширины угла диаграммы направленности; меньшие габариты предпочтительны при создании быстро вращающейся антенной системы.

Таким образом, при решении вопроса о длине волны РЛС грозообнаружения должен быть найден компромиссный вариант, который в какой-то мере удовлетворяет каждому из вышеприведенных соображений. Вероятно, оптимальная длина волны лежит в интервале 50—80 см. При $\lambda = 60$ см антенна, обеспечивающая $\Phi_0 = 4 \dots 6^\circ$, должна иметь габариты 6—6,5 м. В вертикальной плоскости диаграмма направленности антенной системы должна иметь косекансную форму.

Расчеты показывают, что для радиолокационного обнаружения молний на расстоянии до 150—200 км надо иметь мощность генерируемую передатчиком 180—230 кВт, чувствительность приемника должна составлять $10^{-13} - 5 \cdot 10^{-14}$ Вт (при соотношении уровней сигнал/шум, равном 3), а частота зондирующих импульсов — 350—400 Гц.

Длительность зондирующего импульса должна быть такой, чтобы в отражающем объеме пространства могла разместиться значительная часть молниевых каналов. Если пренебречь ответвлениями от канала и считать его ориентированным вертикально (наихудшие условия обнаружения), то в этом случае эффективно

отражающим будет объем ионизированной области, который обычно невелик. По данным некоторых авторов [230, 247], пространственная протяженность этого объема вдоль направления зондирования может достигать до нескольких метров. Таким образом, в этом неблагоприятном случае длительность зондирующего импульса практически не имеет ограничений в сторону уменьшения (она должна превышать приблизительно 0,2 мкс). Если канал ориентирован горизонтально и вытянут в направлении распространения зондирующего импульса РЛС, то сигналы отражения от ответвлений канала могут заметно увеличить амплитуду сигнала на выходе приемного устройства РЛС. Необходимо помнить, что увеличение длительности импульса ухудшает разрешающую способность станции по дальности и точность ее измерения. Учитывая вышеизложенные соображения, оптимальным интервалом длительности зондирующего импульса следует считать 2—4 мкс.

Как уже было сказано в главе 2 этой книги, наблюдениям за сигналами, отраженными от канала молнии, мешает нетепловое радиоизлучение, возникающее в конвективных облаках и резко усиливающееся в момент разряда. Это излучение может быть эффективно использовано при поиске грозоопасных и грозовых зон и диагностике состояния облаков. Однако при определении расстояния до канала молнии и пространственной протяженности канала радиоизлучение — фактор мешающий. Ослабить влияние НТРИ можно, используя в приемном тракте РЛС режим накопления. При этом синхронные сигналы, отраженные каналом молнии, начинают более отчетливо выделяться на фоне сигналов радиоизлучения, которые резко ослаблены и практически незаметны на экране ИДА (см. рис. 2.1).

Приведенные выше соображения определяют технические требования, которым должна отвечать РЛС, предназначенная для поиска и определения координат грозоопасных областей пространства. В состав этой станции должны входить индикаторы типа ИДА и ИКО, в которых предусмотрена возможность секторного обзора пространства. Несмотря на ряд существенных достоинств РЛС грозообнаружения, ей присущи некоторые недостатки. Отметим основные.

1. РЛС грозообнаружения может обнаруживать только сформировавшийся грозовой очаг, причем, как правило, лишь через некоторое время после начала грозы. Действительно, необходимо учитывать, что какая-то часть молниевых разрядов не воспринимается РЛС, работающей в режиме кругового обзора, так как в момент появления разряда может осуществляться зондирование той части пространства, в которой канала молнии нет. В этом случае существует конечная вероятность того, что канал молнии исчезнет прежде, чем после поворота антенной системы начнет производиться зондирование той части пространства, в которой был канал. Учитывая, что на начальных стадиях развития грозы разряды происходят редко, время, разделяющее момент появления первого разряда и момент первого обнаружения разряда, может

быть значительным. Расчеты показывают [83], что в среднем для используемых сейчас РЛС оно равно 7—14 мин в зависимости от частоты молниевых разрядов на ранних стадиях развития грозы. При увеличении частоты вращения антенны оно может быть снижено до 2,5—6 мин, что, однако, тоже нельзя считать удовлетворительным и отвечающим требованиям сегодняшнего дня.

2. При отсутствии грозы крайне осложнена работа оператора РЛС грозообнаружения, так как длительные наблюдения за экраном, на котором не возникают изображения полезных целей, быстро утомляют оператора и создают ощущение бесполезности выполняемой работы. Исследования, проведенные специалистами инженерной психологии [135, 138], показали, что «монотонность и бедность внешних воздействий также ведет к увеличению ошибок действий, снижению эмоционального тонуса, появлению сонливости и т. п.». В связи с этим РЛС грозообнаружения целесообразно использовать только для определения местоположения и траектории перемещения уже существующих грозовых очагов или для их поиска при условии заведомо известной высокой вероятности возникновения грозы.

3. РЛС грозообнаружения представляет собой сложный радиотехнический комплекс, эксплуатация которого требует высокой квалификации обслуживающего персонала и характеризуется высокой стоимостью. Ряд узлов РЛС, в частности передатчик, имеет ограниченный срок службы основных (причем дорогостоящих) комплектующих изделий. Эти обстоятельства также указывают на крайнюю нецелесообразность работы РЛС в дежурном режиме и на необходимость разработки средств, которые, работая в автоматическом режиме, сигнализировали бы о возникающей предгрозовой или грозовой обстановке. Такими средствами могут быть радиоприемные устройства, принимающие сигналы НТРИ конвективных облаков до и во время грозы.

7.2. Требования к аппаратуре пассивной радиолокации грозовых и грозоопасных очагов

О параметрах сигналов НТРИ конвективных облаков подробно рассказывалось в главе 3. Отличительные особенности этих сигналов, а именно: их импульсный характер, кратковременность импульсов, заметные паузы между ними — дают возможность сравнительно просто выделить их на фоне других сигналов. Импульсы НТРИ резко отличаются от сигналов искусственного происхождения (помех), и ручная фильтрация, поиск частоты, на которой не наблюдаются сигналы помех, осуществляется оператором сравнительно легко (при условии, что в процессе работы ведется постоянный контроль за отсутствием источников помех на частоте настройки приемника). Изменение условий прохождения радиоволн или включение ранее неработавшего передатчика, излучающего сигналы на частоте настройки приемника, могут приводить

к ложным срабатываниям. Необходимо применять дополнительные меры, обеспечивающие автоматическую перестройку частоты приемника при поступлении на его вход сигналов помех, тогда ложные тревоги могут быть сведены к минимуму.

Вероятность необнаружения цели (пропуска грозы) в зоне уверенного приема (около 80—100 км) практически близка к нулю, так как ситуации, при которых во время грозы не наблюдалось бы НТРИ, невозможны. Другой вопрос связан с заблаговременностью обнаружения грозы. В настоящее время статистических данных, позволяющих произвести расчет этой величины, недостаточно. Ориентировочно можно считать, что с 20-минутной заблаговременностью можно будет обнаруживать 70 % гроз, а с 10-минутной — около 90 %.

Недостатком однопунктных систем обнаружения предгрозового и грозового состояния по сигналам НТРИ является невозможность определения координат облаков. Указанные системы позволяют лишь сделать заключение о приближении грозы или о ее наличии в том или ином азимуте. Для определения координат грозоопасных зон и грозовых очагов необходимо использовать РЛС_{дм} совместно с МРЛ-5.

На основании накопленного опыта и анализа особенностей сигналов НТРИ можно кратко сформулировать требования, которым должна отвечать аппаратура пассивной радиолокации, предназначенная для обнаружения грозоопасной облачности (в частности, находящейся в предгрозовой стадии развития), для диагностики электрического состояния облаков, определения стадии и тенденции развития грозового процесса. Как нам представляется, в состав этой аппаратуры должны входить несколько специализированных радиоприемных устройств со следующими техническими характеристиками:

- 1) радиоприемные устройства (РУ) должны работать на нескольких частотах в диапазоне 1—400 МГц;
- 2) чувствительность РУ должна быть не менее 2 мкВ при соотношении сигнал/шум, равном 5;
- 3) амплитудная характеристика РУ должна быть линейно-логарифмической с динамическим диапазоном по входу не менее 72 дБ, по выходу не более 20 дБ;
- 4) полезный сигнал должен сохранить постоянную составляющую огибающей высокочастотного напряжения, для чего он снимается на систему обработки с выхода детектора приемного устройства.

7.3. Возможные варианты построения специализированной аппаратуры активно-пассивной радиолокации грозовых и грозоопасных очагов

Выше были перечислены те требования, которым должна отвечать аппаратура активной и пассивной радиолокации, предназна-

ченная для своевременного обнаружения предгрозовой стадии развития облаков, поиска и определения координат грозových очагов. Здесь изложим некоторые варианты использования активно-пассивной радиолокации, позволяющие повысить безопасность и регулярность полетов самолетов (и других ЛА) при фронтальной облачности в пунктах взлета и посадки. При этом должны определяться не только области развитой грозовой активности, но и тенденция (прогноз) развития процессов в грозовой, догрозовой и послегрозовой стадиях на короткие временные интервалы, выбираемые на командно-диспетчерских пунктах в процессе управления воздушным движением (УВД). Особо должны выделяться зоны облачности, где отсутствуют молнии, но которые подготовлены к искусственному инициированию (провокации) молниевых разрядов различными ЛА.

В наиболее простом варианте аппаратура, обеспечивающая диспетчера аэропорта информацией о грозowych зонах пространства, может быть выполнена в виде дополнительного комплекса, сопрягаемого с диспетчерской РЛС_{см}. Об интенсивности электрических процессов предполагается судить по радиолокационной отражаемости облаков, определяемой с помощью диспетчерской РЛС, а также по сигналам НТРИ облаков, принимаемым в диапазоне средних и метровых волн. Анализ получаемой информации позволит выделить облачные зоны с повышенной интенсивностью электрических процессов, причем заблаговременно обнаруживаются облака, которые, не являясь грозowymi, могут быть опасными для ЛА: приближающийся объект может спровоцировать в таких облаках молниевый разряд. Дополнительный комплекс должен включить систему многоконтурного изохро, сопрягаемую с выходом радиоприемного тракта современной диспетчерской РЛС, систему многолучевой пеленгации НТРИ на трех различных частотах с конструктивно независимым антенным устройством, систему обработки информации и формирования данных о степени грозоопасности облаков и тенденции их развития на базе мини-ЭВМ, а также систему вывода информации на командно-диспетчерский пункт.

Во втором, более сложном, варианте следует произвести сопряжение вышеописанной системы с метеорологическим радиолокатором МРЛ-5, что позволит повысить вероятность обнаружения и определения координат грозowych зон и выявлять потенциально грозоопасные (негрозowe в данный момент) облака.

Наиболее полно удовлетворяет современным требованиям к аппаратуре грозообнаружения специализированный комплекс активно-пассивной радиолокации грозowych очагов (сокращенно — КРГО). На этом варианте остановимся более подробно.

Аппаратура КРГО должна состоять из РЛС_{см} типа МРЛ-5, специализированной РЛС грозообнаружения, работающей в длинноволновой части дециметрового диапазона, четырех радиоприемных устройств (СВ-, КВ-, метрового и дециметрового диапазонов) и системы обработки и отображения информации.

Комплекс должен работать в двух режимах: дежурном и оперативном. В первом случае КРГО обеспечивает постоянный контроль сигналов, излучаемых облаками, и сигнализирует о переходе в предгрозовую стадию. В оперативном (или рабочем) режиме комплекс осуществляет поиск и обнаружение грозовых зон, слежение за этими зонами, определяет их координаты, основные параметры и тенденцию развития.

В дежурном режиме в КРГО работает только один средневолновый радиоприемник (частота настройки $\sim 1,7$ МГц) и система обработки и отображения информации. Приемник имеет штыревую антенну, обеспечивающую одинаковые условия приема радиоизлучения со всех азимутов. Сигналы НТРИ с выхода детектора этого приемника поступают в систему обработки, в которой происходит селекция полезных сигналов от сигналов искусственного происхождения (помех). При возникновении помех приемник автоматически отстраивается от частоты помехи. При появлении устойчивых сигналов НТРИ вырабатывается сигнал тревоги, извещающий о наличии предгрозового состояния, при этом автоматически включаются другие приемные устройства и две РЛС — КРГО переводится из дежурного режима в оперативный.

Информация о параметрах сигналов НТРИ высвечивается в цифровом виде на специальном табло и в аналоговой форме на экране дисплея с указанием времени. Это существенно упрощает обработку и восприятие получаемых данных. При появлении сигнала НТРИ одновременно на выходах всех радиоприемных устройств, т. е. при возникновении сигнала широкополосного радиоизлучения, связанного с молниевым разрядом, специальным регистратором отмечается момент наступления грозовой опасности.

После прогрева электровакуумных приборов радиопередающих устройств производится полное включение РЛС и начинаются обзор пространства с их помощью с целью выявления и определения координат и основных параметров грозоопасных и грозовых областей пространства, а также наблюдения за перемещением, эволюцией и тенденцией развития грозовых очагов.

Алгоритм работы оператора КРГО может быть в этот период различным. Наиболее целесообразным представляется поиск зон повышенной радиолокационной отражаемости в сантиметровом диапазоне с последующим контролем электрического состояния выявленных облачных систем РЛС_{дм} и синхронным контролем НТРИ облаков всеми радиоприемными устройствами комплекса, включающими два канала направленного приема. При этом РЛС_{дм} может использоваться как в режиме с неподвижной антенной, так и в режиме с быстро сканирующим лучом. Второй режим представляется более целесообразным, так как он позволяет получить радиолокационное изображение грозового очага на индикаторе кругового обзора.

Результаты активно-пассивных радиолокационных измерений должны поступать также на блок автоматизированной обработки,

который осуществляет непрерывный подсчет числа импульсов молниевое и немолниевое радиоизлучения в единицу времени по всем приемным каналам и аналого-цифровое преобразование. Этот блок должен сопрягаться с миникомпьютером, имеющим выход на дисплей. Миникомпьютер по данным измерений строит поле степени грозовой активности обозреваемого пространства и осуществляет оптимальную экстраполяцию поля во времени и интерполяцию в пространстве. На дисплее представляется результат обработки зарегистрированных сигналов в виде распределения степени грозовой активности в пространстве в каждый момент наблюдений начиная с предгрозовой стадии, а также оптимально спрогнозированное распределение грозовой активности.

Выводы

В этой главе предлагается несколько вариантов современной аппаратуры оперативного грозообнаружения, которые могут лечь в основу нового поколения метеорологических радиолокаторов. Следует отметить, что в ЛГМИ все эти варианты разработаны на уровне технического задания, однако подробный анализ их схематических решений выходит за рамки данной книги.

ГЛАВА 8

**ЭЛЕКТРИЗАЦИЯ И РАДИОИЗЛУЧЕНИЕ
ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА
ПРИ ПОЛЕТЕ В АТМОСФЕРЕ.
БОРТОВОЙ ИНДИКАТОР
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ**

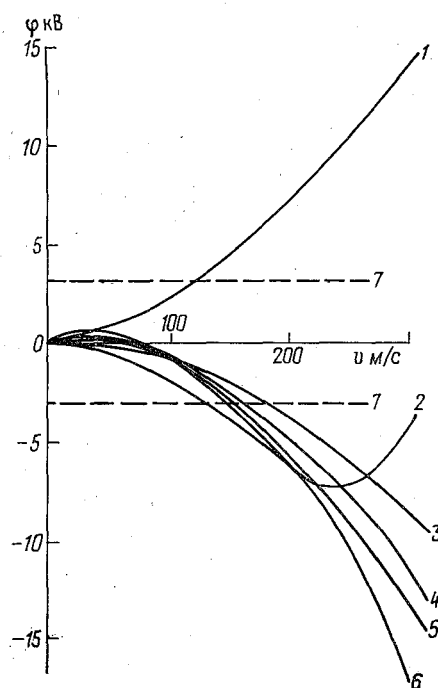
Для измерения электрического состояния ЛА (самолета, ракетного комплекса) наряду с наземной аппаратурой дополнительно можно использовать аппаратуру, размещенную на борту летательного аппарата.

Известные попытки установки на борту ЛА измерителей напряженности электростатического поля типа динамических электрометров (флюксометров) не привели к положительным результатам. Соответствующие датчики, требующие наружной установки электромеханических устройств, нетехнологичны, сложны для установки, к тому же, как показывает эксперимент [61], наличие только одного датчика не позволяет получить полную картину электрической обстановки вокруг ЛА.

В то же время анализ летных происшествий показывает, что большая часть случаев поражения ЛА молниевым разрядом приходится на негрозовые облака, а также на те конвективные облака, в которых до появления в них ЛА электрическая активность не регистрировалась. Не всегда подобные зоны удается обнаружить и с помощью существующих радиолокационных методов, использующих сантиметровый диапазон [175].

Уже давно в ряде исследований по поражению самолетов молниевыми разрядами отмечалось, что за несколько секунд до поражения ЛА молнией возникало сильное коронирование, сопровождаемое интенсивными радиопомехами [61]. Отмечался еще один примечательный факт — поражение молнией происходило в условиях слабых внешних электрических полей и было обусловлено интенсивной электризацией самого ЛА. Этот факт позволил в дальнейшем сформулировать понятие *электрически опасной зоны* в облаках, которая в отличие от *электрически активной зоны* определяется не интенсивными внешними электрическими полями, а комплексом физико-химических характеристик аэрозоля (жидких или твердых облачных элементов или компонентов осадков), которые приводят к интенсивной электризации попадающего в такую зону летательного аппарата. Тем самым такая зона в значительной мере остается скрытой от наблюдения и не выявляется традиционными радиолокационными и электрофизическими методами [175], поскольку ее опасность определяется не только указанными характеристиками облачных элементов, но и в значи-

тельной мере аэродинамическими параметрами и скоростью вторгающегося в нее ЛА. Однако некоторые собственные параметры этой зоны, например рН и электропроводность облачной воды, в большой степени определяющие интенсивность последующей электризации проникающего в нее высокоскоростного объекта, могут быть определены с помощью специальных дистанционных методов зондирования.



В конце 60-х годов в ЛГМИ применительно к проблеме электризации ЛА в облаках и осадках проводились экспериментальные исследования электризации тел в потоке высокоскоростного аэрозоля [30]. Было исследовано свыше 20 различных материалов, в основном используемых в авиационно-космической промышленности — алюминий и его сплавы, титан, нержавеющая сталь, плексиглас, кварцевое стекло, стеклотекстолит и т. п. Выявлено, что практически все использованные в опытах материалы в потоке капель

Рис. 8.1. Зависимость предельного потенциала φ от скорости потока v для различных материалов.
1 — свинец, 2 — алюминий, 3 — титан, 4 — нержавеющая сталь, 5 — кварц, 6 — текстолит; 7 — порог начала радиоизлучения.

дистиллированной воды при скоростях свыше 150—200 м/с заряжаются отрицательно (единственным исключением являлся свинец, в широком диапазоне скоростей заряжающийся положительно, но его электризация, по-видимому, обусловливается интенсивной эрозией поверхности при взаимодействии с потоком и уносом части массы пробного тела, см. рис. 8.1).

Особый интерес представляло то обстоятельство, что отрицательный заряд наблюдался не только у металлических пробных тел, но и у тел, изготовленных из различных изоляторов. Это позволяло предположить, что элементарный процесс электризации реализуется не в точке контакта аэрозоль—твердое тело, как это считалось ранее, а при разрыве жидкости, аналогично тому, как это происходит при разрушении твердых тел. Тем самым интенсивность электризации должна была в значительной степени определяться электропроводностью взаимодействующей с твердым телом

жидкости, так как аналогичная зависимость электризации от электропроводности материала наблюдается в твердых диэлектриках при их разрушении (трещинообразовании).

В связи с этим была исследована интенсивность электризации пробного тела, изготовленного из диэлектрика (с целью уменьшения возможности электрохимического взаимодействия с потоком

аэрозоля при различных рН исходного раствора). Разумеется, электропроводность раствора была бы более универсальной характеристикой, поскольку позволяет выявить также влияние и основных солей, однако величина рН отличается большей универсальностью в смысле независимости соотношения H^+ и OH^- от концентрации со-

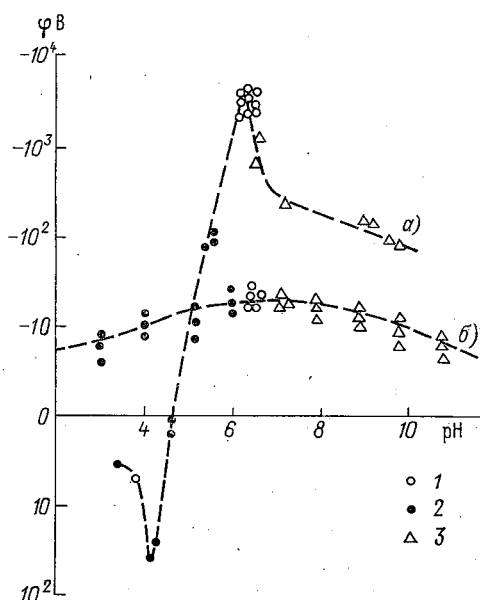


Рис. 8.2. Зависимость предельного потенциала φ от рН потока аэрозоля для двух случаев.

а — высокоскоростной поток ($v \approx 150$ м/с), *б* — контактная электризация ($v \approx 30$ м/с); 1 — дистиллированная вода, 2 — HCl, 3 — NaOH; материал пробного тела — текстолит.

державшегося в растворе вещества. Другой причиной использования этой электрохимической характеристики была необходимость сравнения ее с ранее полученной универсальной зависимостью кристаллизационного потенциала от рН [183].

Результаты эксперимента приведены на рис. 8.2а. Здесь же приведены результаты аналогичного эксперимента при малых скоростях взаимодействия капель аэрозоля с твердым телом в области проявления контактной электризации (б). Из сравнения результатов видно, что интенсивность электризации, связанной с разрывом жидкости, сильно зависит от концентрации примесей в распыляемой воде и достигает максимума в равновесной дистиллированной воде. Примечателен тот факт, что измеренная удельная производительность электризации, связанной с разрывом жидкости, равна примерно 1 Кл/кг (для дважды дистиллированной воды и скорости потока около 300 м/с). Таким образом, обнаружен наиболее интенсивный механизм статической электризации. Для сравнения — удельная производительность баллоэффекта достигает всего 10^{-11} — 10^{-10} Кл/кг. К тому же баллоэффект наблюдается лишь у полярных жидкостей, а проведенные измерения показали, что электризация, связанная с разрывом (разрушением)

жидкости, наблюдается и у веществ с нулевым дипольным моментом (бензол, четыреххлористый углерод и т. п.).

Традиционно процесс электризации и последующего возникновения собственного радиоизлучения ЛА представляется в виде двух этапов: 1) заряджение ЛА за счет контактного механизма электризации до потенциала, превышающего порог коронирования, 2) возникновение широкополосного радиоизлучения вследствие стекания избыточного заряда. Однако измерения, проведенные при скоростях потока свыше 200 м/с, показали наличие прямого механизма радиоизлучения. Оно возникает непосредственно в зоне интенсивного разрушения соударяющихся с твердым телом капель и сопровождается интенсивным, видимым даже при дневном свете свечением зоны разрушения в виде световой «короны» вокруг тела. При этом не играют особой роли материал тела (оно может быть выполнено и из изолятора), а также наличие на нем потенциала (тело может быть заземлено).

При наличии в потоке скоростного аэрозоля металлического пробного тела реализуется еще один механизм радиоизлучения — резонансный. В радиотехнике аналогом этого является генерация радиоизлучения «звонящим контуром» — т. е. возбуждение собственных резонансных колебаний в LC -цепи при воздействии на нее периодических токовых импульсов, период следования которых заведомо больше периода колебаний контура. Как показано в работе [176], если поверхность ЛА электропроводна, то она представляет собой колебательную систему с распределенными параметрами, собственные частоты которой определяются характерными размерами ЛА.

Коронный разряд, имеющий нестационарный характер, возбуждает в этой колебательной системе электромагнитные колебания, поскольку каждая пульсация заряда Δq вызывает появление цуга затухающих электромагнитных волн с энергией

$$\Delta W = a u \Delta q = (q/C) a \Delta q. \quad (8.1)$$

Здесь a — безразмерный коэффициент, который определяется электрическими и геометрическими параметрами ЛА и местом расположения точек, где возникает разряд. При частоте f -пульсаций коронного разряда мощность возникающего электромагнитного излучения будет равна

$$P = f \Delta W = (q/C) a f \Delta q. \quad (8.2)$$

Поскольку $f \Delta q = I$, где I — суммарный ток коронного разряда, то

$$P = (q/C) a I = a I, \quad (8.3)$$

где φ , q , C — соответственно потенциал, заряд и электрическая емкость ЛА. Таким образом, мощность собственного радиоизлучения ЛА, возбужденного коронным разрядом, пропорциональна мощности последнего и может служить индикатором электрического состояния ЛА.

Если в качестве колебательной системы с распределенными параметрами будет служить металлический стержень длиной l , то он становится источником электромагнитных колебаний, длина волн которых будет $\lambda = 2l/k$, где $k = 1, 2, 3, \dots$

Оценки мощности ЛА как электростатического генератора помех, выполненные по формуле (8.3), а также приведенные в работе [53], показывают, что в экстремальных случаях для современного широкофюзеляжного самолета она может достигать весьма внушительной цифры — сотен и тысяч киловатт.

Электрические и электромагнитные процессы такой интенсивности могут существенно повлиять на полет ЛА, вплоть до отказа систем энергоснабжения, связного и навигационного оборудования, а в ряде случаев даже до перебоев или отказа в работе двигателей установок. Известны случаи поражения самолетов молниевыми разрядами в облаках негрозового типа [53, 61, 175], где до и после пролета в них ЛА грозовая деятельность не отмечалась. Следовательно, она была стимулирована как собственным высоким потенциалом ЛА, так и возникновением в облаках дополнительных зарядов, генерируемых при разрушении капель и частиц аэрозоля при столкновении с поверхностью ЛА.

Как было показано выше, интенсивность этого процесса сильно зависит от концентрации примесей в облачной воде, причем как раз в том диапазоне концентраций, которые наиболее характерны для естественных атмосферных условий. Тем самым возрастание интенсивности электризации ЛА и связанной с ней интенсивности собственного электромагнитного излучения будет свидетельствовать о наличии электрически опасной зоны в облаках даже при отсутствии в ней существенных внешних электрических полей.

Исследования этого явления проводились на самолетах гражданской авиации. Так, на самолете АН-24, где в качестве датчика использовалась штатная коротковолновая антенна, было зарегистрировано характерное радиоизлучение самолета, основная длина волны которого составляла $\lambda_0 \approx 58$ м. Характерные размеры самолета АН-24: длина фюзеляжа — 23,53 м, размах крыльев — 29,2 м. Следовательно, с достаточно хорошим приближением длина волны в этом случае определялась размахом крыльев и оказалась, как и ожидалось, в 2 раза больше последнего.

Очевидно, такое радиоизлучение может возбуждаться у каждого летательного аппарата с электропроводной поверхностью при его полете с достаточно большой скоростью, когда возникает коронный разряд. Какой характерный размер ЛА будет определять длину волны, зависит от соотношения длины фюзеляжа и размаха крыльев, их взаимного расположения, а также размещения разрядников.

Для развития грозового разряда необходимо существование в облаке, где находится самолет, электрического поля со средней напряженностью не ниже требуемой для поддержания разряда. При этом самолет, несущий заряд, может играть роль поджигающего электрода, вызывающего появление пиков напряженности

электрического поля больше необходимой для возникновения разряда.

Исследования условий поражения самолетов молниями показали, что вероятность удара молнии в самолет довольно тесно связана с величиной электрического заряда самолета.

Для повышения безопасности полетов на летательных аппаратах следует иметь устройства, сигнализирующие об опасных си-

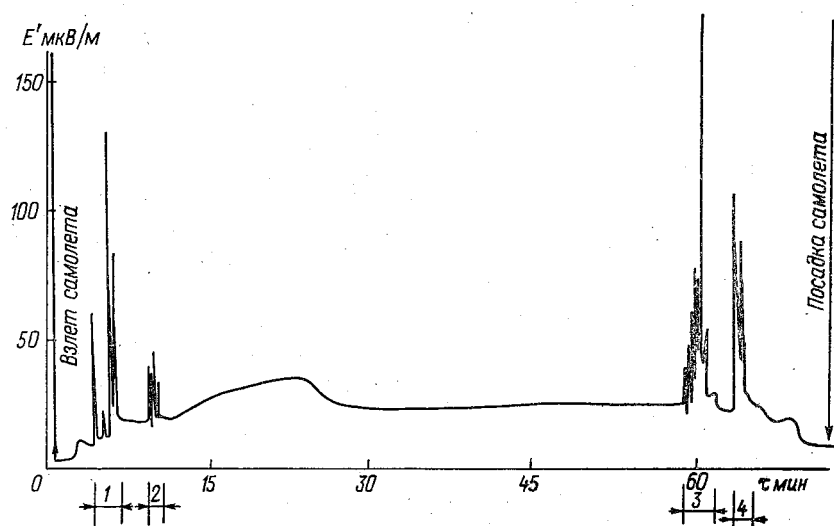


Рис. 8.3. Пример регистрации собственного радиоизлучения самолета при полете по кольцевому маршруту. Рига, февраль 1978 г.

1, 2 — пересечение слоев слоистых облаков при взлете; 3, 4 — пересечение слоев слоистых облаков при посадке; с 15-й по 60-ю мин — полет в свободной атмосфере на высоте 6000 м; E' — напряженность электромагнитного поля.

туациях, характеризующихся возникновением интенсивного коронного разряда. Об интенсивности коронного разряда можно судить по пропорциональной ей интенсивности характерного радиоизлучения корпуса самолета, возникающего, как уже было сказано, вследствие нестационарного характера коронного разряда. Датчиком в этом случае может служить антенна, наклеенная на корпус самолета, не имеющая подвижных частей, изолированная от осадков и обледенения. Антенна соединяется с соответствующим регистратором, и информация может фиксироваться не только визуально, но и записываться регистратором, что может быть полезно при объективном разборе происшествий, связанных с поражением самолета электрическим разрядом. Регистратор может быть снабжен устройством, автоматически отличающим и блокирующим отдельные радиоэлектронные блоки самолета при достижении интенсивности коронного разряда критического значения.

Разработанный в ЛГМИ индикатор электрически опасных зон в облаках (ИЭЗ) представляет собой радиоприемное устройство,

настроенное на собственную резонансную частоту самолета. В качестве приемных антенн в разное время использовались штатная коротковолновая антенна самолета, магнитная антенна, расположенная в блистере внутри фюзеляжа, антенна в виде отрезка полосковой линии, приклеиваемая непосредственно к фюзеляжу и не изменяющая аэродинамических характеристик самолета. Выходной сигнал регистрировался на ленте самопишущего миллиам-

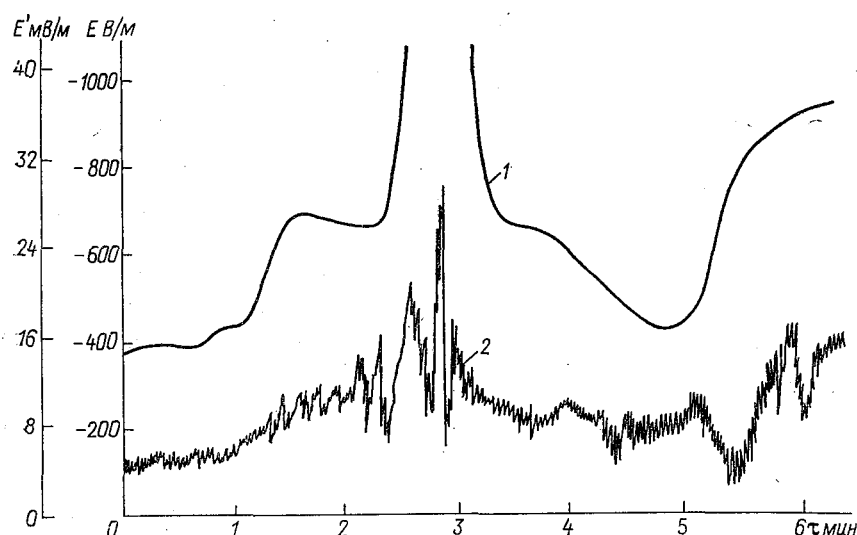


Рис. 8.4. Синхронная регистрация электрического (1) и собственного электромагнитного (2) поля самолета (ТУ-104Б, полет в облаке типа Ns, февраль 1978 г.).

E — напряженность электрического поля, E' — напряженность электромагнитного поля.

перметра. Пример регистрации собственного радиоизлучения самолета при полете по кольцевому маршруту представлен на рис. 8.3. Отчетливо фиксируются моменты входа и выхода из облака.

В разное время испытания ИЭЗ проводились на самолетах-лабораториях типа АН-24, ТУ-104Б, АН-12. В зависимости от условий полета и состояния атмосферы измеряемые уровни электромагнитных сигналов колеблются от единиц-десятков микровольт при внутрифюзеляжной антенне и полетах в малооблачных условиях до десятков милливольт при полетах в электрически заряженных облаках.

Рассмотрим результат одного из экспериментов в натуральных условиях. Этот эксперимент проводился во время полетов на самолете типа ТУ-134. Датчик в виде короткозамкнутого на одном конце отрезка полосковой линии крепился вдоль крыла вблизи фюзеляжа, и открытый конец его с помощью коаксиального кабеля соединялся с измерительным радиоприемником, установлен-

ным в салоне самолета. Регистрация велась на многоканальный самописец. Производилась синхронная запись интенсивности собственного радиоизлучения самолета и напряженности внешнего электрического поля при полете через облако. На рис. 8.4 представлен фрагмент такой записи. Радиоизлучение возникало во время полета при заходе в облако и его интенсивность зависела от скорости и окружающий самолет обстановки. Резкий рост напряженности электрического поля вокруг самолета сопровождается столь же резким усилением радиоизлучения, связанным, по-видимому, с увеличением заряда самолета за счет его статической электризации.

Выводы

Определяемое с помощью индикатора электрически опасных зон в облаках электрическое состояние ЛА является комплексной характеристикой как собственного потенциала ЛА, так и внешних электрических полей, она в первом приближении не дублирует измеритель напряженности поля, однако может характеризовать степень электрической опасности, в частности вероятность поражения молниевым разрядом. Информация об «электрическом состоянии» ЛА может иметь и самостоятельное значение, но оптимально ее применение в качестве дополнительной к радиолокационной.

Коронный разряд может вызвать появление характерных электромагнитных колебаний и в других электропроводных объектах, таких, как, например, линии передачи электрической энергии. При этом длина волны, скорее всего, будет определяться расстоянием между опорами.

В дальнейшем усовершенствованный вариант прибора предполагается испытать совместно с другими измерителями электрических характеристик на самолетах-лабораториях.

Для обнаружения гроз в стационарных условиях используется комплекс радиолокационной аппаратуры в режиме активного и пассивного зондирования. В настоящий момент аналогичное устройство даже в упрощенном варианте не может быть еще установлено на серийном самолете, однако предупреждение о грозе и электрически опасных зонах в облаках по маршруту полета приобретает первостепенное значение для обеспечения безопасности полетов. В этом плане прибор типа ИЭЗ по способу измерения и простоте устройства представляется оптимальным для установки на самолетах гражданской авиации.

ГЛАВА 9

ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕТЕПЛОВОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ

9.1. Моделирование нетеплового радиоизлучения, возникающего при кристаллизации воды (и некоторых диэлектриков)

В последние годы проведено большое количество работ по исследованию электрических явлений при фазовых переходах, в частности при кристаллизации воды и некоторых диэлектриков.

Первые работы в этой области относятся к 1960 г. [85], когда исследовались импульсные электрические токи, возникающие при взрывообразном раскалывании капель спонтанно кристаллизующейся воды. В дальнейшем было обнаружено импульсное радиоизлучение, сопровождающее спонтанную кристаллизацию воды [93]. Аналогичные результаты получены в Томском политехническом институте [22, 43], однако если в [93] деформация была вызвана кристаллизацией, то в [22, 43] она создавалась внешней (по отношению к образцу льда) нагрузкой либо термическими напряжениями. В природных процессах, очевидно, сочетается и то и другое [96].

Согласно работе [112], радиоизлучение наблюдается и при разрушении материалов; в ней показано, что максимум интенсивности этого излучения лежит в области низких частот (5 кГц).

Естественные процессы, связанные с фазовыми переходами воды, сопровождают широкий круг природных явлений (гляциологические, океанологические, атмосферные и т. п.), поэтому возникла необходимость разработки новых методов их дистанционного диагноза и прогноза. В связи с этим были проведены лабораторные измерения НТРИ, которое, как предполагалось, должно сопровождать процесс термодинамически необратимой кристаллизации. Ряд соображений о возможности радиоизлучения при кристаллизации высказан ранее в работе [57].

Установка для лабораторного исследования нетеплового радиоизлучения кристаллизующейся воды является дальнейшим развитием варианта, применявшегося для измерения межфазных кристаллизационных потенциалов [172]. Замораживались растворы с концентрацией от 10^{-6} до 10^{-3} М при скоростях движения фронта кристаллизации 0—1,5 мм/мин. Измерялись электрическая и магнитная составляющие радиополя в диапазоне от 20 Гц до 10 МГц с помощью нескольких селективных вольтметров с полосой пропускания 0,2—200 кГц в низкочастотной части диапазона и 5 кГц — в высокочастотной. Чувствительность аппаратуры позво-

ляла уверенно регистрировать сигналы с напряженностью поля более 3 мкВ/м. Акустический сигнал регистрировался с помощью пьезодатчика.

На рис. 9.1 показаны результаты типового опыта. Управляя температурным режимом измерительной кюветы, добивались того, чтобы кристаллизационный потенциал, возрастая, достиг макси-

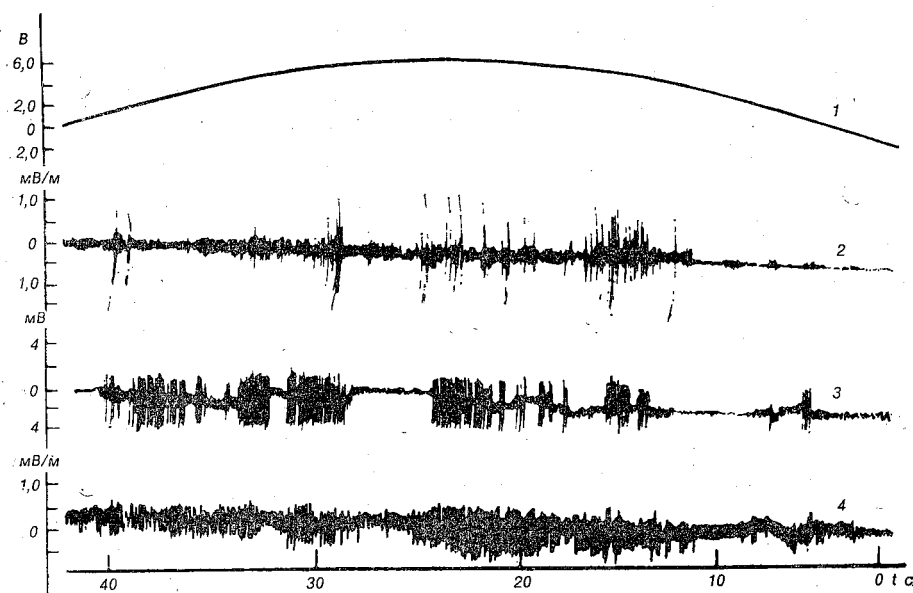


Рис. 9.1. Типовая синхронная запись электрических, электромагнитных и акустических сигналов, возникающих при кристаллизации воды.

1 — электрокристаллизационный потенциал, 2 — интенсивность электромагнитного поля (электрическая компонента), 3 — интенсивность акустического сигнала (в условных делениях регистратора), 4 — интенсивность электромагнитного поля (магнитная компонента).

мального значения, а затем вновь снизился до нуля. Радиоизлучение и акустический сигнал следуют за изменением скорости движения фронта кристаллизации. Они возникают (исчезают), если потенциал оказывается выше (ниже) некоторого порогового значения. На рис. 9.2 показана характерная осциллограмма серии из трех последовательных высокочастотных импульсов. Длительность одного полупериода изменяется в пределах от долей до нескольких микросекунд, а максимальная частота напряжения, зарегистрированная в эксперименте, составляет $(1-2) \cdot 10^6$ Гц.

На рис. 9.3 представлены некоторые параметры НТРИ в зависимости от электрокристаллизационного потенциала, а на рис. 9.4 — вероятностные характеристики параметров НТРИ (обработано 420 осциллограмм).

В работе [169] исследовано новое явление самопроизвольного излучения в оптическом диапазоне при замерзании и охлаждении

жидкостей и растворов. Увеличение скорости кристаллизации воды, водных растворов, органических спиртов, кислот, некоторых эфиров сопровождается деформационными процессами и явлениями криолюминесценции. Большую роль в возникновении криолюминесценции играют электрические явления, происходящие в быстрозамерзающих жидкостях (пьезо- и пьезоэлектрические эффекты), разделение зарядов на свежесформированных поверхно-

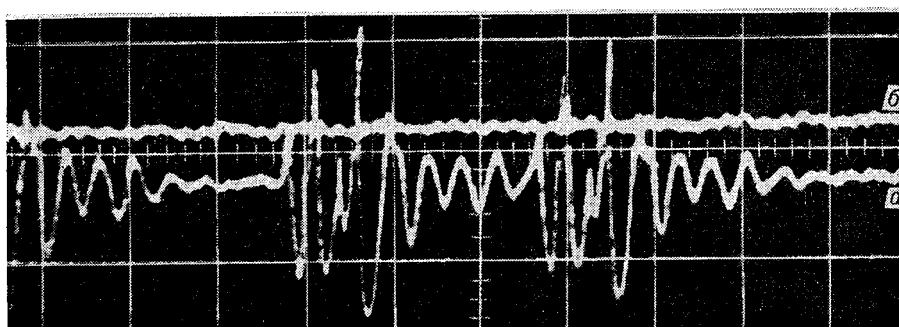


Рис. 9.2. Осциллограмма импульсов НТРИ, возникающего при кристаллизации воды.

а — электрическая компонента, б — фоновый сигнал при отсутствии кристаллизации (для наглядности сдвинут вверх на 0,5 деления).

Масштаб: по горизонтали 1 деление — 5 мкс, по вертикали 1 деление — 1 мВ/м.

стях, образование и движение дислокации в твердом теле, растрескивание и излучение.

Электромагнитные импульсы зарегистрированы также при кристаллизации сала. Как известно, при затвердевании расплавленного сала наблюдается значительная межфазная разность потенциалов. По-видимому, радиоизлучение при кристаллизации должно наблюдаться и у других веществ, кристаллизация которых сопровождается возникновением значительных межфазных потенциалов. Общепринятого объяснения обнаруженного эффекта пока нет. Привлечение для объяснения пьезоэффекта льда не представляется оправданным из-за сильной зависимости исследуемого эффекта от содержания примесей, к тому же большинство авторов отрицают наличие у льда пьезоэффекта при температурах выше 160 К. Близкий по характеру процесс, по-видимому, описывался в работе [186] при внешнем нагружении образца льда. Автор [186] объясняет появляющееся при этом радиоизлучение возникновением разломов и электризацией бортов трещин. Однако зарегистрированный в этой работе спектральный максимум излучения лежит в диапазоне частот менее 1 кГц, в то время как при кристаллизации максимум излучения наблюдается в диапазоне 0,1—1 МГц.

В соответствии с нашими работами [78, 88] механизм нетеплового радиоизлучения можно представить следующим образом.

В тонком кристаллизующемся слое, примыкающем к фронту кристаллизации, возникает значительная разность потенциалов (до 10^2 — 10^3 В) при одновременном резком возрастании диэлектрической проницаемости. Из-за неравномерности (в микромасштабе) процесса в системе возникают импульсы давления [79] и периодические разрывы (микротрещины) в твердой фазе. В зоне трещины диэлектрическая проницаемость среды скачком уменьшается до

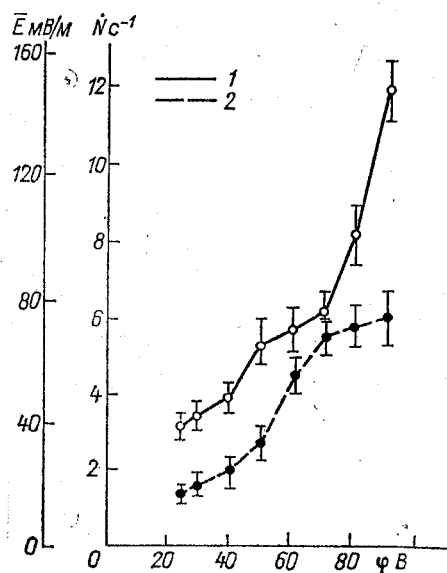


Рис. 9.3. Зависимость характеристик НТРИ от электрокристаллизационного потенциала ϕ (скорости протекания процесса).

1 — частота пакетов импульсов НТРИ N ,
2 — напряженность поля НТРИ (электрическая компонента) E .

значения, характерного для атмосферного воздуха. Соответственно в микроконденсаторе, образованном бортами трещины, резко возрастает первоначальная разность потенциалов (за счет электрокристаллизационного эффекта в начальной фазе кристаллизации градиент потенциала может достигать 10^3 — 10^4 В/см, что достаточно для возникновения газового разряда). Электрический пробой воздушного промежутка за счет резкого возрастания потенциалов на бортах трещин и является источником широкополосного НТРИ (см. рис. 9.2, видно, что возникающий радиоимпульс носит характерную для разрядного процесса форму).

Потенциал кристаллизации и аномально высокая диэлектрическая проницаемость являются функциями скорости кристаллизации количества примесей, поэтому от последних двух параметров также зависит и интенсивность радиоизлучения.

Выше речь шла о НТРИ, возникающем вследствие кристаллизационно-деформационных процессов, однако в природных условиях деформация льда может быть вызвана также термическим напряжением [43] или внешней нагрузкой [22].

При деформации морских и озерных льдов под влиянием флуктуирующего ветра происходит растрескивание льда, вызванное

сильными динамическими нагрузками [57]. Плавление льда с последующей быстрой кристаллизацией приводит к растрескиванию, вызванному как кристаллизацией, так и ветровой нагрузкой. Вне зависимости от природы процесса растрескивание электрически поляризованного льда сопровождается интенсивной электризацией бортов трещин и газовым разрядом в полости.

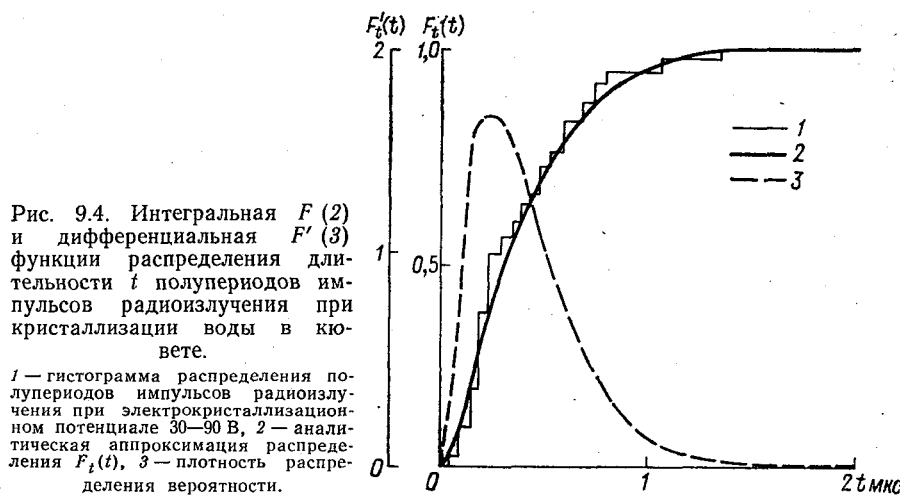


Рис. 9.4. Интегральная F (2) и дифференциальная F' (3) функции распределения длительности t полупериодов импульсов радиоизлучения при кристаллизации воды в кювете.

1 — гистограмма распределения полупериодов импульсов радиоизлучения при электрокристаллизационном потенциале 30–90 В, 2 — аналитическая аппроксимация распределения $F_t(t)$, 3 — плотность распределения вероятности.

Возможность использования НТРИ природных льдов для дистанционного контроля за напряженно-деформированным состоянием естественных ледовых покровов вытекает также из анализа физических процессов трещинообразования. В работах [58, 123] показано наличие определенной связи между действующим (в описываемых экспериментах — одноосным) механическим напряжением и интенсивностью акустической эмиссии из деформируемого образца, считающейся индикатором микротрещинообразования. Исходя из разрядного механизма формирования НТРИ, следует ожидать прямой связи между интенсивностью НТРИ и действующим механическим напряжением [22].

Натурные и лабораторные эксперименты показывают, что интенсивность НТРИ возрастает по мере того, как усиливается интенсивность деформации ледового покрова. Это относится как к естественным процессам, так и к вызванным искусственно.

В последние годы появились работы, в которых исследуется НТРИ, сопутствующее и другим природным процессам — землетрясениям, извержениям вулканов, оползням и т. п. Несмотря на столь обширный диапазон возможного проявления рассмотренных эффектов, в их основе лежит общий механизм генерации НТРИ — деформационное растрескивание диэлектрических материалов, сопровождающееся электризацией бортов трещин и последующим газовым разрядом.

Дальнейшее совершенствование методов регистрации собственного НТРИ природных объектов требует как определения наиболее информативного частотного диапазона при индикации тех или иных природных процессов, так и перехода от амплитудных характеристик НТРИ к амплитудно-частотным с использованием методов аппаратного корреляционного анализа и распознавания образов.

Представляется принципиально возможным использование рассмотренного неизвестного ранее явления для дистанционного зондирования тех природных объектов, в которых наблюдаются интенсивные процессы фазовых переходов. В то же время, например, при измерении радиотеплового излучения с земли или со спутников, при радиоастрономических наблюдениях кристаллизирующаяся в атмосфере вода может явиться источником радиопомех, особенно в метровом диапазоне радиоволн, а также в тех диапазонах УКВ, в которых кристаллизующиеся аэрозоли выступают в качестве резонансных линейных излучателей.

9.2. Исследование нетеплового радиоизлучения при кристаллизации капель воды

В конвективных облаках на разных стадиях развития наблюдаются процессы кристаллизации переохлажденных капель воды (гидрометеоров), в результате которых могут возникнуть НТРИ. Для получения количественных характеристик этого излучения была разработана специальная лабораторная установка. Она состояла из рабочей камеры, в которую помещалась исследуемая капля дистиллированной воды. Сигнал НТРИ, возникающий при кристаллизационно-деформационных процессах замерзающей капли, воспринимался антенной и подавался на вход широкополосного усилителя. Акустический сигнал регистрировался специальным пьезодатчиком. Заряд, возникающий при раскалывании (взрыве) замерзающей капли, снимался со стержня держателя и подавался на вход электрометра. Эксперименты проводились с каплями диаметром 2... 4 мм. Температура рабочей капли менялась от 0 до -40°C . Было проведено более 300 опытов с регистрацией НТРИ и акустических сигналов.

Кристаллизация капли начинается на поверхности [85, 126, 219] с образования ледяной оболочки. При этом наблюдается импульсное НТРИ. Текстура ледяной оболочки в момент ее формирования зависит от скорости охлаждения и скорости движения фронта кристаллизации. Возникновение импульсов НТРИ в начальный момент образования ледяной оболочки, по-видимому, обусловлено формированием микротрещин на ее поверхности, разделением зарядов, движением бортов трещин. Выбросы ледяных частиц, воздушных пузырьков, их ускорение также могут привести

к возникновению излучения. Так как эти процессы продолжаются несколько микросекунд, то формируются короткие импульсы в СВ-диапазоне частот.

По мере охлаждения капли и движения фронта кристаллизации к ее центру, капля испытывает деформации, связанные с ростом внутреннего давления, которое может достигать, согласно Книгу и Флетчеру [219], нескольких мегапаскалей. При замерзании воды в капле поглощенный ею воздух выделяется и собирается в виде пузырьков. В результате избыточного внутреннего давления и неоднородности льда в оболочке замерзающей капли образуются местные деформации (выпуклости, трещины, рога, спикеры), внутренняя часть которых состоит из воздуха или воды с воздушными пузырьками [126, 250]. Такие процессы сопровождаются образованием трещин по всей капле, вырыванием ледяных осколков или струек воды, а иногда — и взрывоподобным раскалыванием кристаллизующейся капли [85, 232]. Одновременно происходит разделение зарядов. Отлетающие осколки льда, как правило, уносят положительный заряд, а мельчайшие капли воды — отрицательный. Выборочно проводилась регистрация зарядов при взрывной кристаллизации. По данным измерений средний заряд был равен $(4,3 \pm 2,5) \cdot 10^{-12}$ Кл.

Деформация замерзающей капли, сопровождающаяся разделением зарядов и их перемещением, обуславливала появление переменных электрических и магнитных полей. Наведенные на антенну приемного устройства сигналы наблюдались и регистрировались. При взрывоподобном раскалывании замерзающей капли или образовании в ней деформаций возникают также и акустические сигналы. Импульсы НТРИ, наблюдаемые на выходе широкополосного усилителя, имеют крутой передний фронт и сложную форму заднего фронта. При этом длительность импульсов составляет несколько десятков микросекунд, и частотный диапазон смещен в область низких частот.

На рис. 9.5 представлены типовые примеры сигналов, наблюдаемых на экране широкополосного запоминающего осциллографа при взрывоподобном раскалывании и при образовании спикера, на рис. 9.6 — типовые примеры сигналов, возникающих в результате остальных кристаллизационно-деформационных процессов: при образовании микротрещин в начальный момент замерзания капли. Из рисунков видно, что амплитуда и длительность сигналов излучения, возникающих при различных видах деформации замерзающей капли, различны.

Все импульсы, полученные в эксперименте, были разделены на группы по различным видам деформации замерзающей капли: 1-я группа — излучение при образовании микротрещин и трещин; 2-я группа — излучение при образовании рогов, спикера; 3-я группа — излучение при взрывной кристаллизации капли. При анализе стохастических характеристик сигналов объем выборки составлял: для микротрещин — 92, трещин — 67, взрывов — 62, спикера — 56 образцов сигналов.

Исходная информация была преобразована в числовой массив с использованием кусочно-линейной аппроксимации данных. Каждый импульс представлял совокупность чисел, четные значения которых определяли напряжение в точках перегиба, нечетные — временные координаты точек перегиба аппроксимирующей функции. Эти данные вводились в ЭВМ, которая программно определяла следующие характеристики: среднее напряжение на

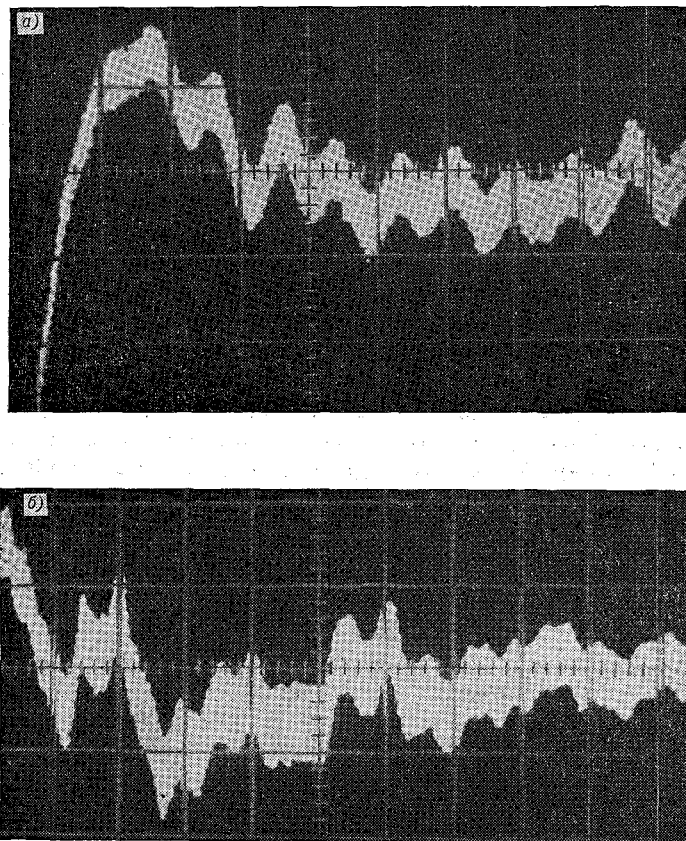


Рис. 9.5. Характерная форма сигналов НТРИ.
а — взрывная кристаллизация, б — образование спикул.
Масштаб: по вертикали — 200 мкВ/дел., по горизонтали 50 мкс/дел.

входе приемника $U_{\text{ср}}$, максимальное напряжение $U_{\text{макс}}$, эффективную полосу излучаемых частот $f_{\text{эф}}$, модуль функции спектральной плотности $|G(jf)|$ на частоте f . После получения вышеперечисленных данных для каждого импульса выполнялся статистический анализ.

Результаты статистического анализа представлены в виде функции распределения излучения кристаллизующейся капли в момент образования микротрещин, трещин, спикул и при взрывоподобном раскалывании капли (рис. 9.7—9.11). Надежность аппроксимации оценивалась по критерию А. Н. Колмогорова $P(\lambda)$, который составлял в среднем 0,97.

Из анализа следует, что энергетические характеристики сигналов НТРИ при формировании микротрещин несколько ниже, чем

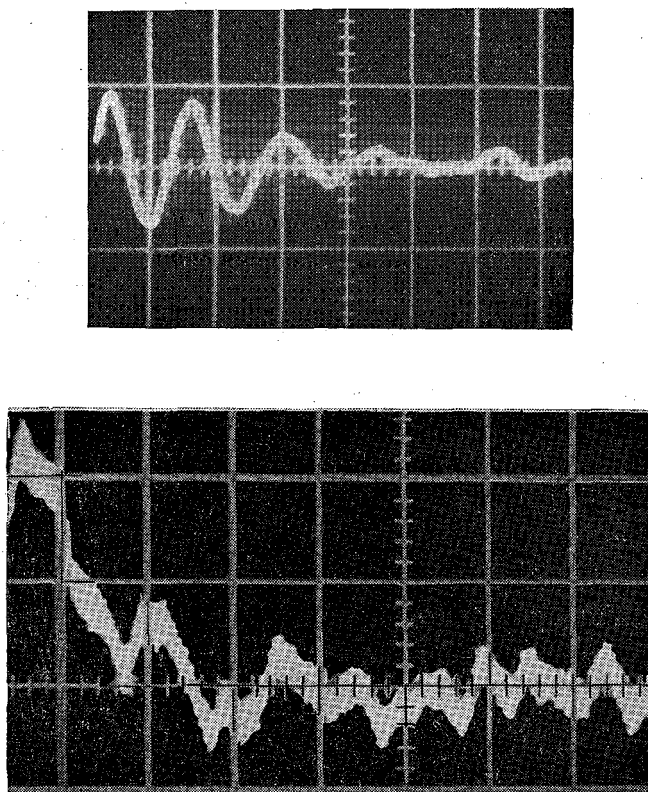


Рис. 9.6. Характерная форма сигналов НТРИ.
Верхний рисунок — возникновение микротрещин в начальный момент замерзания, нижний рисунок — возникновение трещин.
Масштаб: по вертикали — 50 мкВ/дел., по горизонтали — 1 мкс/дел. (а), 50 мкс/дел. (б).

при образовании трещин, спикул или при взрывоподобном раскалывании.

Определялась осредненная по ансамблю значений спектральная плотность электрической составляющей НТРИ при кристал-

лизационно-деформационных процессах замерзающей капли. Для этого использовались данные о спектральной плотности сигналов НТРИ по каждому импульсу излучения и для каждой частоты выполнялось осреднение по всему ансамблю наблюдаемых импульсов.

При определении ширины спектра излучаемых частот, где наблюдается максимум спектральной плотности, с помощью ЭВМ про-

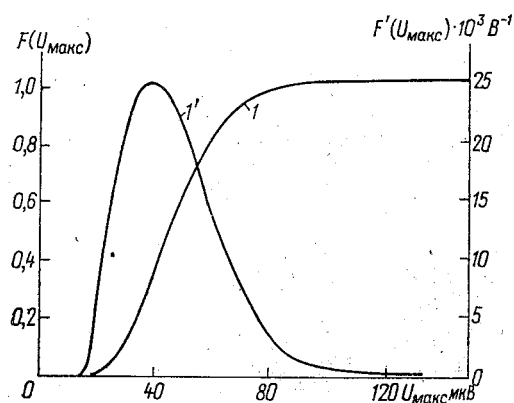


Рис. 9.7. Интегральная (F) и дифференциальная (F') функции распределения максимального напряжения на входе приемника $U_{\text{макс}}$ (1, 1') в начальный период кристаллизации капли воды (микротрещины).

водилось нормирование функций спектральной плотности каждого исследуемого импульса. Вычислялись осредненные нормированные функции спектральной плотности в экстремальных участках кривой осредненных функций спектральной плотности для различных

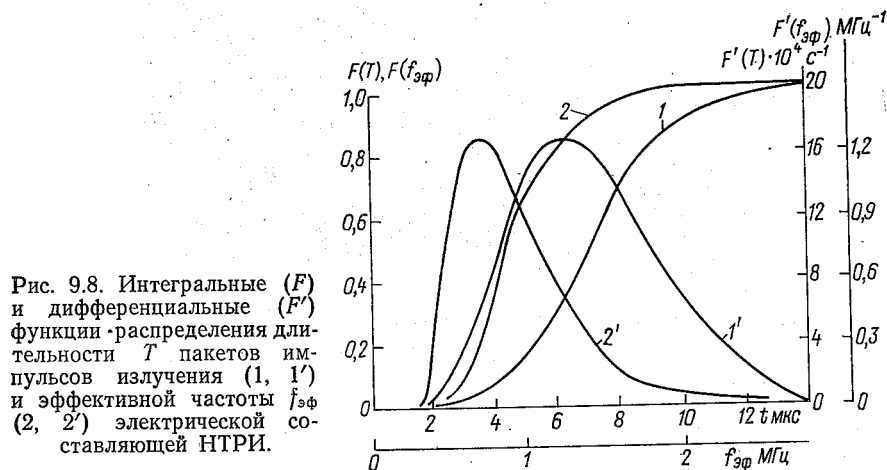


Рис. 9.8. Интегральные (F) и дифференциальные (F') функции распределения длительности T пакетов импульсов излучения (1, 1') и эффективной частоты $f_{\text{эф}}$ (2, 2') электрической составляющей НТРИ.

кристаллизационно-деформационных процессов (микротрещины, трещины, спикеры, взрывы).

Рис. 9.9. Интегральная (F) и дифференциальная (F') функции распределения максимального напряжения на входе приемного устройства $U_{\text{макс}}$ (1, 1') при образовании трещин.

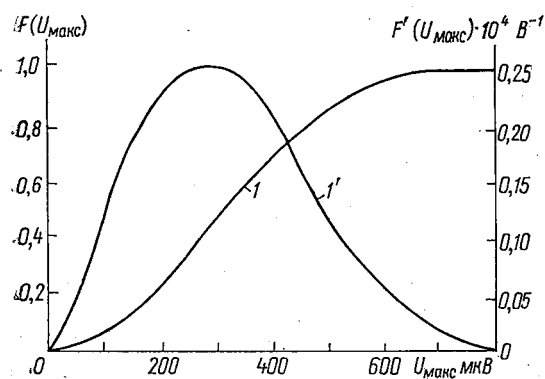
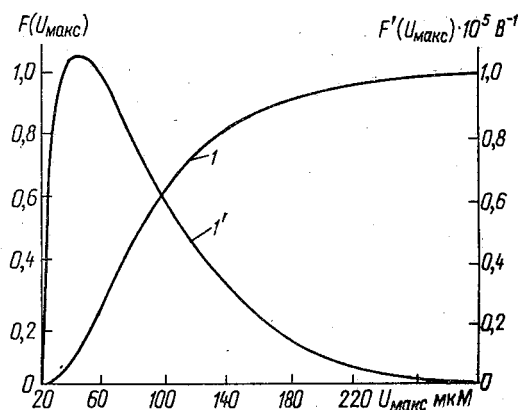


Рис. 9.10. Интегральная (F) и дифференциальная (F') функции распределения максимального напряжения на входе приемного устройства $U_{\text{макс}}$ (1, 1') при образовании спикул.

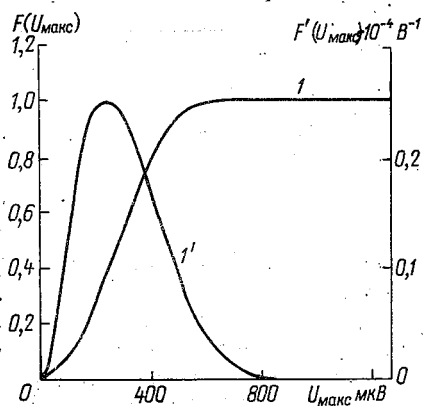


Рис. 9.11. Интегральная (F) и дифференциальная (F') функции распределения максимального напряжения на выходе приемного устройства $U_{\text{макс}}$ (1, 1') при взрывной кристаллизации.

На рис. 9.12 представлены данные осредненных функций спектральной плотности излучения микротрещин, трещин, спикул, взрывов при кристаллизации капли воды. Видно, что при образовании микротрещин наблюдаются два максимума: на частоте 900 гГц ($2,7 \cdot 10^{-11}$ В/Гц) и 1250 кГц ($2,1 \cdot 10^{-11}$ В/Гц). Максимальная функция спектральной плотности излучения от трещин составляет $8,5 \cdot 10^{-9}$ В/Гц на частоте 9,4 кГц. Это более чем на два порядка превышает функцию спектральной плотности излучения от микротрещин в начальный период кристаллизации капли воды.

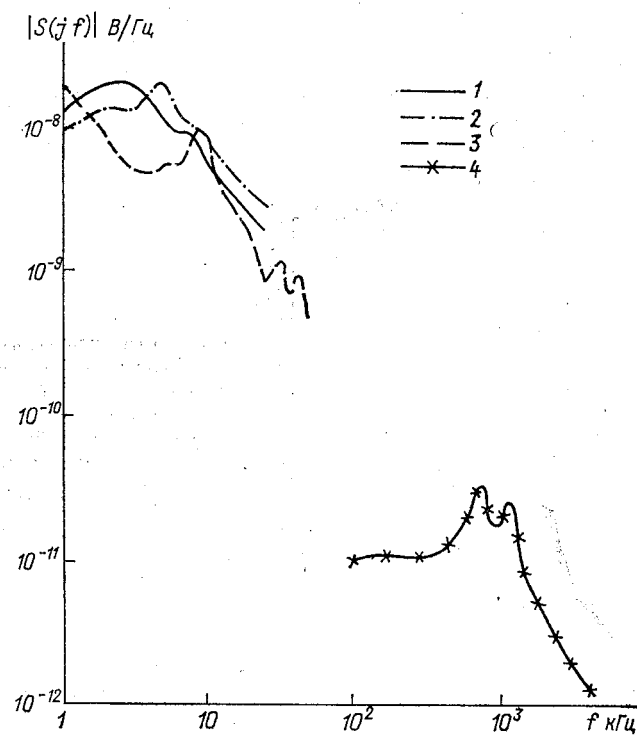


Рис. 9.12. Функции спектральной плотности излучения $|S(jf)|$ при взрывной кристаллизации капли (1), при возникновении спикул (2), трещин (3) и микротрещин (4).
 f — частота излучения.

Частотный диапазон излучения трещин смещен в низкочастотную область (9—40 кГц) по отношению к микротрещинам (0,90—1,25 МГц). Частотный диапазон функции спектральной плотности электрической составляющей спикул и взрывов смещается в еще более низкочастотную область и составляет $2 \cdot 10^{-8}$ В/Гц на частоте 4,8 кГц и $1,9 \cdot 10^{-9}$ В/Гц на частоте 2,5 кГц.

Для оценки ширины полосы излучаемых частот рассчитывались нормированные функции спектральной плотности. Результаты расчета представлены на рис. 9.13. Анализ показал, что у трещин ширина полосы излучаемых частот составляет около 1,5 кГц на частотах 9,4 и 30 кГц. При взрывной кристаллизации и при возникновении спикул ширина полосы излучаемых частот, где наблюдается максимум функции спектральной плотности, составляет около 2 кГц на частотах 2,5 и 4,8 кГц.

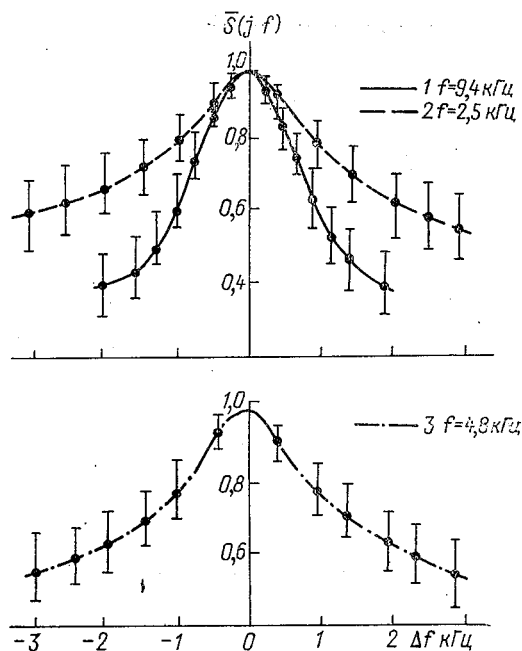


Рис. 9.13. Нормированные функции спектральной плотности излучения $S(jf)$ при образовании трещин (1), при взрывной кристаллизации замерзающей капли воды (2) и при образовании спикул (3).
 f — частота излучения.

Выводы

Лабораторные исследования показали, что возникновение НТРИ может быть связано с образованием трещин при хрупких деформациях, разделением зарядов и последующим газовым разрядом, а также с колебаниями заряженных бортов трещин, ускорением и последующим торможением осколков льда. Кристаллизационно-деформационные процессы, обуславливающие образование микротрещин, спикул и взрывов, формируют широкий спектр высокочастотных и низкочастотных сигналов НТРИ. По энергетическим и спектральным характеристикам, как показали эксперименты, возможна не только регистрация сигналов НТРИ, но и их селекция в зависимости от вида деформаций, которые наблюдаются в замерзающей капле.

Сопоставление спектральных характеристик импульсов НТРИ конвективных облаков с параметрами сигналов, полученных в лабораторных условиях при замерзании водяных капель, дает основание считать достоверным фактом, что сигналы НТРИ облаков могут быть связаны с кристаллизационно-деформационными процессами, происходящими с гидрометеорами облаков.

Результаты лабораторных исследований параметров НТРИ при кристаллизации капель воды могут быть использованы при создании радиоприемной части комплекса аппаратуры активно-пассивной радиолокации.

ГЛАВА 10

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПАСНЫХ ДЛЯ ПОЛЕТА ХАРАКТЕРИСТИК ТУРБУЛЕНТНОСТИ В ГРОЗОВЫХ ОБЛАКАХ

Количественные характеристики такого опасного для полета фактора облачности, как турбулентность, в настоящее время не поддаются непосредственному радиолокационному измерению с достаточной степенью подробности. Поэтому рассмотрим метод, основанный на численном моделировании гидротермодинамических и микрофизических процессов, протекающих в конвективном облаке.

Исходными данными для расчетов являются данные радиозондирования. Для привязки к конкретным облакам используются данные радиолокации в сантиметровом диапазоне волн (поле радиолокационной отражаемости). В качестве модели конвективного облака применяется численная модель ЛГМИ, как наиболее адекватная экспериментальным данным при достаточно экономичной организации вычислительных процедур [44, 179, 214]. Следует отметить, что методика определения характеристик турбулентности на основе численного моделирования не является оперативной при современном уровне развития ЭВМ и в этом случае невозможна организация выдачи результатов в реальном масштабе времени. В то же время, по-видимому, результаты активно-пассивных радиолокационных измерений косвенно отражают степень развития искомого фактора облачности в силу взаимосвязанности и взаимообусловленности процессов, происходящих в конвективных облаках. Однако установление статистических связей между измеряемыми и искомыми характеристиками (что позволило бы организовать оперативные процедуры оценки в темпе измерений количественных характеристик турбулентности в конвективной облачности) невозможно без использования численного моделирования, задающего, по существу, обучающую выборку.

10.1. Определение характеристик турбулентности

Эффекты локальной турбулентности учитываются путем использования уравнений гидротермодинамики осредненного движения с коэффициентами турбулентного переноса [179, 214]. В качестве параметра, характеризующего степень турбулизированности

потока в заданной точке, используется коэффициент турбулентности, который является функцией координат трехмерного пространства и определяется градиентами скоростей и температур среднего потока.

Выражение для определения коэффициента турбулентности, зависящего от полей температур и скоростей, можно получить из уравнения баланса турбулентной энергии [44, 179, 214]:

$$\begin{aligned} \frac{dr}{dt} = & \kappa (\text{Def})^2 - \kappa_T \frac{g}{T_\Phi} \left(\gamma_{в.а} + \frac{\partial T'}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\kappa_2 \frac{\partial r}{\partial y} \right) + \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left(\kappa_2 \frac{\partial r}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\kappa_2 \frac{\partial r}{\partial z} \right) - \varepsilon. \end{aligned} \quad (10.1)$$

Здесь r — удельная кинетическая энергия турбулентных пульсаций; $\kappa (\text{Def})^2$ — скорость генерации r за счет среднего движения

$$(\text{Def})^2 = \sum_{i=1}^3 \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_i} \right)^2$$

(в декартовой системе координат); $\kappa_T \frac{g}{T_\Phi} \left(\gamma_{в.а} + \frac{\partial T'}{\partial z} \right)$ — скорость

поступления или потери энергии турбулентности за счет сил плавучести; $\gamma_{в.а}$ — влажноадиабатический градиент; ε — скорость диссипации турбулентной энергии в тепло; остальные члены правой части уравнения (10.1) характеризуют скорость диффузии.

Вводятся следующие предположения:

а) о приближенном подобии — функции κ , κ_T , κ_2 однозначно определяются через r и масштаб турбулентности l ;

б) о локальном балансе турбулентной энергии — вся образующаяся в фиксированной точке пространства турбулентная энергия диссипирует в тепло; это утверждение позволяет пренебречь левой частью уравнения (10.1) и диффузией в правой части;

в) об изотропности турбулентности (если не учитывать работу сил плавучести).

С учетом сделанных предположений после преобразований из уравнения (10.1) можно получить выражение для коэффициента турбулентности

$$\begin{aligned} \kappa(x, y, z) = & cl^2 \left[(\text{Def})^2 - \alpha_T \frac{g}{T_\Phi} \left(\gamma_{в.а} + \frac{\partial T'}{\partial z} \right) \right]^{1/2}, \\ (\text{Def})^2 = & 2 \left[\left(\frac{\partial v_x}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_y}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_z}{\partial z} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right)^2 + \\ & + \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_y}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial y} \right)^2. \end{aligned} \quad (10.2)$$

Здесь v_x , v_y , v_z — составляющие скорости ветра среднего потока соответственно по осям x , y , z ; эмпирические константы c и l принимаются равными соответственно 0,21 и 2,5.

В качестве линейного масштаба турбулентности в трехмерном случае используется выражение

$$l = (\Delta x \Delta y \Delta z)^{1/3},$$

где Δx , Δy , Δz — численный размер сети, в узлах которой определяется поле скоростей среднего потока при численном интегрировании. В рассматриваемой методике численный размер сети равен 100 м.

Методика расчета поля коэффициента турбулентности в конвективном облаке строится следующим образом.

По данным температурно-ветрового зондирования с учетом поля радиолокационной отражаемости осуществляется численное моделирование конвективного облака. Результатом моделирования являются трехмерные поля скоростей и поле температуры внутри облака. По ним определяются поля градиентов скоростей и температур и в соответствии с выражением (10.2) рассчитывается поле коэффициента турбулентности в облаке.

В качестве примера на рис. 10.1 представлены результаты расчетов полей коэффициентов турбулентности мощных конвективных облаков, наблюдавшихся 4 и 6 июня 1982 г. на учебно-научном полигоне в Восточной Грузии. Трехмерные поля турбулентности представлены в виде плоских сечений по высоте облака с нанесением линий равного уровня значений коэффициента турбулентности в пределах каждого сечения. Из анализа графиков следует, что поле турбулентности существенно неоднородно как по высоте, так и в плоскостях сечений, имеются зоны повышенной турбулентности и локальные очаги со слабо развитой турбулентностью. Из сравнения данных расчета за 4 и 6 июня следует, что абсолютный максимум коэффициента турбулентности 6 июня в 1,6 раза выше, чем 4 июня (соответственно 812 и 516 м²/с). Кроме того, в ситуации 6 июня по высоте имеется два локальных максимума: при $z = 5$ км ($\kappa = 525$ м²/с) и при $z = 10$ км ($\kappa = 812$ м²/с), в отличие от поля турбулентности за 4 июня, когда наблюдался один максимум коэффициента турбулентности при $z = 6$ км. Размеры зоны повышенной турбулентности 6 июня больше, чем 4 июня. Помимо прочего, ситуация 6 июня характеризуется большим градиентом коэффициента турбулентности в радиальном направлении. Таким образом, можно сделать вывод, что в конвективном облаке, наблюдавшемся 6 июня 1982 г., имеется существенно более развитая турбулентность.

Из сопоставления данных активно-пассивной радиолокации конвективных облаков 4 и 6 июня 1982 г. следует, что в стадии максимального развития случай 6 июня мощнее как по радиолокационным параметрам, так (в большей степени) и по интенсивности собственного электромагнитного излучения. Комплексный критерий грозоопасности 6 июня в среднем в 1,5 раза выше. Тем самым подтверждается предположение о связи результатов активно-пассивных радиолокационных измерений с характеристиками интенсивности турбулентности в облаке.

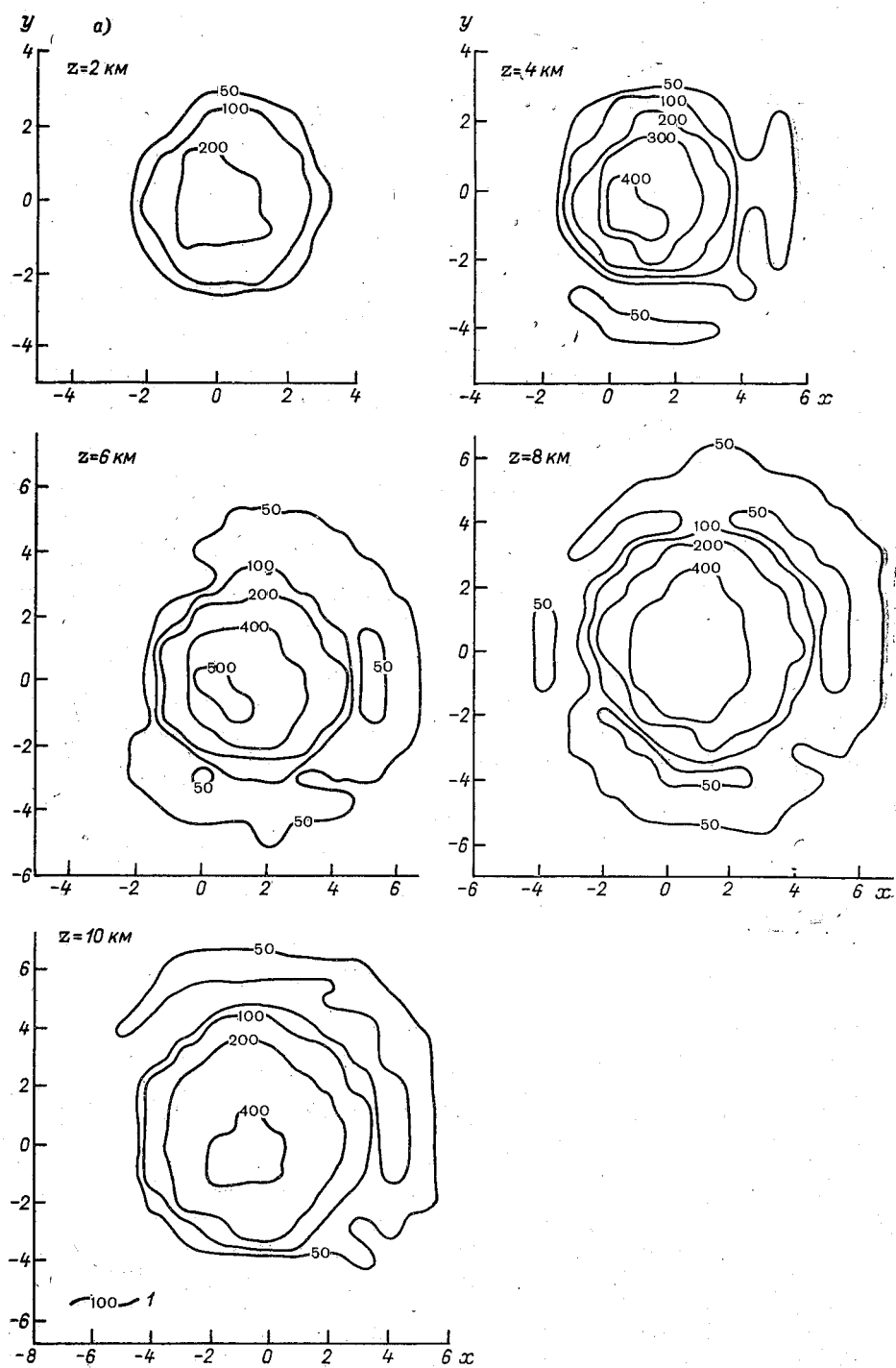
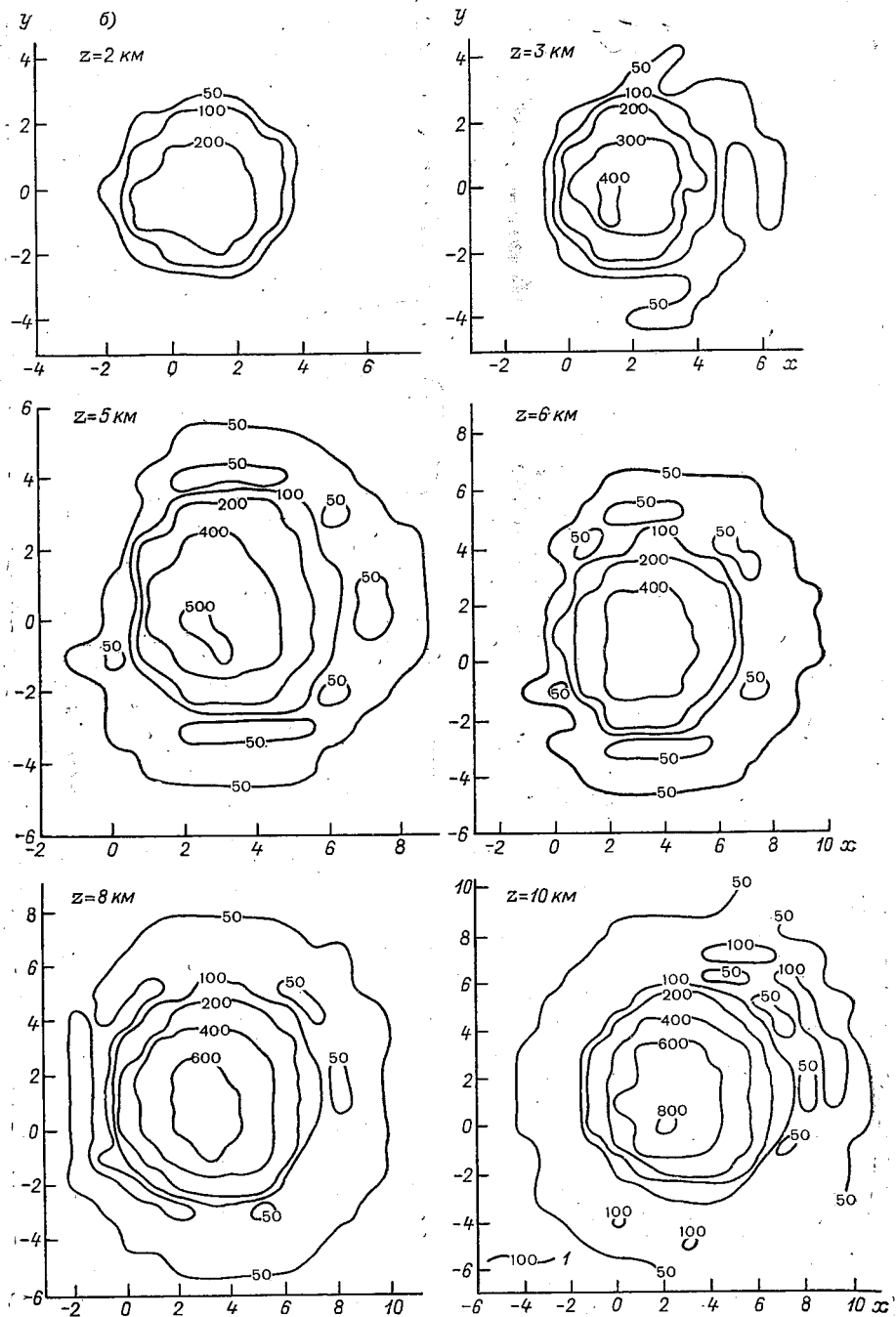


Рис. 10.1. Сечение по высоте z трехмерного поля коэффициента турбулентности
а) 4 июня 1982 г., б) 6 июня 1982 г.; 1 —



сти грозового облака в стадии максимального термодинамического развития.
изолинии коэффициента турбулентности (m^2/c).

Предметом дальнейших исследований является установление статистически надежных количественных соотношений между комплексным критерием грозоопасности, представляющим собой линейный агрегат результатов активно-пассивных радиолокационных измерений, и коэффициентом турбулентности в различных точках конвективного облака. Это в принципе позволит организовать оперативные процедуры определения местоположения зон повышенной турбулентности в темпе измерений.

10.2. Турбулентность и нетепловое радиоизлучение

Традиционным альтернативным подходом к определению характеристик турбулентности в конвективных облаках является радиолокационный метод, основанный на анализе амплитудных, частотных или фазовых [153] флуктуаций отраженного от облачных частиц сигнала. Этот метод нельзя признать исчерпывающим по следующим причинам. На флуктуации параметров отраженного сигнала в сантиметровом диапазоне длин волн в значительной степени влияют не связанные с исследуемой турбулентностью неконтролируемые факторы, искажающие истинную картину: неоднородности и наличие рассеивающих центров по трассе зондирования до исследуемого объекта. Кроме того, подобный метод, в котором трассерами турбулентности являются мелкие облачные частицы, обеспечивает в основном регистрацию характеристик лишь микромасштабной турбулентности.

В связи с этим возникает естественный вопрос: возможно ли определение параметров турбулентности в грозовых облаках непосредственно по данным активно-пассивной радиолокации. Некоторые соображения, носящие пока дискуссионный характер, позволяют надеяться на положительный ответ в этом вопросе.

Временная статистическая структура измеряемых средствами активно-пассивной радиолокации параметров облачности, по-видимому, в немалой степени обусловлена влиянием турбулентности. Особенно это касается параметров нетеплового радиоизлучения, так как предполагаемый механизм возникновения немолниевых НТРИ обусловлен микроразрядами в обычной массе. Пульсации масштабов и частота микроразрядов в первую очередь связаны с локальными усилениями напряженности электромагнитного поля вследствие турбулентного перемешивания заряженных частиц и объемов. По этой причине можно ожидать проявления статистических свойств облачной турбулентности на «языке» радиосигналов во временной структуре НТРИ.

Представляются возможными два варианта оценки характеристик турбулентности.

Первый — аппаратный. Для его реализации необходим набор приемных устройств с одинаковой приведенной чувствительностью, перекрывающих диапазон длин волн от 1 до 10^3 м. Синхронно регистрируя этими устройствами количество импульсов

НТРИ в единицу времени в различных диапазонах и рассматривая эту величину как функцию длины волны (т. е. $N(\lambda)$) с точностью до мультипликативной константы, можно получить пространственный спектр турбулентности в облаке — источнике НТРИ:

$$S_T(l) = cN(2l), \quad (10.3)$$

где $S_T(l)$ — спектр пространственного периода $l = \lambda/2$, c — константа масштабирования.

Это объясняется тем, что преобладающая частота в спектре единичного акта излучения соответствует масштабу порождающего его разряда, определяемого в свою очередь характерным размером турбулентного вихря. Длина l немолниевых электрических разряда в облаке предполагается определяемой линейным размером соответствующей турбулентной зоны облака (совпадает с расстоянием между центрами заряженных зон), а релаксации электрической и турбулентной структур происходят одновременно [96]. Как показано в [71, 96], максимум спектральной плотности потока мощности излучения от разряда масштаба l приходится на длину волны излучения $\lambda = 2l$. Поэтому турбулентный вихрь масштаба l проявит себя максимумом НТРИ на длине волны $\lambda = 2l$, что при соответствующем выборе порога чувствительности набора приемных устройств выразится в регистрации сигнала только приемником, настроенным на эту длину волны. Количество актов излучения с преобладающей длиной волны λ , (т. е. $N(\lambda)$) при этих предположениях соответствует количеству турбулентных вихрей масштаба $l = \lambda/2$ в зондируемом объеме облака. Варьируя значение λ , можно получить, по существу, распределение турбулентных вихрей по размерам $l = \lambda/2$, т. е. функцию, пропорциональную пространственному спектру турбулентности. При этом максимум $N(\lambda)$, а следовательно, максимум $S(l)$, будет соответствовать длине волны, равной статистически преобладающему в зондируемом объеме удвоенному размеру турбулентного вихря.

В настоящее время аппаратной реализации этого метода не существует в силу определенных технических трудностей разработки приемных антенн с одинаковой диаграммой направленности и чувствительностью в столь широком диапазоне длин волн. По мере преодоления технических трудностей метод сулит хорошие перспективы.

Второй вариант основан на временном спектральном анализе интенсивности НТРИ. В основе лежит предположение об определяющем вкладе турбулентности в формирование спектральной плотности временных пульсаций интенсивности НТРИ. В результате такая спектральная плотность $S(f)$ оказывается пропорциональной временному спектру турбулентности $S_T(f)$:

$$S(f) = hS_T(f). \quad (10.4)$$

Здесь h — коэффициент пропорциональности.

Оценка спектра временной функции НТРИ может быть проведена непосредственно по реализации известными методами спектрального анализа. Однако такой анализ не может быть организован в реальном масштабе времени. В реальном масштабе времени спектральную плотность можно оценить по параметрам адаптивной стохастической модели процесса НТРИ, так как такая модель воспроизводит спектральные свойства процесса (см. разд. 2.1, 6.2). Связь спектральной плотности (в момент времени t) с параметрами адаптивной стохастической модели задается формулой (6.12), что с учетом (6.14) дает

$$S(f, t) = \frac{2\sigma_e^2(t)}{|1 + a_1(t) \exp(-2\pi j f \Delta t) + \dots + a_p(t) \exp(-2p\pi j f \Delta t)|^2} \quad (10.5)$$

в диапазоне частот

$$0 \leq f \leq 1/2\Delta t. \quad (10.6)$$

Так, например, для модели третьего порядка уравнение (10.5) сводится к выражению

$$S(f, t) = \frac{2\sigma_e^2(t)}{\delta_1(t) + \delta_2(t) \cos 2\pi f \Delta t + \delta_3(t) \cos 4\pi f \Delta t + \delta_4(t) \cos 6\pi f \Delta t}, \quad (10.7)$$

где

$$\begin{aligned} \delta_1(t) &= 1 + a_1^2(t) + a_2^2(t) + a_3^2(t); \\ \delta_2(t) &= 2[a_1(t) + a_1(t)a_2(t) + a_2(t)a_3(t)]; \\ \delta_3(t) &= 2[a_2(t) + a_1(t)a_3(t)]; \\ \delta_4(t) &= 2a_3(t). \end{aligned}$$

Соответствующий блок оценки спектральной плотности может быть включен в комплекс адаптивных алгоритмов оптимальной фильтрации и прогноза.

Выводы

Наиболее перспективными представляются два метода оперативного дистанционного определения характеристик турбулентности в грозовых облаках:

1) по комплексному критерию грозоопасности путем установления статистически надежных связей его экспериментальных значений с полученным в результате численного моделирования полем коэффициента турбулентности;

2) по характеристикам нетеплового радиоизлучения путем анализа его временной и частотной структуры.

При всей привлекательности эти методы носят пока дискуссионный характер и задачей дальнейших исследований является установление надежности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная аппаратура и методика активно-пассивной нетепловой радиолокации обеспечивают длительные непрерывные наблюдения за грозовыми процессами начиная с ранней стадии развития и до стадии диссипации. Активная радиолокация в метровом (дециметровом) диапазоне радиоволн позволяет выявлять пространственно-временную структуру и местоположение грозовых очагов, определять такие параметры грозы, как частота разрядов молний, их протяженность, время существования. С помощью активной радиолокации установлено, что максимальная вероятность встречи с молниями, как правило, наблюдается в тылу зон максимальной отражаемости (по МРЛ). При этом следует иметь в виду, что область генерации молний нередко выходит за пределы зоны выпадения осадков (определенной по МРЛ), особенно при диссипации грозы. Наблюдения за нетепловым радиоизлучением конвективных облаков в широком диапазоне длин волн (пассивная радиолокация) в сочетании с радиолокационными наблюдениями в сантиметровом диапазоне позволяют определять тенденцию развития грозового процесса, дают возможность оперативно с вполне удовлетворительной точностью выявлять потенциальную грозоопасность облачности, т. е. предупреждать приближение грозы. Наиболее полную информацию о состоянии и тенденции развития грозовых процессов можно получить, используя одновременно аппаратуру активной и пассивной радиолокации.

Немолниевое нетепловое радиоизлучение наблюдается в СВ-диапазоне длин волн, как правило, задолго до появления первых молний. По мере приближения облака к грозовой стадии развития, интенсивность этого излучения нарастает (увеличиваются амплитуда, частота следования импульсов), оно начинает регистрироваться на более высоких частотах, после чего возникают первые разряды молний. В стадии активной грозы немолниевое радиоизлучение отмечается в паузах между разрядами. При диссипации грозового процесса наблюдается обратная картина — после прекращения молний вначале исчезает радиоизлучение на более высоких частотах, а затем — в СВ-диапазоне. Если разряды прекратились, а радиоизлучение остается интенсивным, то грозовой процесс может через некоторое время возобновиться. Пока уровень излучения на всех частотах высокий — облачность остается грозоопасной для летательных аппаратов. В таких случаях велика вероятность провокации молнии ЛА. Также велика опасность провокации молний в догрозовой стадии при наличии интенсивного радиоизлучения.

Характерными значениями максимальной мощности источников немолниевых радиоизлучений в СВ-диапазоне являются единицы милливатт, в метровом диапазоне — сотни микроватт. Мощность же источников радиоизлучения молниевых разрядов (для метровых волн) составляет в среднем единицы милливатт, в некоторых случаях достигает десятков милливатт.

Разработанный комплекс адаптивных алгоритмов для оперативной автоматической интерпретации результатов активно-пассивных радиолокационных измерений позволяет оценивать степень грозовой опасности обозреваемого пространства путем построения поля критерия грозоопасности (как функции азимутального угла наблюдений при пассивной радиолокации, азимута и дальности — в случае активно-пассивной радиолокации) и осуществлять оптимальный прогноз критерия грозоопасности на короткий временной интервал в реальном масштабе времени.

Лабораторные эксперименты показали, что появление сигналов немолниевых радиоизлучений может быть связано с кристаллизационно-деформационными процессами, происходящими с гидрометеорами в облаках. Вместе с тем, по всей видимости, за возникновение этого радиоизлучения ответственны несколько механизмов, для выявления которых необходимо провести дополнительные исследования.

Представленные основные технические характеристики радиолокационных комплексов грозообнаружения той или иной степени сложности должны существенно повысить безопасность полетов в процессе управления воздушным движением. На командно-диспетчерские пункты аэродромов с помощью такой аппаратуры может выводиться информация об оптимальном азимуте взлета — посадки и пути следования в районе аэропорта при грозоопасной ситуации, а также оптимально спрогнозированное в темпе измерения распределение грозоопасности на короткий временной интервал.

В полете дополнительной характеристикой грозоопасности может служить собственное радиоизлучение летательного аппарата, измеренное с помощью простого бортового прибора.

Метод активно-пассивной нетепловой радиолокации грозовых и грозоопасных очагов применительно к аэродромам, ракетодромам и другим «грозочувствительным» объектам представляется более перспективным, чем используемые в настоящее время методы. Обнаружение потенциально грозоопасных зон методом «радиоподслушивания» облаков, сопровождение грозовых и грозоопасных очагов до их диссипации или выхода из зоны наблюдения в сочетании с автоматизированным прогнозом эволюции процесса — наиболее рациональная схема предупреждения грозоопасности в районе охраняемых объектов. Работы по регулированию грозовой активности также немыслимы без контроля эффективности воздействия на процессы с помощью подобного метода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абшаев М. Т., Кармов Х. Н. Активно-пассивный метод обнаружения градовых очагов в кучево-дождевых облаках//Тр.ВГИ. 1976. Вып. 33. С. 43—56.
2. Авиационная метеорология/А. М. Баранов, О. Г. Богаткин, В. Ф. Говвердовский, В. Г. Еникеева. С.—П.: Гидрометеониздат, 1992. 347 с.
3. Аджиев А. Х. Определение интенсивности грозовой деятельности радио-техническими средствами//Электричество. 1986. № 11.
4. Аджиев А. Х., Акчурин М. М., Богаченко Е. М. Определение местоположения молниевых разрядов в грозовых облаках с помощью ЕН-грозопеленгатора-дальномера и роль осадков в грозовой активности облака// Атмосферное электричество. Тр. II Всесоюз. симпоз. Л.: Гидрометеониздат, 1984. С. 176—178.
5. Аджиев А. Х., Богаченко Е. М. Импульсно-временные характеристики электромагнитного излучения грозовых облаков в дециметровом диапазоне//Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1983. Т. 24. № 9. С. 973—979.
6. Аджиев А. Х., Сижажев С. М. Методика исследования предгрозового состояния конвективных облаков и некоторые предварительные результаты// Тр. ВГИ. 1985. Вып. 56. С. 8—13.
7. Айвазян С. А., Бежаева З. И., Староверов О. В. Классификация многомерных наблюдений. М.: Статистика, 1974. 240 с.
8. Активно-пассивная радиолокационная станция для исследования атмосферы/Н. В. Горностаев, А. И. Новоселов, В. А. Петрушевский и др.// Тр. ГГО. 1975. Вып. 328. С. 120—124.
9. Активно-пассивная радиолокация грозовых облаков/Л. Г. Качурин, Л. И. Дивинский, Б. Д. Иванов, Ю. Г. Осипов//Тез. докл. VI Всесоюз. совещ. по радиометеорологии. Таллинн, 1982. С. 134—135.
10. Активно-пассивная радиолокация грозовых очагов/Л. Г. Качурин, Л. И. Дивинский, Б. Д. Иванов и др.//Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1988. Т. 24. № 6. С. 601—612.
11. Александров Г. Н. О механизме перехода коронного разряда в искровой в длинных воздушных промежутках//ЖТФ. 1965. Т. 35. Вып. 7. С. 1225—1229.
12. Александров Г. Н. О механизме разряда с отрицательно заряженного острия. Молния//ЖТФ. 1967. Т. 37. Вып. 2. С. 288—293.
13. Александров Г. Н. и др. Особенности картины электрического пробоя весьма длинных воздушных промежутков//ДАН СССР. 1958. Т. 183. № 5. С. 1048—1051.
14. Александров М. С. и др. Флуктуации электромагнитного поля Земли в диапазоне СНЧ. М.: Наука, 1972. 195 с.
15. Андерсен Т. Введение в многомерный статистический анализ. М.: ГИФМЛ, 1963. 500 с.
16. Андреев С. И., Соколов Б. И. Образование искрового канала в воздухе//ЖТФ. 1965. Т. 35. Вып. 7. С. 1295—1297.
17. Аоки М. Оптимизация стохастических систем. М.: Наука, 1972. 424 с.

18. Арис Р. Дискретное динамическое программирование. М.: Мир, 1969. 172 с.
19. Атлас Д. Успехи радарной метеорологии. Л.: Гидрометеониздат, 1967. 194 с.
20. Атмосферное электричество//Тр. ГГО. 1984. Вып. 471. 129 с.
21. Банников В. И., Стасенко В. Н., Фролов В. И. Обнаружение грозных разрядов с помощью РЛС дециметрового диапазона типа ПРВ-10//Тез. докл. III Всесоюз. симпоз. по атмосферному электричеству. Тарту: ТГУ, 1986. С. 187.
22. Барабанова Н. В., Ширяев В. Ф. Зависимость между числом импульсов ЭМИ и напряжением при нагружении образцов льда//Тез. докл. Всесоюз. науч. совещ. «Электронимпульсная технология и электромагнитные процессы в нагруженных твердых телах». Томск: ТПИ, 1982. С. 179.
23. Баранулько В. А. Особенности распространения радиоволн. М.: Воениздат, 1964. 191 с.
24. Баранулько В. А., Федотов И. В. Радиоэхо от молнии//Радиотехника. 1955. Т. 10. № 11.
25. Бартон Д., Вард Г. Справочник по радиолокационным измерениям. М.: Советское радио, 1976. 392 с.
26. Бару Н. В., Кононов И. И., Соломоник М. Е. Радиопеленгаторы-дальномеры ближних гроз. Л.: Гидрометеониздат, 1976. 143 с.
27. Баттан Л. Дж. Радиолокационная метеорология. Л.: Гидрометеониздат, 1962. 196 с.
28. Башаринов А. Е., Гурвич А. С., Егоров С. Т. Радиоизлучение Земли как планеты. М.: Наука, 1974. 188 с.
29. Бейтуганов М. Н. Об обуславливаемых сильными электрическими полями физических явлениях в облаках//Метеорология и гидрология. 1989. № 9. С. 42—49.
30. Бекряев В. И., Качурин Л. Г., Псаломщиков В. Ф. Электризация тел в потоке аэрозоля//Тр. ЛГМИ. 1972. Вып. 45. С. 3—18.
31. Белоцерковский А. В. Адаптивные алгоритмы оперативного выбора наименее опасной траектории полета самолета в условиях повышенной грозовой активности//Межвуз. сб. науч. тр. «Опасные для полетов метеорологические явления и безопасность полетов ВС». Л.: ОЛАГА, 1984. С. 31—38.
32. Белоцерковский А. В. Об одном адаптивном алгоритме оптимальной фильтрации и прогноза метеорологической ситуации на короткие временные интервалы//Гидрология и метеорология (БНР). 1983. Т. XXXII. № 6. С. 28—34.
33. Белоцерковский А. В. Прогноз метеорологической ситуации на короткие временные интервалы с использованием адаптивных стохастических моделей//Межвуз. сб. науч. тр. Л.: ЛПИ, 1983. Вып. 81 (ЛГМИ). С. 145—153.
34. Боровиков А. М. и др. Радиолокационные измерения осадков. Л.: Гидрометеониздат, 1967. 237 с.
35. Браммер К., Зиферлинг Г. Фильтр Кальмана Бьюси. М.: Наука, 1982. 200 с.
36. Валевский Н. М., Нестеров Е. В. Поражение самолетов молниями//Тез. докл. I Всесоюз. науч.-техн. конф. «Безопасность полета в условиях опасных внешних воздействий». Киев: КИИГА, 1982. С. 15.
37. Вопросы радиолокационной метеорологии/Под ред. Е. М. Сальмана//Тр. ГГО. 1969. Вып. 243. 60 с.
38. Гальперин С. М. Изменение параметров радиоэха в ливневых и грозных облаках в период их максимального развития//Тр. Всесоюз. симпоз. «Радиофизические исследования атмосферы». Л.: Гидрометеониздат, 1977. С. 253—257.
39. Гальперин С. М., Степаненко В. Д., Осетров А. С. Радиолокационное обнаружение молний//Тр. ГГО. 1974. Вып. 301. С. 81—87.
40. Гашина С. Б., Сальман Е. М. Особенности радиолокационных характеристик грозных облаков//Тр. ГГО. 1965. Вып. 173. С. 19—25.

41. Гашина С. Б., Сальман Е. М. Статистические особенности радиолокационных характеристик конвективных облаков в разных физико-географических условиях//Тр. ГГО. 1969. Вып. 243.
42. Генерация электромагнитного поля при разломе ледяных покровов-акваторий//Л. Г. Качурин, В. Я. Андросенко, В. Б. Логинов и др.//Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1988. Т. 24. № 10. С. 1113—1116.
43. Гольд Р. М., Ананьина Е. В. Электромагнитные процессы при кристаллизации воды и термоупругих напряжений в образцах льда//Тез. докл. Всесоюз. науч. совещ. «Электроимпульсная технология и электромагнитные процессы в нагруженных твердых телах». Томск: ТПИ, 1982. С. 178.
44. Зуев В. Е. Распространение видимых и инфракрасных волн в атмосфере. М.: Советское радио, 1979. 496 с.
45. Гуфельд И. Л., Постнов В. В. Электрическая прочность микронных зазоров//Герметизированные магнитоуправляемые контакты. Рязань: Радиотехнический институт, 1979. № 5. С. 25.
46. Дивинский Л. И. О выделении радиолокационного сигнала, отраженного от молнии//Тр. ЛГМИ. 1972. Вып. 45. С. 169—175.
47. Дивинский Л. И. Об эффективной отражающей поверхности канала молнии//Тр. I Всесоюз. симпоз. по атмосферному электричеству. Л.: Гидрометеониздат, 1976. С. 177—185.
48. Дивинский Л. И. Радиолокационные исследования грозовых облаков. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Л.: ЛГМИ, 1974. 21 с.
49. Дивинский Л. И. Радиолокационная эффективная отражающая поверхность канала молнии//Тр. ЛГМИ. 1975. Вып. 54. С. 28—40.
50. Довиак Р., Зрнич Д. Доплеровские радиолокаторы и метеорологические наблюдения. Л.: Гидрометеониздат, 1988. 512 с.
51. Долгов Г. Г., Мандельштам С. Л. Плотность и температура газа в искровом разряде//ЖЭТФ. 1953. Т. 24. Вып. 6. С. 694—700.
52. Дубровский С. А. Прикладной многомерный статистический анализ. М.: Статистика, 1982. 216 с.
53. Евтеев Б. Ф., Имянитов И. М. Причины статической электризации самолетов и меры уменьшения ее опасности//Методическое письмо. Л.: Гидрометеониздат, 1984. 42 с.
54. Егоров В. Н., Гальперин С. М. Однопунктное обнаружение атмосферных разрядов различными РТС//Тез. докл. I Всесоюз. науч.-техн. конф. «Безопасность полета в условиях опасных внешних воздействий». Киев: КИИГА, 1981. С. 8.
55. Егоров В. Н., Гальперин С. М., Петренко И. А. Методика и предварительные результаты исследования радиоизлучения гроз//Тр. ГГО. 1979. Вып. 405. С. 109—115.
56. Живлюк Ю. Н., Мандельштам С. Л. О температуре молнии и силе грома//ЖЭТФ. 1961. Т. 40. Вып. 2. С. 483—497.
57. Задумкин С. Н., Хоконов Х. Б., Шокаров Х. Б. Акустический эффект при кристаллизации и плавлении вещества//ЖЭТФ. 1975. Т. 68. С. 1315.
58. Зарецкий Ю. К., Чумичев Б. Д. Кратковременная ползучесть льда. Новосибирск: Наука, 1982. 121 с.
59. Горелик Л. Г., Мельнейчук Ю. В., Черников А. А. Связь статистических характеристик радиолокационного сигнала с динамическими процессами и структурой метеобъекта//Тр. ЦАО. 1963. Вып. 48. С. 3—55.
60. Имянитов И. М. Строение и условия развития грозовых облаков//Метеорология и гидрология. 1981. № 3. С. 5—17.
61. Имянитов И. М. Электризация самолетов в облаках и осадках. Л.: Гидрометеониздат, 1970. 212 с.
62. Имянитов И. М., Евтеев Б. Ф., Камалдина И. И. О причинах, приводящих к поражению самолетов молниями в холодное время года//Методическое письмо. Л.: Гидрометеониздат, 1976. 31 с.
63. Имянитов И. М., Евтеев Б. Ф., Камалдина И. И. Физические и метеорологические условия, приводящие к поражению самолетов атмосферно-электрическими разрядами вне кучево-дождевых облаков//Методическое письмо. Л.: Гидрометеониздат, 1981. 39 с.

64. Имянитов И. М., Лободин Т. В. О зонах неоднородности в грозовых облаках//Тр. ГГО. 1964. Вып. 157. С. 3—8.
65. Иньков Б. В. Фазовые методы определения расстояния до очагов атмосфериков//Тр. ГГО. 1973. Вып. 319. 127 с.
66. Исследование временных характеристик сигнала, отраженного от начала молнии//Л. И. Дивинский, Б. Д. Иванов и др.//Тр. ЛГМИ. 1975. Вып. 54. С. 41—53.
67. Исследование пространственного распределения плотности разрядов в землю с помощью АГДП «Очаг-2П»//В. А. Раков, А. Х. Аджиев, М. М. Акчурин, Ю. Р. Шойванов//Метеорология и гидрология, 1989. № 2. С. 48—53.
68. Исследование радиолокационных характеристик кучево-дождевых облаков применительно к задаче распознавания опасных явлений//А. Г. Линева, С. Б. Гашина, Б. Ш. Дивинская, Е. М. Сальман//Тр. Всесоюз. симпозиум по радиофизическим исследованиям атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1977. С. 239.
69. Исследование электромагнитного излучения гроз в метровом диапазоне радиоволн//С. М. Гальперин, В. И. Банников, В. П. Никитин и др.//Тр. ГГО. 1987. Вып. 508. С. 15—21.
70. Исследование эффективности кристаллизующего действия реагентов в облаках по радиоизлучению//Х. Х. Медалиев, В. В. Березкин, Х. Б. Кяров, С. М. Сихажев//Тр. ВГИ. 1979. Вып. 42. С. 84—88.
71. Кабасов Ю. К., Розенталь О. М. К вопросу о радиоизлучении грозовых облаков//Межвуз. сб. науч. тр. Л.: ЛПИ, 1983. Вып. 81 (ЛГМИ). С. 36—40.
72. Калечиц В. И., Нахутин И. Е., Полуэктов П. П. О возможном механизме радиоизлучения конвективных облаков//ДАН СССР. 1982. Т. 262. № 6. С. 1344—1347.
73. Кармов М. И. Аппаратура и методика исследования спектральных характеристик электромагнитного излучения грозовых облаков//Тр. II Всесоюз. симпозиум по атмосферному электричеству. Л.: Гидрометеиздат, 1984. С. 150—153.
74. Кармов М. И. Исследование характера электромагнитного излучения конвективных облаков в диапазоне частот 0,1—300 МГц//Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Нальчик: ВГИ, 1972. 12 с.
75. Кармов М. И. О некоторых особенностях электромагнитного излучения кучево-дождевых облаков в метровом диапазоне волн//Тр. Всесоюз. симпозиум по радиофизическим исследованиям атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1977. С. 275.
76. Кармов М. И. Оценка полных энергий электромагнитного излучения разрядных процессов в облаках в диапазоне $4—1 \cdot 10^6$ кГц//Тр. ВГИ. 1985. Вып. 56. С. 21—28.
77. Кармов М. И. Устройство для исследования радиоизлучения грозовых облаков на разных стадиях развития//Тр. ВГИ. 1971. Вып. 19. С. 149—155.
78. Кармов М. И., Медалиев Х. Х. К вопросу о радиоизлучении облаков на разных стадиях развития грозовых процессов//Тр. ВГИ. 1971. Вып. 19. С. 83—92.
79. Кармов Х. Н. Некоторые результаты экспериментальных исследований активной и пассивной радиолокации градовых и кучево-дождевых облаков//Тр. ВГИ. 1978. Вып. 41. С. 76—82.
80. Карцивадзе А. И., Иванов Б. Д., Осипов Ю. Г. Активная и пассивная радиолокация грозовых зон во фронтальной облачности//Тез. докл. I Всесоюз. науч.-тех. конф. «Безопасность полета в условиях опасных внешних воздействий». Киев: КИИГА, 1981. С. 91.
81. Катковник В. Я., Кульчицкий Ю. Ю., Хейсин В. Е. Аппроксимация решений существенно нестационарных стохастических экстремальных задач в непрерывном времени//Автоматика и телемеханика. 1983. № 1. С. 101—112.

82. Качурин Л. Г. К построению теории электрокристаллизационных потенциалов//Поверхностные явления в жидкостях. Л.: ЛГУ, 1975. С. 137—153.
83. Качурин Л. Г. Физические основы воздействия на атмосферные процессы. Л.: Гидрометеониздат, 1990. 464 с.
84. Качурин Л. Г. Электрокинетические явления, возникающие при кристаллизации жидкостей//Электрохимия. 1970. Т. 6. Вып. 9. С. 1294—1299.
85. Качурин Л. Г., Бекряев В. И. Исследование процесса электризации кристаллизующейся воды//ДАН СССР. 1960. Т. 130. № 1. С. 1141—1144.
86. Качурин Л. Г. По поводу радиоизлучения, возникающего при кристаллизации некоторых жидкостей//ЖТФ. 1991. Т. 61. № 5. С. 136—137.
87. Качурин Л. Г., Бекряев В. И., Гурович М. В. Численная модель суперъядерного облака//Материалы Всесоюз. семинара по физике облаков, воздействиям на градовые процессы и проблемам изыскания новых реагентов для борьбы с градом. М.: Гидрометеониздат, 1985. С. 29—35.
88. Качурин Л. Г., Бекряев В. И., Псаломщиков В. Ф. Экспериментальное исследование электрокинетического явления, возникающего при кристаллизации слабых водных растворов//ДАН СССР, 1967. Т. 174. № 6. С. 1122—1125.
89. Качурин Л. Г., Дивинский Л. И., Иванов Б. Д. Излучение конвективных облаков в метровом диапазоне радиоволн//Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1979. Т. 15. № 7. С. 724—730.
90. Качурин Л. Г., Дивинский Л. И., Осипов Ю. Г. Характеристики немолниевых излучений в диапазоне 1,7 МГц//Тез. докл. III Всесоюз. симпоз. по атмосферному электричеству. Тарту: ТГУ, 1986. С. 149.
91. Качурин Л. Г., Кармов М. И., Медалиев Х. Х. О радиоизлучении облаков в предгрозовой стадии//Тр. ЛГМИ. 1972. Вып. 45. С. 28—37.
92. Качурин Л. Г., Кармов М. И., Медалиев Х. Х. Основные характеристики радиоизлучения конвективных облаков//Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1974. Т. 10. № 11. С. 1164—1169.
93. Качурин Л. Г., Колев С., Псаломщиков В. Ф. Импульсное радиоизлучение, возникающее при кристаллизации воды и некоторых диэлектриков//ДАН СССР. 1982. Т. 267. № 2. С. 347—350.
94. Качурин Л. Г., Медалиев Х. Х., Сижажев С. М. Радиолокационное исследование грозных очагов в дециметровом диапазоне радиоволн//Тр. ЛГМИ. 1975. Вып. 54. С. 21—27.
95. Качурин Л. Г., Петков Б. К. Трансформация оптического излучения при прохождении через термодинамически необратимый кристаллизующийся слой вещества//ДАН СССР. 1991. Т. 318. № 3. С. 586—589.
96. Качурин Л. Г., Полтинников В. И. О селекции теплового и нетеплового радиоизлучения при зондировании Земли со спутников//Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1976. Т. 12. № 9. С. 947—952.
97. Качурин Л. Г., Псаломщиков В. Ф., Степанюк И. А. Нетепловое радиоизлучение интенсивно деформирующихся ледяных покровов акваторий естественных водоемов//Исследование Земли из космоса/АН СССР. 1984. № 3. С. 60—66.
98. Качурин Л. Г., Розенталь О. М. К построению теории электризации тел//Тр. ЛГМИ. 1972. Вып. 45. С. 18—22.
99. Качурин Л. Г., Розенталь О. М., Кабасов Ю. К. К построению кинетической модели электрической структуры грозных зон//Тр. ЛГМИ. 1975. Вып. 54. С. 84—94.
100. Кашпровский В. Е. Определение местоположения гроз радиотехническими методами. М.: Наука, 1966. 220 с.
101. Кондратьев К. Я. и др. Микроволновое дистанционное зондирование окружающей среды. Обнинск, 1975. 110 с.
102. Кононов И. И., Петренко И. А., Снегуров В. С. Радиотехнические методы местоопределения грозных очагов. Л.: Гидрометеониздат, 1986. 223 с.

103. Корниенко Г. Г., Павлова Г. П. Использование грозопеленгатора-дальномера совместно с метеорологическим радиолокатором МРЛ для повышения эффективности обнаружения гроз//Тр. ГГО. 1975. Вып. 358. С. 104—107.
104. Косарев Е. Л., Зацепин В. Г., Митрофанов А. В. Основные характеристики радиоизлучения линейных молний в дециметровом диапазоне//ЖТФ. 1971. Т. 41. Вып. 2. С. 315—322.
105. Косарев Е. Л., Сережкин Ю. Г. Узкополосное радиоизлучение молний в дециметровом диапазоне//ЖТФ. 1974. Т. 44. Вып. 2. С. 364—371.
106. Лазерное зондирование атмосферы из космоса//Под ред. В. М. Захарова, Л.: Гидрометеиздат, 1988. 222 с.
107. Левин В. Г. Курс теоретической физики. Т. 1. М.: Наука, 1969. 910 с.
108. Листов А. А. Лесные пожары от гроз в лесах Севера//Лесное хозяйство. 1967. № 5.
109. Магнитоэлектрическое излучение рудных тел//Г. А. Соболев, В. М. Деншин, В. Ф. Лось, Ю. А. Майбук//ДАН СССР. 1980. Т. 252. Вып. 6. С. 1353—1357.
110. Макхол Дж. Линейное предсказание//Обзор ТИИЭР. 1975. Т. 63. № 4. С. 20—44.
111. Мандельштам С. Л., Суходрев Н. К. Элементарные процессы в канале искрового разряда//ЖЭТФ. 1953. Т. 24. Вып. 6. С. 701—707.
112. Мартынов Ю. К. Исследование свечения и электризации кристаллов LiF при их деформации//Кристаллография. 1965. Т. 10. № 2. С. 224.
113. Матвеев Л. Т. Динамика облаков. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 311 с.
114. Медалиев Х. Х., Кармов М. И. Радиоизлучение облаков//Тр. ВГИ. 1972. Вып. 92. С. 92—104.
115. Медалиев Х. Х., Кяров Х. Б., Сижажев С. М. Исследование грозовых явлений в дециметровом диапазоне радиоволн//Тр. ВГИ. 1977. Вып. 38. С. 40—44.
116. Медалиев Х. Х., Кяров Х. Б., Сижажев С. М. Электрическая активность грозоопасных облаков//Тр. ВГИ. 1979. Вып. 42. С. 89—98.
117. Медалиев Х. Х., Сижажев С. М. Активная и пассивная радиолокация грозовых явлений//Тр. Всесоюз. симпоз. по радиофизическим исследованиям атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1977. С. 276.
118. Медалиев Х. Х., Сижажев С. М. Изучение степени грозоопасности облаков и определение времени и места возникновения канала молнии//Тр. ВГИ. 1975. Вып. 29. С. 3—11.
119. Медич Дж. Статистически оптимальные линейные оценки и управление. М.: Энергия, 1973. 440 с.
120. Мейсон Б. Дж. Физика облаков. Л.: Гидрометеиздат, 1961. 543 с.
121. Местоположение зон генераций молний в грозовом облаке (по радиолокационным данным)//Л. Г. Качурин, Л. И. Дивинский, Б. Д. Иванов, Ю. Г. Осипов//Тез. докл. III Всесоюз. симпоз. по атмосферному электрич. Тарту: ТГУ, 1986. С. 107.
122. Методика исследования гроз радиотехническими средствами//С. М. Гальперин, В. Д. Степаненко, В. Н. Егоров и др.//Тр. I Всесоюз. симпоз. по атмосферному электричеству. Л.: Гидрометеиздат, 1976. С. 161—170.
123. Мишель Б. Механическая модель ползучести поликристаллического льда с микрорастрескиванием//Физика и механика льда. М.: Мир, 1983. С. 240—257.
124. Мучник В. М. Некоторые радиолокационные характеристики ливней и гроз//Тр. ЦАО, 1958. Вып. 20. С. 82—87.
125. Мучник В. М. Физика грозы. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 351 с.
126. Мучник В. М., Рудько Ю. С. Особенности замерзания переохлажденных капель воды//Тр. Укр. НИГМИ. 1961. Вып. 26. С. 64—73.
127. Наблюдения за эволюцией грозовых очагов методами активной и пассивной радиолокации//Л. Г. Качурин, Л. И. Дивинский, Б. Д. Иванов, Ю. Г. Осипов//Межвуз. сб. науч. тр. «Радиофизические методы зондирования природных объектов». Л.: ЛПИ, 1986. Вып. 95 (ЛГМИ). С. 4—22.
128. Некоторые характеристики электромагнитного излучения атмосферных разрядов в метровом диапазоне//Л. Г. Качурин, А. И. Карцивадзе, Л. И.

- Дивинский и др.//Тр. Всесоюз. симпоз. по радиофизическим исследованиям атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1977. С. 263.
129. О возможности определения предгрозовой стадии развития облачности методами пассивной радиолокации/Б. Д. Иванов, Н. К. Екатериничева, Е. В. Осокина, Л. Н. Яковлева//Межвуз. сб. науч. тр. Л.: ЛПИ, 1983. Вып. 81 (ЛГМИ). С. 17—25.
 130. Облака и облачная атмосфера: Справочник/Под ред. И. П. Мазина, А. Х. Хргиана. Л.: Гидрометеиздат, 1989, 647 с.
 131. Обнаружение грозных облаков с помощью РЛС метрового диапазона/С. М. Гальперин, В. Д. Степаненко, В. Н. Егоров, А. Ф. Гончар//Тр. ГГО. 1975. Вып. 328. С. 56—63.
 132. Обнаружение молний радиолокаторами метрового диапазона с различными поляризациями антенн/С. М. Гальперин, В. И. Банников, В. П. Никитин, В. И. Фролов//Тез. докл. III Всесоюз. симпоз. по атмосферному электричеству. Тарту: ТГУ, 1986. С. 187.
 133. Образование и развитие грозных явлений в естественных условиях и при активном воздействии/Х. Х. Медалиев, Р. Г. Бадасян, М. И. Кармов и др.//Тр. I Всесоюз. симпоз. по атмосферному электричеству. Л.: Гидрометеиздат, 1976. С. 107—114.
 134. Определение зон опасных для полетов с помощью активно-пассивных РТС/С. М. Гальперин, И. М. Гапонов, В. Н. Стасенко и др.//Тез. докл. IV Всесоюз. науч.-практич. конф. по безопасности полетов. Л.: ОЛАГА, 1985. С. 27.
 135. Осипов Ю. Г. Исследование радиоизлучения облаков применительно к задаче активно-пассивной радиолокации: Дисс. ... канд. физ.-мат. наук. Л.: ЛГМИ, 1986. 201 с.
 136. Перенос миллиметрового радиоизлучения в атмосфере/Под ред. К. С. Шифина. Л.: Гидрометеиздат, 1968. 164 с.
 137. Петренко И. А., Гальперин С. М., Егоров В. Н. Длительность собственного излучения атмосферных разрядов в метровом диапазоне радиоволн//Тр. ГГО. 1976. Вып. 383. С. 140—144.
 138. Попов Г. П. Инженерная психология в радиолокации. М.: Советское радио. 143 с.
 139. Псаломщиков В. Ф. Исследование электризации аэрозольных систем//Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Л.: ЛГМИ, 1974. 18 с.
 140. Псаломщиков В. Ф., Фомичев И. А. Электризация и радиоизлучение тел в потоке аэрозоля//Тез. докл. респ. конф. «Проблемы наук о Земле». Тбилиси, 1978. С. 171.
 141. Радиолокационные методы исследования Земли/Под ред. Ю. А. Мельника. М.: Советское радио, 1980. 264 с.
 142. Радиолокационное обнаружение грозных облаков/С. М. Гальперин, В. Д. Степаненко, В. Н. Егоров, А. Ф. Гончар//Тр. I Всесоюз. симпоз. по атмосферному электричеству. Л.: Гидрометеиздат, 1976. С. 170—177.
 143. Радиолокационное сопоставление местоположений молний и зон осадков/В. И. Фролов, В. И. Банников, С. М. Гальперин, В. Д. Степаненко//Тр. ГГО. 1987. Вып. 508. С. 3—11.
 144. Радиолокационные наблюдения за грозными очагами в кучеводождевых облаках/Л. Г. Качурин, А. И. Карцивадзе, Л. И. Дивинский//Тр. ЛГМИ. 1975. Вып. 54. С. 9—20.
 145. Радиолокационные характеристики грозных облаков в сантиметровом и метровом диапазонах радиоволн/Л. Г. Качурин, А. И. Карцивадзе, Л. И. Дивинский//Тр. I Всесоюз. симпоз. по атмосферному электричеству. Л.: Гидрометеиздат, 1976. С. 185—190.
 146. Раннее обнаружение ближних гроз на УКВ/И. Г. Выскребцов, И. М. Гапонов, С. П. Козлов//Тез. докл. III Всесоюз. симпоз. по атмосферному электричеству. Тарту: ТГУ, 1986. С. 185.
 147. Распределение по земному шару атмосферных помех и их характеристики//Докл. 10 пленарной ассамблеи МККР: Отчет 322. Женева, 1964. М.: Связь, 1965. 78 с.
 148. Распространение ультракоротких радиоволн/Пер. с англ. под ред. Б. А. Шиллерова. М.: Советское радио, 1954. 710 с.

149. Раст В. Д., Тейлор В. Л., Макгормен Д. Р. Предварительное исследование локализации молний относительно грозовых облаков//Ракетная техника и космонавтика. 1982. Т. 20. № 5. С. 98—105.
150. Результаты экспедиции по исследованию радиоизлучения линейных молний в дециметровом диапазоне/Е. Л. Косарев, А. Б. Ваганов, Б. С. Закиров и др.//ЖТФ. 1968. Т. 38. Вып. 11. С. 1831—1834.
151. Рекуррентное оценивание и адаптивная фильтрация. М.: Наука, 1984. 288 с.
152. Руководство по производству наблюдений и применению информации с радиолокаторов МРЛ-1 и МРЛ-2. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 336 с.
153. Сальман Е. М. Комплексный радиолокационный метод метеорологического обслуживания авиации//Тр. ГГО. 1962. Вып. 128. С. 24—34.
154. Сальман Е. М. Методы совершенствования радиолокационного штормоповещения//Тр. Всесоюз. симпоз. по радиофизическим исследованиям атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1977. С. 238.
155. Сальман Е. М. Некоторые вопросы улучшения службы радиолокационного штормоповещения//Тр. ЦАО. 1958. Вып. 20. С. 29—35.
156. Сальман Е. М., Гашина С. Б. Локализация осадков и грозоопасных зон по их радиолокационным характеристикам//Тр. ГГО. 1967. Вып. 217. С. 33—39.
157. Саридис Дж. Самоорганизующиеся стохастические системы управления. М.: Наука, 1980. 400 с.
158. Семенов Н. Е. Техническая электродинамика. М.: Связь, 1973. 480 с.
159. Сидоров С. В., Тихомиров Ю. В. Бортовой прибор для индикации зон с повышенной грозовой активностью//Тез. докл. I Всесоюз. науч.-техн. конф. «Безопасность полета в условиях опасных внешних воздействий». Киев: КИИГА, 1981. С. 19.
160. Совместные радиотепловые и радиолокационные измерения метеопараметров облаков и дождя/А. Е. Башаринов, А. Г. Горелик, В. В. Калашников, Б. Г. Кутуза//Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1970. Т. 6. № 5. С. 527.
161. Современные методы идентификации систем/Под ред. П. Эйкхоффа. М.: Мир, 1983. 400 с.
162. Современная радиолокация.— М.: Советское радио, 1969. 704 с.
163. Справочник по вероятностным расчетам/Г. П. Абезгауз, А. П. Тронь, Ю. Н. Копенкин, И. А. Коровина. М.: Воениздат, 1970. 586 с.
164. Стасенко В. Н., Гальперин С. М. Динамика грозового облака по данным радиотехнических наблюдений//Тр. ГГО. 1976. Вып. 383. С. 129—135.
165. Степаненко В. Д. Радиолокация в метеорологии. Л.: Гидрометеиздат, 1973. 343 с.
166. Степаненко В. Д., Гальперин С. М. Обнаружение ливней и гроз с помощью радиолокационных станций температурно-ветрового зондирования//Тр. ГГО. 1969. Вып. 243. С. 49—54.
167. Степаненко В. Д., Гальперин С. М. Радиолокационная отражаемость и геометрические размеры ливней и гроз//Тр. ГГО. 1975. Вып. 356. С. 148—154.
168. Степаненко В. Д., Гальперин С. М. Радиотехнические методы исследования гроз. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 204 с.
169. Трохан А. М., Лапшин А. И., Гудзенко О. Н. КриOLUMИнесценция жидкостей//ДАН СССР. 1984. Т. 275. № 1. С. 83—86.
170. Трунов О. К. О состоянии и задачах исследований по проблеме опасных для авиации внешних воздействий среды//Тез. докл. I Всесоюз. науч.-техн. конф. «Безопасность полета в условиях опасных внешних воздействий». Киев: КИИГА, 1981. С. 31.
171. Фарамазян В. В., Строганов Б. А., Чудный, Ю. М. Повышение безопасности полетов в грозовой обстановке//Тез. докл. I Всесоюз. науч.-техн. конф. «Безопасность полета в условиях опасных внешних воздействий». Киев: КИИГА, 1981. С. 18.
172. Физика и механика льда/Под ред. Р. В. Гольдштейна. М.: Мир, 1983. 346 с.
173. Физика облаков и активных воздействий/Под ред. А. И. Кардивадзе, А. М. Окуджава. Тбилиси: Мецанерепа, 1977. 130 с.

174. Фомичев И. А. Радиоизлучение летательных аппаратов при полете в облаках//Тез. докл. респ. конф. «Проблемы наук о Земле». Тбилиси, 1978. С. 170.
175. Характеристики электрически активных зон в слоистообразных облаках/Г. Б. Брылев, С. Б. Гашина, Б. Ф. Евтеев, И. И. Камалдина. Л.: Гидрометеониздат, 1989. 158 с.
176. Характерное электромагнитное излучение воздушных судов при их электростатическом зарядении во время полета в облаках/Л. Г. Качурин, А. И. Мержеевский, В. Ф. Псаломщиков, И. А. Фомичев//Межвуз. темат. сб. науч. тр. «Объективная оценка метеоинформации при обеспечении полетов воздушных судов в целях повышения безопасности и регулярности полетов». Л.: ОЛАГА, 1983. С. 95—101.
177. Цыпкин Я. З. Основы информационной теории идентификации. М.: Наука, 1984. 320 с.
178. Чалмерс Дж. А. Атмосферное электричество. Л.: Гидрометеониздат, 1974. 420 с.
179. Численное моделирование градовых процессов и воздействия на них с помощью кристаллизующих реагентов/Л. Г. Качурин и др.//Тез. докл. Всесоюз. конф. по физике облаков и активным воздействиям на них. Обнинск, 1979. С. 74—75.
180. Чуев Ю. В., Михайлов Ю. Б., Кузьмин В. И. Прогнозирование количественных характеристик процессов. М.: Советское радио, 1975. 400 с.
181. Эберт Г. Краткий справочник по физике. М.: Физматгиз, 1963. 552 с.
182. Эволюция фронтальных грозовых очагов (по радиолокационным наблюдениям в метровом и сантиметровом диапазонах длин волн)/Л. Г. Качурин, А. И. Карцивадзе, Л. И. Дивинский, Б. Д. Иванов//Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1979. Т. 15. № 2. С. 187—193.
183. Электризация тел в потоке водного аэрозоля/Л. Г. Качурин, В. И. Бекряев, В. Ф. Псаломщиков, О. М. Розенталь//Тез. докл. Всесоюз. конф. по горению и распылению топлива. Одесса, 1971.
184. Электроимпульсная технология и электромагнитные процессы в нагруженных твердых телах//Тез. докл. Всесоюз. науч. совещ. Томск: ТПИ, 1982. 190 с.
185. Электромагнитное излучение снега и льда при динамических процессах/Л. Г. Качурин, Н. О. Григоров, Ю. Н. Кузин и др.//ДАН СССР. 1979. Т. 248. № 3. С. 583—585.
186. Электромагнитные предвестники землетрясений/Под ред. А. М. Садовского. М.: Наука, 1982. 87 с.
187. Юман М. А. Естественная и искусственно инициированная молнии и стандарты на молниезащиту//ТИИЭР. 1988. Т. 76, № 12. С. 5—26.
188. Юман М. А. Молния. М.: Мир, 1972. 327 с.
189. Aircraft Accident Report, Boeing 707-121, N 709 PA Pan American World Airways, Inc., near Elkton, Maryland, Dec. 8, 1963//Civil Aeronautic Board File № 1-0015.—Feb. 25, 1965.
190. Åström K. J., Söderström T. Uniqueness of the maximum likelihood estimates of the parameters of the APMA model//IEEE Trans. Autom. Control. 1974. V. 19. P. 194—202.
191. Böhne A. R., Chmela A. Observations of turbulence and aircraft lightning strike events in last coast thunderstorms//Prepr. 23rd Conf. Radar Meteor. and Conf. Cloud Phys.—Boston; Mass., 1986. V. 3. P. 1281—1224.
192. Brook M., Kitagawa N., Workman E. J. Quantitative study of strokes and continuing currents in lightning discharge to ground//J. Geophys. Res. 1962. V. 67. N 2. P. 649—659.
193. Browne J. C. A radar echo from lightning//Nature. 1951. N 167. P. 438.
194. Bussey J. Report of Atlas/Centaur.—67/FLTSATCOM F-6 investigation board//NASA, 1987. V. 11.
195. Clifford D. W., Kasemir H. N. Triggered lightning//IEEE Trans. Electromag. Compat. 1982. V. EMC 24. P. 112—122.
196. Dawson G. A. Lightning stroke research by radar//15 Radar Meteorol. Conf.—Boston; Mass., 1972. P. 83—84.

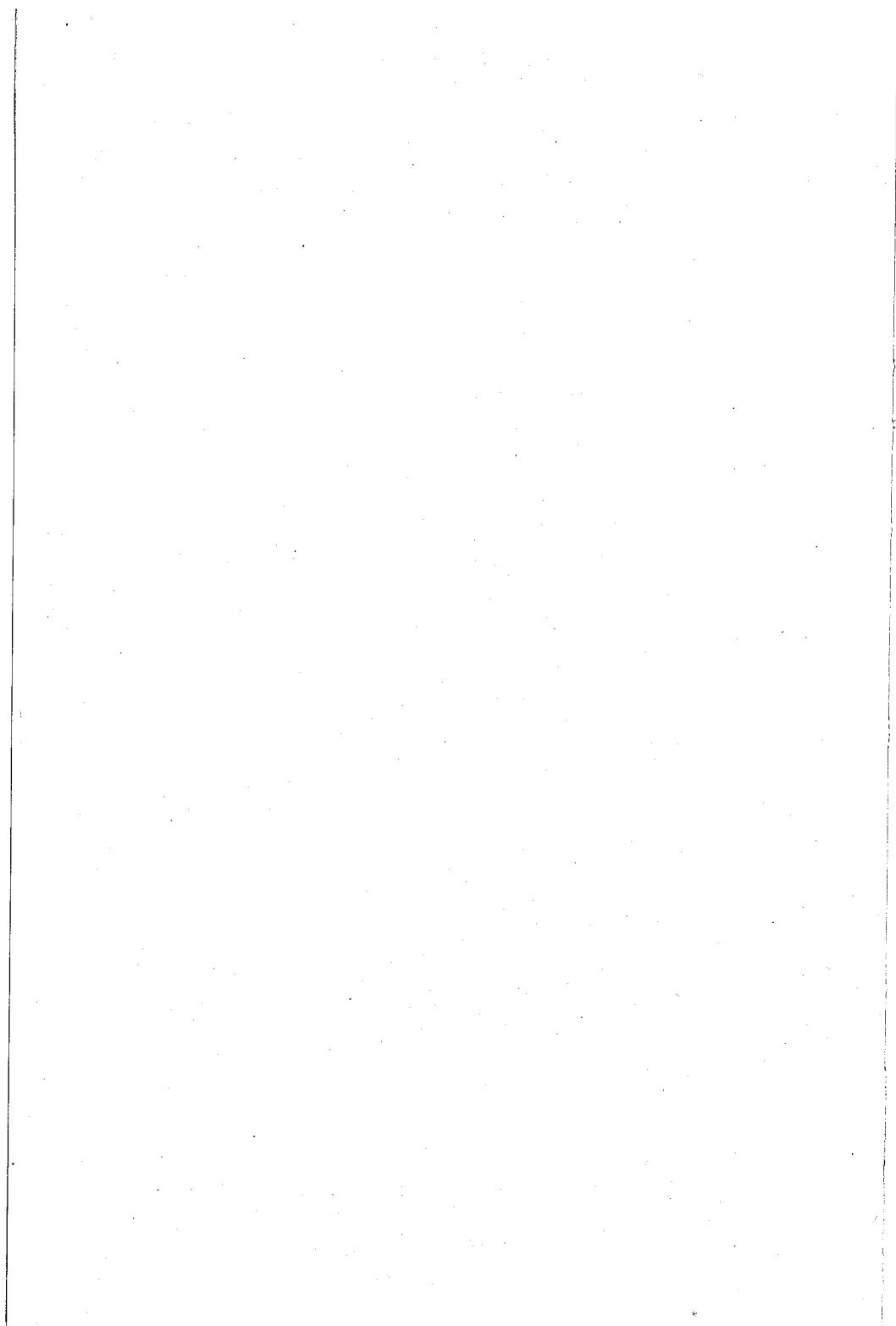
197. Dawson G. A. Radar as a diagnostic tool for lightning//J. Geophys. Res. 1972. V. 77. N 24. P. 4518—4528.
198. Dickey F. R. J. The production of millimeter waves by spark discharges//Tech. Rept. 123 Cruft Laboratory.—Harvard University, 1951.
199. Divinsky P. J. An effective radar cross-section of a lightning channel//J. Atmos. Electric. 1976. V. 1. P. 177—185.
200. Doviak R. J., Zrnić D. S. Doppler radar and weather observation//Academic Press Inc., 1984. 512 p.
201. Fitzgerald D. R. Probable aircraft triggering of lightning in certain thunderstorm//Mon. Wea. J. 1967. V. 95. N 12. P. 835—842.
202. Gibson N. E. Some observations of microwave radiation from clouds//Mem. Rept. 693 US Naval Res. Laboratory.—Washington, DC., 1957. P. 4.
203. Godfrey R., Mathews E. K., Mc Divitt J. A. Analysis of Apollo 12 lightning incident//NASA MSC-01540, Jan. 1970.
204. Harvey R. B., Lewis E. A. Radio mapping of 250 and 925 megahertz noise sources in clouds//J. Geophys. Res. 1973. V. 78. N 12. P. 1944—1947.
205. Hewitt F. J. Radar echoes from interstroke processes in lightning//Proc. Phys. Soc.—London. 1957. V. 70. P. 961—979.
206. Hewitt F. J. The study of lightning streamers with 50 cm radar//Proc. Phys. Soc.—London, 1953. V. 66. P. 895.
207. Hogg D. C., Semplak R. A. The effect of rain and water drops on sky noise centimeter wavelengths//Bell. System. Tech. J. 1961. V. 40. P. 1331—1348.
208. Horner F., Bradley P. A. The spectra of atmospherics from near lightning discharges//J. Atmos. and Terr. Phys. 1964. N. 24. N 12. P. 1156—1166.
209. Jones R. F. Radar echoes from lightning//Quart. J. Roy. Meteor. Soc. 1954. V. 80. P. 579.
210. Jwabuchi T., Magano C. Laboratory experiment on the freezing electrification of freely falling water droplets//J. Meteor. Soc.—Japan, 1975. V. 53. N 6. P. 393—401.
211. Kalaba R. Graf theory and automatic control//Chap. 8 of Applied Combinatorial Mathematics.—E. F. Bekenbach, ed. J. Wiley. 8 sons Inc.—New-York, 1969.
212. Kachurin L. G. Active-passive radar studies of thunder and prethunderstorm clouds and other natural phenomena//8th Intern. Conf. on Atmospheric Electricity.—Upsala—Sweden, 1988.
213. Kachurin L. G. Active-passive radiolocation of dangerous natural phenomena//Advances in atmospheric sciences.—China Ocean Press. Beijing. 1990. V. 7. N 6.
214. Kachurin L. G., Bekriayev V. J., Gurovich M. V. Numerical model for a hailstorm//Proc. of the 9th Intern. Cloud Phys. Conf.—Tallinn, 1984.
215. Kachurin L. G., Bekriayev V. J., Gurovich M. V. Numerical simulation of hailstorm modification by means of crystallizing reagents//Papers presented at the Third WMO Sci. Conf. on Wea. Modific.—Clermont—Ferrand, 1980. V. 2. P. 695—699.
216. Kachurin L. G., Divinsky L. J., Psalomschikov V. F. The possibilities of premeditated and unpremeditated effects upon the electric processes within natural environment//Papers submitted to the Fifth WMO Sci. Conf. on Wea. Modific. and applied Cloud Phys.—Beijing, China, 1989. V. 2. P. 687—690.
217. Kimpara A. Electromagnetic energy radiation from lightning//Proc. Res. Inst. Atmos.—Nagoya Univ., 1964. N 11. P. 1—12.
218. Kimpara A. Electromagnetic energy radiated from lightning//Probl. Atmospheric and Space Electricity.—Amsterdam—London—New-York, 1965. P. 352—367.
219. King W. D., Fletcher N. H. Pressures and stresses in freezing water drops//J. Phys. 1973. V. 86. P. 2157—2186.
220. Kitagawa N., Brook M., Workman E. J. Continuing currents in cloud-to-ground lightning discharges//J. Geophys. Res. 1962. V. 67. N 2. P. 637—647.

221. Kosarev E. L., Zatsepin V. D., Mitrofanov A. V. Ultrahigh frequency radiation from lightning//J. Geoph. Res. 1970. V. 75. N 36. P. 7524.
222. Krider E. P. et al. Lightning and the Appolo 17/Saturn V exhaust plume//J. Spacecraft Rockets. 1974. V. 11. P. 72—75.
223. Kunzer G. D. Cloud-to-ground lightning versus radar reflectivity in Oklahoma thunderstorm//J. Atmos. Sci. 1974. V. 31. N 3. P. 787—799.
224. Le Boulch M. Caracterisation et mecanismes du rayonnement VHF-UHF des decharges orageuses: pour obtenir la titre de detecteur-ingenier.— Soutenue publiquement le 23 mars 1984.— A. l'universite de Clermont II. 344 p.
225. Le Boulch M., Hamelin J. Rayonnement en ondes metriques et decimetriques des orages//Ann. Télécomun. 1985. V. 40. N 5—6. P. 277—313.
226. Lee J. I., Wilk E. Applications of conventional and Doppler radar for aviation safety//19th Conf. Radar Meteor., Amer. Meteor. Soc.— Miami Beach, Fla.— Boston, Mass., s.r., 1980. P. 102—109.
227. Lhermitte R. M. Convective storm development and electrification//Commun. 8em Conf. Intern. Phys. Nnag.— Clermont—Ferrand, 1980. V. 2. P. 501—502.
228. Lhermitte R. M., Earle W. Cloud electrification//Rev. Geophys. and Space Phys. 1983. V. 21. N 5. P. 984—992.
229. Ligda M. G. H. Lightning detection by radar//Bull. Amer. Meteor. Soc. 1950. V. 31. P. 279.
230. Loeb L. B. The Mechanisms of stepped and dart leaders in cloud-to-ground lightning strikes//J. Geophys. Res. 1966. V. 71. N 20. P. 4711—4721.
231. Mac Gorman D. Lighting location from VHF impulses relative to storm structure from dual Doppler radar//EOS Trans. Amer. Geophys. Union. 1979. V. 60. N 46. P. 837.
232. Mayson B. J., Maybank J. The fragmentation and electrification of freezing water drops//Quart. J. Roy. Meteor. Soc. 1960. V. 86, N 368. P. 176—186.
233. Mazur V., Fischer D. B., Gerlach J. G. Lightning strikes to a NASA Airplane penetrating thunderstorms at low altitudes//J. Aircraft. 1986. V. 23, N 6. P. 499—505.
234. Mazur V. Triggered lightning strikes to aircraft and natural discharges//J. Geophys. Res. 1989. N 94, N 3. P. 3311—3325.
235. Metcalf J. I. Airborn weather radar and severe weather penetration//19th Conf. Radar Meteor., Amer. Meteor. Soc.— Miami Beach, Fla.— Boston, Mass., s.r., 1980. P. 125—129.
236. Miles V. G. Radar echoes associated with lightning//J. Atmos. and Terr. Phys. 1953. V. 3. P. 258.
237. Mouffloc J. Le Foudroiement des Aeronefs//La Meteorologic numero Special aviation et Meteorologie. Paris, 1975. P. 163—168.
238. Nowcasting/By Ed. K. Browning.— London; Academic Press, 1982. 256 p.
239. Orville R. E. et al. The Simultaneous display in a severe storm of lightning ground strike locations onto satellite images and radar reflectivities//Prepr. 12th Conf. on Severe Local Storms.— Amer. Meteor. Soc., Boston, Mass., 1982. P. 448—551.
240. Proctor D. E. A hyperbolic system for obtaining VHF radio pictures of lightning//J. Geophys. Res. 1971. V. 76. N 6. P. 1478—1489.
241. Proctor D. E. Radar observations of lightning//J. Geophys. Res. 1981. V. 86. P. 4041—4047.
242. Rust D. W., Doviak R. J. Radar research on thunderstorms and lightning//Nature. 1982. V. 297. P. 461—468.
243. Rust D. W., Taylor W. L., Mac Gorman D. R. Preliminary Study of Lightning Location Relative to storm structure//AIAA Journal. 1982. V. 20. N 3. P. 404—409.
244. Rust D. W. et al. Research on electrical properties of severe thunderstorms in the Great Plains//Bull. Amer. Meteor. Soc., 1981. N 62. P. 1286—1293.
245. Sartor D. J. Radio emission from clouds//J. Geophys. Res. 1963. V. 68. N 18. P. 5168—5172.

246. Sartor D. J. Radio observations of the electromagnetic emission from warm clouds//Science. 1964. V. 143. P. 948—950.
247. Schonland B. F. J. The pilot streamer in lightning and the long spark//Proc. Roy. Soc. (London). 1953. A. 220. P. 25—38.
248. Scott D., Hattchinson V. S. H. The electrification of freezing water drops//Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 1975. V. 91, N 387. P. 80—85.
249. Takagi M. Polarization of VHF radiation from lightning discharges//J. Geophys. Res. 1975. V. 80. N 36. P. 5011—5014.
250. Takahashi C. Deformation of frozen water drops and their frequencies//J. Meteor. Soc. Japan. 1975. V. 53. N 6. P. 402—411.
251. Taylor W. L. Lightning initiation height and progression relative to storm dynamics//EOS Trans. Amer. Geophys. Union. 1979. V. 60. N 46. P. 837.
252. Todd G. A. Experimental investigation of the radar cross-section of cloud-to-ground lightning//J. Appl. Meteor. 1976. V. 15. N 7. P. 795—798.
253. Uman M. A. Lightning//Rev. Geophys. and Space Phys. 1983. V. 21. N 5. P. 992—997.
254. Uman M. A., Woschall R. E. Time-interval between lightning strokes and the initiation of dart leaders//J. Geophys. Res., 1968. V. 73. N 2. P. 491—506.
255. Watt A. D., Maxwell E. L. Characteristics of atmospheric noise from 1 to 100 kc//Proc. IRE. 1957. N. 45. N 6. P. 787—794.
256. Williams E., Geotis S. Radar diagnostics of the plasma and geometry of lightning//Prepr. 23rd Conf. Radar Meteor. and Conf. Cloud Phys.—Boston, Mass., 1986. V. 3. P. 365—373.
257. Williams E., Lhermitte R. Thunderstorm VHF radiation and local radar reflectivity//EOS Trans. Amer. Geophys. Union. 1979. V. 60. N 46. P. 836.
258. Workman E. J., Reynolds S. E. Electrical phenomena occurring during the freezing of dilute agulous solution and their possible relationship to thunderstorm electricity//Phys. Rev. 1950. V. 78. N 3. P. 254—259.
259. Zigler C. L. et al. Relationships among electrical activity, airflow and microphysical properties in a severe thunderstorm//Prepr. 23rd Conf. Radar Meteor. and Conf. Cloud Phys.—Boston, Mass., 1986. V. 3. P. 9296—9299.
260. Zonge K. L., Evans W. H. Prestroke radiation from thunder clouds//J. Geophys. Res. 1966. V. 71. N 6. P. 1519—1523.
261. Zrnić D. S., Rust D. W., Taylor W. L. Doppler spectra of lightning and precipitation at vertical incidence//Prepr. 20th Conf. Radar Meteor., Amer. Meteor. Soc., Boston, Mass., 1981. P. 263—270.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Глава 1. Краткий обзор современных радиотехнических методов наблюдений за грозами и радиоизлучением облаков	8
Глава 2. Активная радиолокация грозовых очагов	23
2.1. Аппаратура активной радиолокации грозовых очагов	—
2.2. Методика измерений	33
2.3. Результаты активной радиолокации грозовых очагов	34
2.3.1. Об эффективной отражающей поверхности канала молнии	35
2.3.2. Пространственно-временная структура грозовых очагов	44
2.3.3. Взаимное расположение в кучево-дождевых облаках областей максимальной отражаемости гидрометеоров и грозовых очагов	48
2.3.4. Определение интенсивности грозового процесса	50
Глава 3. Пассивная радиолокация грозовых и грозоопасных очагов	57
3.1. Аппаратура пассивной радиолокации грозовых и грозоопасных очагов	—
3.2. Методика измерений	59
3.3. Результаты пассивной радиолокации грозовых и грозоопасных очагов	62
3.3.1. Особенности сигналов нетеплового радиоизлучения, связанного с разрядной деятельностью облаков	63
3.3.2. Особенности сигналов немолниевое нетеплового радиоизлучения	66
3.3.3. Немолниевое нетепловое радиоизлучение конвективных облаков в метровом диапазоне радиоволн	70
3.3.4. Характеристики немолниевое нетеплового радиоизлучения облаков в средневолновом диапазоне	77
3.3.5. Пространственная панорама характеристик грозовой облачности по данным пассивной радиолокации	95
Глава 4. Активно-пассивная радиолокация грозовых и грозоопасных очагов	99
4.1. Аппаратура и методика измерений	—
4.2. Результаты активно-пассивной радиолокации грозовых и грозоопасных очагов	103
4.3. Использование численного моделирования грозо-градового процесса при анализе результатов активно-пассивной радиолокации облачности	111
Глава 5. Комплексный критерий грозоопасности (по результатам радиолокационных измерений)	115
5.1. Характеристики грозоопасности	117
5.2. Математическое обоснование и методика построения комплексного критерия грозоопасности	121
5.3. Примеры расчетов комплексного критерия грозоопасности	124
Глава 6. Методы оптимальной фильтрации и прогноза комплексного критерия грозоопасности	130
6.1. Предварительное обсуждение	—
6.2. Математическое обоснование и методика прогнозирования комплексного критерия грозоопасности с использованием моделей	131
6.2.1. Стохастические модели	—
6.2.2. Идентификация моделей	135
6.2.3. Взаимодействие алгоритмов	144
	215



Серенко А. П.

1921

