

В. Д. Степаненко

С. М. Гальперин

*Радио-
технические
методы
исследования*
Гроз



ЛЕНИНГРАД ГИДРОМЕТЕОИЗДАТ 1983

УДК 551.5 : 621.396.96

Рецензенты: д-р физ.-мат. наук *А. Б. Шупяцкий* (Центральная аэрологическая обсерватория); канд. физ.-мат. наук *М. Т. Абшаев*, канд. физ.-мат. наук *М. Н. Бейтуганов*, канд. техн. наук *Б. Х. Тхамов* (Высокогорный геофизический институт)

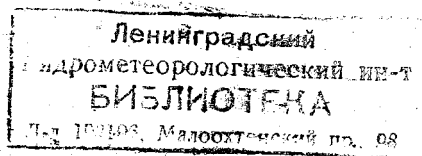
Излагаются вопросы теории обнаружения грозových очагов радиолокаторами сантиметрового, дециметрового и метрового диапазонов радиоволн. Приводятся данные экспериментальных исследований гроз в указанных диапазонах. Наибольшее внимание уделяется радиолокационному обнаружению молний и их регистрации, а также методике приема излучения атмосферных разрядов. Анализируются экспериментальные данные, полученные одновременно активными и пассивными РТС. Рассматриваются возможности и особенности обнаружения гроз самолетыными и спутниковыми радиотехническими средствами.

Приводятся сведения о влиянии гроз на различные отрасли народного хозяйства.

Рассчитана на специалистов метеорологов, радиометеорологов и радиоспециалистов. Может быть использована в качестве учебного пособия для студентов гидрометеорологических институтов.

In the book by V. D. Stepanenko and S. M. Galperin „Radio Means for Thunderstorm Detection” thunderstorm effect on different branches of national economy is considered. There are presented problems of the theory of thunderstorm hearth detecting by centimetre—, decimetre— and metre-band radars. The results of experimental studies of thunderstorms in the above bands are given. Much attention is given to radar detecting of lightnings and their registration, as well as to the techniques for receiving atmospheric discharges radiation. Analysis is made of experimental results obtained simultaneously by active and passive radio means. The possibilities and characteristic features of detecting thunderstorms using aircraft, satellite and radio means are examined.

The book is meant for specialists in meteorology, radiometeorology and radio engineering. It can be used as a text-book for students of hydrometeorological institutes.



С 1903040000-058
069(02)-83 28-83

© Гидрометеоиздат, 1983 г.

Предисловие

Грозы как опасное явление погоды привлекают внимание не только метеорологов, но и большого круга специалистов, работающих в различных отраслях народного хозяйства. Долгое время огромная сеть метеостанций не имела дистанционных инструментальных средств обнаружения гроз. Как правило, для их опознавания использовался визуально-слуховой метод. На смену этому традиционному методу в последние десятилетия приходят методы, базирующиеся на применении различных радиотехнических средств. В настоящее время наиболее широкое применение нашли радиолокаторы миллиметрового и сантиметрового диапазонов, хорошо обнаруживающие грозовые облака.

Применение метеорологических радиолокаторов (МРЛ), входящих в систему штормовых оповещений, позволяет по характеристикам эхо-сигналов гидрометеоров косвенным образом распознавать грозовые облака с вероятностью 80—85 %. Кроме того, вполне надежно определяются геометрические размеры, скорость и направление движения, а также эволюция этих облаков.

Получаемая с помощью МРЛ информация в значительной мере удовлетворяет потребности метеорологического обеспечения авиации. Однако она нуждается в существенном дополнении и уточнении при метеорологическом обслуживании линий электропередачи, лесного хозяйства, районов проведения взрывных работ и др., когда нужно знать координаты грозовых разрядов, их число, интенсивность, пространственную ориентацию и т. д. Кроме того, эти данные необходимы при теоретических и экспериментальных исследованиях физических процессов, протекающих в грозовых облаках, а также для контроля воздействий с целью ослабления их грозовой деятельности.

Находят также широкое применение грозорегистраторы и грозопеленгаторы, результаты измерений которых позволяют получить более качественную информацию о грозах по сравнению с информацией, получаемой визуально-слуховым способом на сети метеостанций. Разработанные в СССР грозопеленгаторы-дальномеры позволяют из одного пункта не только определить направление на грозовые разряды, но и оценить расстояние до них в радиусе 400 км.

В 1964—1970 гг. в нашей стране был сделан новый шаг в области экспериментального исследования грозовых облаков, связанный с применением РЛС метрового диапазона волн. В этот период были впервые обнаружены эхо-сигналы молний с помощью РЛС. Авторы предлагаемой монографии разработали приближенную теорию обнаружения, которая в дальнейшем была развита у нас и за рубежом. В 1970—1971 гг. авторами была организована серия новых экспериментов с помощью РЛС «Малахит» ($\lambda = 1,5$ м) и РЛС П-12 ($\lambda = 2$ м).

Для надежной интерпретации эхо-сигналов этих РЛС предусматривались комплексные наблюдения с обеспечением строгой

временной привязки радиолокационных данных к результатам, получаемым грозопеленгатором, регистратором формы импульса радиоизлучения молнии, метеорадиолокатором МРЛ-1. Было установлено, что радиоэхо молнии, фиксируемое РЛС метрового диапазона, как правило, сопровождается ее собственным излучением, воспринимаемым как шумовой фон, значение которого в несколько раз превышает собственные шумы приемного тракта РЛС.

Радиолокационные наблюдения молнии позволили наиболее точно определить их координаты с одного пункта, оценить время существования эхо-сигналов молнии и их геометрические размеры, эффективные отражающие площади (ЭПР). В дальнейшем эксперименты были продолжены другими исследователями.

Наряду с применением РЛС метрового диапазона для обнаружения молний, применяются также РЛС дециметрового диапазона.

Совместное применение МРЛ и РЛС для обнаружения молний позволило уточнить статистические характеристики отражаемости и геометрические размеры отдельно для ливней и гроз, полученные ранее. Было установлено, что во фронтальных грозовых облаках горизонтальные координаты эхо-сигналов молний часто не совпадают с зонами максимальной радиолокационной отражаемости. В большинстве случаев молнии локализуются в зонах, где наблюдаются высокие значения горизонтальных градиентов радиолокационной отражаемости.

Одновременное применение РЛС метрового и сантиметрового диапазонов дало возможность получить данные, характеризующие динамику грозовых облаков, находящихся в естественном цикле развития или при активных воздействиях. Электрическое состояние облаков определяется по числу эхо-сигналов молний, фиксируемых РЛС метрового диапазона; по данным грозопеленгаторов; приборов, измеряющих напряженность электрического поля; приемников, фиксирующих электромагнитное излучение (ЭМИ) атмосферных разрядов исследуемых конвективных облаков, находящихся в предгрозовой, грозовой и послегрозовой стадиях.

Важной проблемой является исследование ЭМИ атмосферных разрядов в различных диапазонах радиоволн (СДВ—УКВ), решение которой зависит от методики регистрации ЭМИ в различных диапазонах и от аппаратуры, используемой для приема такого излучения. Определение координат молнии с помощью РЛС метрового и дециметрового диапазонов позволило авторам установить ряд параметров ЭМИ разрядов в зависимости от удаления источника излучения. Параметры ЭМИ разрядов, введенные в монографии, используются при разработке аппаратуры, предназначенной для исследования гроз, и при автономном применении грозопеленгаторов-дальномеров на метеостанциях для метеорологического обеспечения авиации и др. Кроме того, такие параметры ЭМИ крайне необходимы в тех случаях, когда источник излучения (молния) рассматривается как помеха для

различных радиотехнических средств, используемых в народном хозяйстве.

Для оперативных и научных целей используются не только наземные, но и бортовые радиотехнические средства обнаружения и исследования грозовых облаков. К ним относятся самолетные РЛС и грозопеленгаторы, устанавливаемые на самолетах или ИСЗ. С помощью таких установок получают данные прежде всего о грозовой деятельности в глобальном масштабе. Жесткие условия размещения указанной аппаратуры на борту самолетов или ИСЗ накладывают дополнительные требования, предъявляемые не только к выбору массы, габаритов, энергопотребления, системы регистрации и передачи полезных сигналов о грозах, но также к выбору рабочих частот аппаратуры и методики ее применения.

Работа над книгой распределена следующим образом: главы 1, 2 и 3, пп. 4.2 и 6.3 написаны В. Д. Степаненко; главы 4, 5 и 6, пп. 3.2, 7.1 и 7.4 — С. М. Гальпериним; пп. 7.2 и 7.3 — В. Н. Стасенко.

Авторы сознают, что книга не свободна от недостатков, обусловленных главным образом многоплановостью и сложностью рассматриваемых в ней вопросов. К тому же она является одной из первых попыток систематизированного изложения материалов, относящихся к использованию радиотехнических методов и средств получения информации о грозовых облаках и интерпретации этой информации. В связи с этим авторы будут благодарны всем, кто выскажет замечания и пожелания для дальнейшего улучшения книги.

Авторы искренне признательны В. И. Банникову, А. Ф. Гончару, В. Н. Егорову, В. Н. Стасенко, А. М. Тряхову, В. В. Федорову, В. Г. Эйхгорну и др., принимавшим активное участие в постановке комплексных экспериментальных исследований, а также выражают благодарность А. Б. Шупяцкому, М. Т. Абшаеву, М. Н. Бейтуганову и Б. Х. Тхамокову, рецензировавшим рукопись и давшим ряд ценных советов.

Глава 1

Краткая характеристика гроз и их влияние на народное хозяйство

1.1. Основные характеристики грозовых облаков и условия возникновения молний

Грозы возникают как результат атмосферных процессов, обуславливающих появление и развитие мощных конвективных облаков. В последнее десятилетие простые модели электрической структуры грозовых облаков [74, 113] были существенно уточнены. Кроме того, была разработана новая модель, учитывающая ее статические и динамические аспекты [73].

На рис. 1.1 приведено схематическое строение грозового облака Cb_T в стадии зрелости [74]. В сравнении со стадией Cb_T стадия $Si\ cong.$ характеризуется тем, что в ней объемные заряды 1, 2 и 4 на несколько порядков величин меньше, чем в стадии Cb_T , а заряд 3 отсутствует. Когда наблюдается стадия перехода $Si\ cong.$ в стадию Cb ($Si\ cong. \rightarrow Cb$), заряд 1 больше заряда 2, вследствие этого вектор напряженности поля над облаком имеет другое направление по сравнению со стадией зрелости. Объемный заряд 3 появляется, как правило, при выпадении заряженных частиц осадков. Для стадии распада грозового облака характерным является существенное уменьшение объемных зарядов 1, 2 и 3 по сравнению с предыдущей стадией. Заряды зон электрической неоднородности 4 могут нередко обуславливать локальные напряженности поля, которые на порядок превышают напряженности, создаваемые основными объемными зарядами.

В табл. 1.1 представлены основные электрические свойства грозовых облаков [73].

Таблица 1.1

Электрические свойства грозовых облаков

Средняя величина основных зарядов облака, Кл	10—13
Средние токи, А	0,05—1
над облаком	10—100
в облаке	10 ⁻¹³ —10 ⁻¹²
Электропроводность, Ом/м	
Предельные значения напряженности поля, В/м	
в среднем по облаку	10 ⁵
в зонах неоднородностей	10 ⁶
Минимальная напряженность поля, при которой начинается разряд, В/м	10 ⁶
Минимальная энергия зоны, в которой начинается разряд, Дж	10 ³
Минимальные размеры зоны, в которой начинается разряд, м	20
Минимальная напряженность поля, необходимая для поддержания разряда, В/м	10 ⁵

Следует подчеркнуть, что величины основных зарядов 1 и 2 различны для различных облаков и в среднем возрастают с уменьшением широты места.

При анализе данных табл. 1.1 нужно иметь в виду, что они являются оценочными, так как для достаточно точной параметризации электрических свойств облаков необходимо накопление

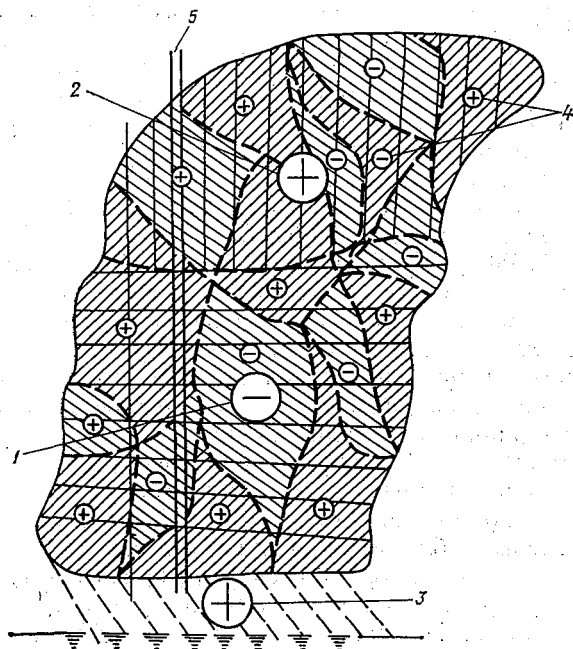


Рис. 1.1. Статическая модель грозового облака в стадии зрелости.

1 — основной электрический заряд облака, 2 — заряд, создаваемый за счет электропроводности атмосферы, 3 — заряд осадков, 4 — заряд электрических неоднородностей облака, 5 — столб единичного сечения.

большого числа систематических измерений, проведенных в различных физико-географических и погодных условиях, которые в настоящее время отсутствуют.

Для грозовых облаков характерным является их большая вертикальная протяженность. В отличие от других облаков в грозовых облаках возникают молниевые разряды. Для этого требуется достаточно высокая «пробойная» напряженность электрического поля, создаваемого объемными зарядами.

Для понимания физических причин, приводящих к образованию «пробойной» напряженности электрического поля, требуется сначала рассмотреть процессы заряжения частиц в облаках, т.е. процессы микроэлектризации. В настоящее время эти процессы сведены к двум основным [73]:

1) контактной электризации, в результате которой происходит обмен зарядами между частицами;

2) к электризации за счет перехода зарядов из ионизированной газовой среды на частицы.

На оба процесса микроэлектризации могут оказывать существенное влияние внешние электрические поля.

Контактная электризация происходит тогда, когда разрывается контакт между двумя частицами, при разрушении частиц, срыве с твердых частиц водяной пленки, вылете сплинтеров из замерзающей капли и т. д.

Анализ возможных механизмов электризации облака, т. е. накопления и разделения объемных зарядов, осуществляли многие авторы. Так, в работах [74, 113, 165] указано, что основной причиной разделения разноименно заряженных областей в облаках является выпадение крупных частиц осадков, которые заряжены одним знаком электричества относительно более мелких частиц, заряженных другим знаком.

В работе [165] указано также, что зарядение облаков происходит за счет конвекционного переноса в облако вертикальными движениями воздуха накапливающегося у земли объемного заряда. Этот заряд, проходя через облако, оседает на его каплях. В свою очередь накопившийся в облаке заряд за счет образовавшегося электрического поля обуславливает подток зарядов другого знака преимущественно к верхней части облака и создает тем самым дипольную электрическую структуру.

В опытах, проведенных с целью выяснения возможности существования конвекционного механизма, было показано, что в мощных кучевых облаках, вершина которых располагается на высотах 6—7 км, не наблюдается предсказываемого теорией электрического заряда. Величина заряда практически не зависит от толщины облака. Но как только в этом облаке — появляются крупные частицы диаметром 100 мкм, происходит усиление электрических процессов [73, 74]. Таким образом, можно полагать, что первопричиной зарядения облака является выпадение осадков, хотя на стадии $Cu\ cong. \rightarrow Cb$ движения воздуха могут оказывать заметное влияние.

В соответствии с современными представлениями о строении грозовых облаков, изложенными выше, определены физические условия возникновения молний в облаках. Во-первых, необходимо, чтобы в зоне неоднородности 4 (см. рис. 1.1) размером $10^{-3}—10^{-1}$ км³ сформировались объемные электрические заряды, достаточные для начала возникновения разрядов. Эти заряды обеспечивают существование критической напряженности электрического поля $E_{кр} \geq 10^6$ В/м, при которой начинается разряд, и энергии около 10^8 Дж. Во-вторых, в достаточно большом объеме облака, не менее $10—100$ км³, должны наблюдаться заряды 1 и 2 в таком количестве, чтобы поддерживать начавшиеся грозовые разряды. Значения напряженности электрического поля, необходимые для поддержания разряда, $E_0 \geq 10^5$ В/м.

Таким образом, для возникновения грозового разряда должна существовать зона с напряженностью $\geq E_{кр}$ (для начала

разряда), находящаяся внутри области с напряженностью $\geq E_0$ (для поддержания разряда).

Следует подчеркнуть, что электрические разряды возникают на фоне противоположно действующих в облаках двух групп процессов. Одни из них обуславливают накопление зарядов, а другие способствуют их уменьшению. Некоторые процессы первой группы вызывают накопление зарядов на отдельных частицах, а другие обеспечивают разделение зарядов разноименно заряженных частиц в значительных объемах облака и создают необходимое электрическое поле.

Вторая группа процессов препятствует росту зарядов как на отдельных частицах, так и в больших объемах облака. Электрическая проводимость воздуха около частиц и их столкновения препятствуют накоплению зарядов на частицах. Электрические токи турбулентной диффузии и конвекции препятствуют накоплению зарядов и росту электрических полей в больших объемах облака или во всем облаке.

Приближенная формула, учитывающая указанные две группы процессов, выглядит следующим образом [73, 106]:

$$\Delta E_0 = \frac{2hS}{R^3} I_3 \tau (1 - e^{-t/\tau}), \quad (1.1)$$

где ΔE_0 — изменение напряженности поля E_0 за время t ; I_3 — ток, заряжающий облако и возрастающий при увеличении интенсивности осадков; τ — время релаксации; R — расстояние до облака; h — расстояние между центрами зарядов (пропорционально толщине облака); S — площадь горизонтального сечения активной части облака.

В свою очередь

$$\tau = \frac{1}{\lambda/\epsilon + pk/h}, \quad (1.2)$$

где λ и ϵ — электропроводность и диэлектрическая проницаемость в активной части облака, k — коэффициент турбулентного перемешивания в облаке, p — численный коэффициент, приближенно равный 10^{-1} .

Следует, однако, отметить, что турбулентность и проводимость, уменьшая в среднем электрическое поле E_0 в объеме облака, могут способствовать росту поля $E_{кр}$ в отдельных зонах облака.

Совместный анализ формул (1.1) и (1.2) показывает, что увеличение τ (уменьшение турбулентности и проводимости воздуха) могут обеспечить образование $E_0 \geq 10^5$ В/м даже в облаках, дающих слабые осадки, где I_3 весьма мало. Вероятно, этим обстоятельством можно объяснить случаи возникновения грозových разрядов в так называемых теплых облаках, наблюдающихся в разных широтах.

Анализ также показывает, что для облаков с большими значениями E_0 и малыми $E_{кр}$ грозовой разряд не возникает до тех

пор, пока в облака не будет направлен какой-либо объект (ракета, самолет), с которого начинается разряд при относительно малых значениях $E_{кр}$.

1.2. Влияние гроз на отдельные отрасли народного хозяйства

Известно, что в среднем молнии поражают земную поверхность около $8 \cdot 10^6$ раз в сутки. В Америке они за год убивают 150 человек, вызывают десять тысяч лесных пожаров, ущерб от которых составляет 30 млн. долларов, и наносят вред различного рода оборудованию и имуществу на сумму более 20 млн. долларов в год. Тушение пожаров от молний обходится в 100 млн. долларов, что составляет около $1/3$ ежегодных расходов по тушению всех пожаров в США [116].

Из анализа данных, опубликованных в работе [166], следует, что в среднем по РСФСР около 60 % лесных пожаров происходит по вине местного населения, а в результате поражения молниями — несколько более 8 %. Для горных и лесостепных районов процент пожаров от молний выше, чем в других местах.

Весьма сильное влияние оказывают грозы на работу авиации. Известно, что от 60 до 70 % аварий самолетов в ВВС США, связанных с погодными условиями, происходит из-за поражения их молниями [116].

В большинстве случаев все обходится благополучно, так как молния «обтекает» внешнюю поверхность корпуса самолета. Однако при поражении самолета молниями нередко выходят из строя радиосредства, средства связи и навигации, электросиловое оборудование, а также могут разрушаться диэлектрические и даже металлические элементы конструкции самолета. Сам факт удара молнии в самолет чреват опасными воздействиями на экипаж. Следует подчеркнуть, что молнии, даже не попавшие в самолет, а прошедшие вблизи него, могут вывести из строя современные радиосредства. Например, 8 декабря 1963 г. молния зажгла бензобак реактивного лайнера «Боинг-707». Самолет разбился недалеко от Вашингтона. Все пассажиры и экипаж погибли [116]. Не всегда поражение молнией самолета приводит к катастрофе. Так, в сентябре 1964 г. в самолет «Боинг-727», круживший над чикагским аэродромом в ожидании посадки, в течение 20 мин 5 раз ударяла молния. К счастью, все закончилось благополучно и самолет приземлился.

В связи с ростом числа самолетов, внедрением более эффективного пилотажно-навигационного оборудования и посадочных систем, а также с тенденцией использовать самолеты в более широком диапазоне метеорологических условий в последние десятилетия число случаев поражения самолетов молниями возросло (табл. 1.2) [106].

Таблица 1.2

Число летных часов, приходящихся на один случай поражения самолета молнией

Годы	Западная Европа	Земной шар
До 1960	—	5000
1959—1970	2100	2900
1972	800	2700

С целью обеспечения безопасности полетов в нашей стране и за рубежом самолетам запрещается заходить в мощные кучевые,

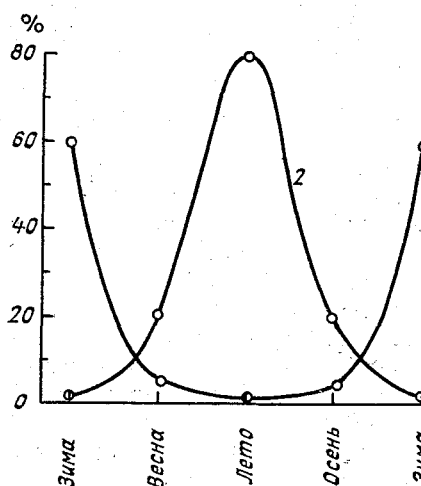


Рис. 1.2. Относительная поражаемость самолетов молниями (1) и сезонный ход повторяемости гроз (2).

кучево-дождевые и грозовые облака. Обходить грозовые очаги следует на расстояниях не ближе, чем 10—15 км [14].

На основании анализа 250 случаев поражения самолетов молниями, проведенного в работе [106], получен следующий, на первый взгляд неожиданный вывод: число поражений, приходящихся на один день с грозой (относительная поражаемость), меньше в теплое полугодие, чем в холодное (рис. 1.2).

Анализ параметров облаков, в которых наблюдались удары молний в самолеты во время полетов, выполнявшихся в холодную половину года, показывает, что почти во всех случаях облака не являлись грозовыми [106] и аэрологические условия не способствовали развитию в них грозовых процессов. Данные о вероятности поражения самолетов молниями при полете в таких облаках и в безоблачном пространстве представлены в табл. 1.3 [106].

Вероятности поражения в безоблачном пространстве были нами рассчитаны с использованием данных работы [106].

Таблица 1.3

Вероятность поражения самолетов молниями
на пути 1 км

Тип самолета	Облака Ns, St, Sc	Безоблачное пространство
Ан-24	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-11}$
Ил-18	$1,7 \cdot 10^{-5}$	$7,1 \cdot 10^{-11}$
Ту-104	$5,0 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-10}$

Анализ табл. 1.3 подтверждает важный вывод авторов указанной работы о том, что поражения самолетов молниями практически происходят лишь при полете в облаках, а также показывает, что тип самолета оказывает заметное влияние на эту вероятность. К сожалению, однако, отсутствуют данные о вероятности поражения при полетах в мощных кучевых, кучево-дождевых и грозовых облаках, т. е. в конвективных облаках, преднамеренные полеты в которых запрещены. Можно с большой уверенностью ожидать, что при полете в таких облаках значения вероятностей поражения должны быть существенно больше по сравнению с указанными в табл. 1.3, особенно в грозовых облаках.

Действительно, пользуясь экспериментальными данными работы [180], нами было определено, что вероятность поражения самолета хотя бы одной молнией при 27 полетах в грозовых облаках на пути 1 км в этих облаках составляет 0,021. Это почти в 1000 раз больше, чем при полете в облаках Ns, St, Sc. Если определять вероятность поражения как отношение числа случаев полетов с ударами молний в самолет к общему числу случаев полетов в грозовых облаках, то она составит 0,59 (16/27).

В связи со сказанным можно объяснить несоответствие между числом дней с грозой и вероятностью поражения самолетов молниями в различные сезоны года. Это связано с тем, что в холодную половину года в наших широтах преобладает слоистообразная облачность, на полеты в которой нет запрета. В этой облачности вероятность поражения самолетов молниями на пути 1 км составляет примерно 10^{-5} . Для теплого полугодия характерно развитие конвективной облачности.

Известно [14], что во время полетов экипаж самолета должен обходить мощные кучевые, кучево-дождевые и грозовые облака, т. е. вынужден часто лететь в безоблачном пространстве, в котором вероятность поражения на несколько порядков меньше (10^{-10} — 10^{-11}) по сравнению с вероятностью поражения даже при полете в слоистообразных облаках. Именно этим следует объяснить неожиданный вывод, сделанный авторами работы [106], в которой вероятность поражения самолетов молниями получилась больше в холодное полугодие, чем в теплое.

Анализ случаев поражения самолетов молниями не только в грозовых, но и в слоистообразных облаках, в которых до появления в них самолета вообще не наблюдалось молний, приводит к выводу о том, что полеты самолетов могут искусственно инициировать грозовые разряды. По-видимому, в этих облаках значение E_0 достаточно для поддержания грозового разряда, а зоны с напряженностью $E_{кр}$ либо отсутствуют, либо наблюдаются очень редко. Факт пребывания самолета в таком облаке может вызвать начало разряда, если характеристики самолета таковы, что он играет роль зоны с $E_{кр}$. Это подтверждается результатами статистической обработки 169 случаев летных происшествий в США, когда почти в 50 % случаев удары молнии произошли в облаках, в которых до появления самолета грозовые разряды не наблюдались [177].

Повторяемость случаев ударов молний в самолет зависит от высоты полета. Удары наблюдаются при полете на высотах от 0,5 до 6 км, хотя имеют место редкие случаи поражения самолетов молниями даже на стоянках. В 30 % случаев зафиксированы удары на высотах 0,5—4,0 км. Наибольшая повторяемость ударов молний отмечается на высотах 1,5—3,0 км. Для территории нашей страны средняя температура воздуха при ударах составляет $-2,3^{\circ}\text{C}$, наиболее часто повторяющаяся температура -0°C [106].

К таким же выводам пришли ученые в США [177]. Характерным является то обстоятельство, что в 82,5 % случаев ударов молний в самолет имело место обледенение его [106]. Наибольшее число ударов приходится на период апрель—август.

Удары молний повреждают лобовое стекло фонаря, прожигают отверстия в обшивке диаметром не более 0,4—0,5 см, повреждают радиоаппаратуру. Из 300 ударов молний в самолет 94 % не принесли никакого вреда членам экипажа и пассажирам, 2 % привели к ослеплению людей, 2,4 % — к поражению электрическим током, 1,6 % — вызвали ожоги и угнетенное психическое состояние у членов экипажа и пассажиров [177].

Грозовые разряды поражают не только самолеты, но и ракеты. Хорошо известен случай, имевший место во время запуска космического корабля «Аполлон-ХII», когда несмотря на ухудшившиеся метеорологические условия (низкая облачность, дождь, кучево-дождевые облака) было принято решение не откладывать запуск [173]. Через 36,5 с после старта, когда ракета с кораблем находилась на высоте примерно 2 км и скорость ее полета была 115 м/с, произошел первый удар молнии. Разряд был между облаком и землей в районе стартовой площадки и прошел через ракету с кораблем. Возникновению разряда способствовал ионизированный факел двигателей длиной в несколько сотен метров, создающий «электрический мост» между облаком и землей. В результате разряда произошло аварийное отключение топливных элементов корабля, были выведены из строя датчики расхода топлива во вспомогательных двигателях, датчики темпера-

туры на корпусе двигательного отсека, полностью прекратилось поступление телеметрической информации с борта в течение 1 с. При дальнейшем подъеме ракеты на 52 с произошел второй удар молнии, связанный с межоблачным разрядом. В результате этого удара гиropлатформа инерциальной системы наведения и навигации корабля встала на упоры [173]. Космонавты наблюдали яркую вспышку, после которой на пульте загорелось столько аварийных сигналов, что они не могли на них реагировать сразу. Через 270 с после старта космонавты ввели в строй все выключившиеся при ударе молнии системы, кроме системы наведения и навигации, нормальное функционирование которой удалось обеспечить лишь на 32 мин полета. К счастью, удары молний не повлияли на работу системы наведения ракеты-носителя. В противном случае необходимо было бы прекращать полет. Аналогичный случай произошел в 1959 г. с ракетой «Атлас», которая на участке траектории выведения попала в грозовое облако. В результате этого связь с ней была полностью потеряна [172].

Грозовые разряды также влияют на работу линий электропередачи (ЛЭП) и подстанций высокого напряжения (ПВН). Известно, что особенностью ЛЭП является большая протяженность, увеличивающая вероятность их поражения молниями. Несмотря на то что сами ПВН занимают относительно небольшую площадь, они воспринимают удары молний со значительно большей площади, так как электрически связаны с отходящими ЛЭП, по которым грозовые волны тока могут распространяться на большие расстояния.

Отечественный и зарубежный опыт показывает, что из-за гроз происходит около 50 % и более всех автоматических отключений высоковольтных линий (ВЛ) [159].

Различают два типа последствий грозовых поражений ВЛ. К первому типу относятся те, которые не приводят к устойчивым повреждениям ВЛ. Второй тип связан с повреждениями, требующими длительного отключения линий с целью ремонтных работ. Повторяемость второго типа повреждений значительно меньше.

Следует подчеркнуть, что даже кратковременное отключение ВЛ из-за грозовых разрядов, не приводящих к механическим повреждениям, вызывает нарушение нормального электроснабжения потребителей, что приводит к нанесению определенного ущерба народному хозяйству. Этот ущерб зависит от передаваемых по линии мощности и напряжения, а также от роли данной ВЛ в энергетической системе.

Данные табл. 1.4 показывают ориентировочный ущерб, обусловленный кратковременными перерывами в электроснабжении из-за грозовых отключений ВЛ [159].

Установлено, что число грозовых отключений ВЛ без специальной защиты на каждые 100 км и при суммарной продолжительности гроз 50 ч составляет не менее 10 раз в год. Путем несложных расчетов показано, что при отсутствии тросовой защиты только от линий, вводимых в течение одного года, ожидае-

Таблица 1.4

Ущерб (тыс. руб./отключение) за счет кратковременных грозových отключений ВЛ при питании районных подстанций (промышленный 50—60 %, коммунально-бытовой 10—30 %, сельскохозяйственный 5—10 %)

Передаваемая мощность, мВт	Напряжение ВЛ, кВ	Коэффициент ограничения нагрузки		
		0,1	0,5	1,0
40	110	0,17	12,8	21
150	220	0,65	48	79
400	330	1,74	123	210
800	500	3,48	256	420

мые экономические потери за счет недоотпуска электроэнергии во время сезона грозových поражений составляет около 70 млн. руб. в год [159]. Такие потери являются безусловно недопустимыми, и поэтому применяются специальные меры грозозащиты ВЛ (тросовые защиты в сочетании с низким сопротивлением заземления опор). Однако при применении грозозащитных средств существенно возрастает стоимость ВЛ, так как необходимо большее количество дефицитного троса и металла для заземления. Кроме того, следует увеличивать высоту опор. В связи с этим для проектировщиков весьма важно иметь информацию о грозовой деятельности, которую можно использовать при выборе объема грозозащитных мероприятий для ВЛ и подстанций. Такая информация должна включать: число молниевых разрядов, проходящихся на 1 км² земной поверхности за 1 ч с грозой (удельная поражаемость молниями); интенсивность грозовой деятельности в районе ЛЭП и подстанций (число дней и часов с грозой за год); распределение амплитуд и крутизны фронтов токов молниевых разрядов [159].¹ Указанные характеристики представляют собой основу при выборе того или иного объема работ по грозозащите и, следовательно, определяют расходы на грозозащитные устройства.

Известно, что более половины общего объема горной продукции производится путем открытой разработки полезных ископаемых. Наблюдается постоянное увеличение площадей, охватываемых такими способами разработки. Значительная часть открытых разработок производится с применением взрывных работ. Однако наземные разряды молний оказывают многофакторное воздействие на электрические сети открытых разработок и тем самым существенно препятствуют внедрению прогрессивных решений в области взрывной технологии. Это подтверждается многими случаями взрывов, инициированных грозowymi разрядами за рубежом и в нашей стране [159].

¹ В настоящее время принимается, что удельная поражаемость равна 0,06 удара на площади 1 км² за 1 ч с грозой.

С целью изучения влияния гроз на взрывные сети в СССР были проведены специальные исследования с использованием грозорегистрационной станции Перевал в Восточной Сибири [115]. В результате были получены следующие важные выводы.

1. Наводки в электровзрывной сети в основном вызываются индукционной компонентой поля излучения грозового разряда. При этом амплитуда наводимого тока приблизительно изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния до канала молнии.

2. В случаях, когда расстояние до грозовых разрядов менее 6 км, а площадь электровзрывной сети примерно 100 м^2 , среднее значение наводимого тока превышает максимально безопасный ток нормальных электродетонаторов, равный 180 мА. Установлено, что наводки в основном вызываются ступенчатыми лидерами [115].

1.3. Вероятность появления гроз

В настоящее время выполнен ряд работ, в которых исследуются климатологические характеристики гроз: число дней

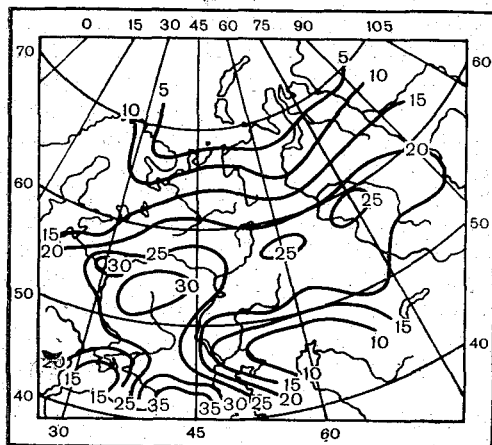


Рис. 1.3. Среднегодовое число дней с грозой на ЕТС.

с грозой, продолжительность гроз и число грозовых разрядов [85, 101, 160]. Наиболее полно изучена первая характеристика, поскольку по визуальным данным наземной сети метеорологических наблюдений она определяется наиболее точно.

Обычно многолетнее среднее число дней с грозой в пределах больших территорий распределяется неравномерно [78, 84, 85, 160] (рис. 1.3). По данным Е. П. Архиповой, в пределах ЕТС наибольшее число дней с грозой наблюдается на Кавказе. Например, в районах городов Сухуми, Еревана, Грозного наблюдается в среднем до 50 дней с грозой. Значительно реже грозы наблюдаются в северных районах нашей страны. Здесь среднее число

дней с грозой не превышает 5—10. Сезонный ход повторяемости гроз в пределах нашей страны достаточно хорошо выражен. Наиболее вероятны грозы летом (июнь—август). Относительно часто грозы наблюдаются в мае. В связи с этим для указанных месяцев следует вычислять не только среднее число дней с грозой, но и вероятность числа дней с грозой. В некоторые годы над отдельными пунктами грозы вообще отсутствуют или возникают очень редко. В другие же годы число дней с грозой достаточно велико и достигает в июне—июле 19. В связи с этим среднегодовое число дней с грозой не является достаточно полной характеристикой географического распределения гроз (табл. 1.5).

Таблица 1.5

Число дней с грозой различной обеспеченности в июне (числитель) и июле (знаменатель). По А. Н. Лебедеву

Пункт	Максимум	Обеспеченность, %											Минимум
		5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	95	
Архангельск	9/11	8/9	6/7	6/6	4/5	3/4	2/4	2/3	1/2	1/2	0/0	0/0	0/0
Москва	13/16	11/13	10/11	9/10	7/9	7/8	6/7	5/7	4/6	3/5	2/4	1/3	1/3
Киев	14/16	13/11	10/9	8/8	8/8	7/7	7/6	6/6	5/5	4/5	4/4	2/2	0/0
Одесса	15/14	14/11	12/10	11/9	9/8	8/6	7/5	6/5	5/4	4/3	3/2	3/1	2/1
Чкалов	13/13	12/11	10/10	8/9	7/8	6/7	6/7	5/5	4/4	3/3	2/2	1/1	0/0
Симферополь	14/16	13/15	10/14	8/9	8/8	7/7	6/6	5/5	4/5	4/3	1/2	1/1	1/1

Из анализа этой таблицы видно, что в период максимума грозовой деятельности в северных районах ЕТС на метеостанциях отмечается до 8—10 дней с грозой в месяц, в центральных и южных районах до 13—14 дней в месяц. Такие случаи наблюдаются примерно 1 раз за двадцатилетний период. В годы с исключительной грозовой деятельностью, отмечавшейся 1 раз за 50—70 лет, число дней с грозой достигает 16—19 в месяц.

Приведенные данные относятся к пункту, ограниченному радиусом действия визуально-слухового метода наблюдений, применяемого на метеостанциях. Если увеличить размеры площадки наблюдений, то вероятность числа дней с грозой существенно увеличивается. А. Н. Лебедев на материалах наблюдений 120 метеостанций, расположенных в районе Приволжской возвышенности, Средней и Нижней Волги, за июнь—август 1946—1950 гг. показал, что на площади радиусом 100 км число дней с грозой в 2—3 раза больше, чем в пункте наблюдений, а на площади радиусом 200 км — в 3—4 раза больше.

В работе [68] приведен расчетный способ определения вероятности появления грозы не менее 1 раза в течение выбранного промежутка времени для пункта или ограниченной площади с помощью уравнения Пуассона, записанного в следующем виде:

$$P = 1 - \exp \left[-\frac{2}{3} \left(\frac{\bar{x}}{k} \frac{r}{r_0} \right) \right], \quad (1.3)$$

где $\bar{x}$ — среднее многолетнее число дней с грозой за месяц или сезон, r — радиус площади, k — число дней в месяце, r_0 — радиус визуально-слухового метода обнаружения гроз (обычно $r_0 \approx 20$ км).

Для проверки указанного способа значения P , рассчитанные по формуле (1.3), сравнивались со значениями P' , определенными по данным наблюдений в районе Калинина (1958—1962 гг.) и Ленинграда (1958—1960 гг.). Для первого пункта всего было 460 дней наблюдений, а для второго 276 дней. Вероятность определялась как отношение $P' = \frac{\bar{x}'}{k}$, где $\bar{x}'$ — среднее для данного месяца число дней с грозой за n' лет наблюдений в пункте или на площади радиусом 50, 100, 150 км. Результаты сравнения P и P' оказались вполне удовлетворительными.

В работе [101] анализируются и уточняются возможности аналитической аппроксимации зависимости изменения числа дней с грозой от изменения площади охватываемого района.

Анализ суточного хода гроз показывает их преимущественное развитие в полуденные и послеполуденные часы.

Поскольку грозовая активность в различных районах земного шара зависит не только от местных физико-географических особенностей, но и от характера крупномасштабных атмосферных процессов, в работе [78] была изучена зависимость грозовой активности от форм атмосферной циркуляции, установленных в классификациях Вангенгейма и Гирса [35, 61]. В связи с определенными успехами, достигнутыми в предсказании различных форм атмосферной циркуляции, результаты работы [78] могут иметь существенное значение при прогнозе аномалий грозовой активности в пределах больших географических районов.

В связи с практической необходимостью, кроме числа дней с грозой, изучается продолжительность гроз (Π) и число разрядов, приходящихся на определенную площадь, обычно на 100 км^2 [85, 160]. Поскольку материал сетевых наблюдений за грозами включал главным образом визуальные данные, ряд авторов для климатологических обобщений рекомендует использовать эмпирические зависимости между среднегодовым числом дней с грозой T и продолжительностью гроз Π , между числом разрядов N и T , а также между числом разрядов и продолжительностью гроз [85, 160].

В результате обработки наблюдений за грозами с 1957 по 1965 г. для территории нашей страны были получены следующие формулы, приведенные в работе [74]:

$$\bar{P} = 0,76 \bar{T}^{1,3}; \quad (1.4)$$

$$\bar{P} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i, \quad \bar{T} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i, \quad (1.5)$$

где n — число станций.

Нелинейный характер установленной зависимости (1.4) объясняется тем, что в районах с большим количеством дней с грозой наблюдается более значительная продолжительность гроз, а также более высокая частота появления нескольких гроз в течение одних суток [85].

Зависимость числа разрядов от числа дней с грозой для равнинной части ЕТС выглядит следующим образом: $N_1 = 3,6 \bar{T}^{1/3}$, где N_1 — число разрядов на землю на площадь 100 км²; $N_2 = 10 \bar{T}^{1/3}$, где N_2 — суммарное число разрядов (число разрядов на землю и число внутриоблачных разрядов), приходящееся также на 100 км². Сравнение этих формул с формулой (1.4) дает основание считать, что между числом разрядов и продолжительностью гроз имеется линейная зависимость вида $N = c \bar{P}$, где $c = 5$ для N_1 и $c \approx 10$ для N_2 .

Анализ некоторых особенностей связи между тремя указанными параметрами грозовой активности, проведенный в работе [101], показал перспективность дальнейшего повышения точности расчетных оценок по сравнению с усредненными экспериментальными зависимостями.

Глава 2

Радиолокационное обнаружение грозовых облаков

2.1. Особенности строения грозового облака как радиолокационной цели

В отличие от других форм облаков при радиолокационном обнаружении и исследовании грозовых облаков на вход приемной антенны РЛС поступают эхо-сигналы, обусловленные рассеянием радиоволн гидрометеорами, объемными зарядами, ионизированными каналами при возникновении коронных, кистевых, лидерных и главных разрядов. Кроме того, на вход антенны поступает радиоизлучение указанных разрядов.

Таким образом, основное уравнение радиолокации для грозовых облаков необходимо записать в таком виде:

$$\bar{P}_{\text{пр}} = m_0 \bar{P}_0 + m_p \bar{P}_p + m_{\text{и}} \bar{P}_{\text{и}}, \quad (2.1)$$

где $\bar{P}_0$ — мощность эхо-сигналов от гидрометеоров; $\bar{P}_p$ — мощность эхо-сигналов от ионизированных каналов разрядов; $\bar{P}_{\text{и}}$ — мощность сигнала, вызванного радиоизлучением ионизированных каналов разрядов; m_0 , m_p , $m_{\text{и}}$ — соответствующие коэффициенты различимости указанных сигналов.

При анализе соотношения (2.1) важным является учет временных характеристик существования эхо-сигналов, входящих в его правую часть. Как известно, различают три стадии в жизни отдельной конвективной ячейки. Первая стадия характеризуется развивающимися кучевыми и мощными кучевыми облаками, когда восходящие движения воздуха наблюдаются во всей ячейке. Вторая стадия — период зрелости — характеризуется наличием как восходящих, так и нисходящих движений, выпадением осадков и возникновением атмосферных разрядов (АР). В третьей стадии происходит распад облака вследствие того, что в нем преобладают нисходящие движения, уменьшается интенсивность осадков и электрической активности.

Продолжительность первой стадии, начиная с момента обнаружения, примерно 10—15 мин, второй — 15—30 мин, третьей — более 30 мин. Таким образом, по данным МРЛ, время продолжительности жизни отдельной ячейки и, следовательно, время непрерывного существования эхо-сигналов $\bar{P}_0$ составляет несколько десятков минут. Если внутримассовые кучево-дождевые облака состоят из нескольких ячеек, то продолжительность существования эхо-сигналов $\bar{P}_0$ составляет 1—2,5 ч, а для фронтальных Сб это время еще больше (3—6 ч).

Как правило, для конвективных ячеек, находящихся в первой стадии (облака Си, Си cong.), характерным является отсутствие АР. Вследствие этого второе и третье слагаемые соотношения (2.1) равны нулю и $\bar{P}_{\text{пр}} = m_0 \bar{P}_0$. Для двух других стадий эти слагаемые часто не равны нулю, поскольку в объемах кучево-дождевых облаков, зон осадков или между этими облаками периодически происходят атмосферные разряды, число которых колеблется от одного разряда за 5—10 мин до нескольких десятков разрядов за этот же интервал времени. Причем время существования сигналов $\bar{P}_{\text{пр}}$ и $\bar{P}_{\text{и}}$ от каждого разряда, как правило, не превышает 1 с.

2.2. Ослабление радиоволн в облаках и осадках и их отражающая способность

При распространении сантиметровых и особенно миллиметровых радиоволн в земной атмосфере существенное влияние может оказывать молекулярное поглощение кислородом и водяным

паром. При радиолокационных исследованиях грозных облаков чаще всего используются РЛС, работающие на длинах волн λ , равных 3, 10, 30 и 200 см. Для кучевых и мощных кучевых облаков, расположенных на небольших расстояниях, целесообразно использовать $\lambda = 0,8$ см.

Рассматривая поглощение указанных длин волн газами атмосферы, можно видеть, что оно для $\lambda > 10$ см весьма мало и им практически можно пренебречь [20].

Для длин волн 0,8, 3 и 10 см ослабление в газах атмосферы у поверхности земли при нормальных атмосферных условиях соответственно равно 0,06, 0,011 и 0,006 дБ/км [136].

Расчет поглощения в газах при распространении радиоволн по наклонным трассам в диапазоне углов места $5^\circ < \delta < 90^\circ$ производится с помощью выражения, учитывающего сферичность слоев атмосферы,

$$\Gamma_a = \alpha_k(\lambda, h) l_1 + \alpha_{в.п} l_2, \quad (2.2)$$

где α_k — удельный коэффициент поглощения кислородом у поверхности земли вне областей резонанса (дБ/км), $\alpha_{в.п}$ — удельный коэффициент поглощения водяным паром вне этих областей (дБ/км), l_1 и l_2 — эффективные длины путей (ЭДП), проходимые волной соответственно в сухой атмосфере и водяном паре, приведенные к приземным условиям.

Ослабление в прямом и обратном направлениях для трассы 19 км, ориентированной вертикально, в случае стандартной атмосферы на $\lambda = 0,8$ см равно 0,73 дБ, для $\lambda = 3,2$ см — 0,19 дБ и для $\lambda = 10$ см — 0,11 дБ [136]. На высотах более 19 км атмосферным ослаблением пренебрегают.

В тех случаях, когда на трассе распространения радиоволн расположены облака и осадки, к молекулярному ослаблению в газах атмосферы добавляется ослабление за счет поглощения энергии частицами указанных атмосферных образований.

Исходные формулы для расчета интегрального (Γ дБ) и удельного (α дБ/км) коэффициентов ослабления обычно записывают в следующем виде:

$$\Gamma = \int_0^L \alpha(R) dR \quad (2.3)$$

и

$$\alpha = 0,434N \int_0^{r_{\max}} n(r) \sigma_t(r, \epsilon, \lambda) dr. \quad (2.4)$$

Здесь L — расстояние до объекта (км), N — общая концентрация частиц облаков и осадков в 1 м^3 , $n(r)$ — плотность их распределения по размерам, $\sigma_t(r, \epsilon, \lambda)$ — эффективная площадь ослабления отдельной сферической частицы радиусом r с диэлектрической проницаемостью ϵ на длине волны λ .

Для облаков без осадков показатель ослабления $\alpha_{\text{обл}}$ (дБ/км) может быть выражен формулами:

$$\alpha_{\text{обл}} = \frac{0,438}{\lambda^2} W f(t) \text{ или } \alpha_{\text{обл}} = \frac{0,486}{\lambda^2 + 0,0269} f(t), \quad (2.5)$$

где W — водность облаков (г/м^3), λ — длина волны РЛС (см), $f(t)$ — функция, учитывающая влияние температуры. При $t = 18^\circ\text{C}$ значение $f(t) = 1$. С понижением температуры эта функция заметно увеличивается. Например, при $t = -8^\circ\text{C}$ для $\lambda = 3,2$ см значение $f(t) \approx 2,1$.

Расчеты, выполненные по указанным формулам, показывают, что на $\lambda = 0,8$ см это ослабление заметно для стадии *Сu cong.* и особенно существенно для *Сb*. В этих облаках оно становится соизмеримым с ослаблением в умеренном и сильном дожде для λ , равных 0,8—10 см. Для радиоволн с $\lambda > 10$ см ослаблением за счет мелких частиц всех форм конвективных облаков можно пренебречь.

В верхних частях *Сb* наблюдаются ледяные кристаллы и замерзшие мелкие капли, в которых ослабление даже на $\lambda = 0,8$ см мало. Почти во всем объеме *Сb* находятся частицы осадков в виде снежинок, крупы, градин или дождевых капель. Ослабление дождями теоретически хорошо изучено [12, 120]. На длинах волн $\lambda \geq 10$ см это ослабление весьма мало даже при катастрофических дождях с интенсивностью 100—150 мм/ч. Приблизительно это ослабление можно рассчитать с помощью полуэмпирической формулы

$$\alpha_d = \beta I^\gamma, \quad (2.6)$$

где α_d — показатель ослабления в дождях (дБ/км), I — интенсивность осадков (мм/ч).

На $\lambda = 0,8$ см значение $\beta = 0,25$ и $\gamma = 1,0$; на $\lambda = 3$ см значение $\beta = 0,0074$ и $\gamma = 1,31$ и на $\lambda = 10$ см значение $\beta = 3 \cdot 10^{-4}$ и $\gamma = 1,0$.

Указанные в формуле (2.6) параметры β и γ были получены в работе [12] на основе результатов вычисления функции $\alpha_i(r, \varepsilon, \lambda)$ с использованием экспериментального распределения дождевых капель по размерам, полученного Маршаллом—Пальмером. Эти параметры в основном зависят от λ и слабо от температуры капель.

Расчет ослабления радиоволн, распространяющихся в градовых или снеговых зонах *Сb*, затрудняется тем, что форма градин и снежинок отличается от сферической. В связи с этим обычно расчет величин α в граде производят, полагая, что форма градин является сферической. Однако и в этом случае сложный осциллирующий характер зависимости функции $\alpha_i(r, \varepsilon, \lambda)$ от влияющих параметров не позволяет пока получить простые аналитические выражения типа (2.6), найденные для дождей, с тем, чтобы определять ослабление в граде с использованием его интегральной микроструктурной характеристики — водности, либо ин-

тенсивности градовых осадков. Поэтому расчет α для града производится путем численного интегрирования общего выражения (2.4) в предположении, что спектр градин по размерам подчиняется гамма-распределению [4]:

$$n(r) = \left(\frac{\mu}{r_m}\right)^{\mu+1} \frac{r^\mu}{\Gamma(\mu+1)} \exp\left(-\frac{\mu}{r_m} r\right), \quad (2.7)$$

где r — радиус градин; μ — параметр распределения; r_m — модальный радиус градин; $\Gamma(\mu+1)$ — гамма-функция аргумента $(\mu+1)$, численные значения которого затабулированы.

При конкретных расчетах α_t , выполненных Б. М. Воробьевым по формуле (2.4), значения модального радиуса находились в диапазоне 0,5—7,5 мм, параметр μ принимался равным 2. Расчеты выполнялись для спектров однородного, полностью обводненного либо сухого града. Использовались значения σ_t отдельных сферических градин, рассчитанные по точным формулам Ми [168]. Предполагалось, что обводненные градины рассеивают и ослабляют сигналы как равновеликие им по размеру водяные сферы [4].

Результаты расчетов при единичной концентрации градин N представлены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Значения удельного коэффициента ослабления α_t в граде

r_m мм	λ см	α_t дБ/км	
		обводненный град	сухой град
0,75	0,86	0,060	0,042
	3,2	0,016	$7,34 \cdot 10^{-4}$
	10	$6,5 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-5}$
2,51	0,86	0,686	0,786
	3,2	0,634	0,362
	10	0,196	$7,17 \cdot 10^{-3}$
3,76	0,86	1,52	1,58
	3,2	1,50	1,54
	10	0,73	0,069
5,01	0,86	2,58	2,68
	3,2	3,16	3,32
	10	1,74	0,354
7,52	0,86	5,47	5,60
	3,2	5,78	7,34
	10	5,17	2,27

Анализ таблицы показывает, что ослабление рассматриваемых радиоволн в крупном граде ($r_m > 3$ мм) сравнимо с ослаблением в сильных и очень сильных дождях. Для мелкого града ($r_m < 3$ мм) наблюдается хорошо выраженная зависимость коэффициента α от r_m .

Мелкий сухой град заметно меньше ослабляет радиоволны, чем такой же обводненный град. С увеличением размеров градин

уменьшается зависимость коэффициента α от фазового состояния поверхности градин.

Анализ экспериментальных работ по изучению ослабления радиоволн в атмосферных образованиях показывает, что, если ослабление в дождях более или менее изучено и расчетные данные, в общем, согласуются с опытными, то для снегопадов, градовых зон и облаков данные весьма малочисленны и поэтому в определенной степени являются ориентировочными.

По измерениям автора, значения ослабления на $\lambda = 0,8$ см в четырех мокрых снегопадах составили 0,24 — 1,81 дБ/км. Среднее значение составило 0,86 дБ/км [142].

В работе [184] приведены значения измерений ослабления на частотах 4,8, 8,5 и 15,3 ГГц ($\lambda_1 = 7,5$ см, $\lambda_2 = 3,7$ см, $\lambda_3 = 2$ см) в нескольких дождях, мокрых снегопадах и в зонах града. Оказалось, что для дождей расчетные и измеренные значения ослабления хорошо совпадают. При этом значения ослабления на $\lambda = 2$ см находились в пределах от 1—2 до 15—16 дБ.

Однако для сильно отражающих градовых зон в Сб и для слоев мокрого снега (яркая линия) измеренные значения ослабления неожиданно оказались в несколько раз меньше расчетных.

Следует отметить, что расчетные значения ослабления $\alpha_d(R)$ были получены по результатам радиолокационных измерений мгновенных значений интенсивности дождей с помощью соотношений (2.1), (2.12) и (2.6).

Указанные в работе [184] результаты позволяют также считать достаточно надежными статистические данные об ослаблении радиоволн в дождях в радиусе до 100 км, полученные после обработки радиолокационных измерений интенсивности и геометрических характеристик дождей на трассе длиной 50 км в районе Ленинграда [150]. Обработке подверглись данные МРЛ-2 Информационного центра погоды в количестве 3729 случаев, относящихся к периоду май—сентябрь 1973 и 1974 гг. По результатам обработки составлена табл. 2.2.

Из анализа данных табл. 2.2 следует, что для района Ленинграда на рассматриваемой трассе ослабление в дождях радио-

Таблица 2.2

Повторяемость (%) множителя ослабления радиоволн (k) на трассе длиной 50 км. Ленинград

λ см	k				$\bar{k}$
	0,01—0,05	> 0,05—0,1	> 0,1—0,5	> 0,5—1,0	
0,8	3,74	34,96	15,40	45,80	0,495
2,0	3,06	20,04	9,80	67,10	0,674
3,0	1,60	7,50	9,10	81,80	0,800
6,0	2,27	2,94	3,90	90,81	0,893
10,0	0,00	0,00	0,20	99,80	0,981

волн длиной 0,8, 2, 3, 6 и 10 см не превышает 0,01 соответственно в 38,7, 20,1, 9,1, 5,21 и 0 % случаев.

В то же время для рассматриваемых длин волн повторяемость относительно малых ослаблений (менее 3 дБ) возрастает от 45,8 % для $\lambda = 0,8$ см до 99,8 % для $\lambda = 10$ см.

Важно отметить, что радиолокационные данные сети МРЛ позволяют получить статистические характеристики ослабления и для других районов СССР.

Теперь, пользуясь рассмотренными выше данными об ослаблении при распространении радиоволн в различных условиях, представляется возможным оценить общее ослабление с помощью известного соотношения

$$k = 10^{-0,2 \left[\int_0^R \alpha_r(R) dR + \int_{R_1}^{R_2} \alpha_{обл}(R) dR + \int_{R_3}^{R_4} \alpha_d(R) dR \right]} \quad (2.8)$$

Первое слагаемое в показателе степени учитывает ослабление газами атмосферы, второе — в облаках без осадков, а третье — в осадках.

Полагая, что ослабление радиоволн в облаках происходит на интервале расстояний, равных $0,5R$, а в дождях — $0,25R$, были рассчитаны значения k при распространении радиоволн $\lambda = 3$ см и $\lambda = 10$ см в различных метеорологических условиях. Этим условиям соответствовали дожди с интенсивностью I , равной 1, 5, 10 и 50 мм/ч, и водность облаков $W = 2$ г/м³.

Из рис. 2.1 видно, насколько существенным может быть ослабление в конвективных облаках с сильными и очень сильными дождями на трассе для $\lambda = 3$ см. Действительно, даже для $R = 20$ км (ширина зоны дождей 5 км) множитель k , учитывающий ослабление в дождях с $I = 10$ мм/ч и $I = 50$ мм/ч, соответственно равен 0,28 и $2,8 \cdot 10^{-3}$. При больших геометрических размерах зон указанных дождей ослабление волны $\lambda = 3$ см становится таким большим, что практически может иметь место экранировка дальних дождей ближними к РЛС дождями. Совсем другое дело, если $\lambda = 10$ см. В этом случае значение ослабления даже при $I = 50$ мм/ч и ширине зоны дождя 25 км ($R = 100$ км) не бывает большим ($k = 0,69$).

2.3. Эффективная площадь рассеяния грозовых облаков

При некогерентном рассеянии электромагнитных волн гидрометеорами в грозовых облаках эффективная площадь рассеяния (ЭПР) единицы их объема, как известно, выражается соотношением

$$\sigma = \int_0^\infty N(D) \sigma_i(D, \lambda) dD, \quad (2.9)$$

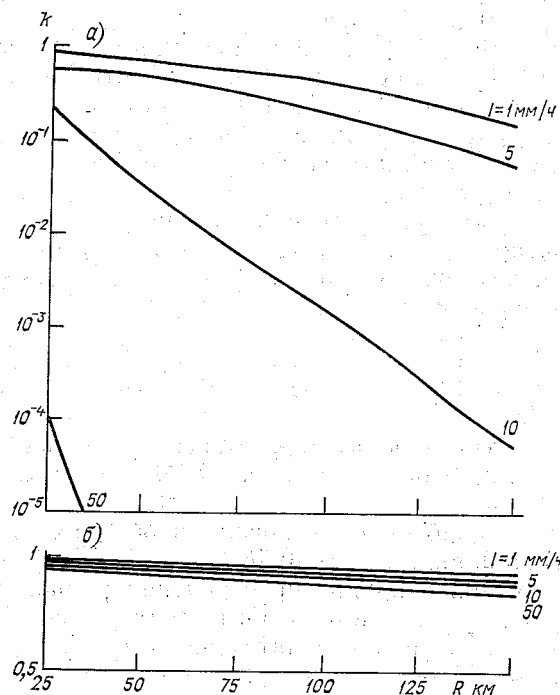


Рис. 2.1. Ослабление радиоволн $\lambda=3$ см (а) и $\lambda=10$ см (б) в различных дождях, выпадающих на трассах.

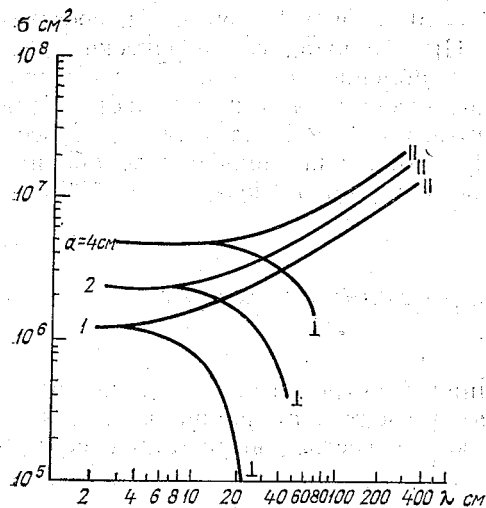


Рис. 2.2. ЭПР ионизированных каналов молний в зависимости от их радиуса, длины волны РЛС и вида поляризации (сверхплотная плазма).

где D — диаметр гидрометеора, N — число гидрометеоров в единице объема, σ_i — ЭПР отдельного гидрометеора.

Полагая гидрометеоры в виде сферических частиц, значение их ЭПР можно рассчитать по известной формуле Ми:

$$\sigma_i(D, \lambda) = \frac{\lambda^2}{16\pi^2} \left| \sum_{n=1}^{n=\infty} (a_n - b_n) \right|^2, \quad (2.9a)$$

где a_n и b_n являются амплитудами парциальных волн и обычно определяются по методике, развитой в работе [168].

В тех случаях, когда длина волны РЛС значительно больше облачных частиц и гидрометеоров, расчет σ_i производят по известной формуле Рэлея:

$$\sigma_i = \frac{\pi^5 D^6}{\lambda^4} \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2, \quad (2.10)$$

где m — комплексный показатель преломления вещества, из которого состоят частицы.

В рассматриваемых диапазонах волн для водяных частиц $\left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2 \approx 0,9$, а для ледяных — 0,2.

С учетом формул (2.9) и (2.10) можно записать следующее выражение для ЭПР единицы объема:

$$\sigma = \sum_i \sigma_i = \pi^5 \mu \frac{\sum_i N_i D_i^6}{\lambda^4} \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2, \quad (2.11)$$

где μ — коэффициент, учитывающий отклонение точного рассеяния от рэлеевского.

Для дециметрового и метрового диапазонов волн этот коэффициент можно считать равным единице.

Как известно, радиолокационная отражаемость $Z = \sum N D^6$ связана с интенсивностью осадков I следующим соотношением:

$$Z = A I^b. \quad (2.12)$$

Для умеренных широт $A = 200$, $b = 1,6$. Тогда формулу (2.11) с учетом соотношения (2.12) можно записать в виде

$$\sigma = 200 \frac{\pi^5 I^{1,6}}{\lambda^4} \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2. \quad (2.13)$$

Результаты расчетов ЭПР различных дождей по формулам (2.9a) и (2.13) приведены в табл. 2.3.

В тех случаях, когда в зонах грозовых облаков находится град, диаметр частиц которого может быть соизмерим с длиной волны МРЛ, расчет ЭПР следует проводить по точной формуле (2.9a).

В работе [120] проведены расчеты ЭПР града, состоящего только из сухих или обводненных градин, а также из первых и вторых градин, находящихся в различных соотношениях по отношению друг к другу (табл. 2.4).

Таблица 2.3

ЭПР дождей σ (м^{-1}) из конвективных облаков

λ см	I мм/ч					
	0,25	2,5	10	50	100	150
3	10^{-8}	$3,9 \cdot 10^{-7}$	$3,6 \cdot 10^{-6}$	$4,2 \cdot 10^{-5}$	$9,6 \cdot 10^{-5}$	—
10	$6,3 \cdot 10^{-11}$	$2,4 \cdot 10^{-9}$	$2,2 \cdot 10^{-8}$	$2,7 \cdot 10^{-7}$	$8 \cdot 10^{-7}$	$1,6 \cdot 10^{-6}$
30	$6,0 \cdot 10^{-13}$	$2,7 \cdot 10^{-11}$	$2,4 \cdot 10^{-10}$	$3,0 \cdot 10^{-9}$	$9,0 \cdot 10^{-9}$	$1,8 \cdot 10^{-8}$
200	$3,3 \cdot 10^{-16}$	$1,5 \cdot 10^{-14}$	$1,3 \cdot 10^{-13}$	$1,6 \cdot 10^{-12}$	$4,9 \cdot 10^{-12}$	$9,8 \cdot 10^{-11}$

Таблица 2.4

ЭПР градовых зон σ (м^{-1}) в грозовых облаках

r_m мм	λ см	σ обводненного града	σ сухого града
0,75	3,2	$1,68 \cdot 10^{-6}$	$1,6 \cdot 10^{-7}$
	10	$1,17 \cdot 10^{-8}$	$2,2 \cdot 10^{-9}$
2,51	3,2	$8,3 \cdot 10^{-5}$	$2,2 \cdot 10^{-5}$
	10	$2,7 \cdot 10^{-5}$	$2,1 \cdot 10^{-6}$
3,76	3,2	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$
	10	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-5}$
5,01	3,2	$2,1 \cdot 10^{-4}$	$5,8 \cdot 10^{-4}$
	10	$4 \cdot 10^{-4}$	$4,8 \cdot 10^{-5}$
7,52	3,2	$3,95 \cdot 10^{-4}$	$3,04 \cdot 10^{-3}$
	10	$8,99 \cdot 10^{-4}$	$1,94 \cdot 10^{-4}$

Полагая распределение градин по размерам

D см	1	3	5	7
N м^{-3}	2	$3 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-4}$	10^{-5}

типичным, получим следующие значения ЭПР града σ в зависимости от λ :

λ см	3	10	30	200
σ м^{-1}	$6,7 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-7}$	$1,3 \cdot 10^{-10}$

Из анализа приведенных данных следует, что ЭПР грозовых облаков, из которых выпадает град, почти на 2—3 порядка больше, чем ЭПР очень сильных дождей на всех рассматриваемых длинах волн.

Источниками радиоэха в грозовых облаках могут служить объемные заряды. В работе [75] указывается, что плотность зарядов в этих облаках $Q = 10^{-10} \div 10^{-7}$ Кл/м³ и даже более. Чаще всего геометрический размер ионизированных неоднородностей в кучево-дождевых облаках равен 200 м, но иногда и 1,5 км.

Если предположить, что заряд электрона равен заряду иона, то количество электронов (ионов) в 1 м^3 будет $N_e = \frac{Q}{e}$. Здесь e — заряд электрона, равный $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл. При указанных плотностях зарядов величина $N_e \approx 10^9 \div 10^{12} \text{ м}^{-3}$.

Величина ЭПР одного электрона выражается следующим известным соотношением:

$$\sigma_e = 4\pi \cdot 10^{-14} \left(\frac{e^4}{m_e^2} \right) = 10^{-28} \text{ м}^2, \quad (2.14)$$

где m_e — масса электрона, равная $9,1 \cdot 10^{-31}$ кг.

Считая рассеяние некогерентным, можно определить ЭПР единицы объема ионизированных областей в облаках как $\sigma = \sigma_e N_e$. Тогда для грозowych облаков при указанных условиях значение $\sigma = 10^{-19} \div 10^{-16} \text{ м}^{-1}$. В общем, это существенно меньше, чем ЭПР дождевых и градовых зон.

В грозowych облаках могут наблюдаться коронные разряды между гидрометеорами, характеризующиеся большими значениями электронной и ионной концентрации [170]. В пределах объема коронного разряда, согласно работе [170], значение ионной концентрации может достигать 10^{11} м^{-3} . Число таких коронных разрядов за счет сближившихся частиц осадков составляет при сильных дождях около $10 \text{ м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$. Все это дает основание считать среднюю концентрацию ионов порядка $10^{14} \text{—} 10^{16} \text{ м}^{-3}$. При таких условиях значение $\sigma \approx 10^{-14} \div 10^{-12} \text{ м}^{-1}$, что соизмеримо со значением ЭПР очень сильных дождей с $I \geq 50 \text{ мм/ч}$ на $\lambda = 200 \text{ см}$.

2.4. Характеристики канала линейной молнии и ее ЭПР

Как известно (см. п. 1.1), в грозowych облаках наблюдаются области, несущие преобладающий объемный заряд того или иного знака. Средний диаметр этих областей около 200 м или более. Внутри грозowych облаков вследствие перемещения областей возникают такие комбинации их взаимного расположения, при которых напряженность электрического поля становится достаточной для электрического пробоя [74].

Наряду с мелкомасштабными электрическими неоднородностями в верхней части облака преимущественно сосредоточена область положительных зарядов (P -область). В нижней части облаков преимущественно сосредоточена область отрицательных зарядов (N -область). Здесь же находится зона небольшого положительного заряда (P -зона).

Рассмотрим процессы развития линейной молнии и ее характеристики. Этот вид молнии наблюдается в виде электрического разряда между облаками или между облаком и землей. Первый вид разряда встречается в среднем в 10 раз чаще, чем второй.

По современным представлениям первым этапом развития сильного разряда является образование ступенчатого лидера, который начинается с момента образования местного коронного разряда диаметром в несколько метров между *P*-областью и *N*-областью облака. В центральной части коронного разряда возникает дуговой канал, диаметр которого равен нескольким сантиметрам. Лидер имеет длину ступени 50—60 м, головная часть его движется не равномерно, а толчками. Обычная скорость распространения ступенчатого лидера в среднем составляет $1,5 \cdot 10^5$ м/с.

Важным параметром, определяющим отражающую способность ионизированных каналов, является концентрация свободных электронов. Расчеты и эксперименты, выполненные различными авторами [79, 109, 165], показывают, что средняя концентрация свободных электронов в канале ступенчатого лидера равна 10^{15} — 10^{17} м⁻³, а в центральной части достигает 10^{24} м⁻³.

Как только лидер достигает земли, в подготовленном им канале высокой проводимости развивается возвратный (главный) разряд. Скорость его распространения в среднем составляет $3,5 \times 10^7$ м/с, а длительность 50—100 мкс [165]. По этому каналу протекает очень большой ток (15—200 кА).

Как правило, грозовой разряд (вспышка) состоит не из одного импульса тока (повторного разряда), а из нескольких (в среднем 3—5) [109, 165]. Наблюдались молниевые разряды, состоящие из 26 импульсов тока.

Всем последующим разрядам предшествуют стреловидные лидеры, подготавливающие канал для них. Средний интервал времени между импульсами тока (разрядами) составляет 0,04—0,08 с, а средняя продолжительность разряда 0,2—0,5 с. За время существования больших токов с одного главного канала разряжается в среднем 2—3 Кл электричества. Выделяющееся в канале джоулево тепло приводит к повышению в нем давления и температуры, которая достигает 22 000—28 000 К [79, 109, 165]. Диаметр ионизированных каналов главных разрядов равен нескольким сантиметрам.

Диаметры главных разрядов и лидеров не остаются постоянными с течением времени. В работе [109] на основании лабораторных опытов была найдена зависимость диаметра искрового разряда от времени, которую можно аппроксимировать следующей формулой:

$$d = d_0(1 + e^{-kt}), \quad (2.15)$$

где $d_0 = 0,3$ см.

Из анализа формулы (2.15) следует, что d возрастает сначала быстро с течением времени t , а затем все медленнее. При значениях $t > 50$ мкс значение d остается практически постоянным и равным примерно 5 см.

В табл. 2.5 представлены основные характеристики ступенчатых лидеров и главных разрядов молний.

Таблица 2.5

Основные характеристики ионизированных каналов молний

Параметр	Минимум	Среднее	Максимум
Длина, м	$\frac{2\,000}{3}$	$\frac{5\,000}{50}$	$\frac{14\,000}{200}$
Диаметр канала, м	$\frac{0,01}{1}$	$\frac{0,075}{5}$	$\frac{0,15}{10}$
Скорость распространения, м/с	$2 \cdot 10^7$	$5 \cdot 10^7$	$1,4 \cdot 10^8$
Заряд, переносимый по каналу, Кл	$\frac{0,2}{3}$	$\frac{2,5}{5}$	$\frac{20}{20}$
Концентрация свободных электронов, эл/м ³	$\frac{10^{23}}{10^{17}}$	$\frac{10^{24}}{2 \cdot 10^{18}}$	$\frac{3 \cdot 10^{24}}{10^{19}}$
Температура канала, К	$\frac{22\,000}{-}$	$\frac{28\,000}{-}$	$\frac{35\,000}{-}$
Пиковый ток, кА	$\frac{-}{-}$	$\frac{10-20}{-}$	$\frac{110}{-}$
Продолжительность протекания пикового тока, мкс	$\frac{1}{-}$	$\frac{2}{-}$	$\frac{30}{-}$
Продолжительность протекания тока, не менее 0,5 пикового, мкс	$\frac{10}{-}$	$\frac{40}{-}$	$\frac{250}{-}$

Примечание. В числителе данные относятся к главным разрядам, в знаменателе — к ступенчатым лидерам, для которых приведена длина одной ступени.

Высокая концентрация электронов в ионизированном канале молнии долго сохраняться не может, так как наряду с ионизацией происходит обратный процесс исчезновения свободных электронов вследствие воссоединения (рекомбинации) их с положительными ионами. Как известно, скорость уменьшения электронной концентрации определяется коэффициентом рекомбинации k_p . Для его оценки можно воспользоваться известным уравнением рекомбинации:

$$N_t = \frac{N_0}{1 + N_0 k_p t}, \quad (2.16)$$

где N_0 — начальная концентрация электронов в момент времени $t = 0$, N_t — концентрация электронов в момент времени t , k_p — коэффициент рекомбинации, t — время.

Проведенные наблюдения за радиоэхом молний показали, что на волнах 1,5—2 м их продолжительность колеблется от долей секунд до 1—3 с [49]. Если за начальное значение электронной концентрации взять $N_0 = 10^{23}$ эл/м³ = 10^{17} эл/см³, а величину N_t положить равной концентрации, обуславливающей полное отражение на волне $\lambda = 1,5$ м ($N_t = N_{кр}$), то для времени $t = 1$ с с помощью формулы (2.16) можно определить приближенное значение k_p .

Действительно, $k_p = \left(\frac{1}{4,5 \cdot 10^8} - \frac{1}{10^{17}} \right) \approx 2 \cdot 10^{-9} \text{ см}^3/(\text{эл} \cdot \text{с})$.

Если теперь считать $k_p \approx \text{const}$, то нетрудно определить время, в течение которого наблюдается полное отражение различных радиоволн от ионизированных каналов молний. Это время при перпендикулярном падении радиоволн можно условно назвать минимальным временем возможного наблюдения радиоэха молний. Его можно рассчитать по известной формуле

$$N_{\text{кр}} = 1,24 \cdot 10^{-8} f_{\text{кр}}^2,$$

где $N_{\text{кр}}$ — значение электронной концентрации в момент полного отражения радиоволн частотой $f_{\text{кр}}$ (Гц). В результате расчетов получены следующие значения минимального времени возможного наблюдения радиоэха грозового разряда:

λ см	3	10	20	50	100	150	200
$N_{\text{кр}}$ см ⁻³	$1,2 \cdot 10^{12}$	10^{11}	$2,8 \cdot 10^{10}$	$4,5 \cdot 10^9$	$1,1 \cdot 10^9$	$4,5 \cdot 10^8$	$2,8 \cdot 10^8$
t с	$5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-2}$	10^{-1}	$5 \cdot 10^{-1}$	1	1,8

Из приведенных данных видно, что чем больше длина волны, тем продолжительнее можно наблюдать радиоэхо ионизированных каналов грозовых разрядов. Фактическое же время наблюдения может быть в несколько раз больше указанного, так как и при электронной концентрации, не превышающей критическую, наблюдается частичное отражение сигнала.

Для расчетов коэффициента отражения радиоволн воспользуемся формулой Френеля

$$\rho_o^2 = \frac{(n-1)^2 + \alpha_n^2}{(n+1)^2 + \alpha_n^2}, \quad (2.17)$$

где α_n — коэффициент поглощения, n — коэффициент преломления.

Допустим, что граница ионизированного канала резко выражена и поглощением радиоволн можно пренебречь. Тогда коэффициент преломления n определяется формулой

$$2n^2 = \sqrt{\varepsilon^2 + 4\delta^2 \tau_c^2} + \varepsilon. \quad (2.18)$$

Здесь δ — проводимость среды, τ_c — период колебаний радиосигнала ($\tau_c = \frac{1}{f}$), ε — диэлектрическая проницаемость.

Известно, что

$$\delta = \frac{Ne^2\nu}{m(\omega^2 + \nu^2)}, \quad (2.19)$$

и

$$\varepsilon = 1 - \frac{4\pi Ne^2}{m(\omega^2 + \nu^2)}, \quad (2.20)$$

где e и m — заряд и масса электрона, N — концентрация электронов (см^{-3}), ω — круговая частота радиосигнала, ν — частота столкновения электронов.

Для вычисления значений ν воспользуемся известной формулой из молекулярно-кинетической теории газов

$$\nu = \frac{5,5}{T^{3/2}} N \ln \left(220 \frac{T}{N^{1/3}} \right). \quad (2.21)$$

Если в эту формулу подставить $T = 1,5 \cdot 10^4 \text{ К}$ и $N = 1,2 \times 10^{17} \text{ см}^{-3} = 1,2 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$, то $\nu = 7 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}$.

Найдем теперь неизвестные величины ϵ и δ . Подставим в формулу (2.20) полученное значение ν и величину ω для частоты 10^{10} Гц ($\omega = 2\pi f$). В результате получим $\epsilon = 1 - 780 = -779$. Полученное отрицательное значение ϵ подтверждает полное отражение радиоволн от области с данной электронной концентрацией, даже в случае таких коротких волн как $\lambda = 3 \text{ см}$.

Для определения δ преобразуем формулу (2.19) и подставим известные входящие в нее величины. В результате получим

$$\delta = \frac{1 - \epsilon}{4\pi} \nu = -4,3 \cdot 10^{13}.$$

По формуле (2.19) определим, что $n = 68$.

Теперь легко найти значение коэффициента отражения ρ_0 с помощью формулы (2.17), который для $N = 3,2 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ (среднее значение для ступенчатого лидера) в зависимости от λ равен:

λ -см	...	3	10	30	100	300
ρ_0	...	0,25	0,59	0,74	0,85	0,91

С течением времени электроны в ионизированных каналах грозовых разрядов быстро рекомбинируют и электронная плотность уменьшается.

Учитывая найденное значение коэффициента рекомбинации по формуле (2.16), можно рассчитать значения N_t для различных моментов времени:

t с	...	0	10^{-9}	10^{-6}	10^{-3}	1	10
N_t эл/м ³	...	$1,2 \cdot 10^{23}$	$9,7 \cdot 10^{22}$	$5 \cdot 10^{20}$	$5 \cdot 10^{17}$	$5 \cdot 10^{14}$	$5 \cdot 10^{13}$

Кроме ослабления $\rho(t)$, вызванного уменьшением концентрации электронов со временем, необходимо также учитывать ослабление вследствие возможного несовпадения фаз сигналов, отраженных от противоположных сторон ионизированного канала. Численно это ослабление учитывается множителем при ρ_0 , равным $\exp \left(-\frac{4\pi^2 a^2}{\lambda^2} \right)$ [176]. Его значение весьма существенно, когда отношением $2\pi a/\lambda$ нельзя пренебречь, т. е. когда длина волны РЛС соизмерима с радиусом ионизированного канала молний.

Пользуясь формулой (2.17) и зависимостью $N_{кр} = \psi(\lambda, t)$, можно рассчитать значения коэффициента отражения ρ_0 главных разрядов или ступенчатых лидеров (табл. 2.6).

Таблица 2.6

Зависимость ρ_0 ионизированного канала молнии от λ РЛС и времени t

λ см	t с				
	0	10^{-9}	10^{-8}	10^{-7}	1
3	0,980	0,960	0,64	$5 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$
10	0,984	0,981	0,79	$7 \cdot 10^{-4}$	$2,2 \cdot 10^{-7}$
30	0,991	0,989	0,87	$9 \cdot 10^{-3}$	$4,0 \cdot 10^{-7}$
150	1,0	0,996	0,94	$1,3 \cdot 10^{-1}$	$5,1 \cdot 10^{-6}$
300	1,0	0,999	0,97	$2,3 \cdot 10^{-1}$	$6,0 \cdot 10^{-6}$

Данные табл. 2.6 показывают, что ρ_0 очень быстро уменьшается со временем, особенно для $\lambda \leq 30$ см. При $t \approx 1$ с его значения весьма малы на всех λ ($10^{-7} - 6 \cdot 10^{-6}$). Характерным является сильная частотная зависимость ρ_0 при $t = 10^{-8}$ с, когда коэффициент отражения на $\lambda = 300$ см почти в 500 раз больше, чем ρ на $\lambda = 3$ см. Кроме того, значение множителя $\exp\left(-\frac{4\pi^2 a^2}{\lambda^2}\right)$ для $\lambda = 3$ см равно всего 10^{-4} . Указанные обстоятельства, по-видимому, являются основными причинами хорошего радиолокационного обнаружения молний на $\lambda = 1,5 - 2$ м и плохого для РЛС, работающих на $\lambda = 3$ см.

Если аппроксимировать ионизированные каналы молний тонкими цилиндрами, то для начальных моментов времени, когда наблюдается «сверхплотная» плазма (коэффициент отражения $\rho_0 = 1$) при условии, что $(2\pi a)/\lambda > 1$ и длина цилиндра гораздо больше первой зоны Френеля, получим

$$\sigma = 2R\pi a, \quad (2.22)$$

где a — радиус канала, R — удаление канала от РЛС.

Соотношение (2.22) остается справедливым для двух поляризаций перпендикулярно падающей волны.

Если $\frac{2\pi a}{\lambda} < 1$, то для ортогонального рассеяния

$$\sigma_{\perp} = \frac{8\pi^5 R a^4}{\lambda^3}, \quad (2.23)$$

а для параллельного рассеяния

$$\sigma_{\parallel} = \frac{2R\lambda}{\pi \left[1 - i \left(\frac{2}{\pi} \right) \ln \left(\gamma \frac{ka}{2} \right) \right]^2}, \quad (2.24)$$

где λ — длина волны, $\gamma = 1,73$ и $k = 2\pi/\lambda$.

Использование соотношений (2.23) и (2.24) возможно только для случая нормального падения радиоволн на ионизированный канал молнии, представляющий собой цилиндр. Авторы работы

[69] на основании данных [134] считают более справедливой модель, в которой сигнал, отраженный от канала молнии, представляется в виде некогерентной совокупности сигналов, отраженных отдельными произвольно ориентированными в отражающем объеме пространства прямолинейными отрезками разряда.

Известно, что ЭПР n -независимых произвольно ориентированных отражателей может рассматриваться в качестве случайной функции, подчиняющейся экспоненциальному закону распределения

$$p(\sigma) = \frac{1}{\bar{\sigma}} \exp\left(-\frac{\sigma}{\bar{\sigma}}\right),$$

где $p(\sigma)$ — плотность распределения величины σ , $\bar{\sigma} = \sum_{k=1}^n \bar{\sigma}_k$ — среднее значение ЭПР. Учитывая предельную теорему Чебышева, запишем

$$\bar{\sigma} = n\bar{\sigma}_k, \quad (2.25)$$

где $\bar{\sigma}_k$ — среднее значение ЭПР прямолинейного отрезка длиной L_k . При расчетах величины $\bar{\sigma}$ необходимо учитывать плотность распределения длин $p(L)$ и радиусов $p(a)$ отдельных прямолинейных отрезков ионизированных каналов. В работе [69] приве-

дены данные величин $\bar{\sigma}$ для отрезков ионизированных каналов, радиусы которых сравнимы или превышают длину волны РЛС.

Решения уравнений (2.23) и (2.24) для $R = 3,66$ км представлены графически на рис. 2.2 в функции длины волны и радиуса ионизированного канала молнии для различных поляризаций. В области значений отношения $2\pi a/\lambda \approx 1$ кривые были сглажены. Можно видеть, что ЭПР для сверхплотной плазмы молний обладает хорошей поляризационной чувствительностью только для каналов с малым радиусом, и она резко увеличивается с возрастанием длины волны.

Для оценки σ ионизированных каналов в грозовых облаках с неплотной плазмой ($\rho_0 < 1$), т. е. когда частота радиоволн становится больше частоты колебаний электронов, используются несколько отличающиеся подходы и соотношения. Так, в работе [176] для определения σ в правую часть соотношений (2.22) — (2.24) рекомендуется вводить коэффициент отражения $|\rho_0|^2$ вместе с множителем $\exp\left(-\frac{8\pi^2 a^2}{\lambda^2}\right)$.

В работе [176] предлагается рассматривать радиоэхо от извилистого канала, каким является канал молнии, приближенно в виде суммы вкладов от тех прямых участков канала, которые расположены нормально к радиолучу (блестящих точек). Проблема состоит в оценке действительного числа таких точек. Для строгого применения метода блестящих точек размеры этих точек должны быть соизмеримы с размерами первой зоны Френеля.

В работе [176] было принято предположение, что только 5 % облученного канала молний участвует в формировании радиоэха. Так как размер первой зоны Френеля равен $l_F = \left(\frac{k\lambda}{2}\right)^{1/2}$, то соотношение $0,05 = \left(\frac{N}{L}\right)\left(\frac{R\lambda}{2}\right)^{1/2}$ позволяет приблизительно определить число действительных блестящих точек N по известной длине ионизированного канала L и его расстоянию R от РЛС. Для расстояний $R = 6$ км и $L = 3$ км типичное число $N = 1 \div 2$.

В этой же работе получено следующее соотношение для ЭПР одной блестящей точки молнии в случае неплотной плазмы:

$$\sigma = \frac{\pi^5 R a^4}{\lambda^3} \left(\frac{\omega_{\pi}}{\omega}\right)^4 \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{v}{\omega}\right)^2\right]} \exp\left(-\frac{8\pi^2 a^2}{\lambda^2}\right), \quad (2.26)$$

где ω — круговая частота РЛС, ω_{π} — плазменная частота, $\omega_{\pi}^2 = \frac{4\pi N_a e^2}{m}$ (N_a — число электронов, e — заряд электрона, m — его масса).

На рис. 2.3 представлены результаты расчетов по формуле (2.26) для неплотной плазмы и по формуле (2.24) — для сверхплотной плазмы. Кривые показывают изменение ЭПР отдельной зоны рассеяния (блестящей точки) во времени после возникновения молнии в случае, когда отсутствует воздействие электрического поля в облаках на процесс рекомбинации электронов. При электрическом поле 190 В/см первичная ЭПР неизменна, но ЭПР с неплотной плазмой по оценкам уменьшается примерно на полтора порядка величины.

На рисунке прослеживается большое различие в ходе кривых для $\lambda = 3,2$ см и всех других λ , что обусловлено весьма малым значением экспоненциального множителя в формуле (2.26) для $\lambda = 3,2$ см, который равен $e^{-30,7}$.

Из анализа кривых на рис. 2.3 также видно, что РЛС с длиной волны $\lambda \geq 10$ см может быть использована для обнаружения и исследования молний. Однако при решении важного вопроса об оптимальной длине волны следует учитывать влияние мешающих эхо-сигналов от частиц облаков и осадков, которое будет рассмотрено ниже. В правой части рисунка показаны шкалы мощностей $\bar{P}$, принятых эхо-сигналов от молний в ваттах с помощью РЛС с обычными техническими характеристиками. Анализ показывает, что на $\lambda \geq 10$ см время наблюдения радиоэха составляет более 100 мкс, а для $\lambda = 3,2$ см всего несколько миллисекунд.

Выше рассматривалось рассеяние радиоволн только ионизированным воздухом (плазмой) в канале молнии. Однако может существовать и другая причина рассеяния, связанная с взаимодействием радиолуча с диэлектрической неоднородностью между нагретым воздухом канала молнии и холодным окружающим воздухом. Пусть канал однороден и имеет резко выраженные границы. В этом случае будет наблюдаться максимальное рассеяние.

В связи с тем, что выполняется неравенство $2Ka|m_2 - m_1| < 1$ (здесь $K = 2\pi/\lambda$, m_2 и m_1 — комплексные показатели преломления горячего и холодного воздуха, a — радиус канала), можно принять приближение Рэлея—Ганса. Тогда, согласно [176], приближенно величину ЭПР можно выразить

$$\sigma = 2\pi^2 Ra (Ka)^3 (\Delta\epsilon - \Delta\mu)^2 \left[\frac{\text{Im}(2Kam_2)}{2Kam_1} \right]^2, \quad (2.27)$$

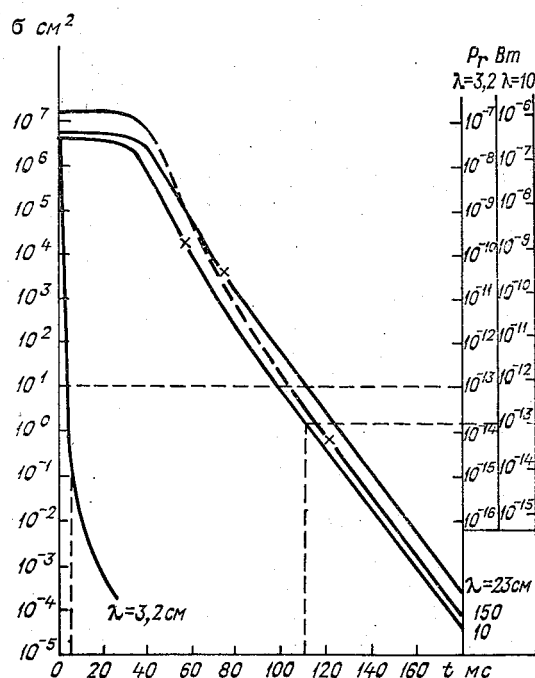


Рис. 2.3. ЭПР ионизированного канала молнии радиусом 2 см, расположенной на расстоянии $R=6$ км, для различных длин волн РЛС и времени t .

где $\Delta\epsilon = \epsilon_2 - \epsilon_1$ и $\Delta\mu = \mu_2 - \mu_1$, $m_2 - m_1 \ll m_1$; индекс 1 относится к окружающему воздуху, а индекс 2 — к горячему воздуху в канале.

Результаты расчетов ЭПР в функции Ka показывают, что σ осциллирует более чем на три порядка. Причем первый максимум приходится на произведение $Ka \approx 1$.

Результаты расчетов ЭПР по формуле (2.27), выполненные автором работы [176], показывают, что мощность эхо-сигнала от диэлектрической неоднородности горячего воздуха в канале составляет для обычных РЛС $10^{-15} - 10^{-17}$ Вт. Это позволяет пренебрегать рассеянием такого типа.

Глава 3

Исследование грозовых облаков РЛС сантиметрового диапазона

3.1. Максимальная дальность и вероятность радиолокационного обнаружения грозовых облаков

Практические возможности радиолокационного обнаружения грозовых облаков, как показано в работе [142], могут быть достаточно полно охарактеризованы их максимальными дальностями и вероятностями обнаружения. В данном случае под вероятностью понимается отношение числа грозовых облаков, фиксируемых РЛС, к действительно наблюдаемому их числу.

Первая характеристика зависит от технических параметров РЛС, отражаемости облаков, их геометрических размеров, условий распространения радиоволн; а вторая, кроме того, определяется повторяемостью характеристик грозовых облаков в данном районе.

Для определения максимальных дальностей обнаружения воспользуемся основным уравнением радиолокации облаков и осадков, записанным в следующем виде:

$$P_r = \frac{0,28\lambda^2 P_t G^2 h \theta_r \theta_v \eta k k_z}{(4\pi) R^2}, \quad (3.1)$$

где P_r — средняя мощность принятого сигнала (Вт), λ — длина волны РЛС (м), P_t — мощность передатчика (Вт), $h = ct$ — пространственная длительность зондирующего импульса (м), θ_r , θ_v — ширина диаграммы направленности в горизонтальной и вертикальной плоскостях соответственно (рад), R — расстояние до метеоцели (м), G — выигрыш антенны,

$$\eta = \frac{\pi^5 \sum_i N_i D_i^6}{\lambda^4} \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2$$

— эффективная площадь рассеяния единицы объема метеоцели (м^2), k — коэффициент ослабления, k_z — коэффициент заполнения частицами объема зондирующего импульса.

Произведем расчет $R_{\text{макс}}$ при следующих упрощающих допущениях: интенсивность осадков и водность облаков по пути распространения радиоволн постоянны. Для слабых осадков вертикальная протяженность отражающей части полагается равной 3 км, для умеренных — 5 км, сильных — 8 км. Эти данные необходимы для определения коэффициента заполнения k_z . При расчетах необходимо также учитывать затухание радиоволн в волноводном тракте РЛС.

Используя формулу 3.1, при заданных технических параметрах МРЛ-1 и П-35, а также заданных величинах k и k_3 можно легко получить $R_{\max}$ для различных значений отражаемости облаков и осадков $\sum_i N_i D_i^6 = Z$ (рис. 3.1). Кривые 1—4 относятся

к МРЛ-1, работающей в сантиметровом диапазоне. Кривая 1 характеризует трассу между станцией и метеоцелью, покрытую на $1/3$ облаками со средней водностью $\bar{W} = 0,2$ г/м³; кривые 2 и 3 характеризуют трассу с такими же облаками, дающими соответственно слабый ($I = 1$ мм/ч) и умеренный ($I = 5$ мм/ч) дождь; кривая 4 характеризует трассу с очень тяжелыми условиями распространения радиоволн (облака с $\bar{W} = 0,3$ г/м³, из которых выпадает дождь с $I = 20$ мм/ч при горизонтальной его протяженности 50 км). Кривая 5 относится к П-35, работающей на большей длине волны.

Анализ кривых на этом рисунке показывает, что МРЛ-1 обнаруживает крупные ливневые и грозовые очаги с отра-

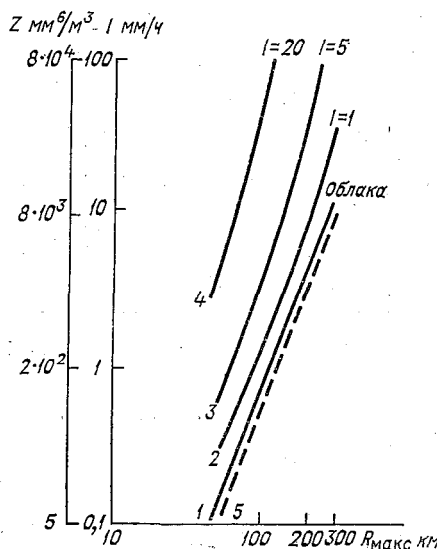


Рис. 3.1. Максимальные дальности обнаружения дождевых и грозовых облаков с помощью МРЛ-1 (1—4) и П-35 (5).

жаемостью $Z \geq 10^5$ мм⁶/м³ ($I \geq 20$ —40 мм/ч) в радиусе 250—300 км не только при безоблачной погоде на трассе, но и при выпадении на ней слабых дождей. Если же на трассе расположены облака, дающие умеренные и сильные дожди значительной протяженности, крупные ливневые и грозовые очаги с теми же значениями Z будут обнаруживаться лишь в радиусе 100—150 км. В отличие от этого на дальность действия радиолокатора П-35 метеорологические условия на трассе практически не влияют. Поэтому зависимость $R_{\max}(Z)$ для РЛС П-35, показанная на рис. 3.1 кривой 5, остается почти неизменной при любых дождях, выпадающих на трассе.

Рассмотрим также возможность обнаружения ионизированных каналов молний указанными РЛС. В этом случае полезные эхосигналы от молний (P_m) будут приниматься одновременно с мешающими радиоэхо облаков и осадков (P_o). Тогда отношение сигнал/шум q будет выглядеть следующим образом:

$$q = \frac{P_m}{m_1 P_{\text{ш}} + m_2 P_r}, \quad (3.2)$$

где $P_{ш}$ — мощность внутренних шумов приемника; m_1 и m_2 — коэффициенты, зависящие от статистических характеристик шумовых сигналов и эхо-сигналов от облаков и осадков.

Пользуясь формулами (3.1) и (3.2), величинами ЭПР молний σ_m со сверхплотной и неплотной плазмой, представленными в п. 2.4, были рассчитаны P_m и P_o для МРЛ-1 и П-35. Расчеты проводились при условии, что грозовое облако с горизонтальными размерами 10 км и вертикальной протяженностью 8 км находилось на удалении $R_1 = 50$ км и $R_2 = 100$ км. При этом его водность $W = 1$ г/м³, а интенсивность выпадающего из него дождя составляла примерно 10 мм/ч. На трассе до грозового облака предполагалось присутствие недождевых облаков с водностью $W = 0,3$ г/м³, покрывающих $1/3$ трассы. В итоге были оценены значения q по формуле (3.2). Результаты оценок сведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Отношение сигнал/шум при радиолокации молний

t с	МРЛ-1		П-35	
	R_1	R_2	R_1	R_2
$I = 10$ мм/ч				
0	40/27	90/90	3500	7800
0,06	$10^{-10}/2 \cdot 10^{-11}$	$2 \cdot 10^{-10}/6 \cdot 10^{-10}$	3	3/4
$I = 50$ мм/ч				
0	3	$7/6 \cdot 10^{-2}$	270	310/330
0,06	10^{-11}	$2 \cdot 10^{-11}/10^{-11}$	10^{-1}	0,2/0,2

Примечание. Числитель дроби — значение q в случае, когда молния находится на периферии рассматриваемой зоны осадков и эта зона не экранирует молнию; знаменатель — значение q при экранирующих свойствах осадков интенсивностью $I = 10$ мм/ч и $I = 50$ мм/ч.

Из анализа табл. 3.1 видно, что в первоначальный момент времени ($t = 0$) значение q в радиусе 100 км для рассматриваемых РЛС больше единицы. Однако с течением времени вследствие очень быстрого уменьшения электронной концентрации в ионизированном канале молнии значение q также весьма быстро уменьшается и становится, как правило, меньше единицы или соизмеримым с ней для РЛС П-35 при $t \geq 0,06$ с.

Особенно быстро уменьшается со временем значение q для МРЛ-1. Вследствие этого эта РЛС практически не обнаруживает молнии. Для РЛС П-35 уменьшение q со временем гораздо меньше, поэтому она с энергетической точки зрения может лучше обнаруживать молнии. При этом следует использовать известные методы подавления мешающих эхо-сигналов облаков и осадков

с помощью поляризационных устройств, методов и аппаратуры селекции молний, использующих существенное различие в статистических характеристиках эхо-сигналов молний и осадков.

Другой характеристикой эффективности радиолокационного обнаружения грозовых облаков является радиоклиматическая вероятность их обнаружения в зависимости от дальности. Эта вероятность определяется, в частности, по результатам одновременных радиолокационных и визуальных наблюдений за грозовыми облаками на сети метеостанций (табл. 3.2) [127].

Анализ табл. 3.2 показывает, что грозовые облака обнаруживаются лучше, чем облака с ливневыми дождями. Для грозовых облаков в радиусе 150—200 км вероятность обнаружения составляет 100—85 %, а для облаков с ливнями — 70—45 %.

Таблица 3.2

Вероятность обнаружения (%) кучево-дождевых облаков с грозами и ливнями с помощью МРЛ-1 в зависимости от расстояния

Кучево-дождевые облака	Расстояние от МРЛ, км						
	над пунктом	50	100	150	200	250	300
С грозой	100	100	100	100	85	40	5
С ливнем	100	100	95	70	45	15	5

3.2. Наземные РЛС сантиметрового диапазона, используемые для получения информации о грозовых облаках

В сантиметровом диапазоне радиоволн работают почти все радиолокационные станции, используемые метеорологами для своевременного обнаружения гроз и их исследований. В нашей стране к таким станциям относятся МРЛ-1(2,5), П-35 и ПРВ-10, в США — РЛС типа WSR-57, AN/FPS-77, AN/CPS-9, WSR-51. Основными длинами волн перечисленных станций являются: 3,2, 5,5 и 10 см. В тех случаях, когда представляет интерес обнаружение ранней стадии конвективного облака (Cu med., Cu cong.), целесообразнее вести наблюдения на $\lambda < 3,2$ см, при которой мелкокапельная структура облаков обнаруживается лучше. Так как внедрение радиолокации в метеорологию было связано, в основном, с решением задач штормового оповещения, т. е. необходимостью обнаружения зрелых грозовых облаков, обнаружению ранней стадии таких облаков не уделялось должного внимания.

Теоретические и экспериментальные исследования грозовых облаков в сантиметровом диапазоне радиоволн позволили установить, что работа МРЛ на $\lambda = 3,2$ см не всегда оптимальна. Здесь имеются в виду в первую очередь случаи, когда на одном

азимуте, но на разных расстояниях находятся два или больше грозовых очага. При таком расположении очагов происходит экранирование ближними очагами дальних. Поглощение радиоволн на $\lambda = 3,2$ см, наблюдающееся в грозах, приводит к ошибкам в измерении отражаемости дальних очагов и определении их геометрических размеров.

При проведении наблюдений за грозовыми облаками на $\lambda = 10$ см этим поглощением можно пренебречь.

В нашей стране основные исследования гроз проведены и проводятся с помощью РЛС метеорологического многоцелевого назначения типа МРЛ-1 и МРЛ-2, а в последние годы — с помощью высокопотенциальной станции МРЛ-5. Кроме того, в этих целях используются РЛС типа П-35 и ПРВ-10, применяемые в гражданской авиации для обнаружения самолетов и иногда для метеорологического обеспечения полетов.

Сопоставление радиолокаторов, используемых для обнаружения гроз, можно провести на основе сравнения их потенциалов ($P_{\text{РЛС}}$), т. е. постоянных станции, не зависящих от ЭПР гроз. Известно [28], что

$$P_{\text{РЛС}} = 1,22 \cdot 10^7 \frac{P_{\text{г}} G^2 \theta_{\text{г}} \theta_{\text{в}}}{P_{\text{г мин}} \lambda^2}.$$

В табл. 3.3 приведены значения $P_{\text{РЛС}}$ для большинства РЛС, используемых для обнаружения, в частности, грозовых облаков.

Таблица 3.3

Типы РЛС и значения их $P_{\text{РЛС}}$ [28]

Тип РЛС	Диапазон частот	$10 \lg P_{\text{РЛС}}$
МРЛ-2	X	283
WSR-57	S	281,4
МРЛ-5 (I канал)	X	293
МРЛ-5 (II канал)	S	280
WSR-74 (I канал)	S	268—274
WSR-74 (II канал)	C	277
AN/FPS-77	C	282
AN/CPS-9	X	274—284
П-35	S	279
ПРВ-10	S	280

Рисунок 3.2 иллюстрирует возможность обнаружения грозовых облаков в зависимости от их минимальной отражаемости $Z_{\text{мин}}$ на различных расстояниях R разными отечественными РЛС. Линии a_1 и a_2 показывают изменение зависимости $Z_{\text{мин}} = \psi(R)$ для МРЛ-2 в тех случаях, когда траектории радиоволны МРЛ-2 проходят соответственно через 25- и 50-километровые зоны облаков со средней водностью $1,0 \text{ г/м}^3$ при температуре 0°C . Как следует

из п. 2.2, такого изменения $Z_{\min} = \psi(R)$ для РЛС П-35 и ПРВ-10 не наблюдается.

Нет необходимости останавливаться на характеристиках РЛС МРЛ-1 и МРЛ-2, подробно изложенных в их технических описаниях и в литературе [19, 122]. Эти РЛС, разработанные для метеорологических целей, позволяют контролировать потенциал станции, проводить измерение отражаемости облаков и осуществлять

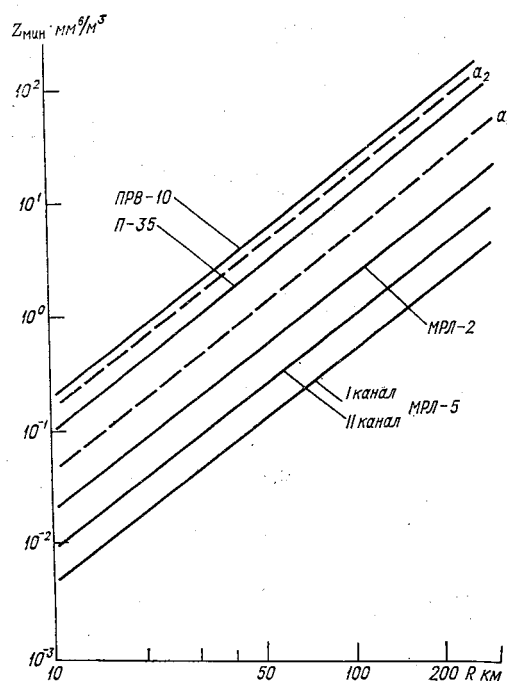


Рис. 3.2. Зависимость $Z_{\min} = f(R)$ для различных РЛС.

фоторегистрацию экранов индикаторов. Необходимо отметить, что данные РЛС предназначены в первую очередь для штормоповещения. Для получения других данных, например, динамики скоротечной эволюции грозových облаков, они требуют лишь незначительных усовершенствований, сводящихся к следующему:

1. Известно, что в МРЛ-1 и МРЛ-2 фотографирование ИКО и ИДВ осуществляется с помощью фотокиноприставок типа ФАРМ-2(3), срабатывающих при замыкании контактов, установленных на вращающейся в азимутальной плоскости или сканирующей в вертикальной плоскости антенной колонне. При этом управление затвором ФАРМ-2(3) проводится при одном и том же азимутальном угле 0° . В результате этого фотографировать экран ИКО можно только через 10 с при скорости вращения антенны 6 об/мин. Этот недостаток можно ликвидировать, управляя работой ФАРМ-2(3) с помощью автономного выключателя при отключенных контактах, установленных на антенне РЛС. Таким обра-

зом, становится возможным проведение оперативного фотографирования индикаторов, особенно, если исследуемые грозовые облака находятся в определенном азимутальном секторе или занимают часть сектора в вертикальной плоскости. В связи с тем, что ИКО и ИДВ радиолокаторов используют ЭЛТ с длительным послесвечением, фотографирование грозовых облаков следует начинать при наибольшем затухании, вводимом в приемный тракт с целью измерения отражаемости.

2. В МРЛ-2 предусмотрено ступенчатое изоэхо измерения отражаемости облаков с интервалом 6 дБ. Более достоверные изме-

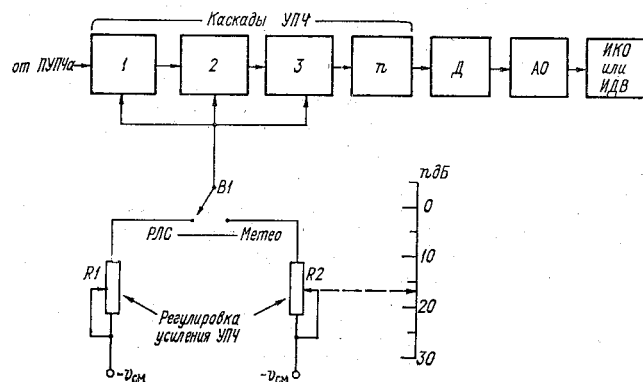


Рис. 3.3. Принцип измерения Z облаков в РЛС П-35 и ПРВ-10.

рения $Z_{\text{макс}}$ производятся с помощью плавного аттенюатора, устанавливаемого между ПУПЧ и УПЧ приемного тракта станции [44].

При проведении радиолокационных исследований гроз необходимо измерение их отражаемости. Радиолокаторы типа П-35 и ПРВ-10 метеорологического назначения не позволяют производить такие измерения. Это связано с тем, что принятый антенной и усиленный в каскадах промежуточной частоты (УПЧ) сигнал после детектирования (Д) поступает на экраны индикаторов кругового обзора (ИКО) или дальность—высота (ИДВ) через амплитудный ограничитель (АО) (рис. 3.3).

В таком случае интенсивные сигналы $U_{\text{макс}}$, достигшие установленного порога ограничения $U_{\text{огр}}$, приобретают плоскую вершину (зона А радиоэха, рис. 3.4). Последнее обеспечивает равномерную яркость цели на экранах РЛС, в том числе и метеорологического характера, и одновременно предохраняет экраны станций от чрезмерных их засветок.

Однако ограничитель существенно препятствует проведению количественной оценки эхо-сигналов, ибо зона Б радиоэха (рис. 3.4), характеризуемая амплитудным значением сигнала $U_{\text{макс}}$, на экранах РЛС не воспроизводится.

Известно, что в радиолокационных станциях типа П-35 и ПРВ-10 регулировка усиления радиоэха осуществляется путем изменения отрицательного смещения $u_{см}$ в нескольких первых каскадах УПЧ (рис. 3.3). Обычно в период подготовки станции к работе потенциометр $R1$ (усиление УПЧ) устанавливается в оптимальное положение (по уровню шумов). Если уровень шумов в процессе работы станции не изменяется, то усиление УПЧ не регулируется.

Увеличение $u_{см}$, имеющее место при уменьшении усиления приемного тракта, приводит к тому, что рабочая точка рассматривае-

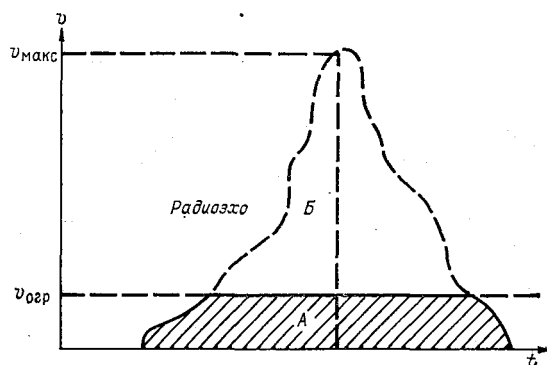


Рис. 3.4. Ограничение радиоэха на выходе приемного тракта РЛС.

мых каскадов УПЧ смещается вниз, но $u_{огр}$ при этом остается неизменным.

Таким образом, регулировка усиления УПЧ позволит установить амплитудное значение эхо-сигналов $u_{макс}$ таким, чтобы оно было меньше $u_{огр}$.

Следовательно, если провести с помощью радара-тестера калибровку усиления приемного тракта в зависимости от положения ручки дополнительно установленного потенциометра $R2$ (см. рис. 3.3), то по моменту исчезновения радиоэха на экранах РЛС можно оценить отношением n [дБ] = $\frac{P_{r\text{ снг}}}{P_{r\text{ мин}}}$, где $P_r = \psi(u_{макс})$.

Приведенный метод калибровки усиления приемного тракта для определения Z грозовых облаков по точности измерений уступает методу, при использовании которого аттенюатор устанавливается между ПУПЧ и УПЧ, но тем не менее может быть использован при проведении исследований грозовых облаков с помощью РЛС неметеорологического назначения.

Для того чтобы сохранить готовность РЛС П-35 и ПРВ-10 к обнаружению самолетов, основной потенциометр регулировки усиления УПЧ станции $R1$ дублируется аналогичным потенциометром $R2$ (см. рис. 3.3), калибровка которого производится до измерений P_r грозовых облаков. Переключение с одного режима

(«метео») на другой («РЛС»), при котором станция производит обнаружение самолетов, осуществляется переключателем В1 (рис. 3.3). Определение отражаемости грозовых облаков с помощью ПРВ-10 показано на рис. 7.21. Известно, что станция П-35 имеет шесть зон обзора в вертикальной плоскости. Для измерения этой станцией значений Z грозовых облаков достаточно использовать два нижних луча [47], в приемных трактах которых следует установить калиброванный потенциометр $R2$, показанный на рис. 3.3.

3.3. Распознавание грозовых облаков по данным МРЛ и оценка их грозовой активности

В случае применения МРЛ для распознавания грозовых очагов среди других форм облачности применяется ряд статистических характеристик и критериев [60, 89, 112, 126, 129].

Так, например, на сети МРЛ в нашей стране рекомендуется использовать критерии $y_1 = H \cdot \lg Z_3$ и $y_2 = \frac{HZ_{\max}}{\lg Z_{\max} - \lg Z_i}$, где H — высота радиоэха (км), Z_i — радиолокационная отражаемость на уровне $H_{Z_i} = H_{Z_{\max}} + 2$ км. С обеспеченностью 95 % для грозовых облаков, 5 % для ливней и 0 % для обложных осадков $y > 8$, интервалу значений $2 < y < 8$ соответствует 75 % ливней, 20 % обложных осадков и 5 % гроз. Эти данные были получены по результатам 150 измерений характеристик радиоэха в ливнях, грозах и обложных осадках [60, 129] для северо-западных и центральных районов ЕТС. В настоящее время они уточнены и для других географических районов нашей страны.

В работе [71] для распознавания гроз предлагается использовать несколько другой критерий:

$$y_3 = \frac{HH_{Z_{\max}} \cdot \lg Z_{\max}}{H_0^2},$$

где H_0 — высота нулевой изотермы. По данным 466 серий радиолокационных измерений в Крыму для 13 ливневых, 57 грозовых и 10 градовых облаков было получено, что с вероятностью не менее 80 % для ливней $3 \leq y_3 \leq 7$, для гроз $8 \leq y_3 \leq 17$, для града $20 \leq y_3 \leq 30$. Для ливней математическое ожидание $\bar{y}_3 = 2,2$, дисперсия $D = 2,8$; для гроз $\bar{y}_3 = 5,9$, $D = 5,99$; для града $\bar{y}_3 = 15,8$, $D = 27,7$.

При распознавании стадии Сб непосредственно после прекращения разрядов молнии получено с вероятностью не менее 80 % $6,5 \leq y_3 \leq 9,5$, математическое ожидание $\bar{y}_3 = 5,0$, а дисперсия $D = 5,6$.

Целесообразно также определять потенциальную грозоопасность Си cong. и Си cong. → Сб по соответствующим радиолокационным критериям.

Эта характеристика может быть полезной при решении вопроса о том, насколько наблюдаемое конвективное облако в своем развитии приблизилось к стадии кучево-дождевого или грозового облака. Параметрами облака, определяющими этот критерий, можно считать максимальные значения радиолокационной отражаемости, соответствующие моменту появления крупных частиц в переохлажденной части $Cu\ congest.$, и вертикальные размеры этой части $\Delta H_B = H_B - H_{t=0}$. Таким образом, с учетом нормировки критерий потенциальной грозоопасности:

$$k_{п.г} = \frac{Z_{\max}}{Z_0} \frac{\Delta H_B}{H_B},$$

где $Z_0 = 10^{-2} \text{ мм}^6/\text{м}^3$ — минимальная радиолокационная отражаемость $Cu\ congest.$, $H_{t=0}$ — высота нулевой изотермы, H_B — вертикальные размеры радиоэха $Cu\ congest.$

Для различных состояний $Cu\ congest.$ определены численные значения $k_{п.г}$, характеризующие их потенциальную грозоопасность:

Грозоопасность	$k_{п.г}$
Отсутствует	$\leq 0,3$
Слабая	$0,3-10$
Умеренная	$10-250$
Весьма опасная	> 250

Данные численных экспериментов по распознаванию грозовых облаков с помощью статистических способов, основанных на различных критериях, приведены в табл. 3.4 [128].

Таблица 3.4

Эффективность статистических методов распознавания грозовых облаков

Способ	Надежность распознавания C_B		Суммарная ошибка распознавания
	грозовых	негрозовых	
Интегральный критерий	0,83	0,73	0,20
Схема Байеса по шести признакам	0,79	0,85	0,18
Наиболее эффективный один признак	0,72	0,81	0,20
Мажоритарный выбор по шести признакам	0,81	0,80	0,20
Линейная дискриминантная функция	0,76	0,80	0,23

Как видно из таблицы, надежность распознавания грозовых облаков с помощью статистических способов не превышает 0,72—0,83, а ошибка распознавания находится в пределах 18—23 %. К тому же в одной из последних работ установлено заметное влияние расстояния на указанную надежность [57].

Резервы повышения достоверности данных сети МРЛ о грозах необходимо искать в увеличении точности измерений параметров радиоэха, использовании автоматизированных систем наблюдений, обработки и представления радиолокационной метеорологи-

ческой информации типа ААОМ [55], использовании грозопеленгаторов совместно с МРЛ [40, 53], одновременном применении РЛС метрового и дециметрового диапазонов и МРЛ [51, 140], поиске наиболее информативных параметров радиоэха.

Вероятность радиолокационного обнаружения и распознавания различных облаков, в том числе и грозовых, зависит также от того, как часто во времени и в пространстве проводятся наблюдения с помощью МРЛ. Известно, что продолжительность грозовой деятельности находится в пределах от нескольких минут до нескольких часов. В результате этого часть грозовых облаков не обнаруживается при проведении наблюдений МРЛ с временной дискретностью 1 раз в 1 ч и продолжительностью наблюдений 15 мин. Изучению этого вопроса посвящена работа [55]. Результаты обработки наблюдений представлены в табл. 3.5.

Таблица 3.5

Вероятность обнаружения гроз с помощью МРЛ в радиусе 160 км при дискретности наблюдений 1 раз в 1 ч и продолжительности 15 мин

R км	0—40	41—80	81—120	121—160
P %	97,3	95,1	94,2	92,8

Из анализа данных табл. 3.5 следует, что от 2,7 до 7,2 % облаков, находящихся в грозовом состоянии, не обнаруживается. Можно проследить также влияние облаков на вероятность их обнаружения при заданной временной дискретности наблюдений.

Фактором, ухудшающим вероятность распознавания гроз, является асинхронность определения характеристик радиоэха, от которых зависят значения критериев y_1 , y_2 , y_3 и др. В то же время хорошо известна большая временная изменчивость измеряемых характеристик радиоэха [142].

В работе [55] исследовалась изменчивость H и Z радиоэха гроз в слое 4—6 км за 15-минутные интервалы. Оказалось, что изменчивость $\lg Z$ за этот временной интервал в 19 % случаев более 1,2. Изменчивость H в 42 % случаев превышает 2 км. Такая высокая изменчивость этих величин указывает на заметное влияние асинхронности радиолокационных наблюдений на вероятность опознавания гроз.

Применение данных аэрологического зондирования совместно с информацией, получаемой с помощью МРЛ, позволяет более надежно распознавать опасные явления, связанные с Сб [24, 31]. Так, например, использование данных МРЛ о высотах радиоэха ливней и гроз и отражаемостей $\lg Z_3$, а также изотермы -22°C позволило разработать косвенные критерии для распознавания гроз, совпадающих с различной обеспеченностью с данными наземной сети метеостанций.

С точки зрения большинства потребителей метеоинформации о грозах, использующих ее в прикладных целях, основными параметрами грозовой активности облаков являются: время начала грозовых разрядов в облаке при их инициировании самолетами

и другими летательными аппаратами (t'_H); время начала этих разрядов без указанного иницирования (t''_H); время окончания грозовых разрядов для первого и второго случаев (соответственно t'_K и t''_K); объем пространства V_0 , в котором происходят или могут происходить в данный момент грозовые разряды для первого и второго случаев, и его местонахождение над местностью. В связи с перемещением облаков и их эволюцией также важным является общий объем атмосферы, в котором происходили грозовые разряды за время $\Delta t''_p = t''_K - t''_H$ (либо $\Delta t'_p = t'_K - t'_H$) от начала до конца грозовых разрядов.

Интенсивность грозовых разрядов определяется величиной нейтрализуемого разряда либо током внутри ионизированного канала молний (I_m).

Тогда для облаков с естественными или стимулированными разрядами можно использовать комплексный критерий их грозовой активности в следующем виде:

$$k_r = N_p \bar{H}_v \bar{S} \bar{I}_m \cdot \Delta t_p,$$

где I_m — ток молнии, $\bar{H}_v$ — средняя вертикальная протяженность облака, $\bar{S}$ — его средняя горизонтальная площадь, N_p — число разрядов.

Для оценки «мгновенной» грозовой активности облака $k_{r.m} = N_p \bar{H}_v \bar{S} \bar{I}_m$, где N_p и I_m определяются за интервалы $\Delta t = 5$ мин.

Получены следующие приближенные значения $k_{r.m}$, характеризующие естественную грозовую активность:

Грозовая активность	$k_{r.m}$ кА · км ³
Отсутствует	0
Очень слабая	0—1,5 · 10 ²
Слабая	1,5 · 10 ² —3 · 10 ⁴
Умеренная	3 · 10 ⁴ —1,4 · 10 ⁶
Высокая	1,4 · 10 ⁶ —3 · 10 ⁸
Очень высокая	3 · 10 ⁸ —10 ¹⁰

Для определения зон повышенной турбулентности в различных, в том числе и грозовых, облаках в ЦАО разработана аппаратура, позволяющая применять некогерентные МРЛ для указанных целей [103]. Обнаружение и индикация этих зон осуществляется в реальном масштабе времени по средней разности радиальных скоростей частиц в двух импульсных объемах, отстоящих друг от друга на расстоянии $\Delta R \approx 0,5$ км.

При прохождении кучево-дождевых и грозовых облаков иногда наблюдаются шквалы. В настоящее время идут поиски приемлемых радиолокационных критериев определения указанной облачности, сопровождаемой шквалами [29, 36]. Наиболее близко решена данная задача в работе [36], в которой получены статистические зависимости между скоростью ветра у земли, с одной стороны, и верхней границей и максимальной радиолокационной отражаемостью конвективного облака, с другой, в условиях Север-

ного Кавказа. Здесь же дана методика расчета скорости ветра.

В работе [29] предлагается решение данной задачи для районов Украины. В качестве исходного материала проанализировано 35 случаев шквалов и опасных порывов ветра (более 15 м/с), наблюдавшихся в 1971—1973 гг. на площади радиусом 200 км. Для анализа использовались следующие данные: фактическая скорость ветра у земли (v_{ϕ}), зафиксированная метеостанциями; максимальная высота верхней границы Сб в радиусе 30 км от метеостанции ($H_{\text{в}}$); максимальная радиолокационная отражаемость $\lg Z_3$ на уровне 2—2,5 км выше нулевой изотермы в этом же радиусе; высота тропопаузы ($H_{\text{т}}$).

Анализ связи скорости ветра у земли с радиолокационной отражаемостью и разностью высот тропопаузы и верхней границы облаков ($\Delta H = H_{\text{т}} - H_{\text{в}}$) показал, что на графике такой связи можно выделить три зоны с определенными их значениями:

Зона	v_{ϕ} м/с	ΔH км	$\lg Z_3$
1	> 20	$+1 - (-3)$	$\geq 2,4$
2	$15 - 20$	$+1,2 - (-1,3)$	$2,9 - 3,9$
3	< 15	$-0,5$	$2,7 - 3,9$

Определенный интерес представляют данные работы [144], в которой анализируется случай развития смерчевого облака. Было отмечено, что такое облако с грозowymi разрядами и градом развивалось в малоградиентном барическом поле со слабыми ветрами неустойчивых направлений во всей толще тропосферы. Во время его развития наблюдалось увеличение влажности воздуха в тропосфере. Характерным являлось существование на высотах 3,5—5,1 км слоя с вертикальными градиентами температуры, превышающими в 1,5 раза сухоадиабатический градиент. Этот слой располагался между двумя тонкими инверсионными слоями. Горизонтальные и вертикальные размеры смерчевого облака были почти одинаковыми и составляли 10—11 км. Максимальные значения радиолокационной отражаемости наблюдались в верхней половине облака и составляли $Z = (2 \div 3) 10^3 \text{ мм}^6/\text{м}^3$. В период появления смерча процесс облакообразования и выпадения осадков в виде сильного дождя и града характеризовался весьма большими значениями скорости увеличения площади радиоэха в радиусе 100 км. Эта скорость изменялась в пределах от 248 до 995 км²/ч.

3.4. Эффективность радиолокационного получения информации о грозowych облаках

В настоящее время информацию об облаках и связанных с ними опасных явлениях погоды при наблюдении с поверхности земли получают, как известно, с помощью визуальных, радиолокационных и оптико-локационных методов. Вопрос об эффективности указанных методов в настоящее время решается обычно пу-

тем использования комплексного критерия, характеризующего вероятность получения требуемого объема, точности и оперативности данных [131, 143]. Информацию об облачности можно подразделить на два вида: штормовую и срочную. Каждый вид информации обладает своими характеристиками.

Вероятность совместного получения m независимых характеристик i -го вида информации, как известно, можно определить с помощью формулы

$$P_i = \prod_{\xi=1}^{\xi=m} P(\xi_i), \quad (3.3)$$

где $P(\xi_i)$ — вероятность получения ξ характеристики i -го вида информации.

Для нашего случая $i=2$ и $m=3$. Следовательно, формула 3.3 переписывается:

$$P_{ш} = P(k_{ш}) P(T_{ш}) P(O_{ш}), \quad (3.4)$$

$$P_c = P(k_c) P(T_c) P(O_c), \quad (3.5)$$

где $P_{ш}$ и P_c — вероятности совместного получения характеристик штормовой и срочной информации; $P(k_{ш})$ и $P(k_c)$, $P(T_{ш})$ и $P(T_c)$, $P(O_{ш})$ и $P(O_c)$ — вероятности получения требуемых объема, точности, оперативности штормовой и срочной информации соответственно.

Критерии $P_{ш}$ и P_c характеризуют метеорологическую эффективность наблюдений за облаками и показывают, какой процент полученной информации удовлетворяет заранее поставленным требованиям.

Рассмотрим кратко методику расчета частных критериев эффективности. Вероятность получения требуемого объема информации $P(k)^i$ об i -й облачности и метеоявлениях зависит одновременно от вероятности обнаружения и распознавания, т. е.

$$P(k)^i = P(k)_{обн}^i P(k)_{расп.}^i$$

Вероятность обнаружения облаков и явлений зависит прежде всего от применяемого метода.

Как показано в работах [130, 142], для оценки радиолокационного метода целесообразно использовать экспериментальные результаты.

Вероятность обнаружения облаков, ливней, гроз и града сетью наземных метеостанций можно определить расчетным путем, применяя закон Пуассона [143]. Известно, что распределение Пуассона возникает там, где какие-то точки (или элементы) занимают случайное положение независимо друг от друга, и определяет количество точек, попавших в какую-то область. В нашем случае за случайную величину можно принять число станций, обнаруживших метеоявление (станции размещены случайным образом), а за область, в которую попадают метеостанции (точки), — площадь, перекрываемую облаками и явлениями за время движения над

сетью метеостанций. Анализ применимости закона Пуассона для нашей задачи показывает, что его можно использовать в случаях наличия внутримассовых облаков и осадков, поскольку расстояние между метеостанциями, как правило, больше размеров внутримассовых очагов Сб. Тогда вероятность обнаружения Сб хотя бы одной метеостанцией из сети можно представить следующей формулой:

$$P(k)_{\text{обн}}^i = 1 - e^{-a},$$

где

$$a = S_D \lambda; \quad S_D = dvt; \quad \lambda = 1,3/l_{\text{эф}}; \quad l_{\text{эф}} = \bar{l} - 2r_0.$$

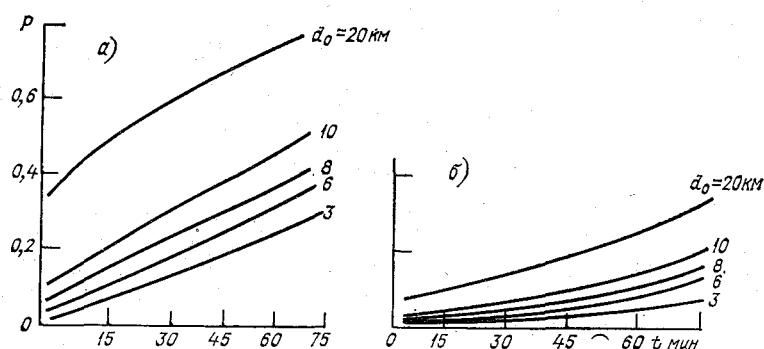


Рис. 3.5. Вероятность обнаружения грозowych (а) и ливневых (б) очагов сетью наземных метеостанций при R , равных 100—200 км.

Здесь a — параметр Пуассона, S_D — площадь области D , λ — средняя площадь наземной сети, d — диаметр Сб, v — скорость его движения, t — время, r_0 — радиус обнаружения Сб и опасного явления, связанного с ним, $\bar{l}$ — среднее расстояние между метеостанциями сети.

Проведем расчеты для следующих вариантов:

1) вхождение очага опасных явлений в наземную сеть метеостанций извне со скоростью $v = 20$ км/ч или $v = 40$ км/ч при разных диаметрах очагов, но при $D_i(t) = \text{const}$;

2) возникновение очагов разного диаметра внутри сети метеостанций с последующим смещением с указанными скоростями. Считалось, что при своем смещении диаметры очагов увеличивались с течением времени по линейному закону;

3) вхождение в сеть метеостанций очагов разного диаметра, изменяющегося со временем по параболическому закону;

4) возникновение очагов разного диаметра внутри сети с последующим смещением со скоростями $v = 20$ км/ч или $v = 40$ км/ч. Во время движения диаметры очагов изменялись по параболическому закону.

На рис. 3.5 приведены вероятности обнаружения грозowych (а) и ливневых (б) очагов (модель 2). При этом, согласно работе

[112], для ливней $r_0 = 2$ км, а для гроз $r_0 = 20$ км в дневное время. Из рисунка видно, что наземная сеть в указанном радиусе обладает значительно меньшей вероятностью обнаружения отдельных ливневых очагов по сравнению с вероятностью обнаружения грозových очагов.

Что же касается вероятности обнаружения полей неждождовой слоистообразной и кучевообразной облачности сетью метеостанций, то для размеров, соответствующих 10-балльной облачности, эта вероятность близка к единице.

Вероятность обнаружения с земли слоев облачности 8 баллов, установленная при одновременных наземных и самолетных наблюдениях, в среднем равна 0,65.

Вероятность опознавания различных видов облачности при использовании визуального метода наблюдений с земли, определенная также при сравнении с одновременными самолетными наблюдениями, составляет в среднем 0,91.

Характеристики вероятности радиолокационного обнаружения различных облаков и связанных с ними явлений достаточно хорошо изучены для РЛС типа МРЛ-1 и МРЛ-2 [122, 130, 142]. Эти характеристики различны для различных типов облаков и зависят, кроме того, от расстояния.

Вероятность опознавания облаков по результатам радиолокационных наблюдений, согласно данным работы [131], составляет в среднем 0,9.

Вероятность обеспечения требуемой точности определения j -х параметров облачности и явлений, следуя работе [112], можно определить с помощью известной формулы Лапласа, характеризующей вероятность попадания случайной ошибки κ_j на участок (a, b) .

В случае нормального закона распределения ошибок

$$P(T)^j = P(a > \kappa_j > b) = \frac{1}{2} \left[\Phi\left(\frac{b - m_j}{\sigma_j \sqrt{2}}\right) - \Phi\left(\frac{a - m_j}{\sigma_j \sqrt{2}}\right) \right], \quad (3.6)$$

где

$$\Phi(\kappa) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\kappa} e^{-t^2} dt$$

— интеграл вероятности; m_j — математическое ожидание ошибки κ_j ; σ_j — среднее квадратическое значение κ_j ; a и b — предельно допустимые ошибки при каком-либо методе измерений.

Определим $P(T)$ применительно к измерениям высоты верхней границы облаков среднего и верхнего ярусов, а также конвективных облаков. Будем считать, что максимальная ошибка не должна превышать ± 1 км.

Допустим, что при визуальных наблюдениях средняя квадратическая ошибка составляет $\sigma_{\Delta h} = 0,7$ км. На основании формулы (3.6) найдем $P(T)^{H_b}$ в интервале от $b = 1$ км до $a = -1$ км при $\sigma_{\Delta h} = 0,7$ км и при $m_{\Delta h} = 0$. Тогда $P(T)^{H_b} = 84$. Для радиолока-

ционных наблюдений применительно к Сб значение $\sigma_{\Delta H} = 0,5$ км [112]. Тогда $P(T)^{H_b} = 0,95$.

Время обновления информации можно также считать случайной величиной. Поэтому, как и в работе [112], оценка вероятности получения информации с заданной оперативностью может быть выполнена также на основе закона Пуассона

$$P(O_i) = 1 - \sum_{i=1}^{n-1} \frac{a_i^{n-1}}{(n-1)!} e^{-a_i}, \quad (3.7)$$

где n — минимально необходимое число обновлений i -го вида информации; a_i — среднее число обновлений i -го вида информации за 1 ч, обеспечиваемое данной системой наблюдений.

Изучение статистических данных о времени прохождения штормовой информации до потребителя показало, что это время в среднем составляет 20 мин. Тогда вероятность того, что обновление штормовой информации может происходить 4 раза в 1 ч, согласно формуле (3.7), при $a_i = 3$ и $n = 4$ будет $P(O_{ш}) = 0,4$.

Наземная система наблюдений за облачностью обеспечивает ежечасную передачу данных, поэтому вероятность обновления срочной информации 1 раз в 1 ч равна единице, т. е. $P(O_c) = 1$.

Изучение статистических данных о времени прохождения штормовой информации от МРЛ до потребителя показывает, что в зависимости от применяемых каналов связи и объема информации это время находится в пределах 5—20 мин при среднем его значении, равном 10 мин. Это означает, что в среднем за 1 ч такая информация обновляется 5 раз. Тогда вероятность того, что такое обновление происходит 4 раза в 1 ч и более, получим по формуле (3.7), приняв $a_i = 5$ и $n = 4$, т. е. $P(O_{ш}) = 0,74$. Для срочной радиолокационной информации $P(O_c) = 1$.

В табл. 3.6 приведены результаты оценок основных характеристик информации по двум ее видам для радиолокационных и визуальных наблюдений, полученные на основе расчетов по уравнениям (3.4) и (3.5).

Анализ этих данных показывает, что при $R = 300$ км штормовая радиолокационная информация характеризуется эффективностью 0,58. Наземная сеть метеостанций около Ленинграда имеет значительно меньшую эффективность, чем МРЛ даже при больших скоростях движения очагов опасных явлений. Это относится как к очагам, образовавшимся внутри сети, так и к очагам, входящим в сеть извне, поскольку при $\Delta t = 10$ мин для ливней $P = 0,02 \div 0,07$, а для гроз $P = 0,45$.

В радиусе 300 км при получении срочной информации об обложных осадках с помощью одной МРЛ значение $P \approx 0,31$, а для облаков без осадков $P \approx 0,19$. В то же время для сети метеостанций $P \approx 0,59$.

Дальнейшие исследования достоверности данных о грозах радиолокационным и визуальным методом проводились в работе [70] путем сопоставления данных МРЛ и метеостанций, главным

Таблица 3.6

Результаты оценки основных характеристик информации по радиолокационным и визуальным наблюдениям

Основные характеристики информации	Визуальные наблюдения		Радиолокационные наблюдения	
	штормовые	срочные	штормовые	срочные
Объем информации об опасных явлениях, связанных с Сб	$P(k_{ш})=0,12$ для варианта 3; $P(k_{ш})=0,22$ для варианта 4		$P(k_{ш})=0,58$	
Облака Ns		$P(k_c)=0,59$		$P(k_c)=0,31$
Точность определения верхней границы	$P(T_{ш})=0,85$	$P(T_c)=0,85$	$P(T_{ш})=1$	$P(T_c)=1$
Оперативность получения	$P(O_{ш})=0,4$	$P(O_c)=1$	$P(O_{ш})=0,74$	$P(O_c)=1$
Общая	$P_{ш}=0,041$ для варианта 3; $P_{ш}=0,0748$ для варианта 4	$P_c=0,25$	$P_{ш}=0,43$	$P_c=0,31$

образом с целью климатических обобщений. Радиолокационная информация сравнивалась с результатами наблюдений пяти метеостанций (МС), расположенных на ограниченной площади, размером 30×30 км (S_{30}).

В результате сравнения оказалось, что начало грозы по данным МРЛ практически всегда совпадает с началом грозы, зафиксированной хотя бы на одной из пяти МС. Время окончания грозы по радиолокационным данным иногда не совпадает с временем окончания гроз на МС. Имелись случаи, когда одна из пяти МС отмечала более позднее время окончания гроз.

Проводились также сопоставления данных МРЛ в радиусе 180 км с данными одной или двух МС, расположенных внутри S_{30} , но на разных расстояниях от МРЛ. По результатам наблюдений рассчитывалась вероятность фиксации гроз одним из методов в предположении достоверности данных, полученных другим методом. Если предположить достоверными данные МРЛ, можно получить, что вероятность фиксации дня с грозой на МС равна 0,8, а срока с грозой 0,54. Полагая достоверными результаты наблюдений МС, можно показать, что вероятность фиксации дня с грозой для МРЛ равна 0,93, а срока с грозой 0,86. В 9 % случаев не подтверждалось окончание гроз, а в 5 % случаев не подтверждались грозы, расположенные на больших расстояниях от МРЛ.

Высокая эффективность получения информации о грозах с помощью МРЛ позволяет ее использовать не только при оператив-

ном метеорологическом обеспечении различных отраслей народного хозяйства, но и для климатических исследований гроз [70].

Выше рассматривалась эффективность неавтоматизированного способа получения радиолокационной метеорологической информации. В настоящее время разработана аппаратура автоматической обработки метеоданных (ААОМ), которая позволяет заметно повысить эффективность получения радиолокационной метеорологической информации [55]. Эта аппаратура дает возможность проводить наблюдения на МРЛ 4 раза в 1 ч, определять различные характеристики радиоэха практически одновременно, что исключает асинхронное получение данных о высоте и интенсивности радиоэха, а также исключает влияние субъективности оператора. Результаты количественных оценок потерь информации за счет проведения наблюдений за ливнями и грозами на МРЛ 1 раз в 1 ч показывают, что они составляют около 7,8 %, а за счет асинхронности наблюдений примерно 6,4 % [55].

Таблица 3.7

Вероятность обнаружения и распознавания ливней и гроз по данным МРЛ и МРЛ с ААОМ в радиусе 150 км

Способ получения информации	$P_{\text{обн}}$		$P_{\text{расп}}$	
	ливень	гроза	ливень	гроза
МРЛ с ААОМ	0,96	0,99	0,70	0,79
МРЛ	0,87	0,90	0,67	0,75

Это подтверждается также сравнением данных автоматизированного и неавтоматизированного способов получения радиолокационной информации, полученных в северо-западном районе ЕТС [55] и в Ленинградской области (Воейково). Результаты сравнения представлены в табл. 3.7.

Анализ данных этой таблицы показывает реальные преимущества автоматизированного способа получения данных даже при использовании одних и тех же критериев распознавания ливней и гроз, которые сейчас используются на обычных МРЛ. Между тем при автоматизированном способе можно с успехом использовать все шесть признаков распознавания ливней и гроз [56] и тем самым повысить $P_{\text{расп}}$.

3.5. Радиолокационная отражаемость и геометрические размеры ливней и гроз

В настоящее время имеется целый ряд работ, в которых сравниваются между собой характеристики радиолокационной отражаемости ливневых и грозовых облаков [59, 111, 129, 142]. В ре-

результате статистической обработки большого числа данных получены критерии, позволяющие проводить распознавания грозовых облаков с той или иной степенью вероятности [111, 129]. Однако главным недостатком всех указанных работ является то, что данные инструментальных радиолокационных измерений отражаемости Z , проведенных в радиусе 100—150 км от РЛС, сопоставлялись с результатами визуальных наблюдений за грозами, получаемыми на метеостанциях и постах. Учитывая специфику радиолокационного метода и недостатки визуальных наблюдений за грозами, а также трудности обеспечения четкой временной синхронизации указанных наблюдений, вполне возможны ошибки, возникающие при распределении измеренных значений отражаемости в группы «ливень» или «гроза» во время обработки экспериментального материала. Эти ошибки часто могут возникать тогда, когда в радиусе метеостанции находится несколько кучево-дождевых облаков, одни из которых являются грозовыми, а другие — не грозовыми.

Наконец, почти во всех более ранних работах статистические характеристики отражаемости и геометрических размеров ливней и гроз были получены с помощью радиолокаторов типа МРЛ-1 и других, работающих в сантиметровом диапазоне длин волн. А эти волны, как известно, испытывают существенное ослабление при распространении в указанных атмосферных образованиях. Поэтому полученные ранее статистические характеристики отражаемости и геометрических размеров ливней и гроз, а также статистические признаки распознавания грозовых облаков [129] необходимо было уточнить. Это уточнение было проведено в работе [148] с использованием новых экспериментальных данных, полученных в 1971—1973 гг. в районе Ленинградской области. Здесь были организованы специальные радиотехнические наблюдения за грозовыми очагами с помощью РЛС типа П-12, П-35 и др. Одни из них служили для обнаружения частиц облаков и осадков, другие позволяли обнаружить ионизированные каналы молний и определять их координаты [51].

Всего было получено и обработано 259 фотоснимков с ИКО и ИДВ с различным вводимым ослаблением (n в дБ) мощности принятого сигнала. По значениям n и дальности до метеочагов с помощью основного уравнения радиолокации облаков и осадков определялось искомое значение радиолокационной отражаемости $Z = \sum_i ND^6$. Общее число измерений Z в кучево-дождевых облаках составляло 1973, из которых 1513 соответствовало грозовым облакам. В грозах $\bar{Z} = 7361 \text{ мм}^6/\text{м}^3$, что почти в 4 раза больше, чем в ливнях, где $\bar{Z} = 1930 \text{ мм}^6/\text{м}^3$.

Несмотря на то что в ливнях наиболее часто повторяющиеся значения Z больше, чем в грозах, однако в них никогда не отмечались $Z > 5 \cdot 10^4 \text{ мм}^6/\text{м}^3$. Между тем в грозах значения Z достигают 10^5 — $10^6 \text{ мм}^6/\text{м}^3$ и более.

Таблица 3.8

Повторяемость (%) и средние значения радиолокационной отражаемости Z по высотам для гроз и ливней

H км	Z мм ⁶ /м ³						Число случаев	$\bar{Z}$ мм ⁶ /м ³
	10 ⁰ —10 ¹	10 ¹ —10 ²	10 ² —10 ³	10 ³ —10 ⁴	10 ⁴ —10 ⁵	10 ⁵ —10 ⁶		
Грозы (по данным ПРВ-10)								
0,5	8	31	26	25	8,5	1	180	9 500
1	8,5	30	27	25,5	8	1	180	9 700
2	7,8	30	26	27,5	7,8	1	192	10 000
3	8,7	32	26	27,5	11	1,3	185	12 600
4	9	36	25,5	22	7,8	0,2	157	6 900
5	9	39	25	19	7,5	0,1	146	5 800
6	10	39	26,5	18,5	6		136	4 900
7	13	47,5	28,5	8,2	2,8		109	2 560
8	14	56,5	23	6,5			78	621
9	21	56	17,5	5,5			57	490
10	29,5	49	17,5	4			51	400
11	32	49	16				47	50
12	37	49					44	19

Ливни (по данным П-35 и ПРВ-10)

H км	Z мм ⁶ /м ³						Число случаев	$\bar{Z}$ мм ⁶ /м ³
	10^0-10^1	10^1-10^2	10^2-10^3	10^3-10^4	10^4-10^5	10^5-10^6		
0,5	5,5	22,2	27,8	38,9	5,5		28	518
1	5,3	16,1	19,8	28,2	24,8	5,3	42	5 078
2	3,4	14,6	25,4	29,8	22,2	4,9	58	5 536
3	5,7	29,3	19,3	30,0	14,3	1,4	38	1 121
4	9,5	32,4	25,7	20,0	7,6	1,9	40	650
5	10,8	42,8	22,5	16,0	4,6	1,5	51	244
6	13,9	46,5	17,8	17,8	2,3		62	25
7	12,5	56,3	6,3	25,0			63	75
8	27,3	45,5	18,2	9,1			41	27,4
9		66,6	33,4				37	22,9

В процессе обработки были также получены повторяемости и средние значения отражаемости по высотам (табл. 3.8). Из этих таблиц видно, что значение $\bar{Z}$ сначала растет с высотой, а затем с некоторого уровня убывает. Для ливней среднее из максимальных значений $\bar{Z}_{\text{макс}} = 5536$ мм⁶/м³ и наблюдается оно на высоте 2 км, а для гроз $\bar{Z}_{\text{макс}} = 12 600$ мм⁶/м³ и соответствует высоте 3 км. Выше указанных уровней отражаемость уменьшается с высотой приближенно по логарифмическому закону

$$Z_H = Z_{\text{макс}} \cdot 10^{-kH},$$

где k — коэффициент, который, по нашим данным, для ливней равен 0,41, а для гроз 0,22. Заметим, что в ранней работе [124],

в которой использовались результаты наблюдений сети метеостанций, значения его для ливней и гроз равны соответственно 0,9 и 0,3.

Средние значения вертикальных градиентов отражаемости для гроз $\overline{dZ}/dH = 980 \text{ мм}^6/(\text{м}^3 \cdot \text{км})$, а для ливней $1300 \text{ мм}^6/(\text{м}^3 \cdot \text{км})$. Особенностью dZ/dR является то, что в противоположность вертикальным градиентам они в грозах больше, чем в ливнях. Действительно, для гроз $\overline{dZ}/dR = 6200 \text{ мм}^6/(\text{м}^3 \cdot \text{км})$, а для ливней $1120 \text{ мм}^6/(\text{м}^3 \cdot \text{км})$.

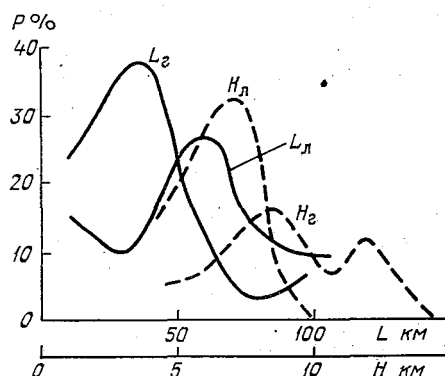


Рис. 3.6. Повторяемость горизонтальных и вертикальных размеров гроз и ливневых очагов.

Вертикальная протяженность H_r радиоэха грозовых очагов заметно больше, чем ливневых H_l (соответственно $H_r \approx 10 \text{ км}$, а $H_l \approx 8 \text{ км}$). Что же касается горизонтальных размеров (L_r) радиоэха грозовых очагов, то они в среднем равны примерно 32 км, а для ливней $L_l \approx 60 \text{ км}$ (рис. 3.6). На полученных результатах могли сказаться особенности Сб в летние периоды аномальных 1972—1973 гг., а также возможности завышения высот радиоэха ПРВ-10.

Учитывая особенности радиолокационного метода обнаружения и исследования гроз, интересным является выяснение влияния расстояния грозовых облаков от МРЛ на характеристики их радиоэха. Изучение этого вопроса было проведено в работах [31, 32] по данным радиолокационных наблюдений АМСГ Киев (Центральная). Анализ и обработке подвергались следующие радиолокационные характеристики грозовых и негрозовых облаков, дающих ливневые дожди и град: максимальные высоты радиоэха, логарифмы отражаемости $\lg Z_3$ на уровне $H_3 = H_0 + 2,5 \text{ км}$, где H_0 — высота нулевой изотермы, критерии $y_1 = H_{\text{макс}} \cdot \lg Z_3$. Полученные результаты представлены в табл. 3.9 и 3.10 [31, 32].

Из анализа данных табл. 3.9; 3.10 можно сделать следующий важный вывод: влияние расстояния рассматриваемых облаков от МРЛ на средние высоты радиоэха, средние значения $\lg Z_3$ и y невелико. Обращают на себя внимание несколько повышенные

Таблица 3.9

Распределение верхних границ радиоэха грозовых облаков и облаков с ливневыми осадками при различных расстояниях от МРЛ (июнь—сентябрь 1973 г.)

Расстояние от МРЛ, км	Метеорологическое явление	$\bar{H}$ км	σ_H км	$\frac{\sigma_H}{\bar{H}}$ %	$y_1 = H \lg Z_s$	Число случаев
0—30	Гроза	8,7	1,97	22,7	19,9	61
	Ливень	6,22	2,1	32,2		95
30—100	Гроза	8,82	2,28	25,3	19,4	202
	Ливень	5,67	19,2	33,9		144
100—150	Гроза	9,13	2,16	23,6	22,8	288
	Ливень	5,91	2,14	36,2		162
150—200	Гроза	8,25	2,21	26,8	17,3	337
	Ливень	5,47	2,0	36,7		277
200—300	Гроза	8,26	2,25	27,3	18,2	329
	Ливень	6,0	1,96	32,8		223
0—300	Гроза	8,58	2,23	26,0	19,0	1207
	Ливень	5,8	2,0	35,0		901

Таблица 3.10

Значения $\overline{\lg Z_s}$ в грозовых облаках при их различных расстояниях

Расстояние от МРЛ, км	$\overline{\lg Z_s}$	$\sigma_{\lg Z_s}$	$\frac{\sigma_{\lg Z_s}}{\overline{\lg Z_s}}$ %	Число случаев
0—30	2,3	0,80	34,7	55
30—100	2,2	0,88	40,2	190
100—150	2,5	0,97	39,4	263
150—200	2,1	0,82	39,4	278
200—300	2,2	0,9	39,9	209
0—300	2,2	0,89	40	995

значения всех указанных характеристик грозовых облаков для удалений 100—150 км по сравнению с теми же характеристиками для других удалений. По-видимому, в кольце 100—150 км из-за увеличения с расстоянием ширины радиолуча МРЛ в объем зондирующего импульса попадают частицы Сb, находящиеся в слое таяния (около нулевой изотермы) и имеющие относительно большие значения ЭПР. В связи с этим и $\lg Z_s$ здесь больше.

Что же касается изменения $\bar{H}(R)$, то уменьшение значений $\bar{H}$ на расстояниях более 150 км можно объяснить недостаточным высоким потенциалом МРЛ, не всегда обеспечивающим обнаружение слабоотражающих частиц облаков, расположенных в их верхних частях, уменьшением коэффициента заполнения радиолуча частицами облаков и осадков, а также влиянием радиорефракции. Более

заметно выражено изменение значений $H_{\text{макс}}$ и $\lg Z_3$ грозовых облаков, связанное с годовым ходом (рис. 3.7).

Из рис. 3.7, полученного по данным наблюдений МРЛ в Киеве, видно, что весной и осенью наблюдаются заметно меньшие значения $H_{\text{макс}}$ и $\lg Z_3$ по сравнению с летними месяцами.

Наибольшие значения $H_{\text{макс}}$, $\lg Z_3$, а следовательно, y_1 наблюдаются в июле, когда отмечается наиболее активная грозовая деятельность в данном районе. Следует рассмотреть также эти размеры для гроз, обусловленных атмосферными фронтами [31]. В зависимости от аэросиноптической обстановки они находятся в пределах 50—500 км. Средняя ширина радиоэха L_r для всех грозовых фронтов, проходящих в районе Киева, составляла 270 км.

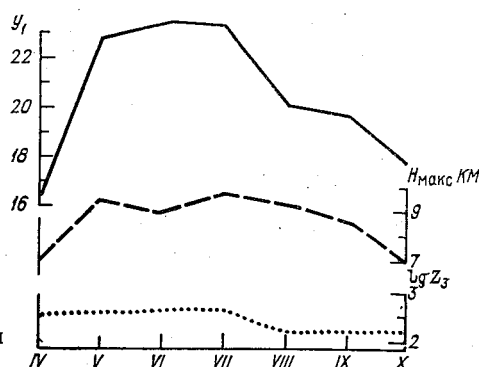


Рис. 3.7. Годовой ход H и $\lg Z_3$ для грозовых облаков.

Максимальные значения L_r характерны для радиоэха грозовых облаков, развивающихся на фронтах окклюзий, для которых в 88 % случаев $L \approx 300$ км.

Средняя площадь S покрытия экрана ИКО МРЛ радиоэхом грозоопасных облаков в радиусе 110 км близка к 18 %.

Средние суммарные площади радиоэха гроз S , связанных с фронтальными разделами, больше, чем внутримассовых гроз. При прохождении теплых фронтов $S_{\text{макс}} \approx 55,4$ %, при внутримассовых процессах развития конвективной облачности в циклоне суммарное покрытие заметно меньше.

С физикой образования и эволюцией грозовых облаков связано местоположение молний в объеме этих облаков. Из более ранних работ известно, что грозовые разряды, как правило, наблюдаются в тех частях облаков, где выпадают наиболее интенсивные осадки и отмечаются максимальные значения радиолокационной отражаемости Z . Однако трудно было ожидать, что весьма сложное пространственное поле электрических характеристик в грозах полностью копирует пространственное распределение их отражаемости и интенсивности осадков. В результате авторами работы [148] были получены новые данные, характеризующие средние расстояния ΔR между эхо-сигналами ионизированных

каналов молнии и зонами с различными значениями радиолокационной отражаемости Z во фронтальных грозовых облаках:

Z мм ⁶ /м ³	$Z_{\text{макс}}$	$Z_{\text{макс}} \cdot 10^{-1}$	$Z_{\text{макс}} \cdot 10^{-2}$	$Z_{\text{макс}} \cdot 10^{-3}$	$Z_{\text{макс}} \cdot 10^{-4}$
$\overline{\Delta R}$ км	11,0	5,9	4,6	7,7	12,0
Число случаев	39	26	27	27	24

Видно, что наименьшие средние значения $\overline{\Delta R}$ соответствуют не зонам с максимальными значениями радиолокационной отражаемости $Z_{\text{макс}}$, а зонам со значениями $Z_{\text{макс}} \cdot 10^{-2}$. Эти выводы в дальнейшем были подтверждены в работах [5, 82].

Последующая обработка экспериментального материала в работе [148] позволила также установить, что эхо-сигналы молний в большинстве случаев совпадают с зонами больших горизонтальных градиентов dZ/dR . При этом наиболее часто повторяющиеся в этих зонах $dZ/dR = 10^3$ мм⁶/(м³·км).

3.6. Результаты экспериментальных измерений движений гидрометеоров и воздушных потоков в грозо-градовых облаках с помощью РЛС

В последние годы наряду с применением обычных некогерентных МРЛ для исследования движений в различных облаках находят применение доплеровские (когерентные) РЛС [5, 64, 154, 155, 156, 188].

Известно, что радиолокационный спектр доплеровских частот от совокупности движущихся гидрометеоров при вертикальном зондировании связан со спектром их диаметров, что в свою очередь определяет спектр скорости частиц

$$n(F) dF = n(D) dD = n(v) dv.$$

Имея измеренные значения $F_{\text{мин}} - F_{\text{макс}}$ доплеровских частот, можно определить $\bar{v}_d$ с учетом весового вклада отражающей способности частиц:

$$\bar{v}_d = \frac{\int_{v_{\text{мин}}}^{v_{\text{макс}}} v \eta(v) dv}{\int_{v_{\text{мин}}}^{v_{\text{макс}}} \eta(v) dv},$$

а также дисперсию скоростей

$$\sigma_v^2 = \frac{\int_{v_{\text{мин}}}^{v_{\text{макс}}} v^2 \eta(v) dv}{\int_{v_{\text{мин}}}^{v_{\text{макс}}} \eta(v) dv} - \left[\frac{\int_{v_{\text{мин}}}^{v_{\text{макс}}} v \eta(v) dv}{\int_{v_{\text{мин}}}^{v_{\text{макс}}} \eta(v) dv} \right]^2,$$

где $v_{\min}$, $v_{\max}$ — доплеровские скорости частиц, соответствующие доплеровским частотам $F_{\min}$, $F_{\max}$; $\eta(v)dv$ — отражающая способность частицы, имеющей скорость v .

В случае вертикального зондирования частиц, находящихся в зондирующем объеме, их средняя доплеровская скорость, измеряемая РЛС, равна

$$\bar{v}_d = \pm \omega - \bar{v}_r,$$

где $\bar{v}$ — средняя гравитационная скорость частиц; ω — средняя вертикальная скорость воздушного потока в объеме зондирующего импульса, которая имеет положительный знак при нисходящем потоке и отрицательный — при восходящем.

Для определения $\bar{v}_r$ можно использовать связь, предложенную в работе [5]:

$$\bar{v}_r = 3,84Z^{0,072}, \quad (3.8)$$

где $\bar{v}_r$ в м/с, Z в мм⁶/м³.

Рассмотрим некоторые результаты наблюдений за грозо-градовыми облаками, проведенных на Муштинском научно-исследовательском полигоне сотрудниками Высокогорного геофизического института.

Используемый доплеровский радиолокатор работал в дециметровом диапазоне радиоволн. Измерения производились по методике, изложенной в работах [5, 154, 156], для разных высот, через каждые 210 м вплоть до максимальной высоты радиоэха. Между двумя соседними измерениями временной интервал составлял 2 мин. Применялись также следующие технические средства: оптический анализатор спектра частот, работающий в реальном масштабе времени, оптический анализатор спектра ОСА-73, регистрирующая аппаратура и другие устройства (накопления и обработки информации). В результате были получены практически мгновенные вертикальные распределения доплеровских спектров [156].

Если учесть конкретную длину волны используемой РЛС, то формула (3.8) перепишется следующим образом:

$$\bar{v}_r = 49,5\eta^{0,072}.$$

Для определения скорости воздушного потока необходимо учитывать изменение давления воздуха с высотой. Тогда

$$\pm \omega = v_d - 49,5\eta^{0,072} \left(\frac{\rho_0}{\rho_H} \right)^\alpha,$$

где ρ_0 , ρ_H — плотность воздуха на уровне моря и на данной высоте, показатель $\alpha = 0,4$ для дождя и $\alpha = 0,5$ для града. Погрешности измерений для $\bar{v}_d$ составляют 0,2 м/с, а для $\bar{\omega}$ — 0,4—0,5 м/с [156].

На рис. 3.8 представлено высотное-временное распределение вертикальных скоростей частиц осадков при прохождении грозо-

вого облака с осадками в виде града [156]. Видна сложная картина распределения этих скоростей. Максимальное значение восходящей скорости частиц составляет 12 м/с, а нисходящей — 20,2 м/с. В передней части облака наблюдается падение частиц со скоростями около 9 м/с. В центральной части отмечается прекращение выпадения осадков и начало восходящего движения частиц. Частицы поднимаются как бы в струе, в которой скорость увеличивается снизу вверх. Диаметр струи в нижней части облака составляет около 5 км. К вершине струя расширяется и здесь ча-

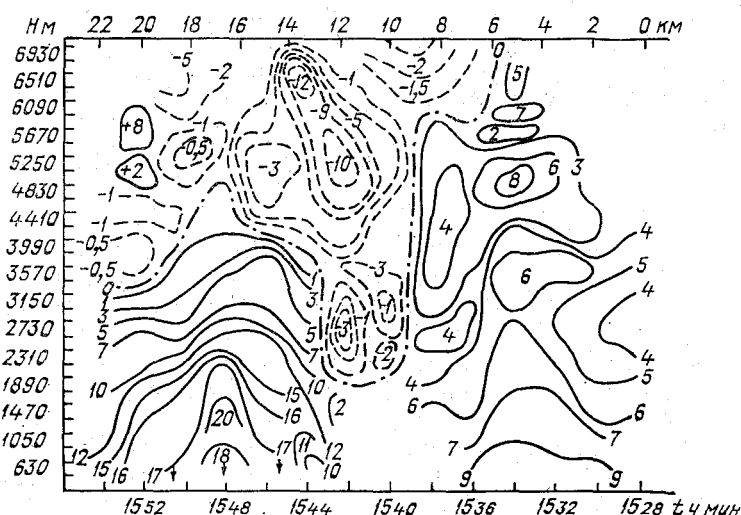


Рис. 3.8. Высотно-временное распределение вертикальных скоростей гидрометеоров в грозо-градовом облаке.

стицы как бы растекаются к фронтальной и тыловой частям облака. По-видимому, это более мелкие частицы гидрометеоров, которые выносятся восходящим потоком к вершине облака [155].

Указанная струя не вертикальна, а наклонена к тыловой части облака примерно на 20° от вертикали. Скорость частиц в струе уменьшается от центральной части к периферии. В тыловой части грозо-градового облака отмечаются нисходящие скорости частиц. С 15 ч 44 мин до 15 ч 50 мин скорости падения частиц у земли достигали 18 м/с, а на земной поверхности выпадал град диаметром около 3 см. Ширина градовой дорожки — примерно 8 км.

Представляется интересным получить осредненные значения параметров вертикальных движений гидрометеоров и вертикальных движений воздуха в грозо-градовых облаках. В работе [155] их средние значения для каждой высоты рассчитывались по многим реализациям, аналогичным тем, которые позволили получить картину вертикальных движений, представленную на рис. 3.9.

В результате статистической обработки данных, относящихся к пяти грозо-градовым облакам, было установлено, что для них

характерным является большой диапазон скоростей гидрометеоров и воздуха. При этом большим диапазоном скоростей остается по всей высоте облака: 2—19 м/с у земли, 3—14 м/с в средней части и 2—20 м/с в предвершинной части. По-видимому, большая изменчивость вертикальных скоростей обусловлена не только широким спектром размеров отражающих частиц, но и сильным влиянием турбулентных движений воздуха. Отметим, что ширина спектра вертикальных скоростей движения воздуха и гидрометеоров в ку-

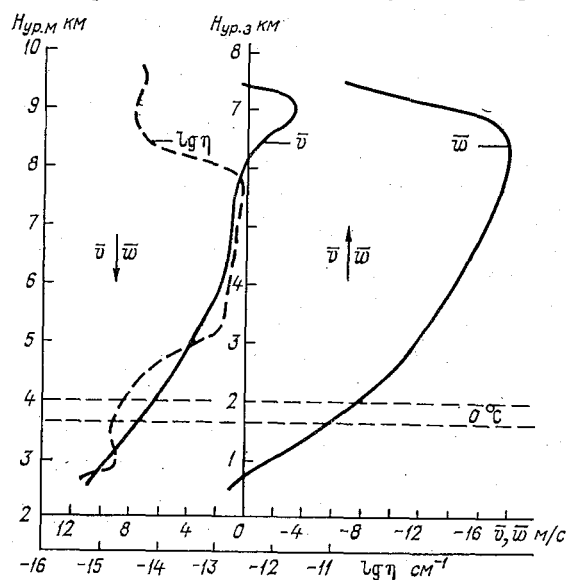


Рис. 3.9. Распределение средних значений $\bar{w}$, $\bar{v}$ и $\lg \eta$ по высоте в грозо-градовом облаке.

чево-дождевых облаках без грозových разрядов гораздо уже. Распределения средних значений $\bar{w}$, $\bar{v}$ и $\lg \eta$ по высоте в грозо-градовом облаке представлены на рис. 3.9.

Из анализа кривых на этом рисунке следует, что в среднем в указанных облаках, за исключением высот ниже 2,5 км, наблюдаются восходящие вертикальные движения воздуха. При этом $\bar{w}$ плавно возрастает в предвершинной части облака, достигая максимального значения на высоте около 9 км над ур. м.

Для гидрометеоров характерно преобладание вертикальных скоростей их падения. При этом максимальные значения $\bar{v}$ наблюдаются у земли. С увеличением высоты происходит плавное уменьшение значений $\bar{v}$ до нуля на высотах 7—8 км. Выше 8 км мелкие частицы увлекаются вверх восходящим потоком воздуха со скоростью около 3 м/с. На этих же высотах $\bar{w}$ достигает максимального значения 18—20 м/с. В зоне аккумуляции и роста градин (5—8 км) среднее значение η мало изменяется с высотой и находится в пределах $10^{-12,5} \leq \eta \leq 10^{-13} \text{ см}^{-1}$. Выше 8 км отражаю-

щая способность резко уменьшается. Обращает на себя внимание то обстоятельство, что максимальное значение η отмечается на 1—1,5 км ниже уровня максимума вертикальных скоростей воздушного потока.

3.7. Применение данных МРЛ для диагноза и прогноза грозových облаков

В настоящее время в синоптической практике нашли применение три вида карт, содержащих радиолокационную метеорологическую информацию: карты с данными одного МРЛ, карты с данными сети МРЛ и комплексные карты с данными сети МРЛ и метеорологических станций [27, 107, 122]. Эти карты составляются в основные синоптические сроки (0, 3, 6, 9, 12, 15, 18 и 21 ч). В случаях штормовой погоды карты, полученные по результатам наблюдений одного МРЛ, составляются еже часно.

Принципиальных различий в анализе указанных карт нет, анализ производится в следующей последовательности: грозо-градовые очаги с вероятностью 90 % и более закрашиваются красным цветом и в этой зоне ставится знак сильной турбулентности; грозовые очаги с вероятностью 75—80 % заштриховываются и в этой зоне ставится знак умеренной турбулентности, а грозовые очаги с вероятностью 30—70 % очерчиваются (но не закрашиваются) и здесь ставится знак слабой турбулентности; далее в соответствии с методическими указаниями выделяются зона облаков с ливневыми осадками и другие облака [107, 122].

При выделении грозо-градовых и грозových очагов учитывается верхняя граница, интенсивность радиоэха и тенденция развития облачного поля.

В синоптической практике радиолокационная метеорологическая информация вместе с аэросиноптической используется при уточнении прогнозов погоды общего пользования и составлении предупреждений об опасных и особо опасных явлениях, связанных с кучево-дождевой облачностью (грозы, град, шквалы), а также при метеорологическом обеспечении авиации (для консультаций пилотов об условиях полетов на трассе и в пунктах посадки).

Заблаговременность прогнозов, составляемых с использованием данных МРЛ, находится в пределах 1—12 ч. Она зависит от объема информации, расстояния между зоной радиоэха и пунктом прогноза, а также от скорости перемещения радиоэха гроз и других атмосферных образований.

В тех случаях, когда при составлении или уточнении прогноза на картах радиолокационной информации уже имеются радиоэхо грозových и ливневых очагов, после анализа этих карт определяется изменение характеристик очагов за последние 1—3 ч (скорость и направление движения), затем рассчитывается время начала и окончания осадков и явлений и их продолжительность, которые указываются в прогнозе.

Если при составлении или уточнении прогноза погоды радиоэхо облака еще не обнаруживается на экранах МРЛ, однако ожидается развитие конвекции, то сначала рассчитывается время начала развития конвекции [121, 167], а затем, если данные МРЛ используются для пунктов, для которых составляется прогноз, определяется режим работы радиолокатора с целью своевременного обнаружения кучево-дождевых и грозовых облаков. Прогноз же сначала составляется без информации МРЛ. По мере появления радиоэха прогноз уточняется с меньшей заблаговременностью.

Движение радиоэха облаков, зон осадков и гроз в общем зависит от скорости ветра в свободной атмосфере и его направления. Однако при скорости ветра менее 5 м/с скорость перемещения радиоэха практически не зависит от ветра.

При прогнозе перемещения радиоэха внутримассовых облаков, зон осадков и гроз, наблюдаемых в виде изолированных очагов, полос или обширных областей неопределенной формы, следует иметь в виду что это перемещение чаще всего не согласуется с направлением и скоростью ветра в свободной атмосфере. По этой причине заблаговременность указанного прогноза не превышает 1—3 ч, если использовать одни лишь данные МРЛ. Прогноз перемещения радиоэха сводится к экстраполяции направления движения. При этом берется скорость движения за предыдущий час.

Можно также использовать аэрологические данные о ветре на высоте для прогноза перемещения радиоэха. Этот способ прогноза основан преимущественно на учете размеров радиоэха конвективных, в том числе грозовых, облаков [26, 107, 167].

При прогнозе перемещения радиоэха, связанного с атмосферными фронтами, следует иметь в виду, что это перемещение в основном согласуется с ветром в свободной атмосфере. Существуют три способа прогноза скорости и направления движения фронтального радиоэха. На практике обычно применяется тот способ, который обеспечивает наиболее высокую оправдываемость прогнозов.

В первом способе предусматривается прогнозирование скорости перемещения радиоэха с учетом ветра на одной из изобарических поверхностей: 850, 700 или 500 гПа, которая выбирается в зависимости от вертикальной протяженности радиоэха [167]. Так, если $\Delta H < 6$ км, используется значение скорости ветра u_T на уровне 850 гПа; при $6 \leq \Delta H \leq 7$ км используются данные о u_T на уровне 700 гПа; если $\Delta H > 7$ км — скорость ветра на уровне 500 гПа. В дальнейшем полученные значения скорости ветра умножаются на коэффициент, определяемый графически согласно работам [107, 167].

Направление движения радиоэха в основном хорошо согласуется с направлением ветра на высотах 850—500 гПа, но отклоняется от него в сторону теплого влажного воздуха на угол 25—27° в пограничном слое атмосферы. С возрастанием скорости

ветра в свободной атмосфере угол отклонения траектории движения радиоэха от направления ветра уменьшается.

Во втором способе требуется уточнять скорость движения отдельной мезомасштабной зоны радиоэха с учетом эффекта его распространения [26, 107].

Когда направление перемещения полос радиоэха совпадает с нормалью к переднему краю полосы, но отличается от направления движения ее отдельных ячеек, для прогноза скорости перемещения ячеек используется следующая формула:

$$u = v_p \cos \alpha + a, \quad (3.9)$$

где v_p — скорость перемещения мезомасштабной зоны радиоэха, определяемая с помощью МРЛ; α — угол между направлением полосы радиоэха и вектором v_p ; a — составляющая скорости распространения радиоэха, которая приближенно определяется как отношение $a = L_a/t_a$ (L_a — расстояние между положением передней кромки радиоэха в два последовательных момента времени t_1 и t_2 , значение $t_a = t_2 - t_1$).

Третий способ предусматривает учет максимальной верхней границы радиоэха $H_{\max}$ и сдвиг ветра в слое 850—500 гПа. Если $H_{\max} < 9$ км и в указанном слое отсутствует сдвиг ветра (по направлению $< 30^\circ$ и по абсолютному значению скорости меньше 10 м/с), радиоэхо движется в направлении среднего ветра в этом слое со скоростью

$$\bar{v} = \frac{1}{3} (v_{850} + v_{700} + v_{500}). \quad (3.10)$$

Если в слое 850—500 гПа имеется сдвиг ветра, радиоэхо будет перемещаться в направлении и со скоростью ветра на уровне 500 гПа.

Если $H_{\max} \geq 9$ км, сдвиг ветра не учитывается. При $9 \leq H_{\max} \leq 11$ км радиоэхо перемещается со скоростью и в направлении ветра на высоте АТ₅₀₀. Если $H_{\max} > 11$ км, то в направлении и со скоростью среднего ветра в слое 500—300 гПа [62].

Когда используются данные одного МРЛ и радиоэхо уже отмечается на его экране, прогноз времени начала явления, в том числе грозы, сводится к определению расстояния S от пункта прогноза до передней кромки радиоэха. Это время легко определяется по формуле

$$t_n = \frac{S}{v} + t_0, \quad (3.11)$$

где t_0 — время составления прогноза.

Для случаев заблаговременности прогнозов 1—3 ч можно пользоваться фактическими данными о скорости и направлении перемещения радиоэха.

При заблаговременности прогноза более 3 ч необходимо рассчитывать скорость перемещения радиоэха с помощью одного из указанных способов. Продолжительность и время окончания гроз, ливней, града и других явлений можно определять лишь в тех

случаях, когда тыловая граница радиоэха четко выражена. В этих случаях время окончания явления определяется как $t_{\text{ок}} = S_{\text{т}}/v$, где $S_{\text{т}}$ — расстояние между пунктом прогноза и тыловой границей радиоэха, а продолжительность явления $\Delta t = \Delta S/v$, где ΔS — ширина радиоэха.

При наличии комплексных радиолокационных карт с информацией сети МРЛ можно составлять прогнозы с заблаговременностью 12 ч, пользуясь теми же способами, что и для заблаговременности 1—3 ч.

В работе [143] была проведена проверка прогнозов ливней и гроз, составленных по данным МРЛ. Использовались материалы радиолокационных наблюдений и данные визуальных наблюдений, полученные от Информационного центра погоды Ленинграда. Сравнение проводилось с апреля по август 1972 и 1973 гг. Анализ 39 случаев прогнозов начала ливня показал, что погрешность составила в 19 случаях не более ± 10 мин, в 9 случаях $+20$ мин, в 7 случаях $+30$ мин и только в 3 случаях наблюдались положительные ошибки более 1 ч (знаки «+» и «—» означают соответственно раньше или позже начинается явление по отношению к прогнозу).

Полученные данные показывают, что погрешность начала ливней в большинстве случаев является сравнительно небольшой. Однако при прогнозе продолжительности внутримассовых ливней отмечаются довольно большие ошибки.

Анализ 22 случаев прогноза гроз для указанного района по данным МРЛ показал, что погрешность прогноза начала грозы в подавляющем большинстве случаев составляет 1 ч (17 случаев из 22). Прогноз окончания грозы характеризуется большими погрешностями, которые достигают 1,5—3 ч.

Глава 4

Исследование гроз радиолокационными станциями дециметрового и метрового диапазонов

4.1. Наземные РЛС дециметрового и метрового диапазонов, используемые для получения информации о грозах

Известно, что с помощью радиолокационных станций возможно обнаружение грозовых облаков и разрядов, возникающих в них [81, 102, 146]. Эффективность такого обнаружения зависит от длины волны. В дециметровом диапазоне радиоволн на обна-

ружение грозовых разрядов (ГР) оказывают маскирующее влияние зоны эхо-сигналов облаков с большой отражаемостью. В метровом диапазоне грозовые разряды видны значительно лучше, отражение от грозовых облаков незначительно, хотя их обнаружение не исключено (см. п. 4.4).

В настоящее время не существует радиолокационных станций дециметрового (РЛС_{дм}) и метрового (РЛС_м) диапазонов радиоволн, специально предназначенных для обнаружения грозовых облаков и разрядов, возникающих в них. Для этих целей используются станции обнаружения самолетов и температурно-ветрового зондирования атмосферы (ТВЗА). Естественно, тактико-технические данные таких станций далеко не соответствуют тем, которые необходимы для точного определения, например, координат ГР, установления вертикальной и горизонтальной протяженности каналов молнии. Эти станции нельзя использовать для проведения измерений ЭПР ГР и метеоцелей.

В связи с тем что подробное описание РЛС, используемых для исследования гроз, дается в их технической документации, далее будем рассматривать только изменения, которые необходимо внести в них для того, чтобы они были приемлемы для исследования гроз.

Для исследования грозовых облаков, а также молний в дециметровом и метровом диапазонах радиоволн в нашей стране используются:

— станции температурно-ветрового зондирования «Метеор» и «Метеорит» (подвижный и стационарный варианты соответственно), а также «Метеорит-2» [19, 119];

— станции П-12 и РСП.

Для определения возможности обнаружения грозовых облаков как множественной цели были установлены зависимости $Z_{\min} = \psi(R)$ для каждой РЛС_{дм} и РЛС_м (рис. 4.1). Из рисунка видно, что наиболее приемлемыми для обнаружения грозовых облаков являются РЛС типа «Метеорит-2» и РСП. Несмотря на то что станция «Метеор» уступает этим РЛС, однако, как следует из работы [146], она способна обнаружить грозовые облака в радиусе до 100 км. Гораздо хуже обнаруживаются такие облака РЛС П-12. В [48] показано, что на расстоянии 20 км и более П-12 способна обнаруживать зоны облаков с $Z \geq 10^5$ мм⁶/м³, что соответствует редко наблюдаемому выпадению осадков с $I \geq 50$ мм/ч. Тем не менее в умеренных широтах отмечались случаи, когда при интенсивных грозах эхо-сигналы с большими значениями Z и I , не связанные с разрядами, наблюдались в радиусе около 70 км (см. п. 4.4).

Иная картина складывается при необходимости радиолокационного обнаружения только молний. С помощью станции ТВЗА молнии обнаруживаются весьма редко в связи с маскирующим влиянием эхо-сигналов грозовых облаков. В работе [146] показано, что в диапазоне длин волн таких станций время существования радиоэха молнии не превышает 10 мс. При частоте сле-

дования зондирующих импульсов РЛС ТВЗА 600 Гц можно принять не более шести эхо-сигналов разрядов, что является порогом их обнаружения [37].

Наиболее надежно ГР обнаруживаются при использовании РЛС длинноволнового участка дециметрового и метрового диапазонов радиоволн, в которых работают РЛС соответственно РСП и П-12. Для получения данных, характеризующих отражаемость грозовых облаков и ЭПР каналов молнии, в приемные тракты этих станций дополнительно необходимо ввести калибро-

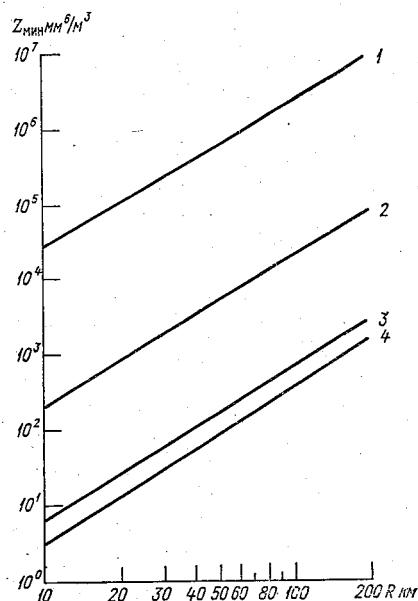


Рис. 4.1. Значения Z_{min} , необходимые для обнаружения грозовых облаков на различных расстояниях.

1 — П-12, 2 — «Метеор», 3 — «Метеорит-2», 4 — РСП.

ванные аттенюаторы. В частности, в РЛС РСП такой аттенюатор устанавливается между лампой бегущей волны и усилителем промежуточной частоты, а в РЛС П-12 — между гониометром и входом приемного тракта станции.

Сопоставление данных о местоположениях молний и величинах их ЭПР может быть правомерно при одновременном излучении зондирующих импульсов этими станциями. Это обеспечивается запуском подмодулятора РЛС П-12 станцией РСП.

Для сопоставления данных, характеризующих местоположение грозовых разрядов в облаках, с полем радиоэха облаков, обнаруживаемых МРЛ, РЛС П-12 должна быть несколько реконструирована:

1. Проведена дискретная задержка с интервалами 50 км импульсов запуска ИКО, ИДВ и типа А. Это обеспечивает фотографирование радиоэха молний на расстояниях до 200 км примерно при 40-километровых масштабах разверток индикаторов станции.

2. Установлены фотокинокамеры, обеспечивающие непрерывную протяжку пленки перед экраном ИКО и ИДВ при горизонтальном положении их разверток. Скорость таких протяжек 10—20 мм/с обеспечивает четкое разделение эхо-сигналов отдельных вспышек молнии.

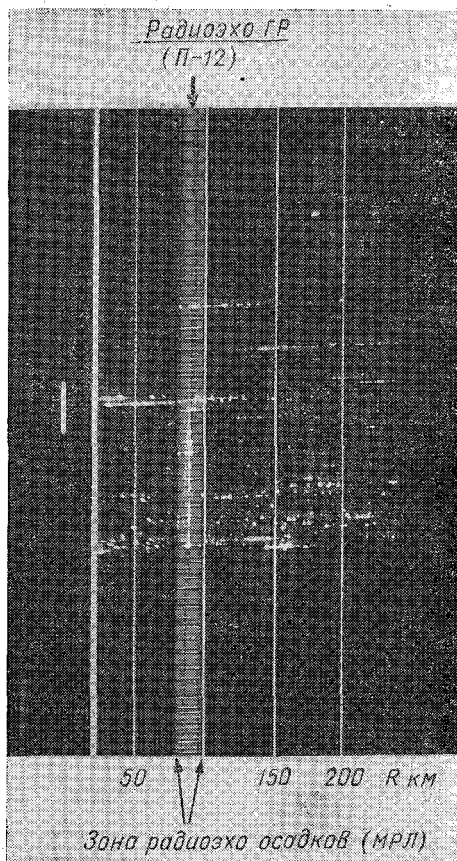


Рис. 4.2. Образец одновременной регистрации эхо-сигналов осадков (МРЛ) и радиозэха ГР (П-12).

3. На индикаторах дальность—высота или кругового обзора станции установлены специальные табло, например со светодиодами, на которые подаются сигналы времени, импульсы срабатывания грозопеленгаторов-дальномеров и другая информация (см. рис. 5.3 и 5.6).

4. Осуществлен запуск П-12 от МРЛ в том случае, когда проводится сопоставление координат эхо-сигналов молнии с радиозэхом зон осадков.

5. При необходимости фотографирования ИКО станции установлена фотокамера типа ФАРМ-2(3).

Аналогично реконструируется и РЛС РСР, за исключением задержки развертки ИКО, предусмотренной в станции.

Для получения достоверных данных, характеризующих расположение ГР относительно зон осадков различной интенсивности, в РЛС П-12 схему индикатора дальность — высота следует несколько изменить. Это изменение сводится к введению в индикатор дополнительного катодного повторителя, на который одновременно подаются эхо-сигналы зон осадков от МРЛ и радиоэха молнии, обнаруживаемых П-12. Таким образом становится возможным при неподвижно установленных на облако антеннах указанных станций проследивать местоположение радиоэха ГР на фоне эхо-сигналов осадков, обнаруживаемых МРЛ (рис. 4.2).

4.2. Вероятность и максимальная дальность обнаружения гидрометеоров и грозовых разрядов

В п. 3.1 была рассмотрена эффективность радиолокационного обнаружения грозовых облаков с помощью МРЛ-1 и РЛС П-35, работающих в сантиметровом диапазоне. Теоретические оценки учитывали обратное рассеяние, обусловленное частицами осадков в указанных облаках, а также отражение от ионизированных каналов молний. В последние годы в нашей стране выяснен ряд особенностей применения РЛС дециметрового и метрового диапазонов для получения информации о грозовых облаках [48, 51, 69, 102].

Оценим сначала возможность обнаружения осадков указанными РЛС. Для этого, как и ранее, воспользуемся основным уравнением радиолокации метеорологических целей (3.1). С помощью этого уравнения, данных табл. 2.3 и технических параметров РЛС РСП и П-12 определим отношение сигнал/шум $P_T/P_{\text{ш}} = q_0$ для различных осадков, выпадающих на разных удалениях от РЛС (табл. 4.1).

Как и следовало ожидать, РСП лучше обнаруживает зоны осадков, чем П-12. Действительно, П-12 может обнаруживать очень сильные дожди ($I > 50$ мм/ч) лишь до расстояний 35—40 км, в то время как РСП — до 150 км, хотя и у нее возможности обнаружения зон осадков значительно хуже, чем у МРЛ-1 и П-35 (см. п. 4.1).

Из грозовых облаков нередко выпадает град, эффективная площадь рассеяния (ЭПР) которого гораздо больше по сравнению с ЭПР даже сильных дождей. Результаты оценок отношения сигнал/шум для града (q_r) и для ионизированных областей ($q_{\text{и}}$) приведены в табл. 4.2.

Из анализа табл. 4.2 следует, что станция РСП может обнаруживать грозо-градовые облака ($q > 1$) до 200 км, в то время как П-12 — только до 70—80 км.

Оценим теоретически радиоклиматическую вероятность W_p обнаружения грозовых облаков с помощью указанных РЛС, пользуясь методикой, предложенной в работе [148].

Таблица 4.1

Отношение q_0 для дождей различной интенсивности

I мм/ч	R км				
	20	50	100	150	200
Станция П-12					
1	$4,3 \cdot 10^{-3}$	$2,6 \cdot 10^{-4}$	$2,6 \cdot 10^{-5}$	$5,3 \cdot 10^{-6}$	$8,2 \cdot 10^{-7}$
5	$6,5 \cdot 10^{-2}$	$5,1 \cdot 10^{-3}$	$6,0 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-5}$
10	$2,0 \cdot 10^{-1}$	$2,6 \cdot 10^{-2}$	$3,2 \cdot 10^{-3}$	$8,3 \cdot 10^{-4}$	$3,0 \cdot 10^{-4}$
50	$2,5 \cdot 10^1$	$4,0 \cdot 10^{-1}$	$4,9 \cdot 10^{-2}$	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$5,0 \cdot 10^{-3}$
100	$7,5 \cdot 10^1$	1,2	$1,5 \cdot 10^{-1}$	$3,9 \cdot 10^{-2}$	$1,5 \cdot 10^{-2}$
Станция РСП					
1	1,0	$6,0 \cdot 10^{-2}$	$6,5 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-4}$
5	4,0	$6,3 \cdot 10^{-1}$	$7,7 \cdot 10^{-2}$	$2,2 \cdot 10^{-2}$	$7,2 \cdot 10^{-3}$
10	$1,3 \cdot 10^1$	1,4	$1,5 \cdot 10^{-1}$	$3,5 \cdot 10^{-2}$	$1,1 \cdot 10^{-2}$
50	$5,3 \cdot 10^2$	$8,1 \cdot 10^1$	$1,2 \cdot 10^1$	3,5	1,3

Таблица 4.2

Значения q_r и q_n

РЛС	Величина	R км				
		20	50	100	150	200
РСП	q_r	$4 \cdot 10^4$	$2,9 \cdot 10^3$	$2,6 \cdot 10^2$	$5,3 \cdot 10^1$	8,4
П-12	q_r	$1,5 \cdot 10^2$	9,6	1,0	$2,1 \cdot 10^{-1}$	$3,2 \cdot 10^{-2}$
	q_n	$1,6 \cdot 10^1$	$2,5 \cdot 10^{-1}$	$3,0 \cdot 10^{-2}$	$8 \cdot 10^{-3}$	$3,1 \cdot 10^{-3}$

Согласно этой методике,

$$W_p = \int_{Z_{\min}}^{Z_{\max}} P(Z) dZ - \int_0^{Z_{\max}} P(Z) dZ, \quad (4.1)$$

где $Z_{\max}$ — максимальное значение радиолокационной отражаемости грозowych облаков; $Z_{\min}$ — минимальное значение отражаемости грозowych облаков; $Z_{\min}^0$ — минимальное значение обнаруживаемой отражаемости для данного расстояния R , зависящее от типа РЛС, геометрических размеров метеоцели и условий распространения радиоволн.

Если положить первый интеграл равным единице, то второй будет характеризовать повторяемость необнаруженных метеоцелей на расстояниях $R \geq R_{\max}$. Пользуясь данными табл. 4.1 и 3.8, можно рассчитать значение $Z_{\min}(R)$. Расчетные значения $W_p(R)$ представлены в табл. 4.3.

Таблица 4.3

Вероятность обнаружения гидрометеоров в грозовых облаках

РЛС	R км				
	0—20	21—50	51—100	101—150	151—200
РСР	0,85	0,61	0,41	0,15	0,02
П-12	0,21	0,15	0,02	0,00	0,00

Данные табл. 4.3 свидетельствуют о весьма низкой вероятности обнаружения гидрометеоров в грозовых облаках с помощью указанных РЛС по сравнению с МРЛ, это особенно касается П-12.

Представляет интерес сопоставить возможности обнаружения зон коронных разрядов, существующих между гидрометеорами в грозовых облаках. С этой целью были рассчитаны отношения q_k для случая, когда использовался радиолокатор П-12. Сравнение величин q_0 , q_T и q_k показывает, что области коронирования могут обнаруживаться лишь до расстояний 20—30 км, т. е. так же, как дожди с интенсивностью $I \geq 50$ мм/ч. Мириады коронных разрядов, существующие в определенных частях кучево-дождевых облаков, по-видимому, создают переплетение кистевых разрядов, которые, повторяясь, могут образовывать зоны, существующие довольно продолжительное время, исчисляемое единицами и десятками минут. За это время происходит спорадическое распространение части кистевых разрядов на значительную область, которая в конце концов превращается в ступенчатый лидер с электронной концентрацией, равной примерно 10^{19} м⁻³. Время существования таких лидеров составляет десятитысячные и сотые доли секунды, их ЭПР, так же как и главных разрядов, можно определить по методу, изложенному в п. 4.4. По-видимому, такая особенность развития грозовых процессов и объясняет предгрозовое излучение, наблюдаемое авторами работы [80].

При теоретических оценках возможности радиолокационного обнаружения молнии с помощью РСР и П-12 воспользуемся также отношением сигнал/шум:

$$q_m = \frac{P_m}{m_1 P_{ш} + m_2 P_0 + m_3 P_k} \quad (4.2)$$

В отличие от соотношения (3.2), в (4.2) фигурирует собственное радиоизлучение ионизированного канала молний P_k , которое в метровом диапазоне волн может значительно превышать мощность собственных шумов приемника РЛС (см. п. 4.4). Для расчетов берутся те же исходные данные, что и при расчете табл. 4.1. В итоге были получены значения q_m для станций РСР и П-12 в функции времени, расстояния и интенсивности экранирующих молнию осадков (табл. 4.4).

Таблица 4.4

Отношение q_m при радиолокации молний в осадках различной интенсивности на расстоянии $R_1=50$ км и $R_2=100$ км

I мм/ч	t с	РСП		П-12	
		R_1	R_2	R_1	R_2
10	0	50	100	1350	1100
	0,06	0,3	0,6	18	1,8
50	0	36	85	1350	1100
	0,06	0,2	0,6	18	1,8

Из анализа табл. 4.4 видно, что в первоначальный момент времени ($t=0$) значение q_m значительно больше единицы; это обеспечивает уверенное обнаружение молний обеими РЛС. Однако в дальнейшем заметным становится некоторое преимущество П-12, обеспечивающее большее время наблюдения эхосигналов молний по сравнению с РСП главным образом за счет меньшего влияния осадков, экранирующих молнии, и более слабой зависимости ЭПР молний от времени в метровом диапазоне по сравнению с дециметровым.

4.3. Точность определения координат грозовых разрядов с помощью РЛС

В связи с тем, что данные РЛС_{дм} и РЛС_м о местоположении ГР сопоставляются с полем радиоэха грозовых облаков, наблюдаемых на экранах РЛС сантиметрового диапазона радиоволн, представляет интерес рассмотреть, с какой точностью устанавливаются координаты эхосигналов молний. Так как в экспериментальных исследованиях используются РЛС П-12 и РСП, проведем такой анализ применительно к этим станциям.

Точность определения местоположения любой цели, в том числе и ГР, зависит от ошибок применяемого радиолокационного метода в целом и ошибок измерений, обусловливаемых тактико-техническими данными используемых РЛС, особенно их индикаторов. Подробно такие зависимости рассмотрены в работе [133]. В целом точность определения координат ГР зависит от ошибок определения расстояния и азимута. Возможность раздельного обнаружения разрядов обусловливается как разрешающей способностью по дальности, так и разрешающей способностью РЛС в азимутальной плоскости. Рассмотрим перечисленные зависимости раздельно.

4.3.1. Точность определения расстояния до молнии. На точность определения расстояния до молнии влияют следующие факторы:

1. Отличие реальной скорости распространения радиоволн от их скорости в стандартной атмосфере. Это приводит к тому, что на предельной дальности обнаружения молний $R \approx 200$ км будет иметь место максимальное завышение расстояния на $\Delta R_c \approx 200$ м [133].

2. Возможное несоответствие полосы пропускания приемного тракта РЛС длительности зондирующего импульса, приводящее к изменению крутизны переднего фронта видеосигнала (затяжки фронта) и, следовательно, к запаздыванию регистрации эхо-сигнала на время t_3 . Из работы [133] следует, что у РЛС П-12 $t_3 \approx 2$ мкс. Это приводит к ошибке определения расстояния $\Delta R_3 \approx 300$ м.

3. Предельная точность используемого индикатора РЛС. Она зависит от ошибок измерения расстояния по элементарной отметке, а также от ошибок отсчета, обусловливаемых формой и размерами реальной цели. Размер элементарной отметки определяется диаметром светового пятна ЭЛТ, который зависит от качества фокусировки электронного луча и обычно пропорционален диаметру экрана [133].

Из сказанного следует, что ошибки в определении расстояния до молнии за счет использования реальной скорости распространения радиоволны и несоответствия полосы пропускания приемного тракта длительности зондирующего импульса невелики. Рассмотрим далее ошибки в определении расстояния до молнии, обусловленные предельной точностью индикаторного устройства.

Применительно к индикаторам типа А, имеющимся в РЛС П-12 и РСП, ошибки измерения расстояния до молнии зависят от крутизны фронта эхо-сигнала и от уровня собственных шумов приемника на его выходе, т. е. от отношения $U_c/U_{ш}$. Если воспользоваться расчетами, приведенными в работе [133], то нетрудно определить, что ошибка при измерении расстояния индикатором типа А станции П-12 при масштабе его экрана 50 км и $U_c/U_{ш} = 2$ не превышает 370 м. При измерении индикатором кругового обзора ошибка зависит, кроме того, от конечных размеров светового пятна. Учитывая все факторы, влияющие на точность определения дальности цели, были проведены расчеты, рекомендуемые [133], с учетом параметров станций П-12 и РСП, приведенных в табл. 4.5.

Результаты расчетов при $U_c/U_{ш} = 2$ и $U_c/U_{ш} = 10$, позволяющие оценить ошибки измерения расстояния до молнии $\Delta R_{общ}$ с помощью индикатора типа А, представлены в табл. 4.6.

Из табл. 4.6 видно, что при увеличении $U_c/U_{ш}$ точность определения расстояния до молнии по индикатору типа А увеличивается. С меньшей погрешностью R устанавливает РЛС РСП. Обе станции наиболее точно определяют расстояние до ГР при масштабе индикаторов типа А, равном 0—50 км. Можно отметить, что $\Delta R_{общ}$ при определении расстояния до молнии по ИКО наиболее приемлемой для этой цели РЛС П-12 на масштабе 0—100 км не превысит 250 м.

Таблица 4.5

Некоторые параметры РЛС П-12 и РСП

РЛС	Параметры			Тип индикатора	Длина развертки, мм	Диаметр пятна, мм
	τ мкс	Δf кГц	θ_r°			
П-12	6	300	11	А	120	0,6
				ИКО	130	0,65
РСП	2,1	830	4	А	120	0,6
				ИКО	120	0,6

Таблица 4.6

Ошибки измерения расстояния (метры) по индикаторам типа А РЛС П-12 и РСП

РЛС	$\frac{U_c}{U_{ш}}$	Масштаб индикатора, км			
		0—50	0—100	0—150	0—200
П-12	2	373	498	623	748
	10	175	300	425	550
РСП	2	215	340	465	590
	10	143	268	393	518

Кроме вышеизложенных факторов, при определении точности измерения расстояния необходимо учитывать ошибки интерполяции, возникающие при отсчетах в промежутках между электронными масштабными метками и равные $1/10$ расстояния между ними. Так как в используемых нами РЛС метки следуют через 10 км, то ошибки интерполяции достигают 1 км. Следует отметить, что РЛС П-12 и РСП при максимальном удалении молний (200 км) с учетом интерполяции позволяют измерить расстояние до них с точностью примерно 1,5—1,8 км. Однако в тех случаях, когда грозовые облака находятся на $R \leq 100$ км и сильноточные разряды сопровождаются интенсивным электромагнитным излучением в диапазоне частот РЛС, $\Delta R_{\text{общ}}$ может превышать 1,8 км. Такое излучение, превышающее собственные шумы приемного тракта РЛ П-12 в 5—10 раз и более, принимается при расположении ГР на $R \leq 100$ км. Если $R > 100$ км влиянием ЭМИ ГР на $\Delta R_{\text{общ}}$ можно пренебречь. Заметим, что изменение цены масштабных меток может привести к увеличению точности отсчета. Но так как размеры эхо-сигналов молнии значительно больше 1 км и расположение эффективного центра излучения разрядов как в поле радиоэха молнии, так и непосредственно молнии пока не установлено, дальнейшее повышение точности определения расстояния до радиоэха молнии, особенно

при сопоставлениях с значительно большими размерами грозовых облаков, обнаруживаемыми РЛС_{см}, пока не является крайней необходимостью.

4.3.2. Разрешающая способность по дальности. Известно, что разрешающая способность по дальности (ΔR_d) характеризуется возможностью раздельного наблюдения по одному азимуту двух точечных целей на индикаторах РЛС и зависит от длительности зондирующего импульса, времени роста и спада сигнала, а также от времени перемещения луча на расстояние, равное диаметру рисуемого пятна. Оценить значение ΔR_d можно с помощью формул, представленных в работе [133]. Рассчитанные значения разрешающей способности по дальности для РЛС П-12 и РСР приведены в табл. 4.7.

Таблица 4.7

Разрешающие способности П-12 и РСР по дальности в зависимости от масштабов ИКО

РЛС	Масштаб индикатора, км			
	0—50	0—100	0—150	0—200
П-12	1650	1900	2150	2400
РСР	745	995	1245	1495

Из табл. 4.7 видно, что в целях улучшения разрешающей способности по дальности предпочтительно проводить наблюдения при малых масштабах индикаторов. В связи с этим в РЛС П-12 был введен специальный блок, задерживающий запуск развертки индикаторов. В качестве блока задержки импульсов запуска развертки на 50, 100 и 150 км могут быть использованы выпускаемые промышленностью генераторы прямоугольных импульсов, например типа МГИ-15. Одновременная задержка разверток индикаторов ИДВ, ИКО и типа А обеспечивает проведение наблюдений за молниями на масштабе 0—50 км в радиусе 200 км. Таким образом, не только повышается разрешающая способность станции по дальности, но и уменьшается значение рассмотренной выше величины $\Delta R_{\text{общ}}$.

4.3.3. Точность определения угловых координат и разрешающая способность РЛС П-12 и РСР по азимуту. При обнаружении молнии РЛС ее азимут устанавливают на основе метода максимума, т. е. направление на объект определяется по наибольшему значению амплитуды радиоэха, имеющему место при совмещении оси диаграммы направленности антенны с направлением на цель. При этом пеленг объекта проходит через вершину главного лепестка диаграммы направленности антенны, где интенсивность радиоэха максимальна, а пеленгационная чувствительность прак-

тически равна нулю. Последнее обуславливает в некоторых случаях недостаточную точность определения угловых координат цели.

Как следует из [133], оператор может визуально зафиксировать уменьшение максимальной амплитуды радиоэха, если она изменится не менее, чем на 10 %. В этом случае максимальная ошибка в определении азимута цели $\Delta\theta_{\text{макс}}$ составляет $0,25\theta_r$, где θ_r — ширина (в градусах) диаграммы направленности антенны в горизонтальной плоскости. Для анализируемых РЛС значения θ_r приведены в табл. 4.5.

Определение азимута таким способом предполагает наличие цели, эхо-сигналы которой закономерно изменяются по амплитуде при вращении антенны РЛС. Радиоэхо молнии представляет собой кратковременный (до 600 мс) сигнал, значительно флуктуирующий в зависимости от числа повторных ГР во вспышке молнии. Это ограничивает использование метода максимума для определения азимутального положения молнии. Поэтому отсчет угловых координат молнии целесообразно производить, когда антенна стоит на определенном азимуте с погрешностью, определяемой ошибками измерения угловых координат элементарной отметки и изображения реальной цели. Не останавливаясь на анализе указанных ошибок, подробно изложенных в [133], приведем значения максимальных ошибок определения угловых координат молний (при неподвижной антенне) в зависимости от R (табл. 4.8).

Таблица 4.8

Значения $\Delta\theta_r$ для РЛС П-12 и РСП (градусы)

Масштаб индикатора, км	РЛС	R км				
		25	50	100	150	200
0—100	П-12	6,28	6,28	6,15	—	—
	РСП	3,08	2,78	2,65	—	—
0—200	П-12	7,15	6,58	6,28	6,19	6,15
	РСП	3,65	3,08	2,78	2,69	2,65

Приведенные в табл. 4.8 значения $\Delta\theta_r$ вполне сопоставимы с азимутальными ошибками автоматических газопеленгаторов-дальномеров. Если антенна РЛС П-12 установлена неподвижно на наиболее грозоактивную часть облака, большая часть пеленгов АГПД располагается в секторе $\theta_n \pm \Delta\theta_r$, где θ_n — азимут неподвижной антенны РЛС П-12, направленной на исследуемое облако.

Из табл. 4.8 видно, что станция РСП позволяет определять направление на цель примерно в 2 раза точнее. При необходимости установления грозоактивной части радиоэха облака, обнару-

живаемого с помощью, например, МРЛ-1, более достоверны данные РСП.

Разрешающая способность РЛС в азимутальной плоскости определяется тем минимальным углом, при котором два точечных объекта еще могут быть видны на экране отдельно, т. е. шириной луча РЛС и размером электронной отметки на данном расстоянии. По мере приближения отметки к центру экрана разрешающая способность по углу места ухудшается [133]. Значения разрешающих способностей по азимуту для РЛС П-12 и РСП приведены в табл. 4.9.

Таблица 4.9

Угловая разрешающая способность по азимуту РЛС при различных R

РЛС	θ°	R км				
		25	50	100	150	200
П-12	11	14,5	12,7	11,9	11,6	11,4
РСП	4	7,5	5,7	4,9	4,6	4,4

Данные, приведенные в табл. 4.9, позволяют оценить разрешающую способность по азимуту L_p и по площади S_p (табл. 4.10).

Таблица 4.10

Значения L_p и S_p РЛС П-12 и РСП при различных R

R км	П-12		РСП	
	L_p км	S_p км ²	L_p км	S_p км ²
25	6,3	—	3,2	—
50	11,1	18,3	4,9	3,7
100	20,8	39,3	8,5	8,4
150	30,2	65,0	11,9	14,8
200	39,8	95,5	15,4	23,1

Проведенные оценки точности определения угловых координат и разрешающей способности РЛС П-12 и РСП по азимуту показывают, что ошибки в определении угловых координат тем меньше, чем ближе расположена цель, а разрешающая способность станции в азимутальной плоскости возрастает по мере удаления отражающего объекта.

Из сказанного следует, что в зависимости от поставленной задачи при обработке данных наблюдений целесообразно проводить разграничение обнаруженных радиолокатором молний на ближние и дальние.

Наибольшее количество грозových разрядов в облаке можно обнаружить при одновременных наблюдениях станциями П-12 и

РСП (см. п. 4.4). Одновременная работа станций дает и другое преимущество. Исследования, выполненные А. Ф. Гончаром [63], показали, что при работе двух РЛС, одна из которых находится в круговом режиме обзора, а другая установлена неподвижно на грозовой очаг, можно добиться значительного улучшения точности определения азимута молнии (с ошибкой $\pm 1^\circ$).

В табл. 4.10 следует обратить внимание на относительно невысокие значения S_p . Это необходимо учитывать при сопоставлении данных П-12 и РСП с результатами наблюдений МРЛ. В настоящее время по косвенным радиолокационным критериям (для МРЛ-1) грозы фиксируются в ячейках размером 15×15 км ($S_1 = 225$ км²) и 30×30 км ($S_2 = 900$ км²) [122]. При сопоставлении значений разрешающей способности S_p , приведенных в табл. 4.10, с S_1 и S_2 видно преимущество использования РЛС П-12 и РСП для определения электрически активных зон в поле радиоэха грозowych облаков, площадь которых, в среднем составляет 100 км² [95].

В заключение следует отметить, что повышению точности радиолокационного определения местоположения ГР способствовало бы разграничение сильноточных вертикальных каналов молнии типа облако—земля и других разрядов иных ориентаций в пространстве. По-видимому, этого можно достичь при использовании РЛС_м и РЛС_{дм} со сканирующими узконаправленными антеннами, позволяющими оценить ориентацию ионизированных каналов молний в пространстве.

4.4. Результаты исследования грозowych облаков и разрядов

4.4.1. Методы радиолокационного исследования грозowych облаков и разрядов. Известны многочисленные работы по радиолокационному исследованию грозowych облаков в сантиметровом диапазоне радиоволн — в диапазоне, где, как правило, не обнаруживаются грозowe разряды (ГР). В этих работах принадлежность облака к грозovому устанавливалась на основе сопоставления параметров их радиоэха с данными о грозах, зафиксированных метеорологических станциями неинструментальными способами. При таком сопоставлении отсутствовала четкая временная синхронизация наблюдений, позволяющая определить изменение параметров радиоэха облаков до появления в них ГР и после их прекращения. Невозможно было также установить изменение параметров эхо-сигналов грозowych облаков в зависимости от изменения числа разрядов в них. Несмотря на это, при многочисленных сопоставлениях радиоэха гроз с данными метеостанций установлен ряд радиолокационных параметров, характеризующих грозowe облака в их активной стадии [59, 125], что позволило разработать косвенные критерии определения гроз, широко используемые сетью МРЛ-1 (2) в оперативной работе при метеообеспечении, например, авиации [122].

В последнее десятилетие значительно возросла интенсивность полетов самолетов. В связи с этим появилась необходимость получения данных о возможном переходе облака в грозовое состояние. Возрос также интерес к определению электрических параметров грозо-градовых облаков в процессе воздействий на них. Все это потребовало исследования грозовых облаков на различных стадиях их эволюции (развитие, зрелая стадия, распад).

Для получения указанных данных возникла необходимость усовершенствования метода исследования грозовых облаков таким образом, чтобы наряду с радиолокационными наблюдениями в сантиметровом диапазоне осуществлялось также обнаружение и определение местоположения в этих облаках грозовых разрядов.

1. Метод исследования грозовых облаков на основе совместного использования наземных МРЛ и грозопеленгатора. Для исследования облаков этим методом был разработан специальный грозопеленгатор, обеспечивающий автоматическое совмещение радиоэха облаков на экране наземной метеорологической РЛС (НМРЛС) с пеленгами на грозовые разряды. Это достигается путем сопряжения моноимпульсного автоматического радиопеленгатора сверхдлинноволнового диапазона (МАРП СДВ) [41, 52] с РЛС МРЛ-1, у которой ИКО имеет неподвижную систему формирования радиальной развертки. Если разрывать развертку ИКО РЛС на время Δt_p , в течение которого в азимутальной плоскости она перемещается примерно на 1° , и в этот промежуток времени Δt_p подавать пеленг с МАРП СДВ, то на ИКО МРЛ-1 разрывы радиальной развертки не будут прослеживаться. Построенное на этом принципе устройство, разработанное авторами совместно с Я. Л. Кильбергом и Ф. И. Бурдаковым, позволило вывести однозначный пеленг ГР МАРП СДВ (рис. 4.3) на ИКО МРЛ-1 (рис. 4.4) в режиме кругового обзора станции, имеющей антенну со скоростью вращения 6 оборотов в 1 мин. При этом $\Delta t_p \approx 28$ мс. Необходимость совмещения эхо-сигналов МРЛ и пеленга ГР возникла еще и в связи с тем, что грозопеленгатор не позволял установить удаление грозового облака. Расстояние до грозового очага в этом случае определяется по ИКО МРЛ [40]. Ограничение радиуса действия грозопеленгатора достигается с помощью амплитудного селектора. Учитывая, что интенсивность излучения молний от одного грозового облака значительно меняется от разряда к разряду, эффективность амплитудной селекции не слишком высока. Несмотря на это, совместная работа МРЛ и грозопеленгатора позволяет получить полезную информацию об эволюции облаков и проводить разграничение их радиоэха на грозовые и ливневые, если рассматривать в процессе обработки данных только следующие случаи:

1) грозовые облака находятся в радиусе обнаружения МРЛ, за пределами этого радиуса грозы отсутствуют. Это устанавливается по кольцевым картам погоды, ежечасным наблюдениям, штормовым предупреждениям и снимкам облачных полей, полу-

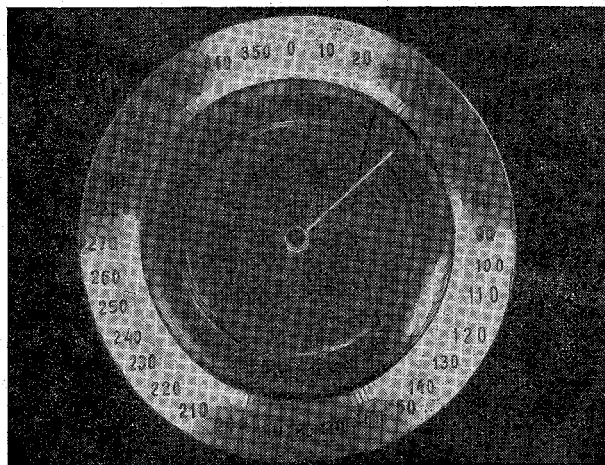


Рис. 4.3. Пеленг ГР на экране МАРП СДВ.

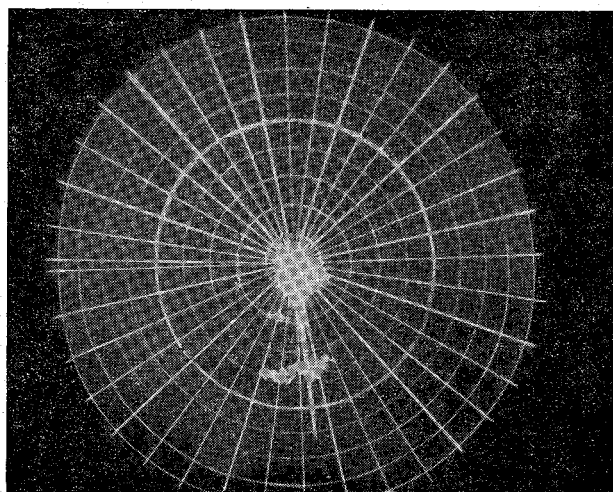


Рис. 4.4. Совмещение пеленга ГР с эхо-сигналом облака.

чаемым с помощью ИСЗ. Целесообразно при этом проводить наблюдения в сроки, близкие к основным синоптическим (0, 3, 6 ч и т. д.); -

2) на одном азимуте присутствует одиночный грозовой очаг. Если на азимуте молнии находятся два очага, то принадлежность каждого из них к грозовым можно установить либо через некоторый интервал времени, когда эти очаги сместятся с одного азимута, либо посредством анализа параметров их радиоэха (высота, отражаемость) в соответствии с косвенными критериями.

Этот метод позволяет проводить исследования грозовых облаков более качественно, чем сопоставление радиолокационной информации с данными метеостанций, при любых погодных условиях.

Фотографии, сделанные при исследовании грозовых облаков 12.06.71 г. на основе метода совместного использования РЛС П-35, ПРВ-10 и грозопеленгатора МАРП СДВ, приведены на рис. 4.5. Основываясь на показаниях МАРП СДВ, неоднократно указывающего азимуты разрядов в секторе $180-200^\circ$, можно утверждать, что облако, удаленное на $R \approx 100$ км, является грозовым.

При активно-пассивной методике исследования грозовых облаков можно не использовать визуально-слуховые наблюдения метеостанции для анализа радиоэха облаков, обнаруживаемых различными РЛС. Такая методика более достоверно классифицирует эхо-сигналы облаков на грозовые и ливневые. Она способствует началу исследований параметров электромагнитного излучения атмосферных разрядов в тех случаях, когда грозовые облака находятся в радиусе их радиолокационно-пеленгационного обнаружения.

Несмотря на перечисленные выше положительные стороны, эта методика обладает существенным недостатком, не позволившим широко использовать ее в оперативной работе метеослужбы. Таким недостатком является амплитудная селекция атмосфериков по дальности. Этот недостаток был устранен Т. В. Лободиныным путем введения в МАРП СДВ ограничителя дальности с двумя порогами, равными примерно 200 и 400 км [97]. Если грозопеленгатор принимает сигналы на частоте 7 кГц, то ограничитель дальности — примерно на 60 кГц. Только при совпадении двух сигналов на экране пеленгатора появляется направление на атмосферный разряд. Грозопеленгатор с ограничителем дальности ПАГ-1 (пеленгатор автоматический гроз) выпускается серийно и в настоящее время входит в комплект МРЛ-1.

Наблюдения за грозами, проведенные одновременно МРЛ-1 и ПАГ-1, позволили установить, что автоматический вывод пеленга на экран метеорадиолокатора нецелесообразен по двум причинам:

1) при интенсивных грозах на экране ИКО МРЛ-1 появляются частые пеленги на любом масштабе дальности (0—25,

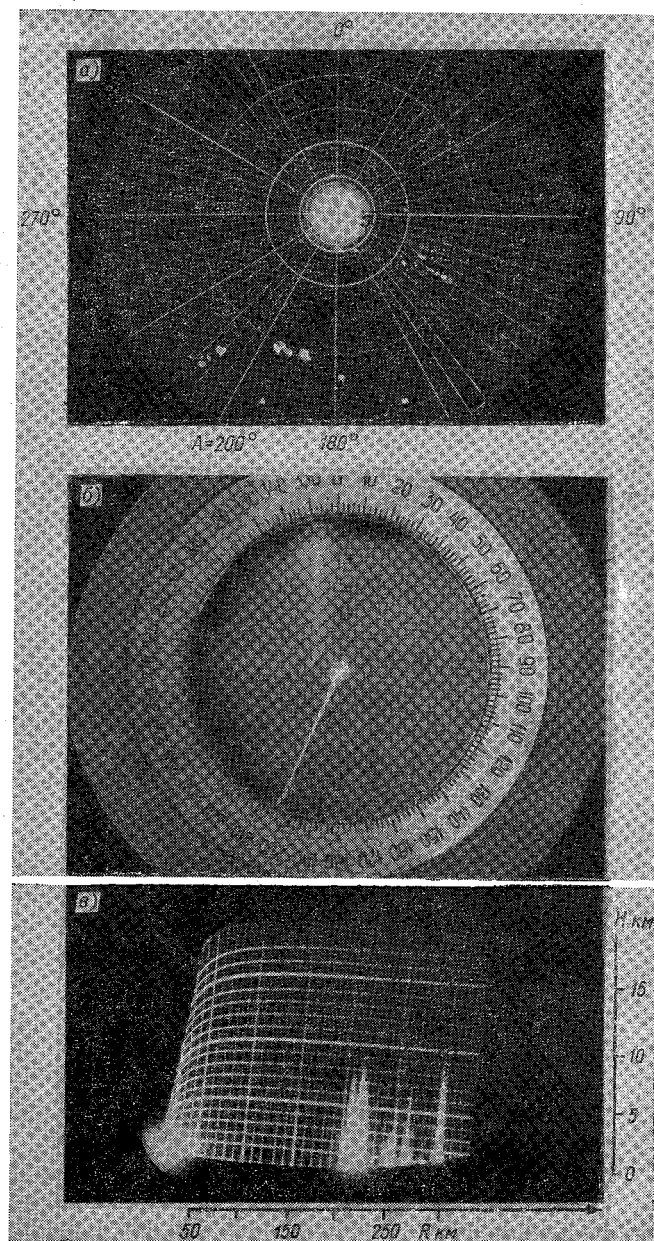


Рис. 4.5. Распознавание грозового облака с помощью РЛС и пеленгатора,
а — ИКО станции П-35, масштаб 350 км, грозовое облако по азимуту 200°; *б* — экран грозо-
 пеленгатора, пеленг по $A=202^\circ$; *в* — ИДВ станции ПРВ-10, масштаб 380 км.

0—100 и 0—300 км), что затрудняет проведение анализа параметров радиоэха облаков;

2) поскольку пеленги разрядов автоматически выводятся на ИКО МРЛ-1, то они появляются на экране индикатора и тогда, когда угол места антенны не позволяет обнаруживать облака. Особенно часто такие случаи имеют место, когда проводится анализ параметров радиоэха грозовых облаков, удаленных на расстояние 100 км.

Разработанный Ф. И. Бурдаковым автономный индикатор к грозопеленгатору ПАГ-1 с памятью до 30 мин позволил успешнее его использовать в оперативной работе.

2. Метод исследования грозовых облаков на основе совместного использования НМРЛ и РЛС обнаружения молнии. В п. 2.4 было показано, что с помощью радиолокационных станций возможно обнаруживать ионизированные каналы молнии. Использование в этих целях, например, РЛС П-12, работающей в метровом диапазоне радиоволн, обеспечивает более детальное исследование грозовых облаков, ибо станция позволяет установить координаты вспышки атмосферных разрядов как при круговом обзоре, так и более успешно при неподвижном установлении антенны станции в направлении на грозовой очаг. На рис. 4.6—4.8 приведены изображения эхо-сигналов молний на различных экранах РЛС П-12. Здесь шумовые сектора — собственное электромагнитное излучение молнии. Видно, что ионизированные каналы молнии хорошо прослеживаются на экранах станции.

Координаты молнии, установленные с помощью радиолокаторов, используются при решении целого ряда задач:

1) исследование изменений параметров радиоэха грозовых облаков, обнаруживаемых метеоррадиолокатором, до появления в них сильноточных атмосферных разрядов, в период их электрической активности и после прекращения разрядов;

2) определение параметров ЭМИ ГР;

3) проверка существующих и вновь разрабатываемых грозопеленгаторов-дальномеров;

4) определение параметров эхо-сигналов ионизированных каналов молний и сопоставление их с данными, полученными с помощью других дистанционных средств обнаружения молний;

5) совершенствование радиолокационно-пеленгационных методов исследования грозовых облаков.

В связи с тем, что методика исследования грозовых облаков одновременно с помощью радиолокаторов сантиметрового (РЛС_{см}) и метрового (РЛС_м) диапазонов в последнее время стала наиболее распространенной, остановимся на ней подробнее.

При совместном использовании этих станций для исследования грозовых облаков наблюдения проводятся последовательно в два этапа.

Первый этап — метеорологическое обеспечение исследований, которое завершается составлением суточного прогноза гроз.

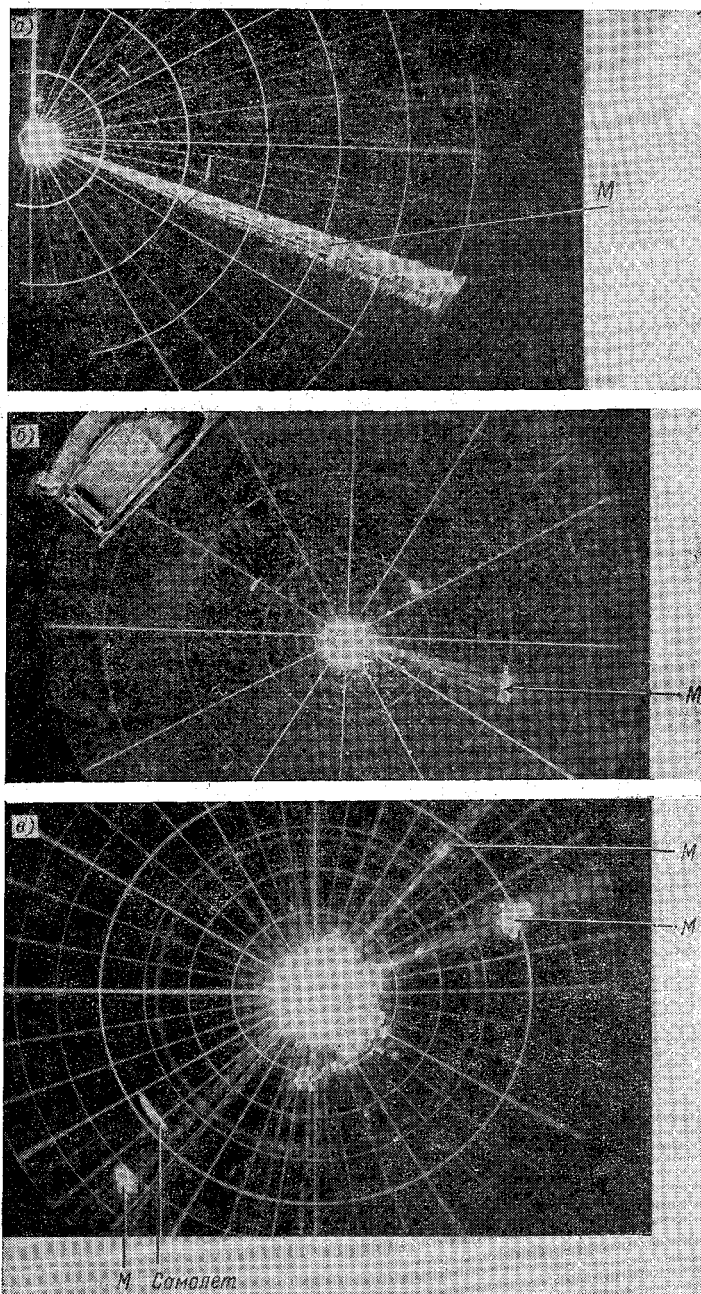


Рис. 4.6. Изображение радиоэха молнии (М) на ИКО РЛС П-12.

a — масштаб 300 км, метки дальности через 50 км, радиоэхо молнии $A=110^\circ$ на $R=215$ км в шумовом секторе ЭМИ разряда; *b* — радиоэхо молнии на $R=100$ км (метки дальности через 50 км); *c* — три вспышки молний, обнаруженные одновременно на атмосферном фронте при одном обороте антенны РЛС П-12 ($A=42^\circ$, $R=45$ км; $A=70^\circ$, $R=46 \div 54$ км; $A=225^\circ$, $R=60 \div 65$ км).

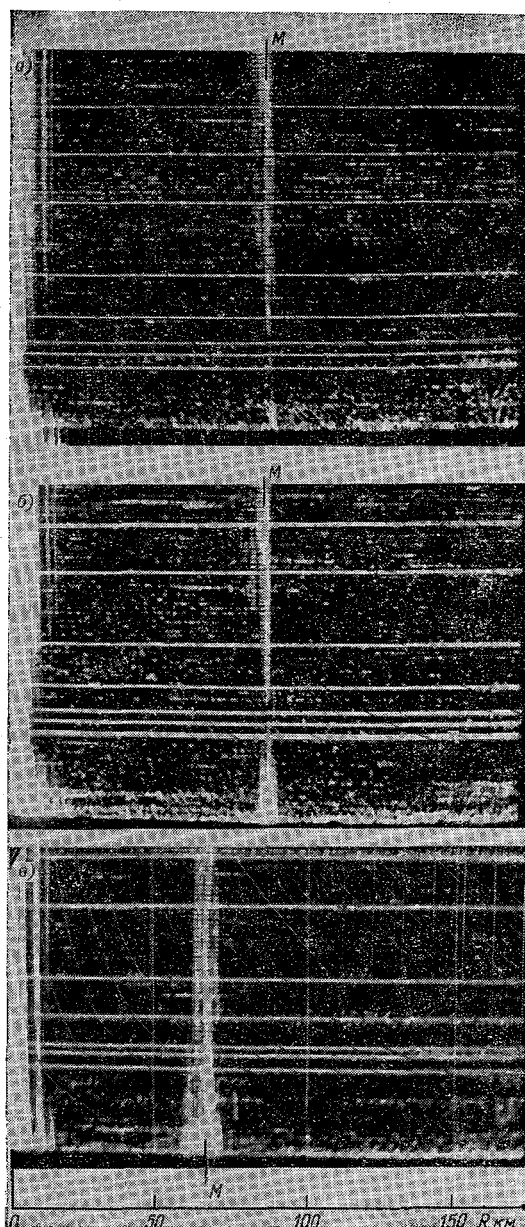


Рис. 4.7. Разновидности радиоэха молний (M) на ИДВ РЛС П-12 при $R = 60 \div 70$ км.

Второй — подготовка РТС к наблюдениям и проведение исследований грозных очагов. Такой подход вполне естествен, ибо ежедневная одновременная работа радиолокаторов различных диапазонов радиоволн, приборов приема ЭМИ грозных разрядов, а также большого комплекса регистрирующей аппаратуры (кинофотокамеры, самописцы, магнитофоны и т. п.) является весьма трудоемкой.

Метеорологическое обеспечение сводится к тому, что на основе суточного прогноза, обычно составляемого ежедневно к 18 ч, и дальнейшего его уточнения по мере поступления фактических данных о погоде, а также периодического включения МРЛ определяется время целесообразного включения РТС наблюдения за грозами.

На втором этапе исследований, когда по прогнозу предполагается грозное положение в радиусе 200 км (наиболее вероятный радиус обнаружения ГР радиолокаторами), наблюдения начинаются с обзора пространства станцией МРЛ под различными углами места антенны.

С момента обнаружения радиоэха метеорообразований на экране МРЛ-1 осуществляются непрерывные наблюдения на высоте появления радиоэха облаков H_1 , а далее, по мере развития облаков, выше, и ниже H_1 , дискретно через 1,5—2 км. Каждый горизонтальный или вертикальный обзор сопровождается фотографированием экранов станции при последовательном введении затухания

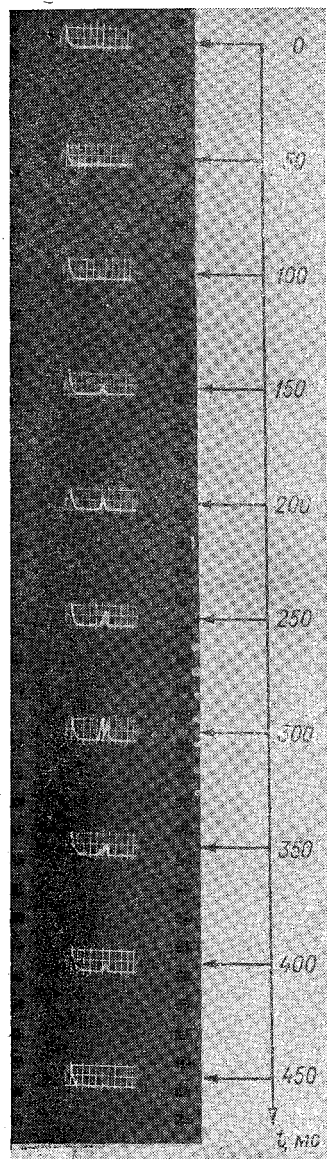


Рис. 4.8. Радиоэхо молнии на экране индикатора типа А РЛС П-12 при скорости фотографирования 20 кадров в 1 с (в начале развертки — местные предметы).

в ее приемный тракт через 5 или 10 дБ с помощью плавного аттенюатора, подключаемого между предварительным и основным усилителями промежуточной частоты [44]. Это обеспечивает более достоверное определение $Z_{\max}$ по сравнению с дискретным атте-

нюатором (через 6 дБ), имеющимся в МРЛ-1. В том случае, когда параметры радиоэха исследуемого облака по мере его развития достигают предгрозовых значений, в направлении этого облака неподвижно устанавливается антенна РЛС_м П-12. В умеренных широтах в июне—августе предгрозовые параметры радиоэха в большинстве случаев имеют следующие значения: максимальная отражаемость близка к 10^2 мм⁶/м³ и высота радиоэха молнии превышает 7 км.

При переходе облака в грозовое состояние, т. е. когда в нем обнаруживаются разряды, РЛС П-12 определяет их местопо-

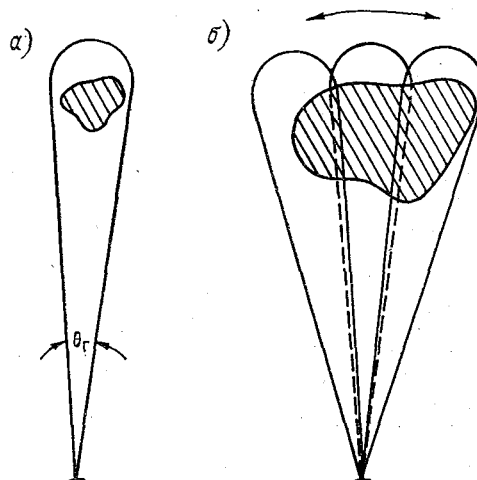


Рис. 4.9. Режимы наблюдений станции П-12 при размерах зоны радиоэха грозового облака меньше θ_r (а) и больше θ_r (б).

жение. Весь цикл проведения наблюдений с помощью РЛС_{см} одновременно с РЛС_м показан на рис. 5.2 а, где индексами (*) обозначены местоположения ГР (по показаниям П-12) в зонах эхо-сигналов облаков, полученных при различных затуханиях n , вводимых в приемный тракт РЛС МРЛ-1.

В связи с тем что ширина диаграммы направленности антенны РЛС П-12 в горизонтальной плоскости составляет 11—12°, режим наблюдений за грозовыми облаками с помощью этой станции определяется геометрическими размерами эхо-сигналов облаков в этой же плоскости. При исследовании грозовых облаков РЛС_м работает в основном в двух режимах обзора пространства. Если размер радиоэха облака на экране РЛС_{см} меньше или соизмерим с шириной диаграммы направленности антенны РЛС_м (θ_r) (рис. 4.9 а), то антенна П-12 устанавливается неподвижно в направлении на очаг. В этом режиме антенна РЛС_м должна синхронно следовать за перемещающимся облаком. Наиболее часто такой режим используется при исследовании внутримассовых облаков.

В случае когда размеры радиоэха облаков значительно больше ширины диаграммы направленности (θ_r) антенны П-12

в горизонтальной плоскости, она работает во втором режиме, предусматривающем последовательное перемещение антенны в азимутальной плоскости на угол примерно θ_r от одного края радиоэха облака до другого и обратно (рис. 4.9 б). В каждом неподвижном положении антенна станции находится в течение времени $\Delta t_{\text{неп}}$. Значение $\Delta t_{\text{неп}}$ обычно определяется в процессе эксперимента количеством ГР, обнаруживаемых РЛС в 3—5-минутные интервалы времени. Первый режим наблюдений позволяет фиксировать начальные ГР в облаке, устанавливать их количество (N_p) в зрелой стадии облака и изменение $N_p = \psi(t)$, а также определять момент времени завершения грозовой активности облака.

При работе РЛС_м во втором (сканирующем) режиме определяется местоположение радиоэха ГР в поле эхо-сигналов облаков и осадков. Необходимо отметить, что более четко координаты радиоэха ГР определяются при использовании радиолокатора, работающего в длинноволновом участке дециметрового диапазона радиоволн (РЛС_{дл}) типа РСП. Ширина диаграммы направленности антенны этой станции в азимутальной плоскости равна примерно 4°.

К недостаткам рассматриваемого метода исследования гроз следует отнести ошибки в установлении местоположения радиоэха ГР, возникающие иногда за счет обнаружения молний боковыми лепестками диаграммы направленности, особенно при использовании РЛС_м П-12. Известно, что $\sigma_{\text{гр}}$ может достигать нескольких тысяч квадратных метров. В радиусе 50—100 км от радиолокатора такие $\sigma_{\text{гр}}$ вполне достаточны для обнаружения молний боковым лепестком. Это установлено следующим образом. Антенна РЛС РСП с незначительными боковыми лепестками устанавливалась на грозовой очаг, в котором имели место ГР. В этом же направлении устанавливалась также боковым лепестком антенна станции П-12. Одновременная регистрация эхо-сигналов этих станций на экране двухлучевого осциллографа позволила выявить нежелательную возможность обнаружения ГР боковым лепестком антенны РЛС_м. С целью исключения ошибок такого рода необходима дополнительная информация, характеризующая грозовую обстановку слева и справа от исследуемого облака. Эту информацию можно получить с помощью грозопеленгатора.

4.4.2. Радиолокационные исследования ГР в метровом диапазоне радиоволн. Из работ [16, 51, 102, 176] следует, что радиолокационные станции дециметрового и метрового диапазонов хорошо обнаруживают ГР. Радиоэхо ГР прослеживается на экранах станций в течение длительного времени (порядка сотен миллисекунд). Рассмотрим причины этого.

Поимпульсная регистрация радиоэха ГР с одновременным приемом атмосфериков в СДВ диапазона (см. рис. 5.1) позволила установить, что основным фактором, влияющим на время существования эхо-сигналов молний (τ_m), является количество

повторных разрядов (n_m) в одиночной вспышке. При обработке отбирались случаи, когда наряду с данными поимпульсной регистрации радиоэха вспышки молнии четко фиксировались атмосферы в диапазоне частот от 0,3 до 60 кГц.

На рис. 4.10 приведено распределение числа повторных разрядов в 151 вспышке, полученное на основании данных активно-пассивных РТС [50] в сопоставлении с данными обзора [6], основанными на скоростном фотографировании молний. Из рисунка видно, что в умеренных широтах в 80 % случаев $n_m \leq 4$, однако имеются случаи, когда $n_m \geq 9$, что совпадает с данными [6].

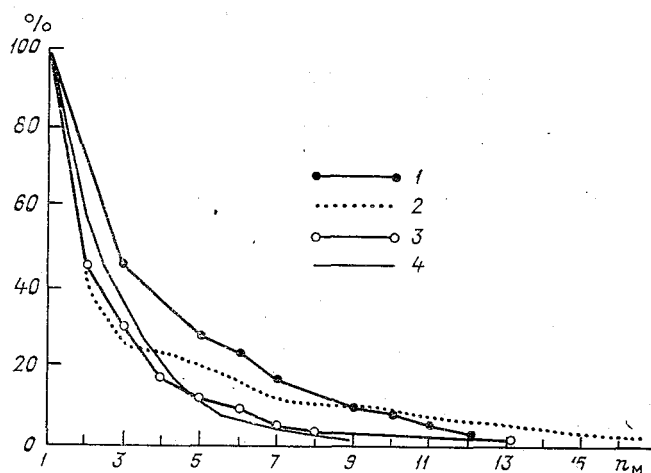


Рис. 4.10. Повторяемость числа разрядов n_m в вспышках молний по данным разных авторов.

1 — И. С. Стекольников [6], 2 — Шонленд [6], 3 — Нота, 4 — активно-пассивные РТС [50].

Представляет интерес рассмотреть интервалы времени Δt_n между повторными разрядами во вспышке, полученные по данным РТС, и сопоставить их с приведенными в [6]. Значения Δt_n , установленные на основе анализа 214 вспышек, приведены на рис. 4.11. Из этого рисунка видно, что в 80 % случаев при $n_m \leq 4$ интервалы времени между повторными разрядами $\Delta t_n \leq 90$ мс. Следовательно, полученные с помощью РТС значения Δt_n реально отражают временные интервалы, установленные ранее в оптическом диапазоне (примерно 93 мс) [6].

Таким образом, установленные активно-пассивными РТС значения n_m и Δt_n являются достоверными, что позволяет определить зависимость $\tau_m = \psi(n_m)$ с точностью 3—6 мс, соответствующей периоду, через который следовали зондирующие импульсы РЛС П-12. На рис. 4.12 и 4.13 приведено время существования эхо-сигналов τ_m и световых вспышек τ_c . При одинаковых значениях n_m эхо-сигналы вспышек (τ_m) являются более длительными, чем τ_c , что связано, очевидно, с радиолокационным обнаруже-

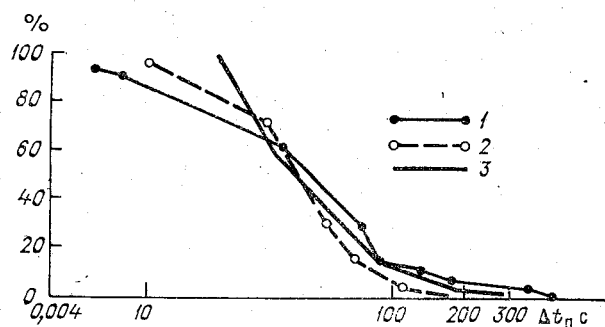


Рис. 4.11. Повторяемость интервалов времени Δt_n между отдельными разрядами в одиночной вспышке по данным разных авторов.
 1 — И. С. Стекольников [6], 2 — Шонленд [6], 3 — активно-пассивная РТС [50].

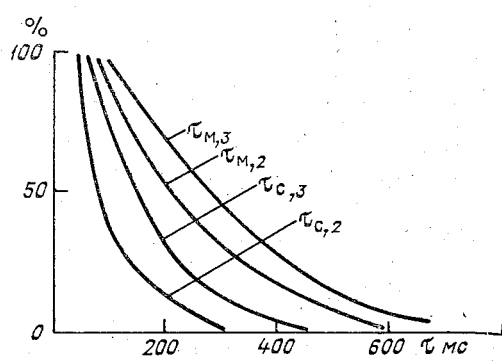


Рис. 4.12. Повторяемость времени существования эхо-сигналов вспышки при двух ($\tau_{м,2}$) и трех ($\tau_{м,3}$) разрядах в ней, а также световых вспышек $\tau_{с,2}$ и $\tau_{с,3}$.

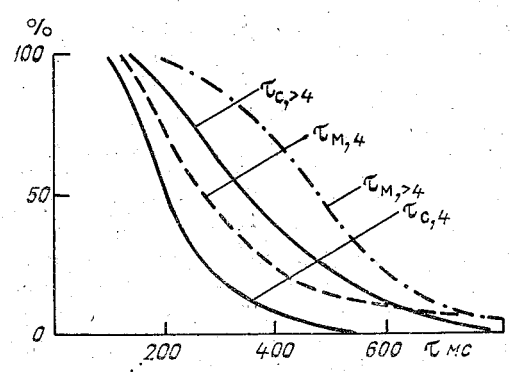


Рис. 4.13. Повторяемость времени существования эхо-сигналов вспышки при четырех ($\tau_{м,4}$) и более ($\tau_{м,>4}$) разрядах в ней, а также световых вспышек $\tau_{с,4}$ и $\tau_{с,>4}$.

нием лидерного разряда, разрядов внутри облака, а также с более длительным интервалом времени существования ионизированного канала молнии по сравнению с инерцией светового потока.

Величины $\bar{\tau}_m$ и $\bar{\tau}_c$ в зависимости от количества разрядов во вспышке (n_m) принимают следующие значения:

n_m	2	3	4	> 5
$\bar{\tau}_m$ мс	300	500	400	600
$\bar{\tau}_c$ мс [171]	150	250	350	530
$\bar{\tau}_m/\bar{\tau}_c$	2	2	1,15	1,13
Число радиоэхо ГР	42	68	25	16

В умеренных широтах в 90 % случаев при $n_m=2$ значение $\tau_m \leq 500$ мс, а при $n_m > 4$ значение $\tau_m \leq 720$ мс. Иногда наблюдались $\tau_m > 1300$ мс, но при этом не было установлено n_m . На удаленностях до 70 км $\bar{\tau}_m \approx 580$ мс, а $186 \leq \tau_m \leq 1287$ мс [51]. В целом, независимо от n_m интегральное распределение τ_m , установленное РЛС П-12 и РСП, представлено на рис. 4.15.

Учитывая, что частота следования зондирующих импульсов РЛС П-12 составляет 330 Гц, при $\bar{\tau}_m \approx 580$ мс можно зафиксировать 190 эхо-сигналов молний, а это надежно обеспечивает обнаружение ГР радиолокационным способом, ибо известно, что предел обнаружения целей с помощью РЛС ограничивается минимумом числа эхо-сигналов, равным 5—7 [37].

Известно, что скоростное фотографирование молний наиболее успешно осуществляется в ночное время и на незначительном удалении от них. Активно-пассивные радиотехнические исследования вспышек молний позволяют определять параметры n_m , Δt_n и τ_m в радиусе до 200 км в любое время суток.

Параметрами эхо-сигнала молнии являются геометрические размеры ее засветки, например, на ИКО РЛС. Было получено 34 фотографии ИКО с различными эхо-сигналами молний, удаление которых не превышало 70 км. При этом установлено, что среднее значение геометрических размеров изображений в радиальном направлении (L_R) составляет примерно 10,2 км ($L_{R \text{ мин}} = 4,6$ км, $L_{R \text{ макс}} = 17,5$ км). В работе [51] приводится даже $L_R = 24$ км. Учитывая, что разрешающая способность используемой РЛС около $\pm 1,5$ км, можно полагать, что значения L_R зависят от следующих факторов: отклонения канала молнии от вертикального положения; разветвленности канала молнии и числа последовательных разрядов, ионизации воздуха, возникающей вокруг молниевых каналов; числа лепестков диаграммы направленности антенны РЛС в метровом диапазоне радиоволн и др. Подробный анализ вклада каждого фактора, обуславливающего большие значения L_R на удаленностях до 70 км от грозового облака, явится предметом дальнейших исследований. Одновре-

менно было замечено, что на расстоянии $R > 100-150$ км значение L_R эхо-сигналов молнии остается неизменным (1,5—2 км).

Необходимо отметить, что указанные размеры L_R устанавливаются не мгновенно. Представляет интерес рассмотреть изменение $L_R = \psi(t)$ в каждом ГР. С этой целью была проведена скоростная фоторегистрация каждого радиоэха РЛС П-12. Это позволило установить, что L_R увеличивается постепенно, причем время, при котором L_R радиоэха ГР достигает максимального значения, определяется расстоянием до молнии. Для выявления этой зависимости рассматривалась функция вида

$$k = \psi\left(\frac{\tau_{L_R \text{ макс}}}{\tau_{\text{общ}}}, R\right), \quad (4.3)$$

где $\tau_{L_R \text{ макс}}$ — время установления $L_{R \text{ макс}}$, отсчитываемое с момента обнаружения первого эхо-сигнала ГР; $\tau_{\text{общ}}$ — время существования радиоэха ГР.

Значения k в (4.3) определялись для эхо-сигналов ГР в интервалах 50 км. В результате получено:

R км	≤ 50	51—100	101—150	151—200
k	0,68	0,30	0,08	0,08
Число радиоэхо ГР	35	13	8	67

Из приведенных данных следует, что в ближней зоне обнаружения ($R < 100$ км) $L_{R \text{ макс}}$ имеет максимальное значение в конце вспышки. Это, возможно, является косвенным подтверждением того, что начало возникновения радиоэха обуславливается внутренними разрядами в облаках или лидерной стадией. На $R > 100$ км такого явления не наблюдается.

Как известно, в настоящее время актуальной задачей остается поиск в радиусе действия МРЛ наиболее информативных дистанционных РТС обнаружения грозových разрядов. В этом случае привлекают внимание радиолокационные станции, позволяющие обнаруживать гораздо большее количество ГР, чем, например, грозопеленгаторы с радиусом действия около 200 км. Сопоставление данных обнаружения ГР станцией П-12 и грозопеленгатором показало, что грозопеленгатор фиксирует примерно $1/3$ разрядов, обнаруженных РЛС [43]. В умеренных широтах на холодном фронте с помощью станции П-12 зафиксировано до 600 эхо ГР за 1 ч. В южных районах их может быть еще больше. Заметим, что большое количество ГР РЛС обнаруживает на расстоянии до 200 км. Анализ 509 молний, обнаруженных П-12, позволил установить, что в северных районах на холодных фронтальных разделах часто регистрировались радиоэхо молний синтервалами $t_1 \leq 6$ с и $t_2 = 6 \div 12$ с на различных расстояниях до грозových очагов R . Число эхо-сигналов ГР, зафиксированных на $R < 100$ км, составило 122 за t_1 и 198 за t_2 , а на $R > 100$ км соответственно 73 и 116.

Таким образом, через t_1 следовало 38 % эхо-сигналов ГР, а через t_2 — 68 %. Это указывает на преимущество радиолокацион-

ных средств обнаружения ГР по сравнению с существующими грозопеленгаторами-дальномерами, которые срабатывают в основном только от вертикальных молний, составляющих примерно 30 % общего числа эхо-сигналов ГР, обнаруживаемых совместно РЛС П-12 и РСП.

В работах [86, 96] определялось число разрядов на площади 100 км² (N_{100}). В этих работах N_{100} рассчитывалось за день с грозой по данным счетчиков разрядов с ограниченным радиусом действия и срабатывающих не на все ГР, обнаруженные радиолокаторами.

А. М. Тряхов для определения N_{100} с помощью РЛС подсчитал число эхо-сигналов ГР, обнаруженных в секторе диаграммы направленности станции П-12 в период наибольшей грозовой активности облаков. Далее пересчитал полученные данные на площадь 100 км² и привел их к 5-минутным интервалам. В результате такой оценки в 64 грозовых облаках на различных расстояниях R (расстояния центра площади размером 100 км² от РЛС) за $\Delta t = 5$ мин он получил:

R км	17	35	50	60	175
N_{100}	390	55	67	56	26

Необходимо отметить, что эти данные получены при исследовании гроз над сушей. Как следует из [138], над водной поверхностью радиолокатором П-12 в грозовом облаке было обнаружено разрядов в 4 раза больше. Не вызывает сомнения, что радиолокационные данные о N_{100} могут оказаться полезными при уточнении карт повторяемости числа грозовых разрядов в заданном районе, приведенных в работах [86, 96].

4.4.3. Исследование радиоэха ГР на фронтальных разделах воздушных масс с помощью РЛС П-12. Грозовая активность фронтальных разделов воздушных масс (ФРВМ) отличается от внутримассовой грозовой активности. На ФРВМ образуется большое количество электрически активных ячеек, проявляющихся почти одновременно. Не исключено влияние электрической активности одной ячейки на электрическую активность других, что подтверждается экспериментом. В процессе наших почти пятилетних наблюдений за грозами, возникающими на фронтальных разделах, было установлено, что при возникновении разрядов в одной ячейке иногда появляются разряды в соседней. Оказалось, что при уменьшении расстояния между грозовыми ячейками до 5—6 км (по данным МРЛ) число разрядов в этих ячейках увеличивается в 3—5 раз без существенного изменения параметров радиоэха облаков (см. гл. 7). При этом обнаруживается серия последовательных эхо-сигналов ГР, сдвинутых по расстоянию и воспринимаемых как одновременно возникающие. Аналогичное явление отмечается и в работе [16] — при сильных грозах отражения ГР наблюдались одновременно с расстояний 80—150 км.

Следует отметить, что на ФРВМ молнии в короткий интервал времени могут быть обнаружены на весьма большой площади. Например, 24.07.74 г. грозовая активность фронтального раздела исследовалась по нескольким азимутам: 150, 165, 170 и 182°. Антенна РЛС П-12, имеющая $\theta_r \approx 11 \div 12^\circ$, позволяла в каждом указанном азимуте фиксировать эхо-сигналы ГР в секторе $150 \pm 6^\circ$, $165 \pm 6^\circ$ и т. д. В течение 2—12 мин на ФРВМ было обнаружено 31—59 радиоэхо ГР на $\Delta R \approx 100$ км (рис. 4.14).

4.4.4. Радиолокационные исследования ГР в дециметровом диапазоне радиоволн. Для повышения точности определения ме-

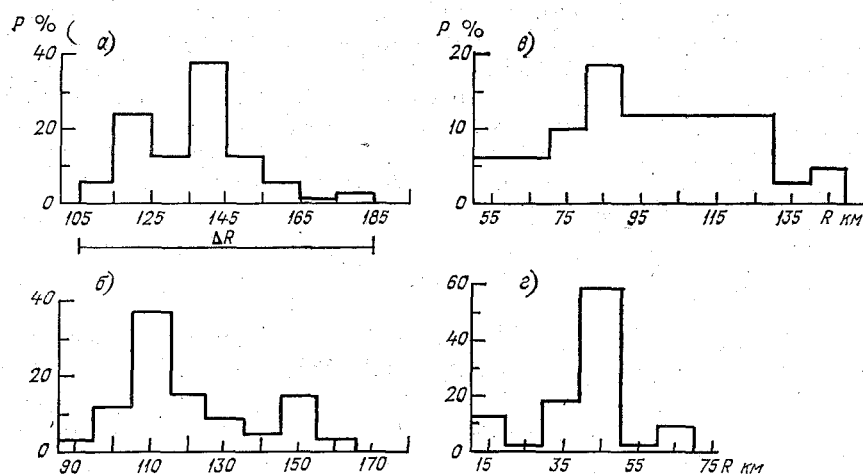


Рис. 4.14. Число вспышек молнии, обнаруженное при наблюдении 24.07.74 г.

Рисунок	а	б	в	г
A°	150	165	170	182
Δt мин	2	7	12	10
$N_{\text{общ}}$	31	34	32	59

стоположения ГР представляет интерес рассмотреть возможность использования для обнаружения ГР радиолокационной станции дециметровых волн типа РСП с $\theta_r \approx 4^\circ$ и $\tau_{\text{изл}} \approx 1$ мкс и сопоставить результаты исследований эхо-сигналов ГР этой станцией с данными П-12.

Интегральное распределение времени существования радиоэха ГР ($\tau_{\text{дм}}$) показывает, что в 80 % случаев $\tau_{\text{дм}} \leq 400-450$ мс, т. е. $\tau_{\text{дм}} < \tau_m$ (рис. 4.15). За время $\tau_{\text{дм}}$ РЛС РСП регистрирует в среднем 200—250 эхо-сигналов ГР. Это связано с тем, что частота следования зондирующих импульсов этой станции в 1,5 раза больше, чем у П-12.

Для определения возможностей обнаружения ГР станциями П-12 и РСП был поставлен ряд экспериментов, в которых они работали от одного импульса запуска и на единое регистрирующее устройство. На рис. 4.16 представлены результаты обнаружения разрядов в грозовом облаке ($R \approx 150$ км) станциями П-12

(N_1) и РСП (N_2), а также число совместно обнаруженных ГР (N_p). Было установлено, что на $R \geq 100$ км преимущественно $N_2 > N_1$, а в зоне до 100 км $N_1 > N_2$. В общем, количество N_1 и N_2 зависит от профиля местности, где устанавливаются РЛС. Кроме того, на обнаружении ГР станцией РСП сказывается маскирую-

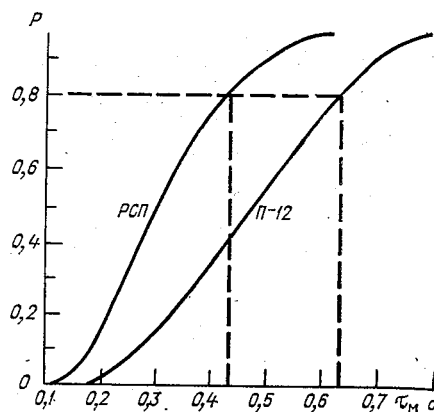


Рис. 4.15. Интегральное распределение времени существования радиоэха ГР, по данным станций П-12 и РСП.

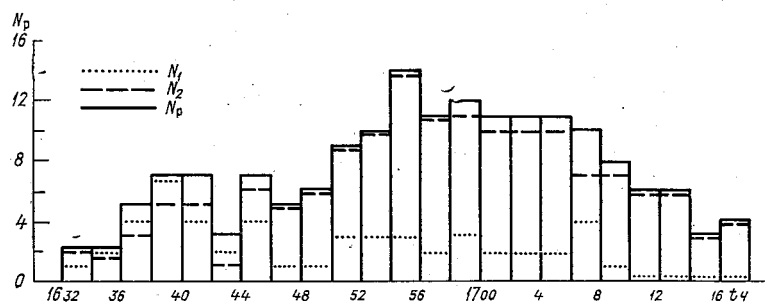


Рис. 4.16. Число разрядов, обнаруживаемых каждые 2 мин станциями П-12 (N_1) и РСП (N_2) (N_p — общее число разрядов).

щий эффект метеоцелей, имеющих отражаемость более 10^2 мм⁶/м³.

Анализируя данные двух станций различных диапазонов радиоволн, можно убедиться в том, что каждая из них в отдельности обнаруживает не все атмосферные разряды в облаке. Одновременные наблюдения РЛС П-12 и РСП несомненно улучшат качество оценки электрической активности облаков.

Большой интерес представляют данные, характеризующие расстояния до одних и тех же грозовых разрядов, установленные одновременно станциями П-12 (R_1) и РСП (R_2). Для их получения проведено 186 синхронных обнаружений ГР двумя станциями и определена разность $\Delta R = |R_1 - R_2|$. Повторяемость ошибок ΔR представлена на рис. 4.17, из которого видно, что в 87 % случаев

разница в определении расстояния до ГР не превысила ± 1 км и только в 3 % случаев имели место ошибки более ± 3 км [140].

Приведенные значения ошибок дают основание считать, что РЛС_{дм} РСП, так же как и РЛС_м, можно применять для измерения расстояний до грозовых разрядов при исследовании грозовых облаков, обнаруживаемых МРЛ, и при проверке различных дальномерных устройств грозопеленгаторов.

4.4.5 Экспериментальное определение ЭПР ГР. Одной из существенных характеристик, обуславливающих возможность обнаружения ГР с помощью РЛС, например, метрового диапазона радиоволн, является ЭПР разрядов (σ_m).

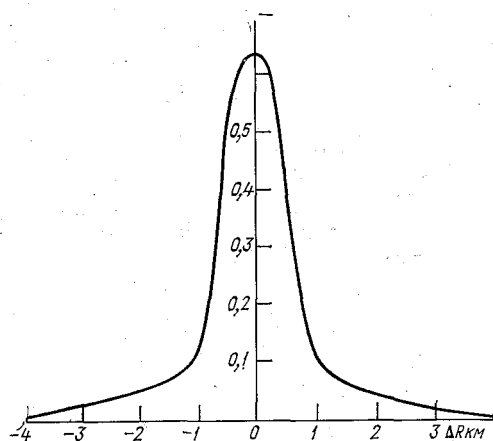


Рис. 4.17. Повторяемость ΔR при определении расстояния до молний МРЛ П-12 и РСП.

Теоретические расчеты ЭПР молнии пока дают только приближенные значения этого параметра, так как отсутствуют достоверные данные о форме разрядов, их разветвленности в облаках, геометрических размерах и электронной концентрации ионизированного канала молнии и окружающего его пространства. Поэтому проводилось экспериментальное определение σ_m с учетом зависимости $P_{гм} = \psi(\sigma_m)$. Условия радиолокационного обнаружения молнии в указанном диапазоне радиоволн можно получить из уравнения вида:

$$P_{гм} = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \eta_r \eta_t}{64\pi^3} \frac{k'}{R^4} \sigma_m > V P_{г мин}. \quad (4.4)$$

Здесь η_r и η_t — КПД приемного и передающего тракта, соответственно (для П-12 их произведение равно примерно 0,9)

$$k' = \int_0^{\theta_B} k(q) d\theta_B,$$

где $k(q)$ — коэффициент, учитывающий влияние земли. В расчетах, связанных с обнаружением молний, k' в интервале углов

места θ_v , зависящих от расстояния до молнии R , принимаем следующие значения:

R км	< 50	50—100	100—150	150—200	200—250
θ_v°	0—11	0—5,5	0—3	0—2	0—1,3
k'	0,60	0,77	0,56	0,39	0,30

При выборе θ_v предполагалось, что молнии в облаках могут наблюдаться до высот около 9 км.

В уравнении (4.4) V — коэффициент различимости, определяемый отношением $U_m/U_{ш}$ [99]. Для уверенного обнаружения молнии на фоне собственного ее излучения необходимо, чтобы $V=5$. При небольшом уровне излучения эхо-сигналы ГР могут быть обнаружены П-12 и при $V=2$.

Для радиолокатора П-12 в формуле (4.4) первый множитель равен $8,5 \cdot 10^{-6}$ при $V=5$ и $k'=0,77$. Если (4.4) представить в виде $\sigma_m = f(R, P_{г\text{ мин}})$, то окажется, что станция на $R=10$ км надежно обнаруживает ГР при $\sigma_{м. мин} \geq 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$, а на $R=200$ км — при $\sigma_{м. мин} \geq 3,7 \cdot 10^2 \text{ м}^2$.

На рис. 4.18 представлена зависимость $\sigma_{м. мин} = \psi(R)$, где $\sigma_{м. мин}$ характеризует минимальное значение ЭПР ГР (прямые при $V=5$ и при $V=2$), необходимое для обнаружения молнии в облаках. В процессе экспериментальных исследований установлено, что на расстояниях до 100 км наиболее часто обнаружение ГР возможно при $V \approx 5$, а на больших расстояниях — при $V=2$. На этом же рисунке приводятся ЭПР грозовых разрядов, обнаруженных на расстояниях до 230 км. Вертикальные линии характеризуют $\sigma_{м. мин}$ и $\sigma_{м. макс}$, установленные в каждой серии наблюдений. Цифры у вертикальных линий показывают количество обнаруженных ГР. Широкий диапазон изменений ЭПР ГР подтверждает данные ранее проведенных исследований [16, 174]. Следует обратить внимание на зарегистрированные три серии наблюдений (а, б, в), к сожалению, не сопровождавшиеся приемом собственного излучения ГР. Если результаты приведенных наблюдений достоверны, т. е. действительно наблюдались молнии с малым значением ЭПР, то очевидно, что на $R \geq 100$ км РЛС П-12 будет обнаруживать не все разряды в облаке. Возможно, эти ближние эхо-сигналы вызваны внутриоблачными разрядами. В общем, почти в 90 % случаев $2,4 \cdot 10^2 \text{ м}^2 \leq \sigma_m \leq 1,4 \cdot 10^4 \text{ м}^2$. Для сравнения напомним, что среднее значение σ у истребителя равно примерно 10 м^2 , а у бомбардировщика — 150 м^2 .

ЭПР ГР изменяется в течение времени существования молнии. С целью определения характера этих изменений и причин, вызывающих их, был поставлен эксперимент, в процессе которого проводилась поимпульсная регистрация эхо-сигналов ГР при $P_m/P_{ш} \geq 5-10$ дБ, а также одновременно регистрировались атмосферерики в СДВ и СВ диапазонах (рис. 4.19) [50]. Зарегистрированная вспышка длительностью 370 мс состоит из лидерной стадии ($\tau_{л}$) и трех сильноточных разрядов (1—3). Временные интер-

валы между 1 и 2, 2 и 3 разрядами равны соответственно 110 и 102 мс. Из рисунка видно, что после возникновения главного и повторных разрядов наблюдается в течение времени τ_p рост ЭПР ГР, а затем в течение времени τ_c непродолжительный спад.

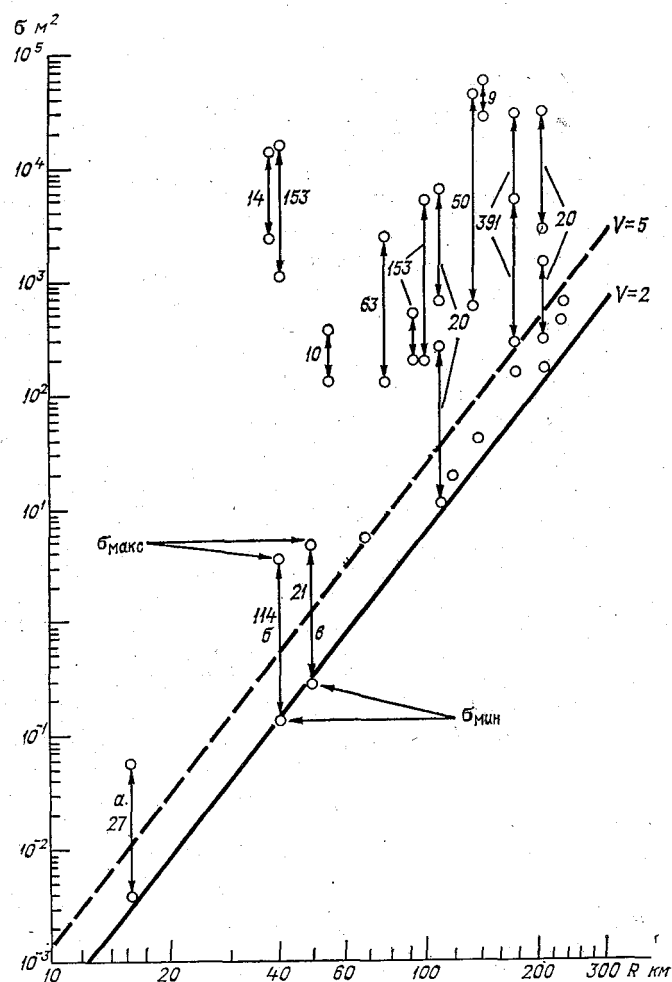


Рис. 4.18. Зависимость $\sigma_m = \chi(R)$ при $V=2$ и $V=5$.

Было отобрано 75 радиоэхо ГР, обнаруженных на расстоянии 30—50 км.

В процессе обработки материалов наблюдений получены интегральные распределения τ_p и τ_c (рис. 4.20), из которых следует, что в 95 % случаев $\tau_p \leq 3,5 \cdot 10^{-2}$ с, а $\tau_c \leq 5 \cdot 10^{-2}$ с и $\tau_c > \tau_p$. Измерения τ_p и τ_c производились перед последним повторным разрядом и после него соответственно (рис. 4.19).

Приведенные данные дают основание полагать, что одной из причин, обуславливающих временную изменчивость ЭПР ГР, яв-

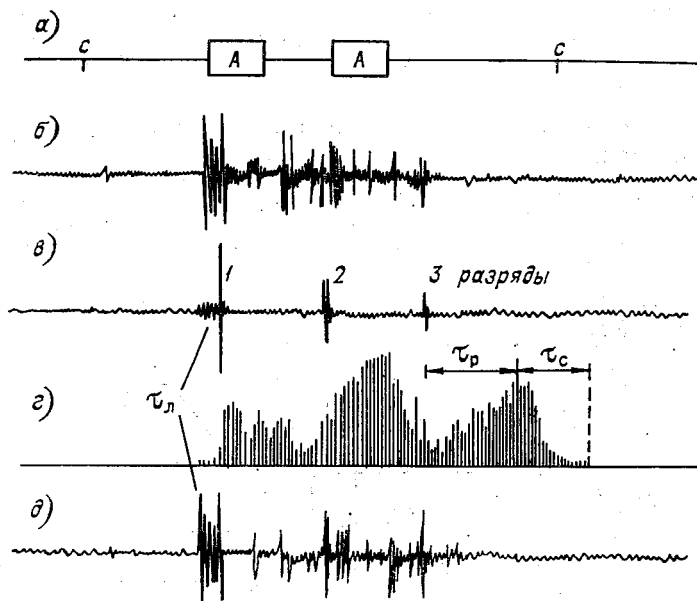


Рис. 4.19. Запись сигналов с выходов активно-пассивных РТС.

а — срабатывание фотокамеры РФИ (А) (с — секундные метки времени), б — сигналы СВ диапазона ($f=600$ кГц), в — сигналы СДВ, г — импульсная регистрация радиоэха вспышки, д — сигналы СВ диапазона ($f=200$ кГц).

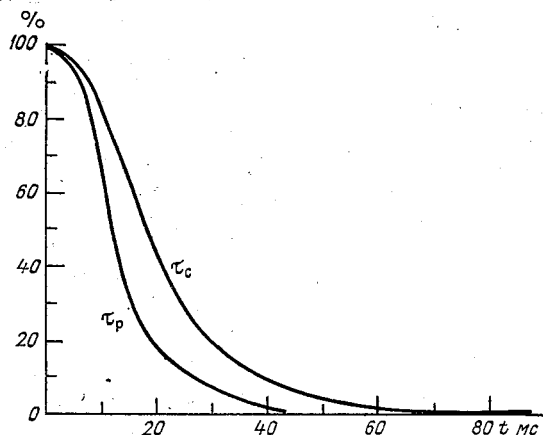


Рис. 4.20. Интегральное распределение времени роста (τ_p) и спада (τ_c) радиоэха ГР.

ляется, по-видимому, расширение зоны ионизации после сильно-точного разряда, температура в канале которого может достигать $(2 \div 3) \cdot 10^4$ °С; другой — рекомбинация, как основной процесс при уменьшении температуры канала молний.

На рис. 4.21 показана зависимость $\sigma_m = \psi(t)$ трех вспышек молний, обнаруженных на $R > 100$ км при двух различных пороговых значениях регистрирующих устройств. Учитывая пороговые значения аппаратуры, можно утверждать, что в одиночной вспышке σ_m может изменяться больше, чем на 1,5—2 порядка [63].

4.4.6. Обнаружение грозовых облаков с помощью РЛС метрового диапазона. В п. 2.4 было показано, что грозовые облака,

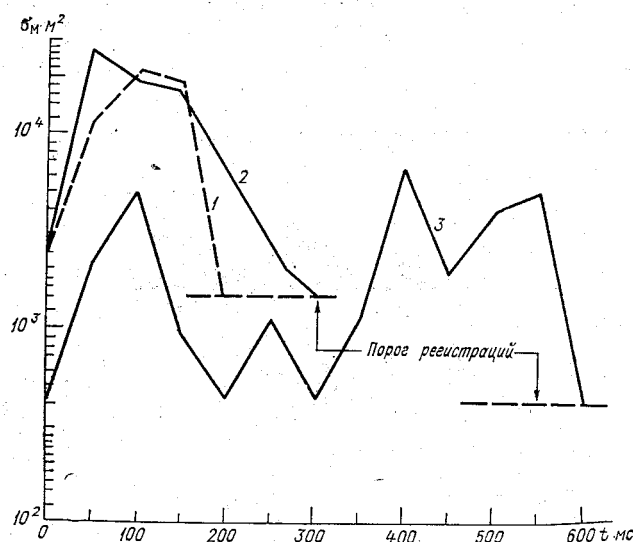


Рис. 4.21. Изменения σ_m у трех вспышек молнии (1, 2 и 3).

вопреки установившемуся мнению, могут быть обнаружены с помощью РЛС, работающей в метровом диапазоне радиоволн.

Впервые кучево-дождевые облака с помощью РЛС П-12 были обнаружены в 1971 г. [48]. В летние периоды 1972—1973 гг. при несистематических наблюдениях за кучево-дождевыми облаками с грозами отмечены 11 случаев (дней), когда наблюдались радиоэхо метеоцелей на экранах РЛС П-12. Это составило примерно 30 % общего числа дней наблюдений за грозовыми Сб. Сопоставление радиоэхо с данными наблюдений метеостанций не позволило однозначно установить характер обнаруженных гидрометеоров. Метеостанции отмечали ливневые дожди, но не фиксировали выпадение града в районах, соответствующих местоположению площадей радиоэха. Однако следует иметь в виду, что град мог выпадать между станциями, но не фиксироваться ими из-за ограниченного радиуса визуальных наблюдений. Он также мог выпадать у земли в виде капель дождя, которые на высотах были градинами.

На рис. 4.22 приводятся снимки ИКО РЛС П-12 с изображениями вышеупомянутых целей, находящихся на удалениях 40—

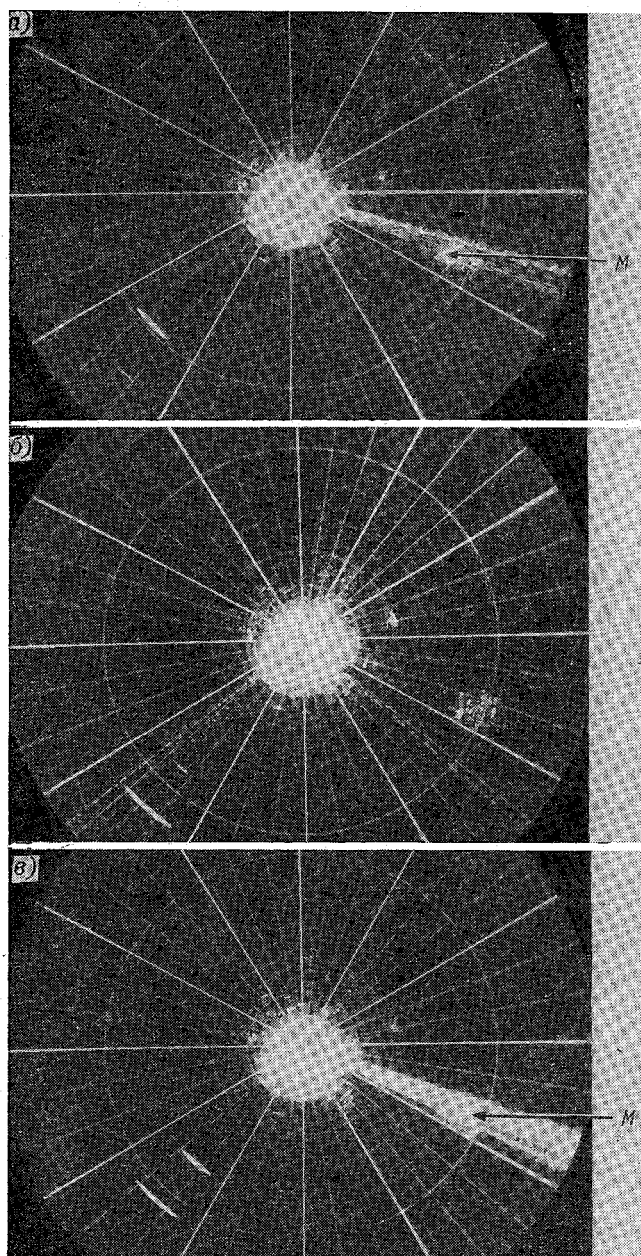


Рис. 4.22. Длительно существующее радиоэхо грозовых облаков (б), радиоэхо ГР и шумовые сектора ЭМИ разрядов (а и в) (масштаб экрана ИКО РЛС П-12 80 км).

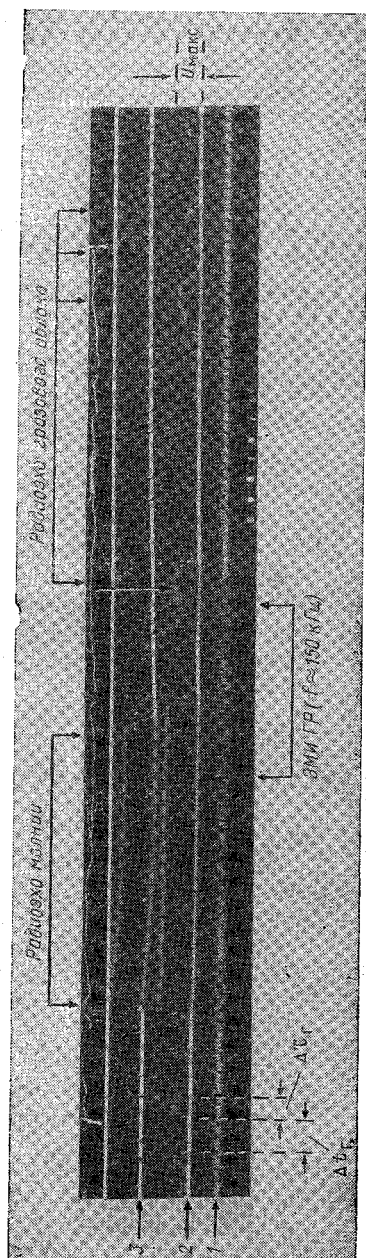


Рис. 4.23. Поимпульсная регистрация длительно существующего радиоэха и каналов молнии на выходе приемного тракта РЛС П-12.

52 км по азимуту 115° (масштабные метки следуют через 10 км). Снимки ИКО получены в 14 ч 27.07.72 г. с интервалом $\Delta t = 25$ с. Обычно размеры радиоэха значительно изменяются от кадра к кадру. При появлении эхо-сигналов, как правило, наблюдается интенсивная грозовая активность. Несмотря на то что эти снимки сделаны в режиме кругового обзора РЛС, на них кроме упомянутых сигналов имеются отражения грозовых разрядов (яркие засветки), а также шумовые сектора, появление которых обусловлено приемом собственного излучения разрядов.

Для более детального изучения параметров таких радиоэхо антенна РЛС П-12 устанавливалась неподвижно на грозовое облако и производилась поимпульсная запись (рис. 4.23). Здесь канал 1 регистратора типа МПО-2 фиксировал собственное излучение ГР на частоте 150 кГц, каналы 2 и 3 — радиоэхо грозового облака и молнии. При больших амплитудных значениях радиоэха, превышающих динамический диапазон второго канала, регистрация эхо-сигналов автоматически осуществлялась третьим каналом МПО-2, но здесь наблюдается ограничение только отраженных сигналов молнии.

Обработка материалов наблюдений позволила установить повторяемость интервалов времени Δt_r , через которые появлялись радиоэхо в метровом диапазоне, а также повторяемость длительностей существования этих радиоэхо Δt_r (рис. 4.23).

Результаты обработки повторяющихся значений Δt_r и Δt_r в виде интегральных распределений представлены на рис. 4.24.

При регистрации радиоэха на удалениях до 30—40 км умень-

шаются интервалы Δt_r и соответственно увеличиваются значения $\Delta \tau_r$. Общей закономерностью изменений амплитудных значений, удаленных до 40 км и от 40 до 70 км, является то, что в обоих случаях эти амплитудные значения не превышают определенного уровня $U_{\text{макс}}$ (см. рис. 4.23). Возможность амплитудного ограничения сигналов была исключена. Это видно на рис. 4.23 по появлению помех (если ограничивал второй канал, то третий канал обеспечивал получение $U_{\text{макс}}$ помехи).

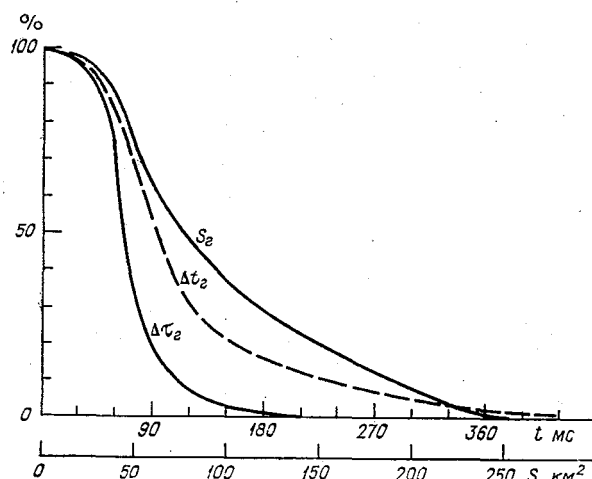


Рис. 4.24. Повторяемость временных интервалов Δt_r и $\Delta \tau_r$ радиоэха грозового облака, а также площадей S этих эхо-сигналов.

Обычно интенсивность упомянутых отраженных сигналов не превышала $4 \cdot 10^{-11}$ Вт, а отражаемость, установленная с помощью МРЛ-1, в большинстве случаев была $\geq 10^4$ мм⁶/м³.

Несмотря на флуктуирующий характер радиоэха, было определено общее время его существования на экранах индикаторов РЛС П-12. Оно составляло 5—52 мин. Возможно, что некоторые радиоэхо существуют и более 52 мин, но наблюдения за ними прекращались. Анализ геометрических размеров эхо-сигналов, обнаруживаемых РЛС П-12, показал, что в 80 % случаев они занимают площадь $S_r \leq 150$ км² (см. рис. 4.24).

Привлекает внимание то, что обнаруженные в метровом диапазоне метеообразования, как правило, имеют повышенную электрическую активность, которая выражается в частом появлении эхо-сигналов грозовых разрядов. В этих экспериментах обнаружение ГР станцией П-12 подтверждалось регистрацией ЭМИ разрядов в СДВ, ДВ и СВ диапазонах. При этом не делалась попытка установить, чем вызвано излучение: разрядами облако—земля, облако—облако, лидерными процессами или другими разрядами и электрическими явлениями в облаках.

Было установлено, что при появлении радиоэха грозowych облаков (гидрометеоров) на экранах индикаторов РЛС П-12 эхосигналы разрядов, имеющие вид, представленный на рис. 4.6, следуют наиболее часто с интервалом времени $\Delta t \approx 2,5-3,5$ с, а при исчезновении радиоэха гидрометеоров (в течение ближайших 10 мин) — через $\Delta t \approx 9,7$ с.

Глава 5

Исследование электромагнитного излучения гроз с помощью наземных радиотехнических средств

Электромагнитное излучение (ЭМИ) гроз обнаруживается в весьма широком диапазоне частот, от нескольких герц до сотен мегагерц. Несмотря на то что такое излучение регистрируется уже на протяжении десятков лет, до настоящего времени не получены достоверные данные, характеризующие его спектральную плотность. В многочисленных работах приводится непрерывный спектр частот ЭМИ ГР до 100 кГц, а на частотах более 100 кГц — дискретные данные.

В настоящее время появилась более чувствительная радиоаппаратура, к которой предъявляются более жесткие требования в отношении ее надежности. В этой связи необходимо дальнейшее исследование ЭМИ гроз как помех. Кроме того, возрос интерес к излучению грозowych разрядов как полезных сигналов, дающих возможность более глубоко изучить физические процессы в грозowych облаках и создать специальную аппаратуру дистанционного обнаружения грозowych облаков на различных стадиях их эволюции.

Предшествующие исследования ЭМИ гроз как помех в большинстве случаев не были связаны с одновременным исследованием облаков. Эти исследования позволили определить уровень помех в различных диапазонах радиоволн, в которых функционируют или разрабатываются каналы радиосвязи. На основании этих исследований получены фоновые параметры ЭМИ ГР как помех, часто даже не связанные с расстоянием до источника излучения. Исключение составляют данные работы [94, 187], которые характеризуют перемещение отдельных грозowych зон и грозowych фронтальных разделов на больших удалениях в диапазоне СДВ.

Наиболее интенсивное исследование ЭМИ гроз началось тогда, когда оно стало рассматриваться как полезная информация. Этому способствовало развитие радиолокационной техники,

позволившей обнаруживать облака на расстояниях до 300 км. Особый интерес к исследованию ЭМИ возник в связи с необходимостью разграничения эхо-сигналов облаков, обнаруживаемых НМРЛ, на грозовые и ливневые и привлечения к решению такой задачи грозопеленгаторов-дальномеров ближней зоны с радиусом действия примерно 300 км [17, 40]. В этом случае ЭМИ стали исследовать в основном на частотах ниже 100 кГц. С целью установления параметров эхо-сигналов облаков в их предгрозовом и послегрозовом периодах началось исследование ЭМИ в широком диапазоне частот.

Для решения перечисленных задач следовало определять координаты грозовых разрядов. В п. 4.4 показано, что с помощью радиолокаторов можно обнаруживать грозовые разряды и определять их координаты. Был разработан метод регистрации излучения ГР для случаев, когда они находятся в радиусе обнаружения их радиолокаторами [50]. В результате проведенных экспериментов удалось установить, что метод, основанный на одновременной регистрации ЭМИ ГР и эхо-сигналов молнии, может обеспечить получение достоверных данных, характеризующих спектральную плотность излучения ГР.

В настоящее время особый интерес главным образом при метеобеспечении авиации вызывает определение параметров предгрозового излучения облаков. Однако, по нашему мнению, прежде всего необходимо определить параметры излучения грозовых облаков, когда они находятся в зрелой стадии, т. е. когда в них присутствуют сильноточные грозовые разряды (СГР). Такой подход обусловлен тем, что, во-первых, определение параметров ЭМИ СГР может способствовать более достоверному установлению характеристик предгрозового излучения, если оно отличается от ЭМИ СГР, хотя одновременное их исследование не исключено; во-вторых, до настоящего времени не установлено, что считать началом грозовой активности облака, т. е. до какого момента времени длится предгрозовое излучение облаков.

Инструментальные исследования грозовых облаков с помощью РЛС обнаружения молний и грозопеленгаторов позволили установить, что они неоднозначно определяют начало появления СГР в грозовом облаке. Современные грозопеленгаторы [52, 157] фиксируют главным образом вертикальные каналы молний. Количество молний, фиксируемых ими, зависит от порога их срабатывания. Таким образом, начало появления СГР в облаке, как признак перехода в грозовое состояние, является неопределенным. Радиолокационные станции метрового и длинноволнового участка дециметрового диапазонов обнаруживают примерно в 3 раза больше ГР, чем грозопеленгаторы ближней зоны [43] и часто раньше последних. При этом РЛС_м и РЛС_{дм} способны обнаруживать молнии различной ориентации в пространстве, а также межоблачные молнии. Следовательно, по сравнению с грозопеленгаторами РЛС устанавливают раньше и начало зрелой стадии грозового облака. В результате длительность пе-

риода существования так называемого предгрозового излучения будет менее продолжительной. К сожалению, пока не удалось оценить, все ли разряды грозового облака обнаруживают РЛС_м и РЛС_{дм} и насколько достоверно они устанавливают появление первых СГР в нем. Возможно, в дальнейшем одновременное использование в эксперименте аппаратуры, регистрирующей ЭМИ ГР в широком диапазоне частот, радиолокаторов, обнаруживающих молнии и облака, грозопеленгаторов, а также приборов, которые измеряют заряды облака, позволит более четко определять момент наступления зрелой стадии грозового облака, т. е. завершения периода его предгрозового излучения. Пока же рассмотрим метод исследования ЭМИ СГР, так как появление таких разрядов считается признаком перехода облака в зрелую грозовую стадию [164].

5.1. Методика исследования ЭМИ грозовых разрядов и используемая аппаратура

При апробировании метода исследования ЭМИ ГР, координаты которых устанавливались с помощью РЛС, использовалась следующая аппаратура:

- РЛС обнаружения СГР типа П-12 с приставкой поимпульсной регистрации каждого отраженного сигнала;
- регистратор формы импульсов (РФИ) атмосфериков с полосой пропускания (Δf) от 0,3 до 60 кГц и кинокамерой автоматического фотографирования формы сигнала;
- приемные тракты, обеспечивающие дискретный прием излучения ГР на частотах f_1, f_2, f_3 в пределах 150÷160 кГц;
- электронные часы, выдающие секундные, минутные и часовые сигналы с точностью 10^{-3} с;
- семиканальный широкополосный магнитофон с Δf от 0,3 до 30 кГц, на который для «привязки» принимаемых параметров ЭМИ к конкретной дальности источника излучения одновременно поступали данные с перечисленной выше аппаратуры (рис. 5.1).

Началу регистрации ЭМИ ГР предшествовал этап обнаружения грозового облака РЛС_{см}, определения в облаке зон повышенной отражаемости через 10 дБ и установления факта присутствия в нем разрядов с помощью РЛС_м. Этот этап проводился в соответствии с изложенным в п. 4.4 методом исследования грозовых облаков. Когда молнии в облаке обнаруживаются в направлении наибольшей повторяемости их эхо-сигналов (зоны Б), т. е. по азимуту $A_{\text{макс}}$, антенна РЛС П-12 устанавливается неподвижно (рис. 5.2 а).

В связи с тем, что по азимуту $A_{\text{макс}}$ за $\Delta t = 1$ мин РЛС П-12 может обнаружить до 10—15 ГР, расстояние между которыми особенно в фронтальных грозах изменяется от нескольких до 100 км и более, для достоверной регистрации ЭМИ разрядов с определенного расстояния становится необходимым выделение

только тех радиоэхо молний, которые появляются на определенном расстоянии от РЛС. Это выделение достигается стробированием по дальности видеосигналов ГР на выходе приемного тракта (после детектора) РЛС_м (эпюра 1, рис. 5.2 б). Например, если центр симметрии стробирующего импульса (эпюра 2, рис. 5.2 б) с помощью блока задержки установлен на $R = 62,5$ км, а его длительность $\tau_{\text{стр}} = 34$ мс (это соответствует $\Delta R = 5$ км), то

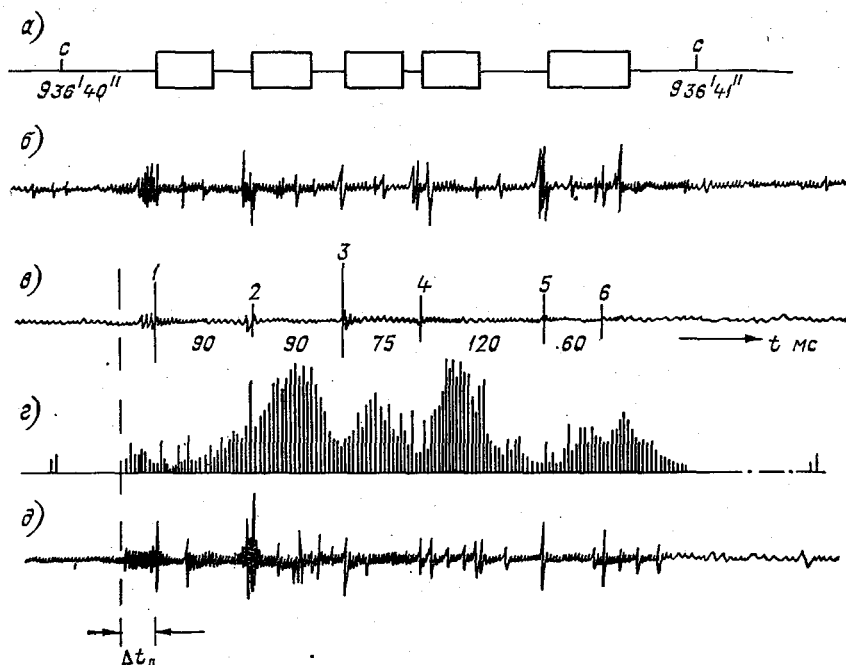


Рис. 5.1. Образец одновременной регистрации радиоэха молнии и ЭМИ разрядов.

а — срабатывание кинокамеры РФИ, а также метки времени (с); б и д — излучение ГР на f_1 , f_2 или f_3 ; в — излучение разрядов, принимаемое РФИ; г — поимпульсная регистрация радиоэха молнии с выхода приемника РЛС П-12.

на один из каналов широкополосного магнитофона через приставку поимпульсной регистрации [149] поступают эхо-сигналы ГР (эпюра 3), которые отмечаются на расстоянии 60—65 км.

Приставка поимпульсной регистрации обеспечивает запоминание максимального значения каждого радиоэха ГР и преобразование такого сигнала по длительности для последующей записи на магнитофоне или многошлейфовом самописце типа К-115.

При возникновении в облаке разряда сопровождающее его излучение, принимаемое на различных частотах, поступает для записи на свободные каналы магнитофона (эпюры 7 и 8, рис. 5.2 б).

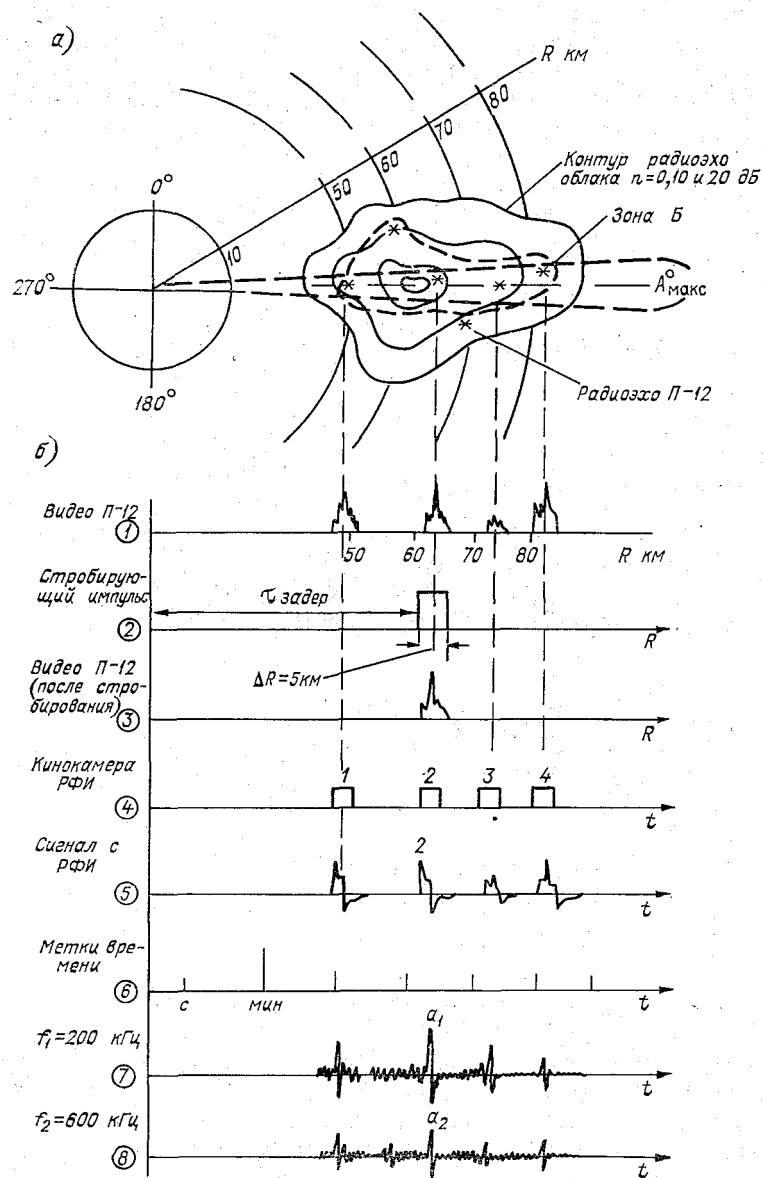


Рис. 5.2. Принцип определения расстояния до источника ЭМИ грозовых разрядов.
а — определение зоны Б с наибольшим количеством грозовых разрядов в поле радиоэха облаков, обнаруженных МРЛ, б — регистрация ЭМИ разрядов.

В тех случаях, когда появление радиоэха грозового разряда в стробе совпадает по времени с записью его ЭМИ, считается, что данное ЭМИ принято с расстояния, на котором находится стробирующий импульс, т. е. ГР.

Таким образом, видно, что связь между радиоэхом молнии и ее ЭМИ устанавливается не посредством технической синхронизации регистрирующей аппаратуры, а за счет временного совпадения процессов с точностью примерно 3 мс (период между зондирующими импульсами $РЛС_m$). Очевидно, что собственное излучение и появление радиоэха ГР есть совпадающие по времени стадии одного и того же процесса, например главного разряда или лидера. Несмотря на указанное выше совпадение при регистрации ЭМИ гроз все же следует проводить периодический обзор пространства с помощью МРЛ-1 для определения расположения других грозовых облаков в радиусе обнаружения молнии станцией П-12. Это исключает в некоторых случаях ложное определение координат ГР, обнаруживаемых боковыми лепестками антенны. Один из возможных способов устранения такого явления приведен ниже.

Рассмотрим подробнее принцип «привязки» ЭМИ к расстоянию до источника излучения (ГР).

На рис. 5.2 б (эпюра 4) показаны прямоугольные импульсы, соответствующие каждому срабатыванию кинокамеры РФИ, фотографирующей атмосферники. Видно, что только второе срабатывание кинокамеры РФИ соответствует радиоэху ГР, расстояние до которого заранее известно по положению стробирующего импульса (эпюра 2). Если рассмотреть ЭМИ на частотах f_1 (эпюра 7) и f_2 (эпюра 8), то под стробирующим импульсом можно найти сигналы a_1 и a_2 , излученные молнией, радиоэхо которой изображено на эпюре 3.

На рис. 5.1 приведен вид поимпульсной записи радиоэха молнии и соответствующего ему ЭМИ, зафиксированного в 19 ч 36 мин 40 с 26 июля 1974 г. при удалении ГР на 45 км. Приведены также сигналы, принятые на 400 кГц (канал б) и 600 кГц (канал д). Поимпульсная регистрация радиоэха молнии получена при $P_m/P_{ш} > 10$ дБ. Вспышка молнии состоит из лидерной стадии (Δt_l), шести сильноточных повторных разрядов ($n=6$), зафиксированных в СДВ диапазоне с помощью РФИ, интервалы времени между которыми также показаны на рисунке цифрами (канал в). Значения этих интервалов хорошо согласуются со значениями, ранее полученными нерадиотехническими способами [93, 171].

Общая продолжительность вспышки, установленная по регистрации атмосфериков в СДВ диапазоне, составляет 435 мс (канал в), а по записи радиоэха вспышки, где каждый отраженный сигнал следует примерно через 3 мс, она составляет около 630 мс. С помощью данных, представленных на рис. 5.1, можно установить связь параметров шести атмосфериков, принятых в СДВ

диапазоне, с сигналами, зарегистрированными на f_1 и f_2 , а также с радиоэхо этой вспышки.

Нетрудно убедиться, что приведенный метод регистрации ЭМИ, «привязанного» к расстоянию до местоположения источника излучения, наряду с положительными сторонами имеет отрицательные. Этот метод не позволяет одновременно регистрировать ЭМИ от нескольких источников — молний, возникших в одном азимутальном секторе $A_{\text{макс}} \pm (5 \div 6)^\circ$ (ширина диаграммы направленности П-12) из-за введенного в регистрацию эхо-сигналов стробирования. Это можно устранить с помощью другого типа регистрации, при которой перед экраном осциллографа с яркостной модуляцией видеосигналов протягивается пленка [88, 147]. Такой тип регистрации целесообразно использовать, когда не нужно записывать длительное, почти непрерывное, излучение ГР, имеющее место на частотах более 1 мГц, например, когда требуется определить форму атмосфериков в СДВ диапазоне, вызывающих срабатывание грозопеленгатора-дальномера, а возможно, и другой радиоаппаратуры, срабатывающей от ЭМИ ГР как помехи.

Рисунок 5.3 поясняет принцип проведения такой регистрации. На вход осциллографа с яркостной индикацией видеосигналов или индикатора РЛС П-12 (при горизонтальном луче ИДВ или ИКО) поступают метки дальности и эхо-сигналы ГР. Слева от экрана устанавливается табло со светодиодами, на которое в двоичном коде выводятся значения азимута с грозопеленгатора и его дальномера (разработано Н. И. Крохиным), а справа — табло со светодиодами, воспроизводящими сигналы времени (с, мин, ч), сигналы срабатывания кинокамеры РФИ, а также специальное табло с номером кадра (N_k), сфотографированного РФИ атмосферика.

Одновременная регистрация радиоэха ГР и данных грозопеленгатора исключает возможность ложного определения расстояния до источника излучения, которое может иметь место при обнаружении молнии боковым лепестком диаграммы направленности антенны РЛС П-12. В тех случаях, когда пеленг на молнию совпадает с направлением $A_{\text{макс}}$ антенны РЛС (см. рис. 5.2 а), можно считать, что данные радиолокатора являются достоверными.

В последнее время пассивный режим работы РЛС П-12 используется для приема ЭМИ ГР. По нашему мнению, без одновременного использования данных грозопеленгатора такое исследование ЭМИ разрядов может привести к получению недостоверной информации, если в радиусе приема излучения станции находится больше, чем один грозовой очаг. Это подтверждается данными следующего эксперимента. Антенна радиолокатора с узкой диаграммой направленности ($\theta_r \approx 4^\circ$), способного обнаруживать разряды, была направлена на грозовое облако, в котором имели место молнии. Эхо-сигналы ГР с выхода приемного тракта этой станции подавались на левую половину двухлуче-

вого осциллографа типа ОК-17, на правую поступало ЭМИ разрядов, принимаемое в пассивном режиме боковым лепестком диаграммы направленности антенны станции П-12 (Аб. л, рис. 5.4).

На рис. 5.5 отчетливо виден шумовой след, принятый боковым лепестком антенны станции П-12, появившийся при возникнове-

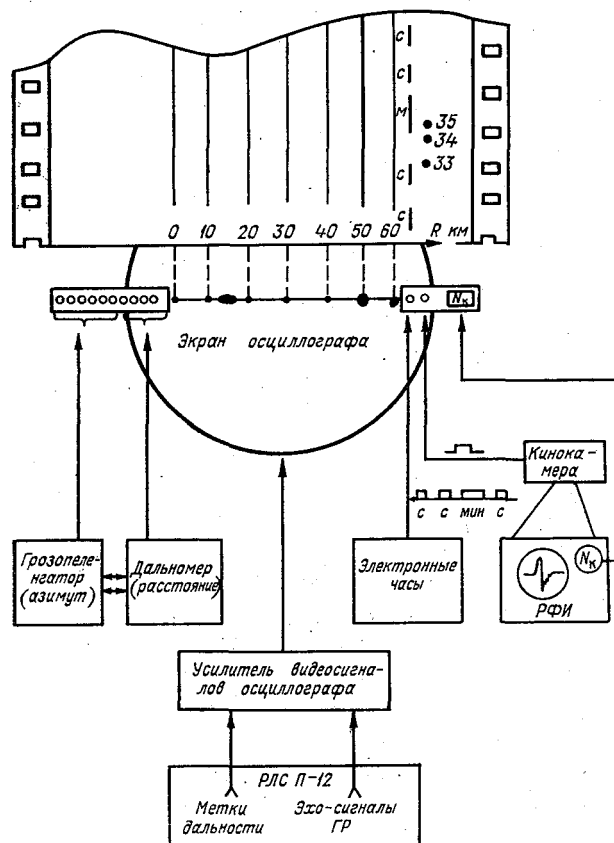


Рис. 5.3. Принцип одновременной регистрации эхо-сигналов ГР, данных АГПД, РФИ и меток времени.

нии молнии, обнаруженной РЛС РСП. В этом эксперименте РЛС РСП не регистрировала собственное ЭМИ ГР, так как в ее приемный тракт был введен аттенюатор. Результаты этого эксперимента дают основание полагать, что такое явление можно ожидать при приеме ЭМИ ГР с помощью антенн, имеющих значительные боковые лепестки, особенно на частотах, меньших 300—400 МГц, и при незначительных расстояниях до грозовых очагов от пункта приема их ЭМИ.

На рис. 5.6 показан метод регистрации ЭМИ в СДВ диапазоне при использовании автоматического грозопеленгатора-

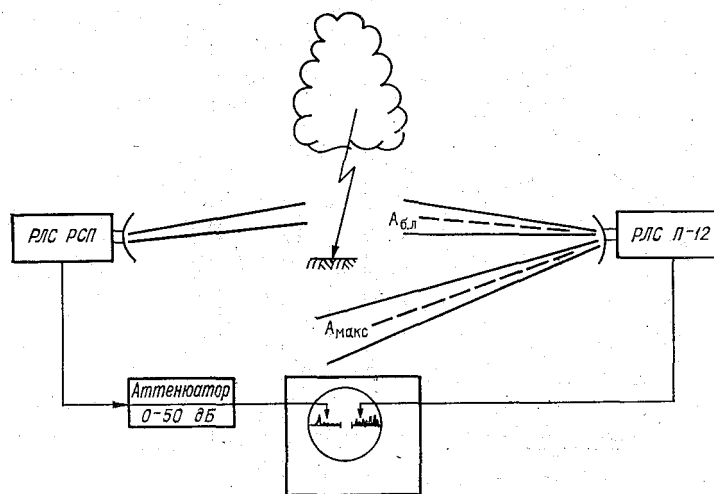


Рис. 5.4. Определение возможности обнаружения ГР и приема их ЭМИ боковым лепестком диаграммы направленности (БЛДН) антенны РЛС П-12.

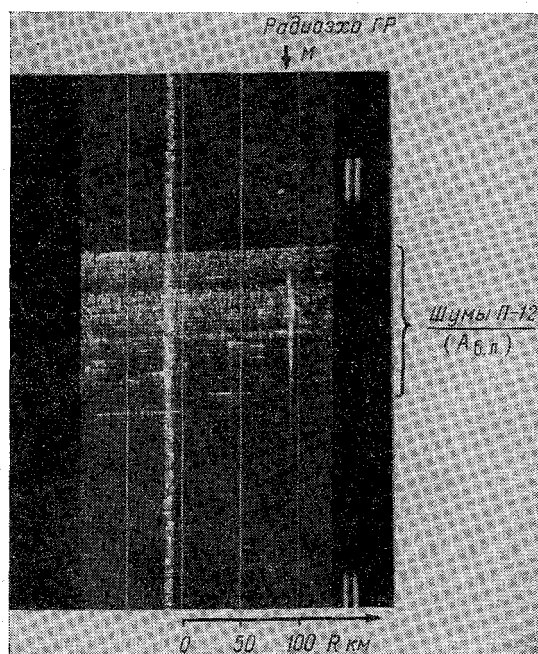


Рис. 5.5. ЭМИ ГР, зарегистрированное БЛДН РЛС П-12 (М — молния, обнаруженная РЛС РСП).

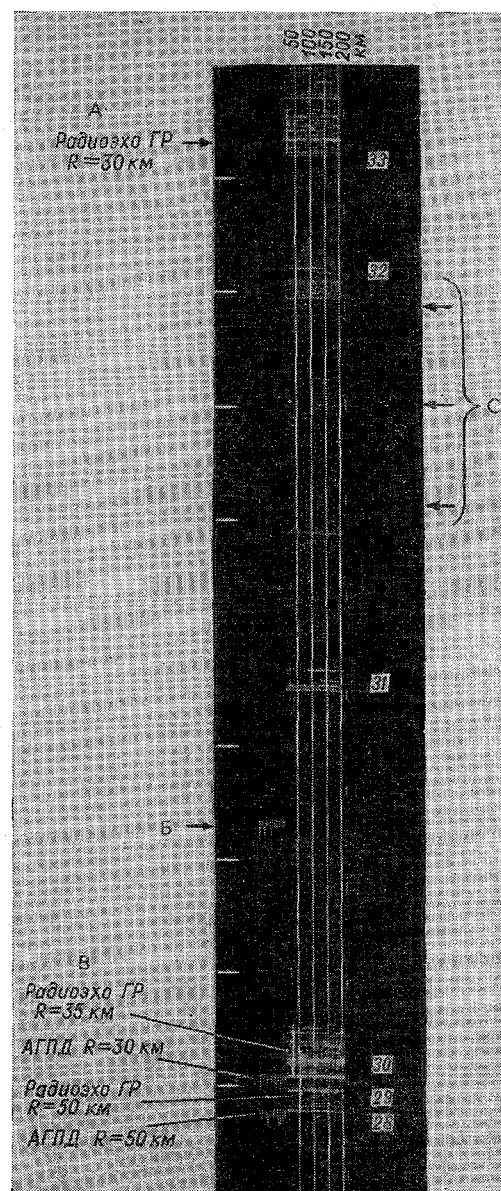


Рис. 5.6. Одновременная регистрация радиознах ГР, азимута и дальности АГПД (В), меток времени (с), меток дальности РЛС (вертикальные линии через 50 км), срабатывания кинокамеры РФИ (справа номер кадра), срабатывания только пеленгатора-дальномера (В) и только обнаружения ГР (А).

дальномера (АГПД) как уточняющего инструмента к РЛС_м, примененный в случае, когда грозовые облака расположены на расстоянии до 100 км. На этом рисунке, по-видимому, А — радиоэхо лидерной стадии или невертикального канала грозового разряда. Отсутствие слева кода АГПД говорит о том, что этот разряд не обнаружен им. Эхо-сигналам каналов молний всюду соответствуют вертикальные яркие отрезки линий, следующие параллельно масштабным меткам дальности.

Появление горизонтальных шумовых секторов обусловливается собственным излучением грозовых разрядов на частоте работы РЛС П-12. Появление при регистрации только кода азимута и дальности АГПД, не совпадающего по времени с эхо-сигналами ГР, имеет место в тех случаях, когда грозоактивная часть облака находится вне зоны обзора антенны РЛС П-12 (антенна РЛС в этом эксперименте установлена неподвижно). Когда показания РЛС П-12 совпадали по времени с данными АГПД, определялись:

- формы атмосфера, вызвавшего срабатывание АГПД;
- расхождения в расстояниях до молнии, устанавливаемых РЛС_м и АГПД.

Приведенная на рис. 5.6 одновременная запись данных РЛС П-12 и АГПД использовалась также для разделения (классификации) радиоэха облаков, обнаруженных РЛС_{см}, на грозовые и ливневые [50].

В п. 5.2 и 5.3 приведены данные, характеризующие ЭМИ ГР в сверхдлинноволновом и средневолновом диапазонах радиоволн. Они получены на основе использования активно-пассивных РТС, главной задачей которых являлось установление расстояния до источника излучения — ГР. Регистрация ЭМИ разрядов на основе описанного выше метода осуществлялась автоматически. Эти данные приводятся с целью привлечь внимание экспериментаторов к относительно простому способу исследования ЭМИ ГР с одного пункта и потому далеко не являются исчерпывающими. Несмотря на то что ошибка метода радиолокационного определения расстояния до молнии может достигать $\pm(4-6)$ км (за счет неточного установления дальности ее радиоэха и отсутствия данных о расположении в поле этого радиоэха эффективного центра излучения), описанный метод регистрации ЭМИ обеспечивает получение большого объема данных, характеризующих ЭМИ ГР при расположении грозовых облаков в радиусе их обнаружения МРЛ, РЛС П-12 и РСП. Обычно этот радиус не превышает 200—230 км, хотя с помощью станции П-12 были случаи обнаружения разрядов на расстоянии примерно 260 км.

Необходимо отметить, что на основе описанного метода регистрации ЭМИ ГР можно исследовать излучения разрядов и на $R \gg 230$ км, если в удаленном пункте имеется аппаратура приема сигналов времени или этот пункт проводит, например, прием кодовых сигналов, передаваемых с центра расположения РТС, осуществляющего обнаружение молнии.

5.2. Электромагнитное излучение грозовых разрядов в сверхдлинноволновом диапазоне

В настоящее время большое внимание уделяется внедрению инструментальных (радиотехнических) средств обнаружения одного из опасных явлений погоды, каким является гроза. Наряду с дальнейшим развитием радиотехнических средств активной локации метеорологических объектов, базирующихся на использовании радиолокационных станций сантиметрового, дециметрового и метрового диапазонов радиоволн, разрабатываются различного типа пассивные радиотехнические средства, в частности, автоматические грозопеленгаторы-дальномеры (АГПД), предназначенные для определения координат гроз с одного пункта.

Разработки грозопеленгаторов-дальномеров необходимы в связи с тем, что они позволяют не только локализовать грозовые очаги, но и определить их электрическую активность.

Для обоснованного выбора технических характеристик и методики калибровки АГПД необходимо знать распределение амплитуд ЭМИ грозовых разрядов и вариации их спектров.

Амплитудные характеристики учитываются, в первую очередь, при установлении чувствительности и требуемого динамического диапазона усиления аппаратуры регистрации атмосфериков, а также при определении порогов срабатывания счетчиков разрядов, широко используемых в метеорологической практике [98].

Определение параметров амплитудного распределения атмосфериков проводилось на основе анализа осциллограмм ЭМИ ГР, полученных в полосе частот 0,3—50 кГц с помощью прибора регистрации формы импульсов атмосфериков (РФИ). Расстояние до каждого отдельного разряда измерялось РЛС П-12 и РСП с погрешностью 1,5—2 км. Данные, характеризующие количество атмосфериков, зарегистрированных в дневное время в различные дни работы, и интервалы расстояний до источников их излучения (молний), установленные с помощью РЛС П-12 и РСП, приводятся в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Количество атмосфериков и удаление источников их излучения, зарегистрированных в процессе проведения эксперимента

Дата	R км	Число атмосфериков
10.07.76	50—80	90
24.07.76	30—130	411
25.07.76	130—200	141
26.07.76	35—80	197
2.08.76	10—120	571

Всего было подвергнуто анализу 1410 атмосфериков, принятых с расстояний, не превышающих 200 км, т. е. в радиусе наиболее вероятного обнаружения ГР радиолокаторами.

Для определения интенсивности атмосфериков в радиусе до 200 км включительно В. Г. Эихгорном была проведена обработка значений их амплитуд как в интервалах дальности, указанных в табл. 5.1, так и в целом, т. е. в интервале 10—200 км. В дальнейшем для обеспечения достаточной представительности выборки амплитудные значения зарегистрированных атмосфериков проводились к $R = 100$ км.

Все атмосферики по форме были классифицированы на три группы (первый полупериод сигнала положительный, отрицательный и атмосферики лидерных разрядов). При этом оказалось 745 атмосфериков с положительным и 205 с отрицательным вступлением, а также 468 близких по форме к излучению лидеров.

В каждой группе и по выборке в целом определялось дифференциальное распределение амплитуд. На рис. 5.7 приводится распределение амплитуд атмосфериков, зарегистрированных 2.08.76 г., при обнаружении эхо-сигналов молний на расстояниях 10—120 км. Аналогичного вида распределения были получены в остальные дни, указанные в табл. 5.1. Это позволило оценить средние значения амплитуд атмосфериков с положительным ($\bar{E}_+$), отрицательным ($\bar{E}_-$) вступлением и лидеров ($\bar{E}_л$), зарегистрированных при расстояниях до молний 10—200 км (числитель), а также приведенных к $R = 100$ км (знаменатель) (табл. 5.2).

В процессе обработки данных рассмотрено отношение числа атмосфериков в каждой из трех упомянутых выше групп к их общему числу (табл. 5.3).

Полученные данные позволяют сделать следующие предварительные выводы:

а) в 90 % случаев амплитуды атмосфериков всех групп, приведенных к $R = 100$ км, ограничены значением порядка 1 В/м,

Таблица 5.2

Средние значения атмосфериков (В/м)

Дата	R км	$\bar{E}_+$	$\bar{E}_-$	$\bar{E}_л$	$\bar{E}_{общ}$
10.07.76	50—80	2,8	2,4	0,6	2,7
	100	0,8	0,2	0,8	0,8
24.07.76	30—130	1,5	0,4	1,4	1,4
	100	0,9	0,4	0,7	0,9
25.07.76	130—200	0,8	0,5	1,0	0,8
	100	1,1	0,8	1,1	1,0
26.07.76	35—80	1,0	0,3	0,4	0,7
	100	0,4	0,2	0,2	0,3
2.08.76	10—120	2,4	1,2	1,5	2,0
	100	1,0	0,6	0,6	0,9

однако наблюдается изменение от одного грозового дня к другому. Для такого же числа случаев значения амплитуд атмосфериков с положительным вступлением, приведенных к $R = 100$ км, не превышают 1,1 В/м. Соответствующие значения амплитуд атмосфериков с отрицательным вступлением в среднем не превышают 0,5 В/м, а лидеров — 0,8 В/м;

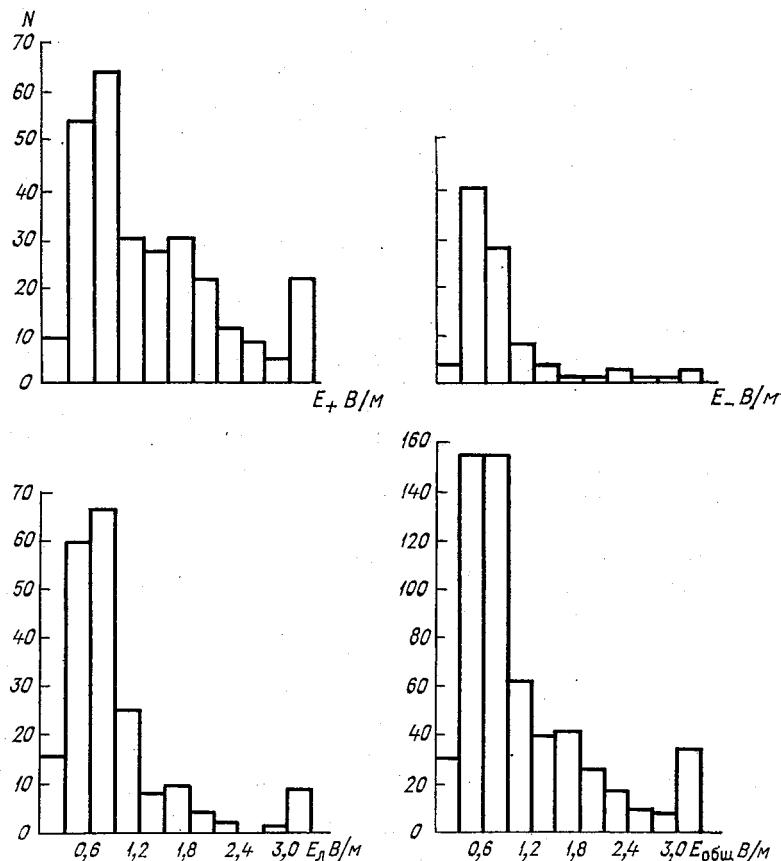


Рис. 5.7. Дифференциальное распределение амплитуд атмосфериков 2.08.76 г. на R , равных 10—120 км.

б) в одном и том же очаге амплитуды атмосфериков с положительным вступлением, как правило, в 2—3 раза превышают амплитуды атмосфериков с отрицательным вступлением и в 1,5—2 раза — амплитуды лидеров;

в) в отдельных случаях зарегистрированные значения амплитуд лидеров достигают значений амплитуд атмосфериков с положительным вступлением. По-видимому, это связано с пространственной ориентацией каналов соответствующих ГР;

г) в среднем от общего числа атмосфериков в 50 % случаев

Таблица 5.3

Отношение (%) числа атмосфериков каждой из трех групп к общему числу

Дата	$N_{+}/N_{\text{общ}}$	$N_{-}/N_{\text{общ}}$	$N_{\Delta}/N_{\text{общ}}$
10.07.76	40	15	45
24.07.76	60	15	25
25.07.76	60	10	30
26.07.76	45	20	35
2.02.76	50	15	35
Среднее	51	15	34

наблюдаются ЭМИ с положительным вступлением, в 15 % — с отрицательным и в 35 % — лидеры.

Рассмотрим спектральные характеристики ЭМИ ГР в СДВ диапазоне. Известно, что практически все существующие пеленгаторы гроз принимают атмосферерики в узкой полосе частот СДВ диапазона. В связи с этим представляет интерес обратиться к характеристикам амплитудного спектра атмосфериков на различных частотах указанного диапазона. Это позволит в дальнейшем более достоверно обосновать частоты настройки грозопеленгаторов-дальномеров, обеспечивающих получение данных об электрическом состоянии облаков.

На основе программ спектрального и статистического факторных анализов [132] В. Г. Эихгорн обработал выборку из 253 сигналов, принятых со следующих различных расстояний:

R км	60—65	80—90	105—120	165	175	233
Число сигналов	61	28	16	26	98	14

На рис. 5.8 представлены средние суммарные спектры в диапазоне частот 0,3—35 кГц атмосфериков всех типов, зарегистрированных с различных расстояний. Их анализ позволяет сделать предварительный вывод о том, что ширина среднего спектра на некотором фиксированном уровне относительно максимума спектральной плотности зависит от расстояния. С увеличением расстояния средний спектр сужается, а максимум спектральной плотности становится выраженным более четко на частотах 4—6 кГц.

Для оценки вариаций спектральной плотности атмосфериков целесообразно рассмотреть среднеквадратическое отклонение (СКО) амплитудного спектра на различных частотах в СДВ диапазоне (относительно среднего спектра).

Из рис. 5.9, на котором показано распределение абсолютных СКО спектров атмосфериков от их средних спектров, можно сделать следующие выводы:

1) СКО соизмеримо со средним суммарным спектром, его относительное значение составляет 0,7—1,0. Это свидетельствует

о том, что распределение случайных вариаций спектров не подчиняется нормальному закону;

2) характер зависимости СКО спектра от частоты подобен зависимости среднего спектра, в частности, его максимальные значения находятся в области частот 3—5 кГц, т. е. близко к экстремальному значению в среднем спектре.

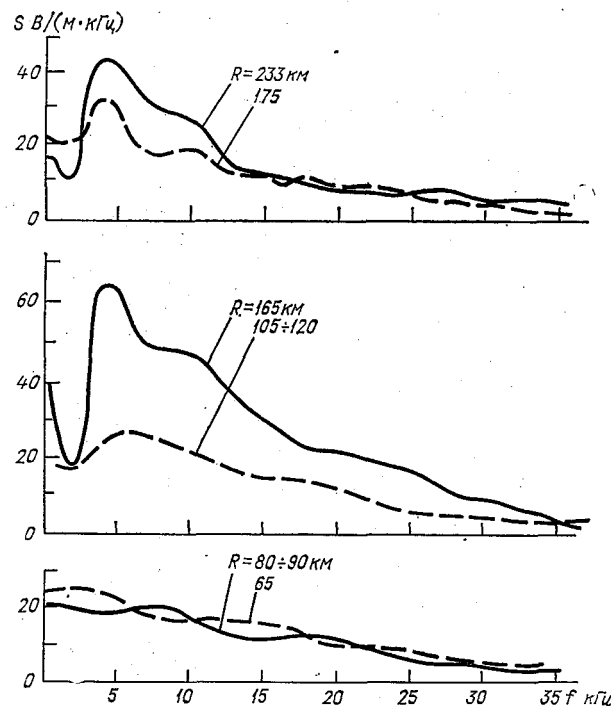


Рис. 5.8. Зависимость спектральной плотности от частоты.

В дальнейшем целесообразно проанализировать отношения значения СКО к среднему значению спектральной плотности (коэффициент вариации):

$$V = \sigma / \bar{S},$$

где σ — СКО, $\bar{S}$ — среднее значение спектральной плотности. Частотная зависимость коэффициента вариации для различных расстояний представлена на рис. 5.10. Здесь же показано изменение V для общей выборки $N = 253$ ($R = 65 \div 233$ км). Из анализа этих рисунков следует, что максимальные значения коэффициента вариации наблюдаются в большинстве случаев на частотах ниже 4—5 кГц ($V_{\text{макс}} = 0,8 \div 1,2$). Затем, с увеличением частоты V уменьшается и достигает значения 0,2—0,5 на $f = 7,5 \div 12,5$ кГц. В полосе частот 22,5—35 кГц наблюдается увеличение V до 1,1.

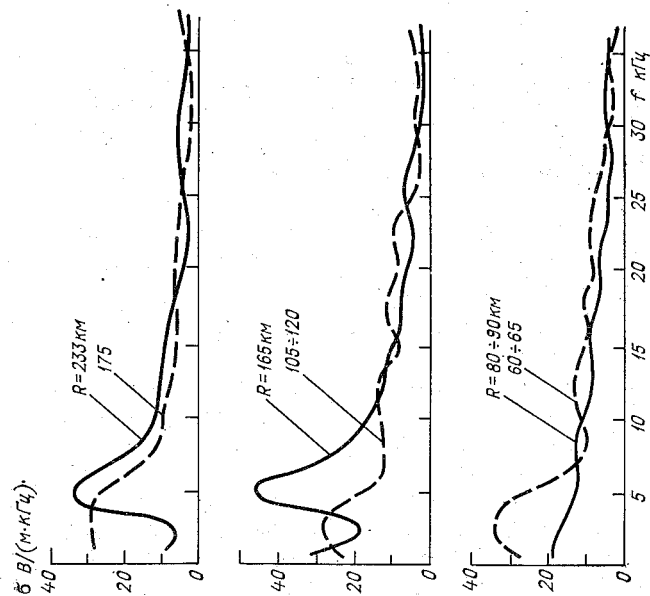


Рис. 5.9. Зависимость СКО от частоты.

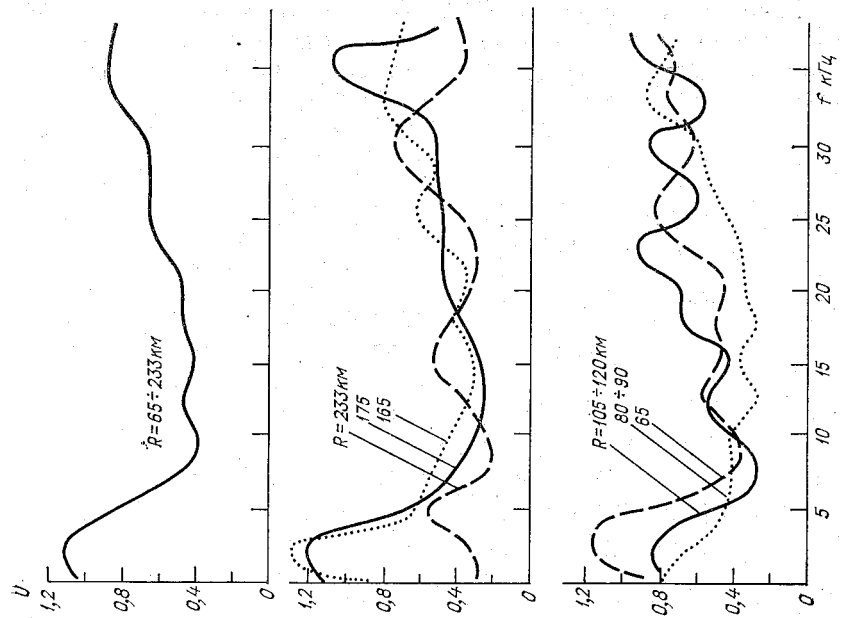


Рис. 5.10. Зависимость коэффициентов вариации от частоты.

Таким образом, видно, что в рассматриваемом диапазоне частот V может изменяться в 5—6 раз.

Следует заметить, что хорошо выраженной функциональной зависимости коэффициента вариации от расстояния не наблюдается. Это может быть связано с тем, что количество атмосфериков, принятых с различных удалений, было неодинаковым. Вместе с тем была замечена зависимость коэффициента вариации от числа и однородности очагов. Если очаг один или группа очагов однородна по форме ЭМИ атмосфериков, то $V_{\text{мин}}$ охватывает большую полосу частот, в которой его значение не превышает 0,4—0,5 ($R=175$ км), по сравнению с коэффициентом вариации для спектров ЭМИ из группы очагов, находящихся на $R=105\div 120$ км. Так, в первом случае рассматривались атмосферники, вызванные одиночными внутримассовыми грозowymi разрядами ($R=175$ км), а во втором — совокупностью очагов, находившихся на $R=105\div 120$ км.

В заключение следует отметить, что число рассмотренных атмосфериков не одинаково при различных удалениях молний. Это не позволяет сделать окончательные выводы, но показывает возможность получения статистически обеспеченных данных при проведении радиолокационного определения координат молний и одновременной регистрации их на ЭМИ.

5.3. Электромагнитное излучение грозowych разрядов в средневолновом диапазоне

Экспериментальные исследования с целью установления связи между параметрами радиоэха ГР и их ЭМИ показали, что излучение, регистрируемое в СВ диапазоне, всегда сопровождает радиолокационные отражения молнии. Как следует из работы [54], в этом диапазоне наблюдается излучение разрядов не только облако—земля, но и облако—облако, которые хорошо обнаруживает РЛС П-12. Кроме того, прием ЭМИ ГР на частоте примерно 500 кГц на расстояниях до 250 км от них позволяет зарегистрировать значительно большее количество атмосфериков, чем это можно, например, сделать с помощью порогового сверхдлинноволнового узкополосного грозопеленгатора с указанным радиусом действия.

Для более четкого определения момента перехода облака в грозовой весьма важным является увеличение информации, характеризующей его электрическую активность. В этом отношении представляет интерес проведение исследований ЭМИ ГР на частоте 500 кГц.

В летние периоды 1973—1976 гг. в Ленинградской области ЭМИ ГР регистрировались на частоте примерно 500 кГц при удалении грозowych разрядов на 20, 40, 60, 85, 100, 115, 125 и 150 км в тех случаях, когда имели место внутримассовые или фронтальные интенсивные грозы (когда РЛС П-12 обнаруживала

от 5 до 30 радиоэхо ГР в 1 мин [48]. С каждого расстояния записывалось и обрабатывалось не менее 50 порций сигналов.

Обычно атмосферерики, регистрируемые на частоте f_{500} , имели форму квазинепрерывного шумового излучения, внутри которого наблюдались дискретные сигналы большой амплитуды, условно названные импульсами типа «а». Такие сигналы появлялись одновременно с атмосфериками сильноточных разрядов, регистрируемыми в СДВ диапазоне и в промежутке между ними. На рис. 5.11 приводится запись ЭМИ вспышки молнии на f_{500} . Здесь же показаны параметры ЭМИ U_a , $U_{ш}$, $\tau_{ш}$ и $\Delta t_{ш}$, измерение которых производилось в процессе обработки данных, снимаемых с ленты прибора К-115.

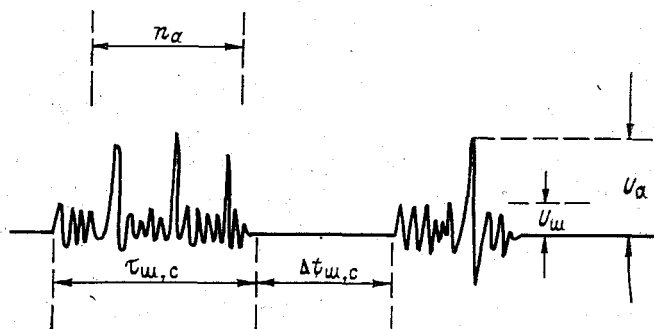


Рис. 5.11. Записи ЭМИ вспышки молнии на частоте 500 кГц.

Параметры U_a и $U_{ш}$ измерялись на уровне 0,7 их максимальных значений, а $\tau_{ш}$ и $\Delta t_{ш}$ — по моментам времени начала и конца каждой порции ЭМИ ГР. Точность измерения $\tau_{ш}$ и $\Delta t_{ш}$ составляла 3—5 мс.

В дальнейшем перечисленные параметры объединялись в совокупности (серии отсчетов), характеризующие их изменения при различных удалениях источников излучения — грозовых разрядов.

Данные, снятые с лент регистрирующего устройства, позволили установить следующие параметры:

- среднее значение квазинепрерывного шумового излучения вспышки молнии, состоящей из нескольких повторных разрядов ($\bar{U}_{ш}$);
- среднее значение импульсов типа «а» ($\bar{U}_a$);
- среднюю длительность квазинепрерывного шумового излучения ($\tau_{ш}$);
- среднее значение промежутка времени между порциями излучения длительностью $\tau_{ш}$ — $\Delta t_{ш}$;
- среднее количество импульсов $\bar{n}_a$ типа «а» в каждой из порций излучений, имеющих длительность $\tau_{ш}$.

Данные, характеризующие ЭМИ ГР по параметрам $\bar{U}_a$ и $\bar{U}_{ш}$, пересчитанные в напряженность поля E у антенны, в зависимости от удаления источника излучения представлены на рис. 5.12. Кривые $\bar{E}_a$ и $\bar{E}_{ш}$ получены в процессе обработки серии отсчетов. На рисунке прослеживается уменьшение интенсивности ЭМИ ГР по мере удаления грозового очага от пункта наблюдения. Так, например, по мере удаления грозовых разрядов, находящихся на расстоянии R , равном 20 км, в район, расположенный на рас-

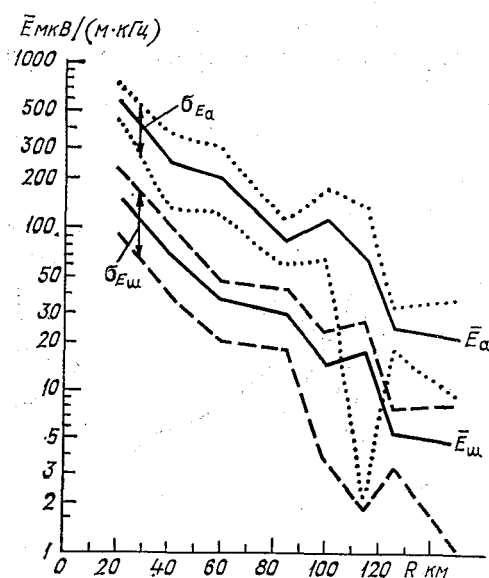


Рис. 5.12. Зависимости $\bar{E}_a = f(R)$ и $\bar{E}_{ш} = \psi(R)$.

стоянии 150 км, значения $\bar{E}_a$ и $\bar{E}_{ш}$ уменьшаются на 30—35 дБ. Наблюдается постоянное превышение по амплитуде сигналов типа «а» над квазинепрерывным шумовым излучением, обычно отношение $E_a/E_{ш} = 3 \div 8$. На этом рисунке, ограниченные пунктирными и штриховыми линиями, показывают дисперсии σ_{E_a} и $\sigma_{E_{ш}}$ соответственно. Приведенные данные позволяют определить необходимую чувствительность аппаратуры, предназначенной для обнаружения ГР. Если дальность приема такой аппаратуры ограничить радиусом действия штормового кольца предупреждения о грозах (до 150 км), то она должна иметь чувствительность 1—2 мкВ/(м·кГц).

Данные, характеризующие длительность квазинепрерывного шумового излучения ГР $\tau_{ш}$ в виде интегрального распределения, представлены на рис. 5.13. Видно, что с увеличением R растет длительность порции излучения. Это, по-видимому, происходит вследствие того, что пороговая чувствительность приемных трактов загроублялась при регистрации ЭМИ ГР, находящихся на расстоянии 20—100 км, и повышалась при расположении грозовых очагов на удалении $R > 100$ км. Такой метод выставления

порогов приемного тракта определялся тем, что динамический диапазон усиления приемников составлял около 15 дБ.

Несмотря на то что пороговая методика регистрации ЭМИ гроз не была оптимальной, все же можно утверждать, что значения $\tau_{ш}$ при $R = 150$ км, полученные при повышенной чувствительности приемных трактов, будут наблюдаться и при приеме сигналов ЭМИ с расстояния 20—40 км, при этом $\tau_{ш}$ может иметь большие значения.

На первый взгляд, приведенные на рис. 5.13 значения $\tau_{ш}$ кажутся весьма большими. Сопоставление этих данных с време-

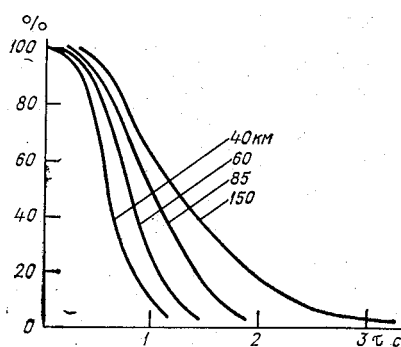


Рис. 5.13. Интегральное распределение $\tau_{ш}$, с.

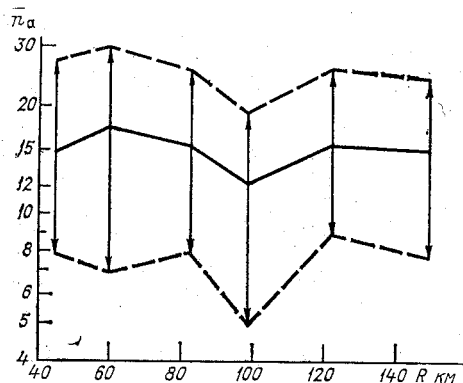


Рис. 5.14. Зависимость $\bar{n}_a = f(R)$.

нем существования радиоэха молний в метровом диапазоне радиоволн $\tau_m = \psi(n)$, позволяет считать, что измеренные значения $\tau_{ш}$ соответствуют физическим процессам в облаках при ГР.

Из работы [50] следует, что в 80 % случаев при $n_m \geq 4$ $\tau_m \leq 600$ мс, в то время как $\tau_{ш} \leq 1800$ мс. При этом установлено, что существует зависимость $\tau_{ш}$ от числа повторных разрядов во вспышке молнии.

Было также рассмотрено среднее число импульсов $\bar{n}_a$ типа «а» в каждой порции ЭМИ ГР в зависимости от дальности, т. е. $\bar{n}_a = \psi(R)$. Эта зависимость представлена на рис. 5.14, где вертикальные линии ограничивают зоны разброса стандартного отклонения от среднего значения. Видно, что $\bar{n}_a$ с удалением ГР почти не изменяется.

Обычно импульсы типа «а» принимались не только при появлении главных и повторных разрядов, но и в промежутках времени между ними. Так, например, если среднее число повторных разрядов вместе с главным в Ленинградской области составляло 3—4 [50], то $\bar{n}_a = 13 \div 16$. В 80 % случаев ($N_{общ} = 271$) $\bar{n}_a \leq 28$. Можно предполагать, что в грозном облаке между сильноточными разрядами возникают дополнительные, которые «подпитывают» основные сильноточные разряды.

Представляет интерес определение интервала времени $\Delta t_{ш}$ между отдельными порциями квазинепрерывного шумового излучения на f_{500} . Такие данные в виде интегральных распределений представлены на рис. 5.15. Здесь на интервал $\Delta t_{ш}$ так же, как и на величину $\tau_{ш}$, оказал влияние метод регистрации ЭМИ при различных порогах чувствительности приемных трактов.

При повышенной чувствительности приемных трактов, т. е. когда расстояние до ГР составляло 100—150 км, наблюдались наименьшие значения $\Delta \bar{t}_{ш}$. При близких грозах наблюдалось обратное. Таким образом, если при $R = 150$ км $\Delta t_{ш} = 5 \div 6$ с, то при $R = 20 \div 40$ км и повышенной чувствительности приемного

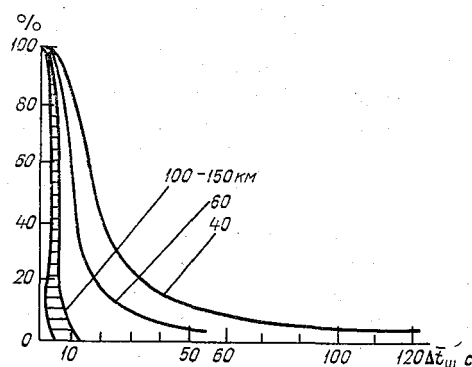


Рис. 5.15. Интегральное распределение $\Delta \bar{t}_{ш}$, с.

тракта (2 мкВ/(м·кГц)) $\Delta \bar{t}_{ш} \leq 5$ с. Как отмечалось, приведенные данные получены при исследовании ЭМИ ГР только интенсивных гроз. Остальные случаи (начало и конец грозовой стадии, слабая грозовая активность) требуют проведения дальнейших исследований.

Полученные значения $\Delta t_{ш} \leq 5$ с не являются случайными. Это видно из того, что при сильных грозах эхо-сигналы ГР, обнаруживаемые РЛС П-12, следуют через интервалы времени 2,5—11 с (см. рис. 4.14), если грозовые облака находятся даже на удалении 200 км.

Глава 6

Исследование гроз с помощью бортовых средств

6.1. Обнаружение гроз самолетными РЛС

Известно, что одним из основных требований, предъявляемых к современной гражданской авиации, является обеспечение безопасности полета для пассажиров. На самолетах для этого во

время полетов широко используются как специальные самолетные метеорологические радиолокаторы, так и радиолокаторы, предназначенные для решения навигационных задач, т. е. предупреждения столкновений с орографическими препятствиями и другими самолетами, картографирования поверхности земли, определения направления на наземные радиомаяки и т. д.

Как правило, современные бортовые РЛС являются многоцелевыми, но они должны обеспечить решение следующих метеорологических задач:

- обнаружение опасных для полета облаков и определение их геометрических размеров;

- обнаружение зон осадков и распознавание гроз, а также выделение в облаках зон с повышенной турбулентностью (по косвенным признакам) [145];

- определение направления и скорости перемещения опасных облаков, тенденции в их эволюции (рост, распад);

- установление верхней границы радиоэха облаков (если РЛС имеет диаграмму направленности типа «игольчатый луч») и т. п.

Решение перечисленных задач крайне необходимо, так как по данным ИКАО 52 % общего числа летных происшествий и предпосылок к ним по метеопричинам приходится на полеты в условиях развития мощных кучевых и кучево-дождевых облаков и связанных с ними опасных явлений погоды (грозы, град, турбулентность и т. д.) [11]. При грозах возникает возможность поражения самолетов молниевыми разрядами. В зонах с сильной турбулентностью, где порывы ветра достигают 10 м/с и более [182] самолет испытывает сильную болтанку, в результате чего может быть повреждена конструкция самолета. Аварии самолетов из-за наличия сильной турбулентности чаще всего происходят в зонах грозовой деятельности. Так, анализ данных наблюдений за 40 000 часов полета по международным трассам показал, что более 50 % случаев сильной турбулентности было связано с грозами [38, 175]. Интенсивные дожди из грозовых облаков вызывают эрозию и механические повреждения поверхности самолета, что приводит к потере запаса прочности самолета [38].

Для того чтобы экипаж современного реактивного лайнера имел возможность выбрать направление безопасного полета и своевременно совершить маневр по обходу опасных ливневых и грозовых зон, самолетные метеорологические РЛС (СМРЛС) должны быть высокопотенциальными. Этим объясняется стремление довести радиус обнаружения гроз СМРЛС до 550—670 км [104]. При этом основное внимание уделяется снижению коэффициента шума приемного тракта РЛС, улучшению характеристик излучения антенны, т. е. увеличению коэффициента ее усиления, совершенствованию методов индикации цели. Современные отечественные и зарубежные СМРЛС выпускаются с мощностью излучения в 3—10 раз меньшей, чем первое поколение

бортовых РЛС, но в 2—6 раз большей длительностью зондирующего импульса.

Максимальную дальность СМРЛС с диаграммой направленности антенн типа «игольчатый луч» по обнаружению грозовых облаков и зон осадков при вероятности 0,95 можно определить с помощью выражения (3.1).

Представляет интерес рассмотреть возможность обнаружения грозовых облаков СМРЛС, отражаемость которых изменяется в широких пределах от 10^2 до 10^6 мм⁶/м³.

В табл. 6.1 приведены параметры СМРЛС, предназначенных для обнаружения грозовых облаков на расстояниях до 375 и

Таблица 6.1

Параметры СМРЛС, предназначенных для обнаружения метеорообъектов на разных расстояниях

СМРЛС	P_t кВт	P_r Вт	$N_{ш}$ дБ	λ см	τ мкс	D см	$\theta_{г. в.}^\circ$	$R_{макс}$ км
$R \leq 375$ км								
Primus-20W XD	7	—	9	3,2	2,25	30,5	7,5	370
RDR-160	6	—	—	3,2	3,5	30,5	7,5	300
RDR-130	8	—	—	3,2	—	30,5	7,5	300
RDR-150	8	—	—	3,2	3,5	30,5	7,5	300
KWK-60	3	—	—	3,2	—	30,5	7,5	280
WXR-150	5	$1 \cdot 10^{-14}$	11,3	3,2	5,5	30,5	7,5	220
Primus-30W XD	7	$2,8 \cdot 10^{-14}$	9	3,2	1,5	30,5	7,5	150
Primus-35WX	7	$2,2 \cdot 10^{-14}$	8,5	3,2	2,25	45,7	4,8	370
РПСН-2	60	$1,6 \cdot 10^{-13}$	—	3,2	1	76	2,8	280
"Гроза"	12	$6,3 \cdot 10^{-14}$	—	3,2	2; 3,5	—	3,0	375
$R \leq 670$ км								
Primus-40W XD	10	$1 \cdot 10^{-14}$	7	3,2	3,5	45,7	4,8	677
AVQ-30X	60, 75	$2,6 \cdot 10^{-14}$	8,2	3,2	6	76,2	2,9	555
AVQ-30C	60, 75	$2,6 \cdot 10^{-14}$	8,2	5,5	6	76,2	4,96	555
WXR-80	30	$1 \cdot 10^{-14}$	8,5	3,2	5,5	55,9	3,94	555
RDR-1F	65, 75	$2,1 \cdot 10^{-14}$	6,5	3,2	5	76,2	2,9	555
AVQ-21	8	10^{-14}	7,5	3,2	3,5	61,0	3,6	600
МРЛ-2	200	10^{-13}	10	3,2	1,2	300	0,8	—

Примечание. В таблице указаны параметры только СМРЛС, которые обеспечивают дальнейшее обнаружение метеоцелей и имеют параболические антенны. При решении неметеорологических задач эти РЛС работают с меньшей длительностью зондирующего импульса и обладают меньшей дальностью обнаружения.

670 км и устанавливаемых на самолетах гражданской авиации США [104], а также некоторых отечественных РЛС аналогичного назначения [91, 100]. Для сопоставления с параметрами СМРЛС дальнего обнаружения приведены параметры наземной метеорологической отечественной станции МРЛ-2.

В связи с тем, что некоторые параметры СМРЛС США, необходимые для определения максимальной дальности обнаружения

гроз, в [104] отсутствуют, они определены с помощью следующих известных выражений:

$$\theta_{г.в} = 68,8 \frac{\lambda}{D},$$

$$P_{г.мин} = 4 \cdot 10^{-18} N_{ш} \Delta f,$$

$$G = \frac{25\,000}{\theta_{г.} \cdot \theta_{в}},$$

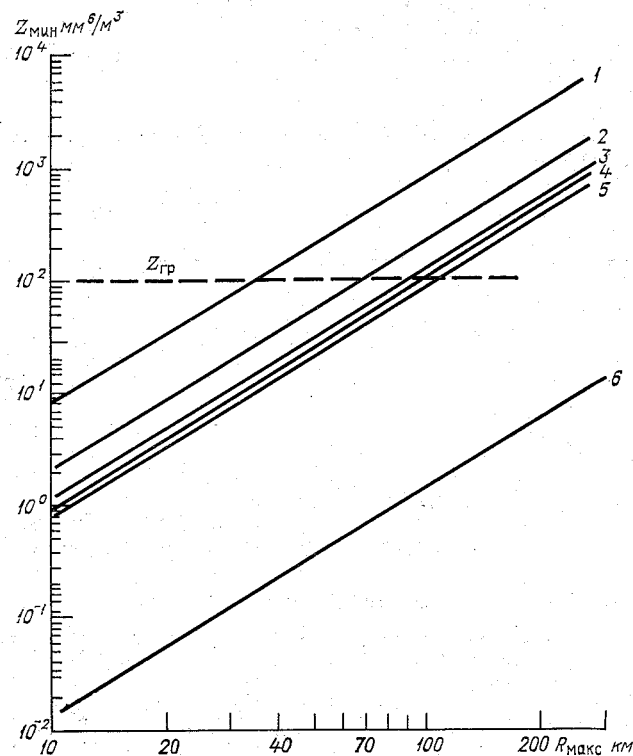


Рис. 6.1. Зависимость $Z_{мин} = \varphi(R_{макс})$ для различных РЛС на расстоянии до 375 км.

1 — Primus-30W XD, 2 — Primus-35WX, 3 — WXR, 4 — РСРН-2, 5 — «Гроза», 6 — МРЛ-2.

где D — диаметр параболического зеркала антенны (м), Δf — ширина полосы пропускания приемного тракта (кГц), $N_{ш}$ — коэффициент шума (дБ).

С помощью уравнения 3.1 определена зависимость $Z_{мин} = \varphi(R_{макс})$ для некоторых РЛС, приведенных в табл. 6.1 (рис. 6.1 и 6.2). Здесь $Z_{мин}$ — минимальное значение отражаемости облаков, при котором обеспечивается их обнаружение на расстоянии R . Такое расстояние принято считать максимальным ($R_{макс}$).

Если учесть, что наиболее часто мощные кучевые и кучево-дождевые облака переходят в грозное состояние при $Z_{гр} \geq 10^2 \text{ мм}^6/\text{м}^3$, то из рис. 6.1 видно, что эту начальную стадию электрической активности облаков (возможное появление в них грозовых разрядов) СМРЛС, предназначенные для обнаружения метеоцелей в радиусе до 370 км, «увидят» не далее 30—100 км. Из рис. 6.2 следует, что СМРЛС с радиусом 500—670 км обнаружат начальную стадию грозовых облаков на расстоянии, не пре-

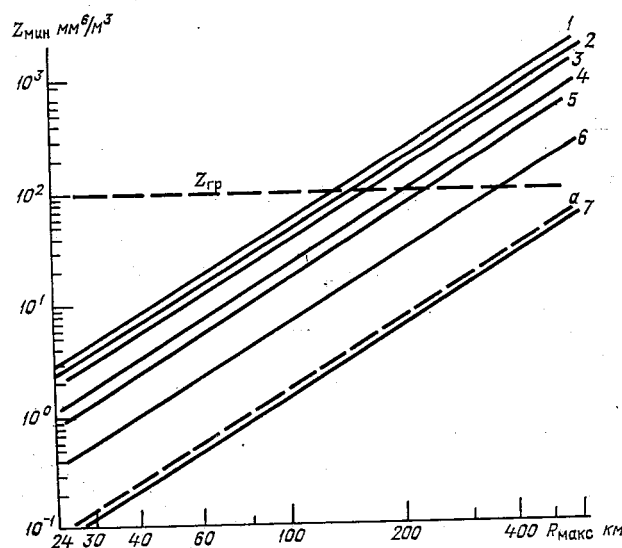


Рис. 6.2. Зависимость $Z_{мин} = \varphi(R_{макс})$ для различных РЛС на расстоянии до 670 км.

1 — RDR-1F, 2 — Primus-40WDX, 3 — AVQ-30C, 4 — AVQ-21, 5 — WXR-80, 6 — AVQ-30X, 7 — МРЛ-2

вышающем 120—380 км. Таким образом, рис. 6.1 и 6.2 показывают, что все СМРЛС обнаруживают грозовые очаги хуже, чем наземная метеорологическая РЛС МРЛ-2.

На рис. 6.3 а представлены грозовые очаги, обнаруженные МРЛ-2 на северо-западе ЕТС в 14 ч 19 мин 26.07.76 г. Видно, что наиболее опасные зоны, где $Z > 10^2 \text{ мм}^6/\text{м}^3$, находятся на удалении 60—80 км в секторах 255—300 и 315—330°.

Установим, что обнаружит СМРЛС, например, Primus-30 WXD, если эту станцию расположить в том же месте, где и МРЛ-2. Сделаем это следующим образом.

Зависимость $Z_{мин} = \varphi(R_{макс})$ для РЛС МРЛ-2 (индекс 1) и Primus-30 WXD (индекс 2) представим в виде:

$$Z_1 = 1,3 \cdot 10^{-4} R_1^2 \cdot 10^{0,1n_1}, \quad (6.1)$$

$$Z_2 = 8 \cdot 10^{-2} R_2^2 \cdot 10^{0,1n_2}, \quad (6.2)$$

где $n_{1,2}$ — затухание (дБ), вводимое в приемные тракты РЛС при измерениях отражаемости облаков.

Определим затухание n_1 , которое необходимо ввести в приемный тракт МРЛ-2, чтобы он обнаруживал облака аналогично станции Primus-30 WXD (при максимальной ее чувствительности, т. е. при $n_2 = 0$ дБ и $R_1 = R_2$). Приравнявая (6.1) и (6.2), получаем $n_1 \approx 28$ дБ.

При проведении наблюдений в 14 ч 19 мин СМРЛС не обнаружила бы зарождающиеся грозовые зоны в азимуте $330-355^\circ$ на удалении 70—80 км. При повторном обзоре МРЛ-2 через

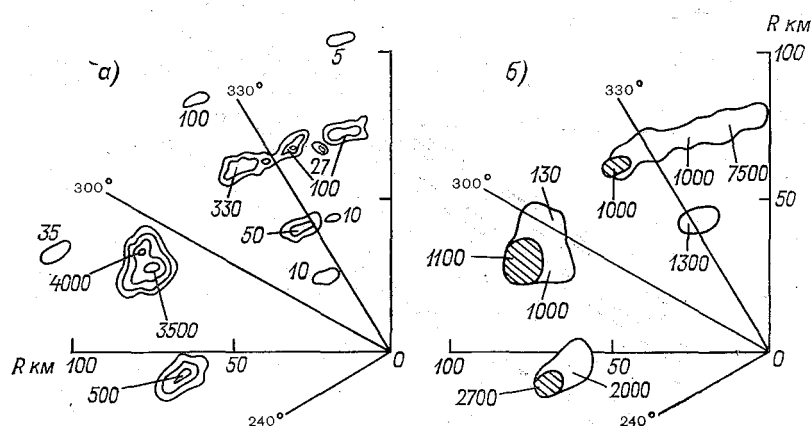


Рис. 6.3. Радиоэхо облаков на ИКО МРЛ-2 26.07.76 г. в 14 ч 19 мин (а) и в 14 ч 30 мин (б) (цифры — значения $Z_{\max}$ в $\text{мм}^6/\text{м}^3$; заштрихованы зоны очагов, обнаруженные СМРЛС в 14 ч 19 мин).

11 мин (14 ч 30 мин) в этом секторе появились интенсивные грозовые зоны, о чем свидетельствует отражаемость, указанная на рис. 6.3 б.

Таким образом, если в приемном тракте станции МРЛ-2 с помощью плавного аттенюатора установлено затухание примерно 28 дБ, то на любом расстоянии от этой станции будут обнаруживаться грозовые зоны так, как их обнаруживает СМРЛС Primus-30 WXD. При сопоставлении данных наземной РЛС и бортовой можно с помощью МРЛ-2 определить момент времени, когда СМРЛС обнаружит развивающееся облако.

С помощью приведенных несложных расчетов можно оценить радиус обнаружения любой СМРЛС, параметры которой приведены в табл. 6.1, по сравнению с МРЛ-2.

С целью экспериментальной проверки рассмотренного метода оценки эффективности обнаружения грозовых облаков бортовыми РЛС летом 1982 г. на полигоне ГГО была установлена бортовая станция «Гроза» рядом с МРЛ и проведены одновременные наблюдения. При этом с помощью МРЛ в радиусе 300 км осуществ-

лялось измерение отражаемости облаков и определение высоты их радиоэха как обнаруживаемых, так и не обнаруживаемых станцией «Гроза».

Из-за неравенства размеров диаграммы направленности антенн указанных станций наблюдения на РЛС «Гроза» в зависимости от расстояния до метеоцели проводились для следующих углов места (θ_v) ее антенны: при $R \geq 100$ км для $\theta_v = 1,5^\circ$; при $50 \text{ км} \leq R \leq 100 \text{ км}$ для $\theta_v = 1,5^\circ$ и $\theta_v = 4,5^\circ$; при $R < 50$ км для $\theta_v = 1,5^\circ$, $\theta_v = 4,5^\circ$ и $\theta_v = 7,5^\circ$.

В пределах значений θ_v выбирался такой угол места антенны МРЛ, при котором фиксировалось максимальное значение отражаемости облака, прослеживаемого на экране станции «Гроза».

На рис. 6.4 приводятся снимки экрана ИКО МРЛ-2 при вводимых в ее приемный тракт затуханиях через 5 дБ и экрана станции «Гроза», проводившей одновременно с МРЛ-2 обзор пространства в секторе $180-360^\circ$. Сопоставление полученных данных позволяет сделать вывод о том, что РЛС «Гроза» обнаруживает метеоцели так же, как и МРЛ при затухании в ее приемном тракте, равном $20-25$ дБ. Эти экспериментальные данные подтверждают достоверность выше приведенной оценки возможности обнаружения облаков любой бортовой РЛС при известных ее параметрах с помощью наземного метеорологического радиолокатора.

Предположим, что центр радиоэха грозового облака удален от МРЛ-2 на $R_1 = 20$ км. Определим, что обнаружит СМРЛС Priplus-30W XD на $R_2 = 60$ км от этого очага. Сопоставление выражений (6.1) и (6.2) при $n_2 = 0$ позволяет определить значение n_1 , при котором на экране МРЛ-2 будут прослеживаться очаги, обнаруживаемые СМРЛС. В данном случае

$$n_1 = 10 \lg \frac{8 \cdot 10^{-2} R_2^2}{1,3 \cdot 10^{-4} R_1^2} \approx 28 \text{ дБ}.$$

Следует отметить, что вводимые в приемный тракт МРЛ-2 затухания не позволяют получить на его экране конфигурацию радиоэха грозового облака, подобную той, которая прослеживается на экране СМРЛС, ибо сравниваемые станции имеют различные диаграммы направленности антенн. При таком сравнении с помощью МРЛ-2 можно только установить факт обнаружения бортовой РЛС того или иного грозового очага. В сложной грозовой обстановке это может оказаться полезным наземной службе аэропорта для принятия решения об изменении маршрута полета самолета. С внедрением автоматизированной обработки данных наземных метеорологических РЛС приведенные выше данные смогут оперативно поступать в службу управления полетами.

Рассмотрим параметры СМРЛС, в наибольшей степени влияющие на дальность обнаружения грозовых очагов.

1. Длина волны (λ). При выборе длины волны учитывается, что бортовые РЛС должны обнаруживать наиболее опасные крупнокапельные зоны облаков и кристаллов льда; зоны, где

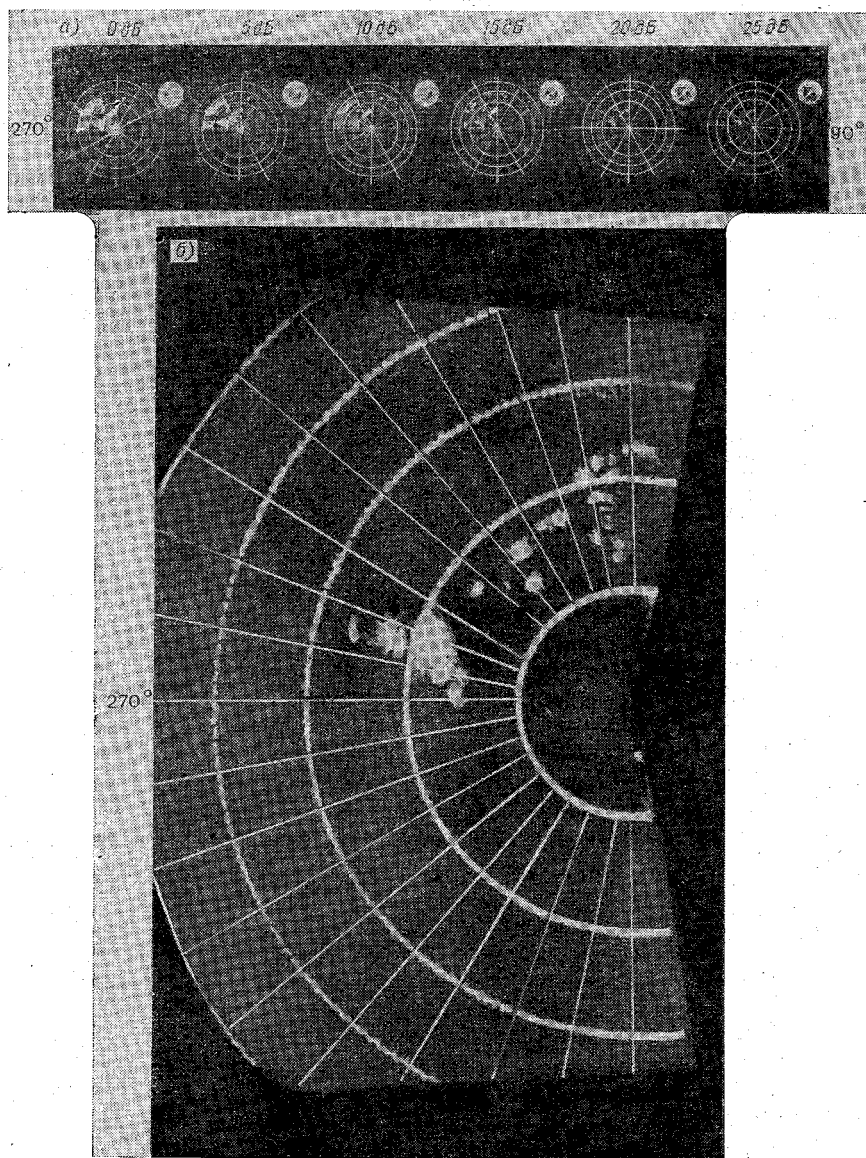


Рис. 6.4. Радиоэхо грозовых очагов на ИКО станций МРЛ-2 (а) и «Гроза» (б) в 13 ч 38 мин 19.07.82 г. (метки дальности через 50 км).

наблюдаются турбулентность и грозовые явления. Учитывается также минимальное затухание радиоволны в таких метеообразованиях. Большинство бортовых РЛС работает в 3-см диапазоне радиоволн, хотя известны станции 2-см и 5,5-см диапазонов [104, 151]. Диапазон 5,5 см характеризуется незначительным затуханием в гидрометеорах, что позволяет получить более четкое очертание радиоэха облаков при наличии интенсивных осадков, хотя используется редко в связи с тем, что требует увеличения диаметра параболоида антенны для формирования острой диаграммы направленности.

Целесообразность использования 3-см диапазона радиоволн, по сравнению с 0,8-см и 2-см, при создании СМРЛС можно проследить с помощью табл. 6.2, где приводятся значения ослабления радиоволн $\bar{\alpha}$ в дождях различной интенсивности, рассчитанные для середины градации интенсивности дождя [142]. Предполагалось, что распределение капель в дождях соответствует распределению Маршалла-Пальмера.

Таблица 6.2

Ослабление радиоволн $\bar{\alpha}$ (дБ/км) в дождях различной интенсивности

λ см	I мм/ч			
	0,25—1 (слабый)	1—4 (умеренный)	4—15 (сильный)	15—50 (очень сильный)
0,8	0,21	0,69	2,64	5,54
2,0	0,01	0,08	0,46	1,22
3,0	0,006	0,035	0,19	0,58
5,0	0,001	0,011	0,03	0,10

Из табл. 6.2 видно, что использование бортовых РЛС с $\lambda = 3$ см дает преимущество по сравнению с $\lambda = 0,8$ см, так как $\bar{\alpha}_{0,8}/\bar{\alpha}_3$ изменяется от 35 до 20 соответственно в слабых и умеренных осадках и от 14 до 10 соответственно в сильных и очень сильных. По-видимому, этим объясняется отсутствие СМРЛС, работающих в миллиметровом диапазоне радиоволн. Однако СМРЛС с $\lambda = 3,2$ см уступают станциям с $\lambda = 5$ см, где даже в интенсивных осадках $\bar{\alpha}_5/\bar{\alpha}_3$ менее 0,2.

В связи с тем что при заданной выходной мощности передатчика и чувствительности приемного тракта РЛС дальность обнаружения, разрешающая способность станции и геометрические размеры антенны определяются длиной волны, окончательный выбор ее зависит от того, какому параметру отдается предпочтение — максимальной дальности обнаружения, угловой разрешающей способности или минимальному поглощению в осадках.

2. Длительность импульса (τ). В связи с тем что самолетные РЛС являются многоцелевыми, навигационные задачи,

решаемые ими, в частности, картографирование местности, требуют, чтобы они работали при наименьшей длительности зондирующего импульса. В этом случае τ не превышает 1,5 мс. При решении же метеорологических задач на сверхзвуковых самолетах, где, по нашему мнению, не требуется высоких точностей при определении расстояния до облаков, а необходимо своевременное их обнаружение, целесообразно, чтобы РЛС работала при большем значении τ , обеспечивающем облучение наибольшего объема облака. При этом $\tau_{\text{макс}}$ ограничивается значением, при котором становится невозможным выделение зон осадков или одиночных грозových ячеек. Как следует из [104], это наблюдается при $\tau > 10$ мкс.

Современные СМРЛС, как правило, имеют длительность излучаемого импульса больше наземных МРЛ. Это можно объяснить следующим образом. Если в уравнении (3.1) обозначить ряд постоянных параметров станции, коэффициентов и численных величин, появляющихся при переходе от η к Z и от h к τ , через c_1 , то получим выражение, позволяющее определить $Z_{\text{мин}} = \varphi(R_{\text{макс}})$ вида

$$Z_{\text{мин}} = \frac{c_1 P_{r \text{ мин}} R_{\text{макс}}^2}{\tau}. \quad (6.3)$$

Учитывая, что $P_{r \text{ мин}} = 4 \cdot 10^{-18} \Delta f N_{\text{ш}} = \frac{c_2}{\tau}$, где $c_2 = 4 \cdot 10^{-18} k' N_{\text{ш}}$

(k' — коэффициент соответствия Δf излучаемой длительности τ зондирующего импульса), выражение (6.3) можно представить следующим образом:

$$Z_{\text{мин}} = c_3 R_{\text{макс}}^2 / \tau^2.$$

Здесь $c_3 = c_1 c_2$. Видно, что значение минимальной отражаемости облаков, обнаруживаемых метеорадиолокаторами, определяется квадратичной зависимостью вида $1/\tau^2$. Таким образом, увеличение τ от 1 до 5 мкс приводит к тому, что СМРЛС обнаруживает облака с отражаемостью, в 25 раз меньшей, чем при работе с $\tau = 1$ мкс. Этим объясняется, что большинство СМРЛС дальнего обнаружения метеоцелей излучают зондирующие импульсы, имеющие $\tau \geq 3,5$ мкс при $\tau_{\text{макс}} \approx 6$ мкс. При таких значениях τ геометрические размеры отражающего импульса в радиальном направлении ($c\tau/2$) составляют 525 м (при $\tau = 3,5$ мкс) и 900 м (при $\tau = 6$ мкс). Эти размеры значительно меньше наиболее часто встречающихся размеров отдельных грозových ячеек, имеющих диаметр 10—11 км [95, 111].

3. Ширина диаграммы направленности антенны. Известно, что чем уже диаграмма направленности антенны, тем больше ее коэффициент усиления (G). Из выражения (3.1) видно, что значение P_r облаков пропорционально G^2 . Мешающее влияние отражения земной поверхности становится минимальным по мере сужения диаграммы направленности СМРЛС. Как следует из [104, 151], большинство СМРЛС США имеют диаметры параболоидов

антенн 25,4—76,2 см. Такие размеры позволяют получить ширину диаграммы направленности антенн 8,6—2,9°.

Первые бортовые РЛС использовали параболические отражатели, перемещающиеся относительно облучателя. При изменении угла места такой антенны наблюдалось уменьшение площади облучения зеркала, что приводило к уменьшению дальности обнаружения целей.

В последние годы стали выпускаться СМРЛС с антеннами в виде плоской щелевой решетки, почти не имеющей указанного недостатка. Эти решетки позволили получить большие значения коэффициента усиления антенны и значительно уменьшить уровень боковых лепестков их диаграммы направленности. При одинаковых диаметрах зеркала антенна в виде плоской щелевой решетки имеет G на 3 дБ больше, чем обычная параболическая антенна [104]. Несмотря на стремление увеличить коэффициент усиления антенны СМРЛС пока не удалось получить значений, сопоставимых с G наземных метеорологических станций. Так, например, отношение G^2 СМРЛС с наименьшим значением $\theta_{г, в} \approx 2,9^\circ$ к G^2 МРЛ-2 составляет $2 \cdot 10^{-3}$, а к G^2 МРЛ-5 — $4 \cdot 10^{-4}$. Этим в значительной мере объясняется лучшее обнаружение облаков наземными МРЛС.

При проведении наблюдений за грозowymi ячейками ширина диаграммы направленности антенны определяет разрешение в вертикальной и горизонтальной плоскостях, а также обуславливает значение коэффициента заполнения (k_z) облучаемого объема метеоцелью. Параболические антенны различных СМРЛС имеют $\theta_{г, в}$, равные 2,8—7,5° (см. табл. 6.1).

В табл. 6.3 представлены данные, характеризующие диаметр облучаемого объема атмосферы на различных расстояниях в зависимости от $\theta_{г, в}$ бортовой параболической антенны. Эти данные, уменьшенные в 2 раза, позволяют оценить разрешающую способность СМРЛС в тангенциальном направлении, составляющую

Таблица 6.3

Диаметр облучаемого объема (километры) атмосферы на различных расстояниях в зависимости от $\theta_{г, в}$ бортовой параболической антенны

$\theta_{г, в}^\circ$	R км								
	25	50	100	150	200	300	400	500	600
2	0,9	1,7	3,5	5,2	7,0	10,4	13,9	17,4	20,9
2,5	1,1	2,2	4,4	6,5	8,7	13,0	17,4	21,8	26,1
3	1,3	2,6	5,2	7,8	10,4	15,7	20,9	26,1	31,3
4	1,7	3,5	7,0	10,4	13,9	20,9	27,8	34,8	41,8
5	2,2	4,4	8,7	13,0	17,4	26,1	34,8	43,5	52,2
6	2,6	5,2	10,4	15,7	20,9	31,3	41,8	52,2	62,6
7	3,0	6,1	12,2	18,3	24,4	36,5	48,7	60,9	73,1
7,5	3,3	6,5	13,0	19,6	26,1	39,1	52,2	62,2	78,3

$\frac{\theta_r}{2} R$, при обнаружении гроз и интенсивных осадков. В тех случаях, когда метеоцели имеют слабую отражаемость, размеры радиозона могут быть занижены на величину $\frac{\theta_r}{2} R$ [18].

Увеличение диаметра зондирующего импульса с расстоянием приводит к уменьшению k_z . Такое изменение k_z по мере увеличения расстояния ограничивает дальность действия НМРЛС [141]. Так как НМРЛС на $R \approx 300$ км облучают объем атмосферы, расположенной на высоте $H \geq 6$ км, их индикаторы имеют предельный масштаб дальности обнаружения, равный примерно 300 км.

Бортовые РЛС с параболическими антеннами при полетах самолетов на больших высотах способны обозревать атмосферу непосредственно от земной поверхности до удалений 600 км и более. Для проведения СМРЛС обзора атмосферы от поверхности земли необходимо, чтобы самолет в зависимости от расстояния до грозового облака совершал полет примерно на следующих высотах H_n :

R км	200	300	400	500	600
H_n км	2,4	5,3	9,5	14,8	213

Из приведенных данных следует, что для обнаружения грозовых облаков и осадков на расстоянии 600 км и более СМРЛС для достижения максимального значения k_z должна быть поднята на высоту примерно 21 км.

Предельная дальность обнаружения грозовых облаков с борта самолета зависит от коэффициента заполнения облучаемого объема. Так, например, при наименьшей ширине диаграммы направленности антенны СМРЛС $\theta \approx 3^\circ$ и $R = 600$ км бортовая станция облучает слои атмосферы высотой примерно 31 км, что в 3 раза превышает верхнюю границу грозовых облаков в умеренных широтах. Предположим, что грозовое облако имеет диаметр $D \approx 10$ км. При τ станции 3,5 мкс отражающая толщина облака $\frac{c\tau}{2} = 525$ м. Следовательно, его отражающий объем $V_{отр} = \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 \frac{c\tau}{2} = 3,14 \cdot (5 \cdot 10^3)^2 \cdot 525 = 4,1 \cdot 10^{10}$ м³, а облучаемый станцией объем при $\theta_{г,з} = 4,8^\circ$ на этом же расстоянии $V_{обл} = 1,3 \cdot 10^{12}$ м³. В этом случае $k_z = V_{отр}/V_{обл} \approx 0,03$.

Оценим возможность обнаружения грозовых облаков СМРЛС Primus-40W XD на $R = 670$ км (см. табл. 6.1) при $k_z = 0,03$ и $k_z \approx 1$. Из рис. 6.2 следует, что для обнаружения облаков на данном расстоянии с помощью РЛС Primus-40W XD необходимо $Z_{мин} \geq 3 \cdot 10^3$ мм⁶/м³ при $k_z = 1$ и $Z_{мин} \geq 10^5$ мм⁶/м³ при $k_z \approx 0,03$. Такая отражаемость отмечается в интенсивных грозах, и, следовательно, при полете самолета на высоте примерно 26,5 км этот очаг будет обнаружен бортовым радиолокатором.

Рассмотрим возможность создания высокопотенциальной гипотетической СМРЛС и оценим ее способность при следующих значениях параметров (суммарное затухание в волноводном тракте и обтекатель антенны принимается равным 2,5 дБ): $P_t = 30$ кВт, $P_r = 1,28 \cdot 10^{-14}$ Вт (139 дБ/Вт), $D = 100$ см ($\theta_{г.в} = 2,2^\circ$; $G = 5,1 \cdot 10^3$), $\tau = 6$ мкс, $\lambda = 3,2$ см.

Перечисленные параметры являются реальными для современной СМРЛС, так как они уже достигнуты в некоторых бортовых станциях (см. табл. 6.1).

С помощью уравнения (3.1) можно определить $Z_{\min} = f(R)$ такой станции (см. рис. 6.2, прямая a). Видно, что эта станция способна обнаруживать грозовые очаги подобно высокопотенциальной наземной метеорологической РЛС МРЛ-2.

Рассматривая работу бортовых РЛС, используемых для решения метеорологических задач, в частности обнаружения гроз, необходимо отметить, что они должны обладать стабильностью таких параметров, как мощность излучения (P_t) и чувствительность приемного тракта (P_r). Нетрудно показать, что их изменение влияет на обнаружение облаков больше, чем на обнаружение самолетов или орографических препятствий. Это видно из следующего.

Уравнение максимальной дальности обнаружения самолетов имеет вид

$$R_{\max. c} = \sqrt[4]{c \frac{P_t}{P_{r \min}} \sigma_c}, \quad (6.4)$$

а метеоцели

$$R_{\max. m} = \sqrt{c' \frac{P_t}{P_{r \min}} Z}. \quad (6.5)$$

Здесь значения P_t и $P_{r \min}$ берутся из паспорта РЛС, c и c' — постоянные станции.

Предположим, что P_t стало меньше на n_1 , а чувствительность РЛС ($P_{r \min}$) — на n_2 . Тогда абсолютные значения этих параметров будут равны:

$$P_{t1} = P_t \cdot 10^{-0,1n_1},$$

$$P_{r \min 1} = P_{r \min} \cdot 10^{0,1n_2}.$$

При $\sigma = 1$ и $Z = 1$ и измененных значениях P_t и $P_{r \min}$ формулы (6.4) и (6.5) примут вид:

$$R_{\max. c}^* = \sqrt[4]{\frac{c P_t}{P_{r \min} \cdot 10^{0,1n_1} \cdot 10^{0,1n_2}}} = R_{\max. c} k_c,$$

$$R_{\max. m}^* = \sqrt{\frac{c' P_t}{P_{r \min} \cdot 10^{0,1n_1} \cdot 10^{0,1n_2}}} = R_{\max. m} k_m,$$

где

$$k_c = \sqrt[4]{\frac{1}{10^{0,1(n_1 + n_2)}}}, \quad \text{а} \quad k_m = \sqrt{\frac{1}{10^{0,1(n_1 + n_2)}}}.$$

На рис. 6.5 показано изменение k_c и k_m в зависимости от $n_{\text{общ}} = n_1 + n_2$ от 1 до 10 дБ, а следовательно, паспортного значения $R_{\text{макс}}$ обнаружения самолетов и облаков. Видно, что при суммарном изменении P_t и $P_{r \text{ мин}}$ в сторону ухудшения на 5 дБ максимальная дальность обнаружения самолетов будет составлять 0,75, а при обнаружении метеоцелей (облаков) — 0,56 от дальности, которая приводится в паспорте СМРЛС.

В тех случаях, когда отмечается увеличение P_t на n'_1 и повышение чувствительности станции на n'_2 , имеем:

$$R_{\text{макс. с}}^{**} = R_{\text{макс. с}} k'_c, \quad (6.6)$$

$$R_{\text{макс. м}}^{**} = R_{\text{макс. м}} k'_m, \quad (6.7)$$

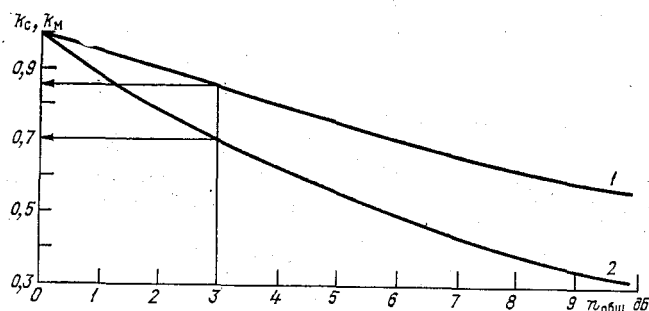


Рис. 6.5. Изменение k_c и k_m в зависимости от $n_{\text{общ}}$.

где

$$k'_c = \sqrt[4]{10^{0,1(n'_1 + n'_2)}}, \text{ а } k'_m = \sqrt{10^{0,1(n'_1 + n'_2)}}.$$

Коэффициенты k'_c и k'_m в зависимости от $n'_{\text{общ}} = n'_1 + n'_2$ принимают следующие значения:

$n'_{\text{общ}}$	...	2	3	4	5	6	7	8	9	10
k'_1	...	1,12	1,19	1,26	1,33	1,41	1,49	1,59	1,69	1,8
k'_2	...	1,26	1,41	1,59	1,8	2,0	2,22	2,51	2,86	3,1

Таким образом, из выражений (6.6) и (6.7) следует, что улучшение параметров станции P_t и $P_{r \text{ мин}}$ в большей степени сказывается на увеличении паспортной дальности обнаружения метеоцелей, чем самолетов.

Известно, что СМРЛС 3-см диапазона радиоволн не обнаруживают гроззовые разряды, являющиеся одним из признаков принадлежности облаков к гроззовым. Используемые на земле косвенные радиолокационные критерии определения гроззового состояния облаков являются вероятностными. Применение на борту само-

лета косвенных критериев не рассматривалось. Такие критерии вряд ли будут применимы без автоматизированной обработки радиолокационной информации в полете. Исходя из этого рассмотрены вопросы, связанных с разработкой бортовых радиолокационных критериев распознавания гроз, подобных критериям, используемым на земле, пока нецелесообразно. Это связано с тем, что в грозовых облаках опасными для самолета являются не только атмосферные разряды, но и турбулентность, порой оказывающая воздействие на самолет большее, чем разряды. В мощных кучевых и кучево-дождевых облаках могут отсутствовать разряды, т. е. они могут не относиться к грозовым, но оставаться из-за турбулентности опасными для полета самолетов. Такое явление может существовать как на стадии роста, так и на стадии диссипации грозовых облаков. Таким образом, очевидно, что первостепенной задачей СМРЛС является обнаружение опасных облаков, возможно, даже без разделения их на грозовые, ливневые и т. п. Критериями опасности этих облаков могут быть отражаемость и ее градиенты, высота радиоэха и выпадение осадков.

Известно, что турбулентность всегда наблюдается в облаках с высокой отражаемостью, особенно на периферии в зоне наибольших градиентов отражаемости, а также в околооблачном пространстве таких облаков. Ширина зоны околооблачных нисходящих потоков может изменяться в пределах $(0,5 \div 2)D_0$, где D_0 — диаметр облака [117].

В национальной лаборатории США по изучению сильных гроз установлено, что частота и интенсивность турбулентности убывает по мере удаления от центра сильной грозы [11]. На расстоянии 36 км от центра частота сильной и умеренной турбулентности в среднем равна 20 %. Если учесть, что в настоящее время обнаружено расхождение между расположениями центров максимальной повторяемости молний в грозовом облаке и зоной его максимальной отражаемости, то пока становится не совсем ясным, что принимать за центр грозы.

Исследования, проведенные П. Д. Астапенко и А. Н. Мошниковым, позволили установить, что частота умеренной болтанки самолета Ил-18 на высотах 7200—8400 м зависит от расстояния до внешнего края радиоэха, прослеживаемого на экране бортовой станции РСН-2 [11].

В работе [11] указывается, что при обходе самолетом грозовых очагов необходимо также учитывать горизонтальные размеры их радиоэха, а в [182] приводятся рекомендации, на каком расстоянии желательно обходить грозовые облака. При этом расстояние от облака отсчитывается от зоны радиоэха с отражаемостью $10 \text{ мм}^6/\text{м}^3$ ($\lg Z = 1$). Это расстояние зависит от $Z_{\text{макс}}$. Предлагаемая методика обхода грозовых облаков при использовании бортового радиолокатора заслуживает внимания. Она может стать более эффективной, если принадлежность облака, обнаруженного СМРЛС, к грозовому будет установлена с помощью бортового грозопеленгатора.

Важное значение имеет определение высоты расположения зоны $Z_{\text{макс}}$, так как эта зона во многих случаях связана с осадками и неблагоприятно влияет на посадку самолетов. Определить высоту расположения зоны $Z_{\text{макс}}(H_z)$ можно по графику, позволяющему установить, на сколько километров ниже или выше (ΔH) высоты полета ($H_{\text{п}}$) при данном угле места ($\theta_{\text{м}}$) антенны типа «угольчатый луч» находится эта зона (рис. 6.6).

Например, при высоте полета самолета $H_{\text{п}} = 8$ км зона $Z_{\text{макс}}$ обнаружена на $R = 100$ км и $\theta_{\text{м}} = -2^\circ$. Это означает, что центр

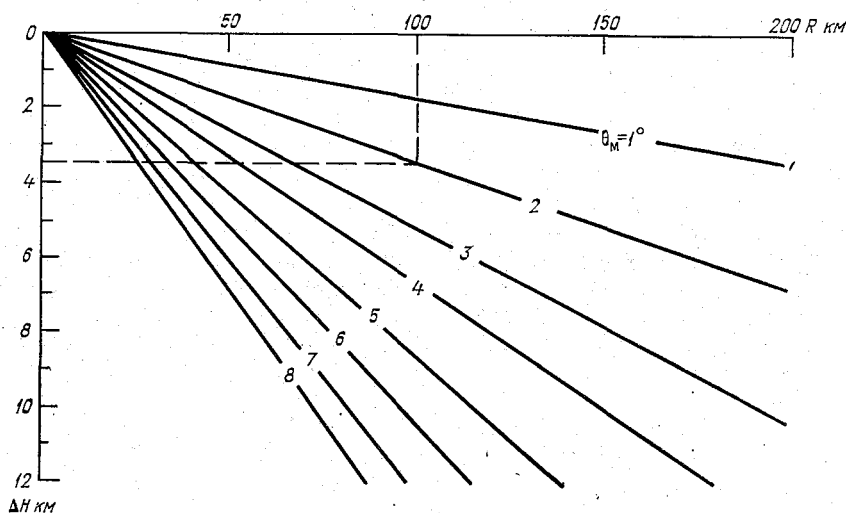


Рис. 6.6. Зависимость $H_z = \psi(H_{\text{п}}, \Delta H)$.

объема, занимаемого зондирующим импульсом СМРЛС, находится на высоте $H_z = H_{\text{п}} - \Delta H = 8 - 3,5 = 4,5$ км, т. е. зона с повышенной отражаемостью расположена на 3,5 км ниже $H_{\text{п}}$.

Достоверность обнаружения опасных для полета облаков СМРЛС в значительной мере определяется способом их индикации на выходе приемного тракта такой станции. Из [104] видно, что в СМРЛС гражданской авиации США до вывода радиоэха на электронно-лучевые трубки (ЭЛТ) предусмотрена цифровая обработка их по амплитуде и длительности. Результаты амплитудного квантования сигналов представляются на ЭЛТ различными дискретными уровнями интенсивности осадков или отражаемости. Чаще всего таких уровней 3—4.

В качестве индикаторов находят применение черно-белые и цветные ЭЛТ. Широко используется яркостная индикация в сочетании с контурной. Первая дает представление о геометрических размерах облаков, а вторая обеспечивает выделение в них наиболее опасных зон, например, четырех уровней интенсивности осадков: 0—1, 1—4, 4—12 и >12 мм/ч, имеющих различные уровни яркости. Некоторые СМРЛС имеют пороговые устройства, позво-

ляющие внутри внешнего контура радиоэха облаков выделить «черную» зону, если отражаемость облака выше предварительно выставленного порога. Появление черных зон — сигнал, предупреждающий, что обнаруженное СМРЛС облако следует относить

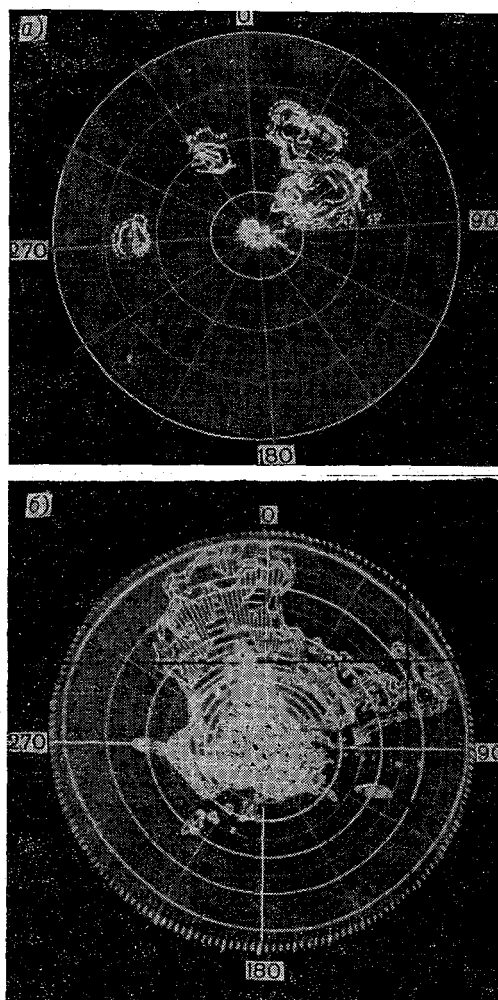


Рис. 6.7. Изображение радиоэха грозовых облаков на ИКО МРЛ-2 при включенном МКИЭ без доработки (а) и при штриховке зон радиоэха с различной отражаемостью (б).

к опасным. Чем меньше расстояние между внешним контуром радиоэха облака и внешней границей черной зоны, тем больше в этой части облака градиент отражаемости (dZ/dR) и, следовательно, выше турбулентность в околооблачном пространстве [151].

В [148] установлено, что чаще всего радиолокационные станции обнаруживают разряды в зоне грозовых облаков, где $\frac{dZ}{dR}$ достигает максимальных значений.

Не менее эффективные устройства выделения опасных зон в облаках созданы в нашей стране. Сконструирована приставка к метеорологическому наземному радиолокатору — многоконтурное изоэхо (МКИЭ) [3], осуществляющая 192 стробирования видеосигнала по дальности, интегрирование 20 эхо-сигналов в каждой стробе, а также стробирование амплитуды видеосигналов по шести градациям через дискретные заранее устанавливаемые n . Такая приставка, подключаемая между вторым детектором приемного тракта станции и индикатором, позволяет оперативно выделить не только зоны повышенной отражаемости, но и зоны с максимальным значением $\frac{dZ}{dR}$. На рис. 6.7 а приводится изображение метеоцели на ИКО МРЛС при включении МКИЭ. Оно может быть более наглядным, если провести штриховку каждой из дискретных зон отражаемости. Такая доработка МКИЭ, проведенная В. Н. Егоровым в ГГО, обеспечивает более четкое изображение зон с различной отражаемостью на ИКО радиолокатора (рис. 6.7 б).

В ЦАО разработана приставка к МРЛС типа ПИПР [153], позволяющая получить черную зону, широко используемую в ряде наземных метеорологических станций. К сожалению, прибор МКИЭ не используется в настоящее время при конструировании отечественных СМРЛС.

6.2. Обнаружение гроз самолетными грозопеленгаторами

При проведении наземных радиолокационных наблюдений за облаками большое внимание уделяется определению их грозоактивности. Для этого используются грозопеленгаторы типа ПАГ-1 [45], панорамные пеленгаторы гроз [135], а также грозопеленгаторы-дальномеры [17, 87].

Такие грозопеленгаторы могут быть использованы и на самолете. В этом направлении проводились работы в ГГО, сотрудники которой установили на борту самолета Ли-2 автоматический сверхдлинноволновый грозопеленгатор [52] и провели исследование его работы в полете [46].

Рассмотрим вопросы, связанные со спецификой использования бортового грозопеленгатора в автономном режиме наблюдений и совместно с СМРЛС.

Очевидно, что принцип действия известных пеленгаторов гроз, изложенный в [17, 52, 83, 90], может быть положен в основу разработки бортовых грозопеленгаторов (БГП), но при этом дополнительно должны быть рассмотрены:

— антенная система направленного приема атмосфериков, размещаемая неподвижно заподлицо с обшивкой фюзеляжа самолета и ориентируемая относительно продольной его оси;

- специфика проведения периодического определения инструментальных ошибок грозопеленгатора в полете;
- методика использования бортового грозопеленгатора совместно с самолетной РЛС и в автономном режиме наблюдений и др.

Антенная система бортового грозопеленгатора. Известно, что в созданных за последнее десятилетие наземных пеленгаторах гроз для получения однозначного пеленга на источник излучения используются две ферритовые антенны направленного приема и все-направленная штыревая антенна.

При разработке бортового грозопеленгатора, предназначенного для установки на сверхзвуковых самолетах, особое требование предъявляется к его антенной системе, не нарушающей аэродинамических качеств самолета.

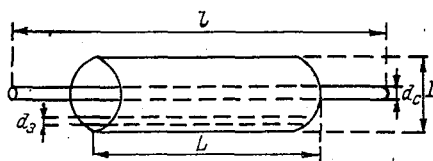


Рис. 6.8. Размеры ферритовой антенны.

Для приема электрической составляющей электромагнитного поля грозовых разрядов целесообразно использовать штыревую антенну в диэлектрическом обтекателе высотой 0,5—0,6 м, аналогичную бортовым связным УКВ антеннам [67].

Из работ [39, 108, 163] следует, что для регистрации магнитных составляющих атмосфериков приемлемы ферритовые антенны, которые менее подвержены влиянию промышленных помех, обладают незначительным антенным эффектом и имеют небольшие геометрические размеры. До установки ферритовых антенн заподлицо с обшивкой самолета потребовалось проведение экспериментальных исследований, связанных с определением изменений действующей высоты (h_d) ферритовых антенн, их антенного эффекта, резонансной частоты ($f_{рез}$) входного контура, элементом которого они являются, добротности такого контура (Q) и напряжения на его выходе ($V_{вых}$) по мере погружения ферритовой антенны в фюзеляж самолета.

Теоретические расчеты действующей высоты ферритовой антенны производились по формулам, приведенным в работах [108, 123, 163]. Экспериментальные исследования осуществлялись с магнитным сердечником, имеющим проницаемость $\mu_0 = 2000$ при длине стержня $l = 340$ мм и его диаметре $d_c = 8,5$ мм. Размеры l и d_c (рис. 6.8) выбраны такими в соответствии с рекомендациями [163], так как эффективная магнитная проницаемость стержня увеличивается по мере роста отношения l/d_c .

Для определения оптимальной добротности антенного контура и максимального напряжения на его выходе экспериментально установлены зависимости $Q = \varphi(n)$ и $U_{вых} = \psi(n)$, где n — число витков рамки (рис. 6.9). Видно, что с увеличением числа витков

в интервале $n' < n < n''$ напряжение на выходе антенного контура растет, а Q падает. Выбранное нами $n \approx 1000$ соответствовало $Q = 40$ на $f = 7$ кГц. Однако из [67] следует, что оптимальная полоса пропускания антенной системы пеленгатора при настройке его на $f = 7$ кГц должна быть 500—700 Гц, что соответствует $Q = 14 \div 10$. Уменьшение добротности достигалось путем размещения ферритовой антенны в электростатическом экране длиной L и диаметром D (см. рис. 6.8). Такое размещение обеспечивает также уменьшение антенного эффекта ферритовой антенны.

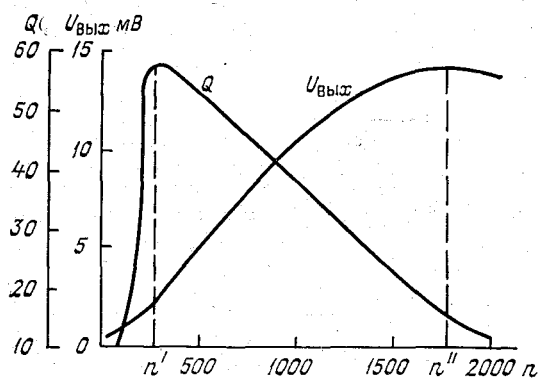


Рис. 6.9. Изменение $Q = \varphi(n)$ и $U_{\text{вых}} = \psi(n)$.

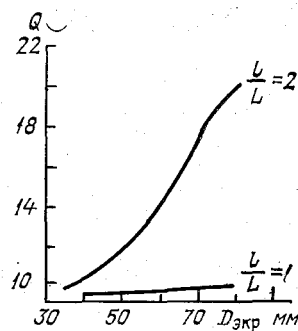


Рис. 6.10. Зависимости $Q = \psi(L, D)$ при $l/L = 1$ и $l/L = 2$.

Зависимость $Q = \psi(L, D)$ определялась для отношений $\frac{l}{L} = 1$ и $\frac{l}{L} = 2$ соответственно для экранов, изготовленных из алюминия и меди (рис. 6.10). Таким образом, установлено, что диаметр и длина экрана в значительной степени определяют Q рамки с магнитным сердечником.

При выборе размеров экрана необходимо также учитывать зависимость Q от зазора экрана d_z (см. рис. 6.8), так как с изменением d_z от 1 до 6 мм значение Q может увеличиваться в 1,5 раза.

На основе проведенных экспериментов созданы экранированные ферритовые антенны с $h_d \approx 2,6$ см [39], которые были размещены сверху центральной части фюзеляжа самолета Ли-2 вдоль продольной его оси (антенна С—Ю) и перпендикулярно ей (антенна З—В).

Исследование влияния глубины погружения ферритовых антенн в изготовленный для нее обтекатель, размещенный внутри фюзеляжа, осуществлялось в равномерном электромагнитном поле [10]. При этом оценивалось влияние фюзеляжа самолета на параметры такой антенны. В качестве фюзеляжа был использован макет, линейные размеры которого — длина (L_{ϕ}), ширина (k_{ϕ}) и

высота (H_{ϕ}) — на частоте 7 кГц ($\lambda \approx 43$ км) имели следующие соотношения с действующей высотой ферритовой антенны: $L_{\phi} = 100h_d$, $k_{\phi} = 60h_d$ и $H_{\phi} = 50h_d$.

Макет фюзеляжа самолета с указанными размерами, намного превышающими h_d ферритовой антенны, должен оказывать примерно такое же воздействие на характеристики ферритовой антенны, какое может оказывать самолет, размеры которого значительно меньше выбранного значения λ . Бортовой грозопеленгатор настраивался на 7 кГц. Как следует из [66], выбранная нами частота, возможно, не является оптимальной, и этот вопрос требует проведения дополнительных исследований.

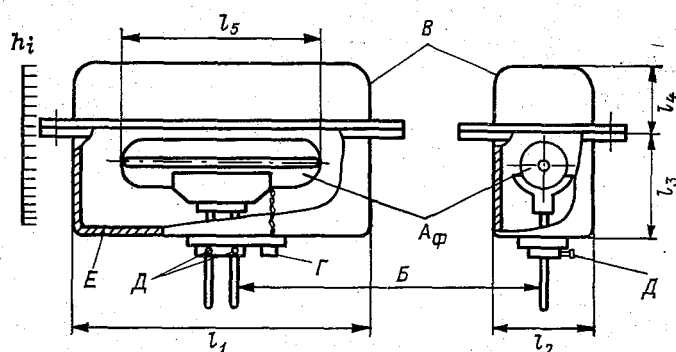


Рис. 6.11. Устройство бортовой ферритовой антенны.

A_{ϕ} — экранированная ферритовая антенна; B — стержни, с помощью которых антенна погружалась и поднималась; B — внешний обтекатель, закрывающий антенну при подъеме ее выше уровня обшивки фюзеляжа самолета; Γ — разъем для подключения антенны к грозопеленгатору; D — болты, фиксирующие поднятую ферритовую антенну; E — внутренний обтекатель, экранирующий антенну от помех, создаваемых бортовой аппаратурой различного назначения (его глубина и ширина составляли 80 мм); l_1 — l_5 — размеры обтекателей и антенны; h_i — глубина погружения ферритовой антенны в обтекатель.

Параметры ферритовой антенны по мере погружения их во внутренний обтекатель фюзеляжа самолета определялись на специальном макете, конструкция и внешний вид которого приведены на рис. 6.11 и 6.12. В дальнейшем такие макеты антенн C — $Ю$ и $З$ — $В$ грозопеленгатора устанавливались на самолете.

Определение антенного эффекта бортовых ферритовых антенн.

Антенный эффект ферритовых антенн определяется в электромагнитном поле, создаваемом параллельными плоскостями, выполненными в виде отдельных линий, по методике, изложенной в [118]. Волновое сопротивление (R_n) линии составляло 80 Ом. Запитывание линии осуществлялось синусоидальным напряжением с частотой 7 кГц и прямоугольными импульсами положительной полярности длительностью около 70 мкс. В каждом случае измерялось напряжение (U_1), когда в линии присутствовала преимущественно электрическая составляющая электромагнитного поля. Это достигалось увеличением сопротивления нагрузки линии (R_n) до тех пор, пока на выходе антенны напряжение становилось достаточным

для измерений. В дальнейшем измерялось напряжение U_2 , когда линия нагружена на волновое сопротивление и в ферритовой антенне наводится максимальная ЭДС.

Значение антенного эффекта (A) оценивалось по формуле

$$A = \frac{U_1}{U_2} \frac{R_a}{R_n}.$$

В результате проведенных измерений в режиме синусоидальных колебаний $A = 0,34 \%$, а в импульсном режиме $A = 0,75 \%$. Учитывая, что при антенном эффекте $1,8 \%$ погрешность в измере-

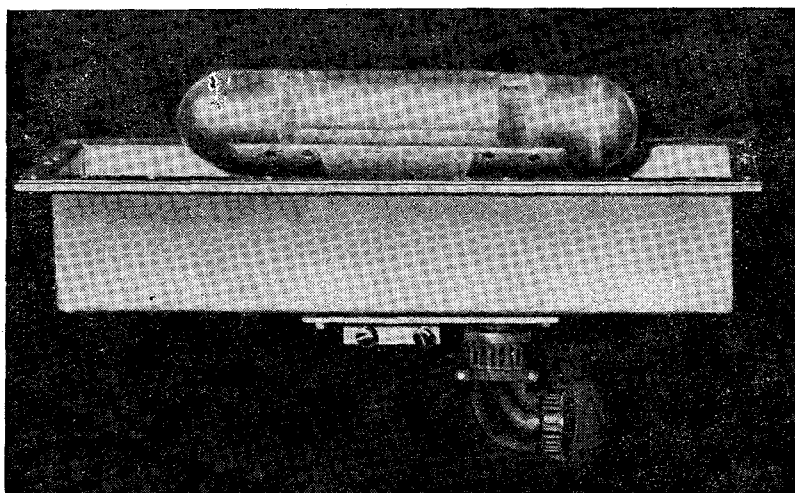


Рис. 6.12. Внешний вид бортовой ферритовой антенны.

нии углов составляет 1° [137], можно считать, что такие бортовые ферритовые антенны будут вносить весьма незначительную погрешность в определение направления на источник излучения.

В результате погружения ферритовых антенн заподлицо с обшивкой фюзеляжа установлено следующее:

- по мере погружения экранированной ферритовой антенны на дно внутреннего обтекателя $f_{рез}$ увеличивалась примерно в 1,2 раза, а $U_{вых}$ уменьшалось примерно в 2,2 раза;

- изменение ширины наружного окна (при размещении ферритовой антенны в центре внутреннего обтекателя) от нуля до максимального значения (проводилось постепенное сближение двух дюралевых пластин) показало, что даже при полностью закрытом окне не исключается возможность приема сигнала на частоте 7 кГц. В последнем случае $U_{вых}$ и h_d уменьшается в 1,6 раза и 1,4 раза соответственно, а $f_{рез}$ изменяется не более чем на 5—6 %.

Полученные результаты показывают, что ферритовые антенны могут быть размещены заподлицо с обшивкой фюзеляжа сверхзвукового самолета. При этом незначительно изменяются их параметры.

В процессе экспериментальных исследований сделана попытка определить изменение диаграммы направленности ферритовой антенны, установленной на макет фюзеляжа, не оснащенный бортовой аппаратурой. При этом, естественно, не обнаружено изменений диаграммы направленности. Как следует из работы [67], влияние корпуса самолета может привести к ошибке пеленгования, достигающей 20° и более. К сожалению, в этой работе не приводится методика определения указанной ошибки.

Определение инструментальных ошибок грозопеленгатора, установленного на самолете. При установке грозопеленгатора на самолете возникает необходимость периодической проверки работоспособности пеленгатора, особенно при длительном отсутствии гроз, а также точности настройки всех его каналов. В наземных условиях такая проверка осуществляется путем ручного вращения ферритовых антенн в магнитном поле, создаваемом кольцами Гельмгольца. При этом антенны направленного приема обычно поворачиваются в азимутальной плоскости дискретно через $22,5^\circ$. Подобная проверка грозопеленгатора на самолете из-за неподвижной установки антенн исключена.

В связи со сказанным была разработана специальная система контроля функционирования бортового грозопеленгатора, позволяющая получить на его экране «розу» пеленгов, характеризующих точность настройки всех каналов пеленгатора в полете [42]. При этом пеленги на индикаторе грозопеленгатора прослеживаются на основных октавных углах $0; 22,5; 45; 67,5; \dots; 360^\circ$. При настроенном грозопеленгаторе эти пеленги должны совпадать с указанными значениями октавных углов на неподвижной шкале индикатора. Такие пеленги, характеризующие инструментальные ошибки, отбиваются на индикаторе постоянно до момента приема ЭМИ ГР (рис. 6.13). Принятый пеленгатором сигнал грозового разряда автоматически отключает системы контроля на весьма короткий интервал времени (около 20 мс), и на индикаторе прослеживается пеленг на источник излучения (рис. 6.13, азимут 32°).

Блок-схема разработанной системы контроля представлена на рис. 6.14, а эпюры напряжений в некоторых ее точках — на рис. 6.15.

Принцип действия системы контроля настройки пеленгатора состоит в следующем. В каскадах, объединенных в линейке А (рис. 6.14), вырабатываются синусоидальное и косинусоидальное напряжения (эпюры 1 и 2 на рис. 6.15). Принципиальная схема линейки А аналогична схеме, формирующей азимутальную развертку ИКО радиолокационной станции [162]. Отличительной особенностью схемы в данном случае является то, что вращающийся трансформатор (ВТ) и синхронные детекторы (СД) подключены к генератору (G_1) синусоидальных напряжений, вырабатывающему

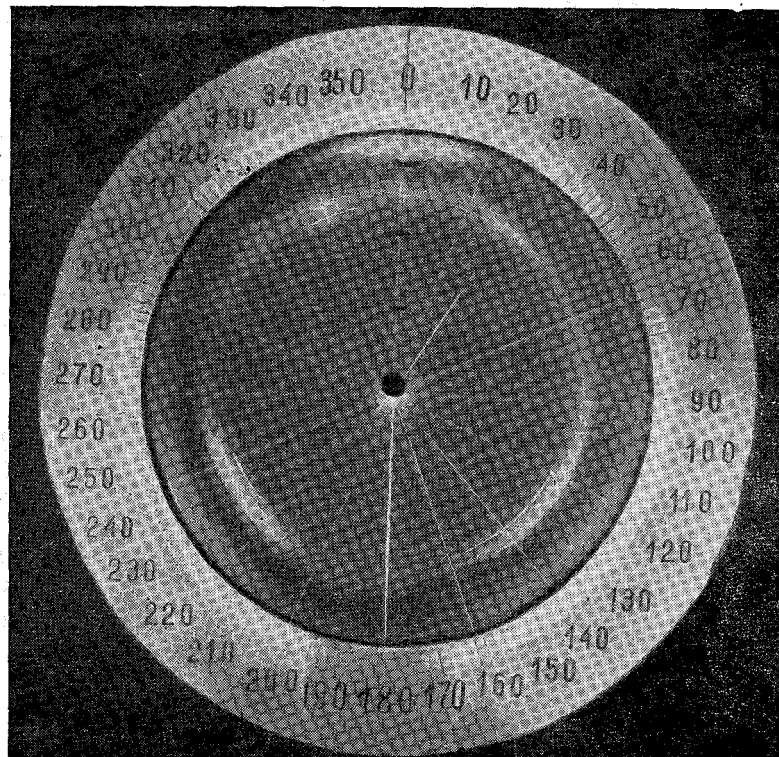


Рис. 6.13. Экран грозопеленгатора с веером пеленгов примерно через $22,5^\circ$, характеризующих его настройку (пеленг по $A \approx 32^\circ$ обусловлен грозовым разрядом).

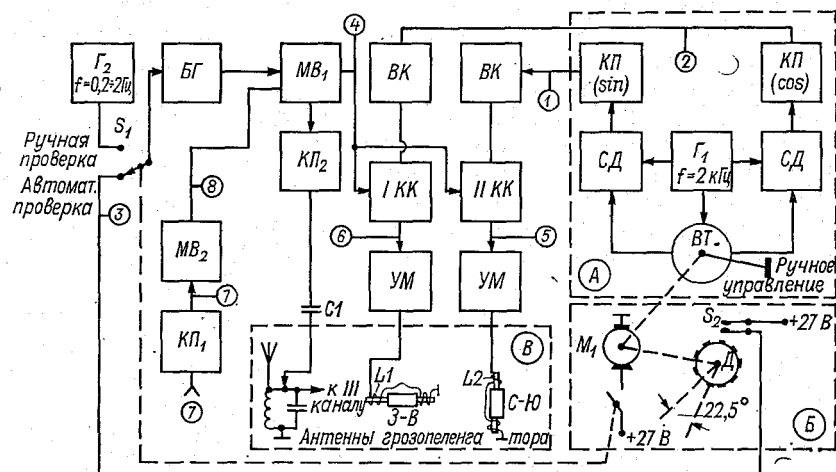


Рис. 6.14. Блок-схема устройства определения инструментальных ошибок грозо-пеленгатора в полете (цифрами указаны номера эпюр напряжений, приведенных на рис. 6.15).

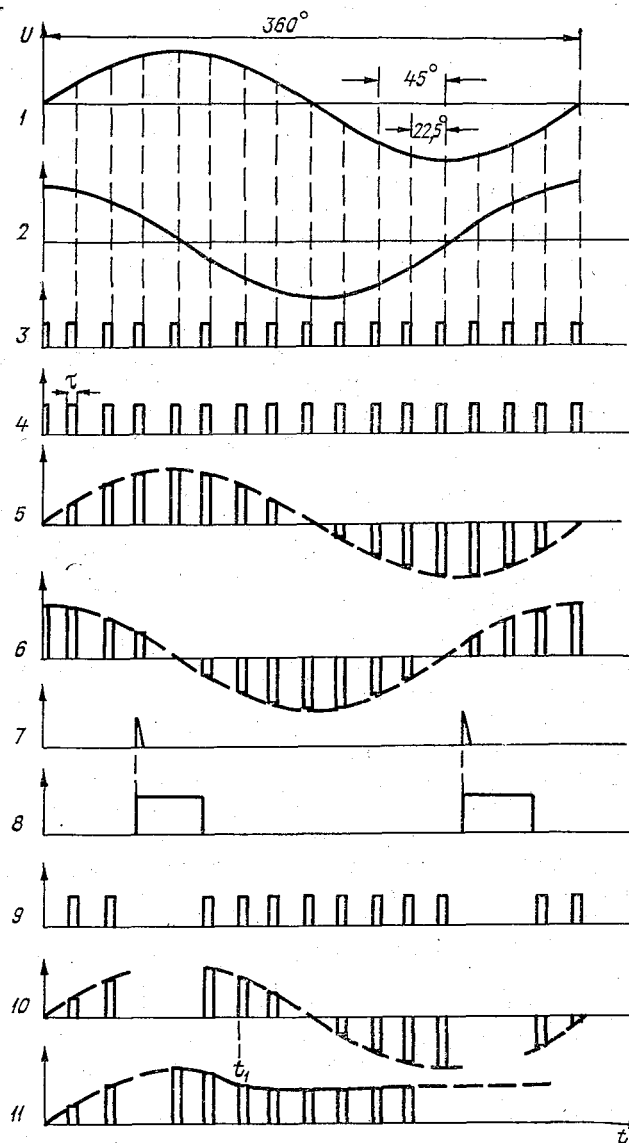


Рис. 6.15. Эпюры напряжений в различных точках блок-схемы устройства определения инструментальных ошибок.

2000 Гц. Симметрия положительного и отрицательного полупериода $\sin$ и $\cos$ напряжений достигается введением в схему выравнивающих каскадов (ВК).

Если в РЛС ВТ связан с перемещением антенны станции, то в данном случае его вращение осуществляется мотором (M_1), с которым одновременно связан датчик (D), позволяющий получить импульсы, синхронизирующие систему контроля в целом.

Датчик импульсов (линейка B на рис. 6.14) представляет собой диск с выступами, следующими через $22,5^\circ$ и замыкающими при вращении микровыключатель $S2$. В результате через $S2$ поступает напряжение, которое представлено эппурой 3. В зависимости от положения $S1$ (проверка автоматическая или ручная) эти импульсы запускают блокинг-генератор (БГ) и далее мульти-вibrator (MB_1), вырабатывающий прямоугольное напряжение длительностью τ , определяемой частотой настройки грозопеленгатора. Так, например, при настройке грозопеленгатора на $f = 7$ кГц значение τ , равное примерно 75 мкс (эппюра 4), обеспечивает экстремальное значение сигнала на выходе узкополосных ферритовых антенн и в канале ненаправленного приема атмосфериков.

Импульсы напряжения, иллюстрируемые эппурой 4, управляют работой I и II ключевых каскадов (КК). В результате такого управления подводимые к ключевым каскадам синусоидальное и косинусоидальное напряжения (эппюры 1 и 2) приобретают форму, представленную эппюрами 5 и 6. Импульсы напряжения, изображенные на эппюрах 5 и 6, через усилители мощности (УМ) с низкоомной нагрузкой подаются на ферритовые антенны каналов $C-YO$ и $3-B$, на которых установлены дополнительные катушки связи $L1$ и $L2$ (рис. 6.14).

Запитывание $L1$ и $L2$ напряжением, изображенным на эппюрах 5 и 6, приводит к тому, что при идентичности параметров приемных трактов каналов $C-YO$ и $3-B$ и их синхронном функционировании с сигналом, следующим от штыревой антенны, на экране ЭЛТ грозопеленгатора прослеживаются пеленги через $22,5^\circ$. Расстройка каналов пеленгатора по частоте и фазе, а также изменение коэффициента усиления одного из каналов приводит к инструментальной ошибке, выражаемой уходом пеленга с азимутального направления, кратного $22,5^\circ$.

Система контроля работоспособности пеленгатора функционирует таким образом, что при приеме пеленгатором сигнала, излучаемого грозовым разрядом, на контрольные рамки $L1$ и $L2$ прекращает поступать напряжение, изображенное эппюрами 5 и 6. Это достигается следующим образом.

С грозопеленгатора поступает импульс синхронизации (эппюра 7), который через катодный повторитель ($KП_1$) запускает мульти-вibrator (MB_2). С указанного мульти-вibratorа снимается импульс положительной полярности (эппюра 8), поступающий на мульти-вibrator MB_1 . Это приводит к тому, что мульти-вibrator MB_1 , управляющий ключевыми каскадами, не срабатывает и, сле-

довательно, на экране ЭЛТ пеленгатора прослеживается только направление на источник излучения, т. е. пеленг ГР.

После завершения импульса мультивибратора MB_1 (эпюра 8) дополнительные катушки $L1$ и $L2$ ферритовых антенн снова запитываются напряжением, осуществляющим контроль работы грозопеленгатора (эпюра 10).

Если переключатель $S1$ установлен в положение «ручная проверка», то датчик D (рис. 6.14) не вращается и с момента времени t_1 (эпюра 11) остановки мотора M_1 на $L1$ и $L2$ поступают импульсы, амплитуда которых постоянна и пропорциональна углу остановки вращающегося трансформатора. В этом случае проверка инструментальной ошибки пеленгатора на любом азимутальном угле (от 0 до 360°) может быть достигнута ручным поворотом вращающегося трансформатора. При ручной проверке ошибок грозопеленгатора синхронизатором схемы контроля служит генератор одиночных импульсов (G_2), следующих с частотой 0,2—2 Гц.

Для проверки 3-го канала, осуществляющего прием электрической составляющей сигнала, в блок контроля введен катодный повторитель ($KП_2$), импульсы с которого (эпюра 9) через емкость примерно 6 пФ подаются непосредственно на штыревую антенну грозопеленгатора (рис. 6.14).

Приведенная выше схема контроля настройки и общей работоспособности грозопеленгатора прошла испытание в полете (см. рис. 6.13).

Методика и результаты исследования грозопеленгатора в полете. Методика проведения исследований бортового грозопеленгатора сводилась к следующему:

- в результате синоптического анализа, а также анализа данных наземной РЛС выбирался маршрут полета, при котором расстояние до грозовых очагов не превышало 400 км (радиус действия грозопеленгатора);

- определение пеленгов на грозу в полете проводилось на прямолинейном участке маршрута, и каждые 10 мин фиксировались координаты самолета. При отсчете пеленга молнии регистрировалось время его появления на экране грозопеленгатора. Это позволило в процессе обработки данных установить, на каком отрезке маршрута зарегистрирован источник излучения;

- для определения перемещения грозовых очагов во времени полеты проводились повторно по одному и тому же маршруту;

- время полета выбиралось близким к синоптическим срокам наблюдений для последующего сопоставления бортовых данных с приземными картами погоды;

- при анализе полученных данных отбрасывались случаи, когда в одном направлении число грозовых пеленгов $N_r \leq 3$, так как они могли быть вызваны дальними грозами или грозовыми очагами слабой активности, которые часто не фиксируются метеостанциями.

В летний период 1969 г. в районе городов Ростов-на-Дону и Краснодар было проведено девять полетов, в которых наблюдалось

12 устойчивых секторов грозовой активности. Из них семь подтверждались штормовыми предупреждениями о грозах наземными метеостанциями и визуальными наблюдениями с самолета, а пять совпадали с зонами кучево-дождевой облачности и ливнями над теми районами, где нет метеостанций. Дополнительный полет был проведен тогда, когда в радиусе 600 км от маршрута самолета наземные станции не фиксировали гроз. Это подтверждалось самолетным грозопеленгатором, на экране которого пеленги отсутствовали.

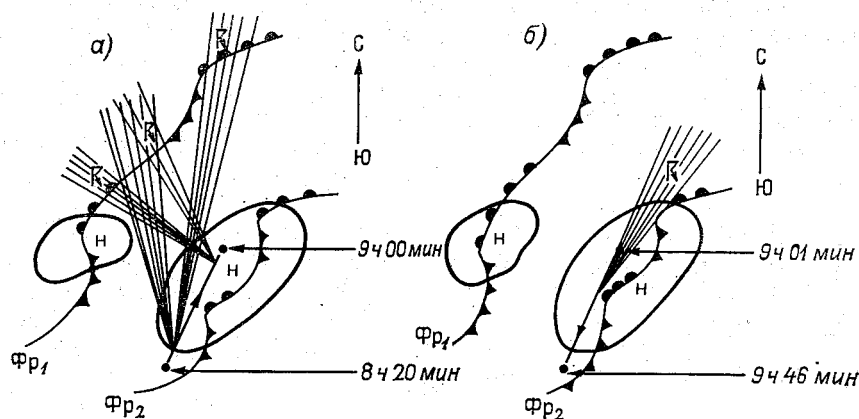


Рис. 6.16. Результаты испытания бортового грозопеленгатора 5.06.69 г. при полете с 8 ч 20 мин до 9 ч (а) и с 9 ч 01 мин до 9 ч 46 мин (б).

Ограниченное количество проведенных полетов не позволило оценить эффективность самолетного грозопеленгатора, но дало возможность определить специфику его использования на борту самолета.

На рис. 6.16 представлены метеорологические условия в 9 ч 00 мин 5.06.69 г. Здесь же показаны маршруты полета самолета с 8 ч 20 мин до 9 ч 00 мин (рис. 6.16 а) при удалении от Краснодара и с 9 ч 01 мин до 9 ч 46 мин (рис. 6.16 б) при возвращении.

В первом случае пеленгатором обнаружены грозы на довольно протяженном участке фронтального раздела (Φp_1) воздушных масс. При обратном маршруте на этом фронтальном разделе грозы не обнаружены, но отмечена интенсивная их активность в очаге, расположенном на Φp_2 (рис. 6.16 б).

Как в первом, так и во втором случае по курсу полета пеленгов не наблюдалось, т. е. грозовые очаги отсутствовали, что подтвердилось в дальнейшем данными визуальных наблюдений.

Приведенные данные подтверждают целесообразность применения грозопеленгатора на самолете лишь в тех случаях, когда экипаж имеет сведения о положении фронтального раздела воздушных масс по отношению к маршруту полета. В этих случаях

грозопеленгатор позволяет установить, является ли фронтальный раздел воздушных масс грозоактивным, и определить моменты начала и прекращения электрической активности фронта.

Неточное определение начала и конца электрической активности облаков связано с тем, что наземные грозопеленгаторы реагируют главным образом на электромагнитное излучение сильноточных атмосферных разрядов, например преимущественно на вертикальные каналы молнии. Они часто не обнаруживают внутриоблачные разряды. Вероятно, создание всеполяризационного грозопеленгатора, настроенного на частоты, где проявляется в достаточной степени электромагнитное излучение не только сильноточных, но и слаботочных (лидерных) и других разрядов, позволит достовернее установить момент начала перехода облака в грозовое состояние.

Иная картина складывается при автономном использовании бортового грозопеленгатора (как и выше без СМРЛС) в районе полета, где положение фронтальных разделов до вылета достоверно установить не удалось или предполагается развитие отдельных внутримассовых грозовых облаков. Это можно показать на следующих примерах.

Ранее существовало представление, что во время полета на прямолинейном участке маршрута из пункта А в Б (рис. 6.17 а) методом пересечения пеленгов можно достоверно определить координаты грозового очага (ГО_д). Анализ наших данных показал, что этот метод можно использовать лишь при наличии одиночного внутримассового грозового очага, однако это наблюдается в редких случаях. Если одновременно имеется два очага (или более), определение их местоположения этим методом не всегда достоверно, так как на экране появляется зона ложного грозового очага (ГО_л) (рис. 6.17 б, г). Такое же явление наблюдается в случаях, когда грозовые разряды имеют место на протяженных фронтальных разделах воздушных масс (рис. 6.16 а).

Наиболее приемлемым оказалось использование пеленгатора гроз при полете непосредственно на грозовой очаг (рис. 6.17 в). В этом случае отклонение самолета от направления на ГО, например, вправо, и последующее изменение азимутов разрядов влево, показывает, что самолет обходит опасный грозовой очаг.

Проведенные исследования пеленгатора гроз ПАГ-1 с ограничителем дальности 400 км на борту самолета показали, что определение координат грозовых разрядов в полете им не обеспечивается. Для определения координат наряду с азимутом на грозу необходимы данные, характеризующие расстояние до нее, т. е. нужны бортовые дальномеры. Наземные дальномеры, основанные на принципе приема сигнала грозовых разрядов на различных частотах, измеряют фазовые соотношения между составляющими E и H электромагнитного поля [17, 77, 157]. Пока с их помощью нельзя решить с достаточной точностью поставленную задачу. На земле, например, дальномеры типа Е-Н, применяемые в радиусе (R) до 100 км в лучшем случае определяют расстояние до

разряда с точностью $(0,2 \div 0,3)R$. Несмотря на это вызывает интерес установка их и на самолетах.

Известно, что в наземных условиях совместное использование МРЛ с грозопеленгатором ограниченного радиуса действия (240 или 400 км), как это сделано в ПАГ-1 [22], повышает качество

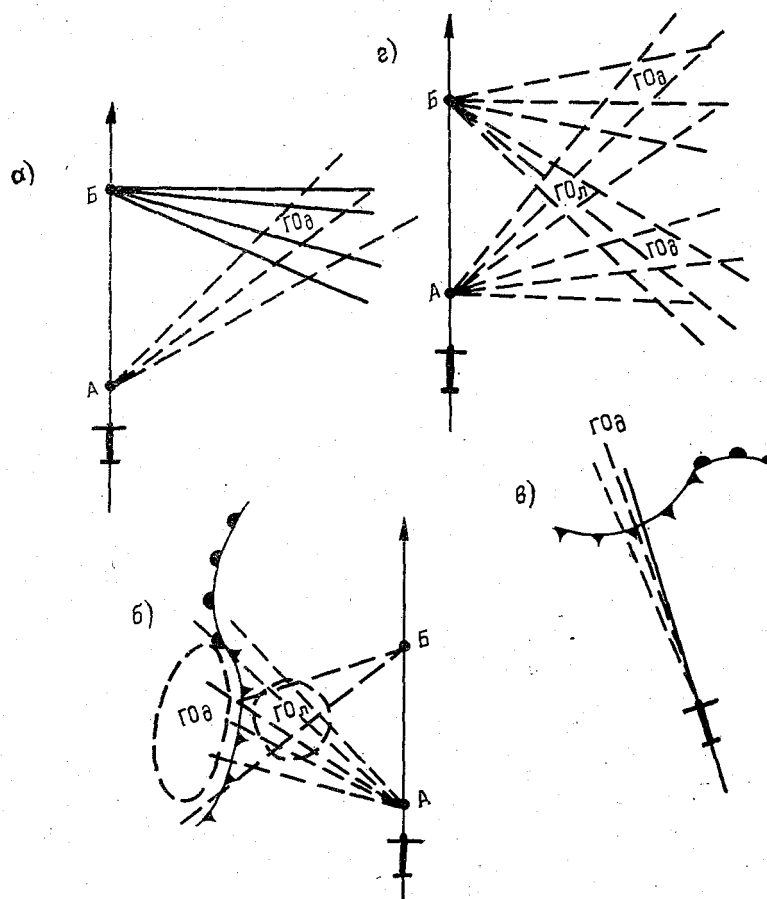


Рис. 6.17. Определение грозных зон бортовым грозопеленгатором.

распознавания грозных и ливневых очагов. При сопряжении бортового пеленгатора гроз с СМРЛС также следует ожидать улучшения качества наблюдений. В некоторых случаях такое сопряжение может оказаться даже более эффективным, чем на земле. Например, предположим, что на экране ИКО наземного МРЛ на одном азимуте обнаружено два очага, через которые проходят грозные пеленги, и косвенные радиолокационные критерии не позволяют определить, в каком из них имеются грозные разряды. В этой обстановке следует ожидать смещения очагов с одного

азимута или дальнейшей эволюции параметров их радиозеха до того момента времени, когда косвенные критерии позволят достоверно определить принадлежность того или иного очага к грозо-

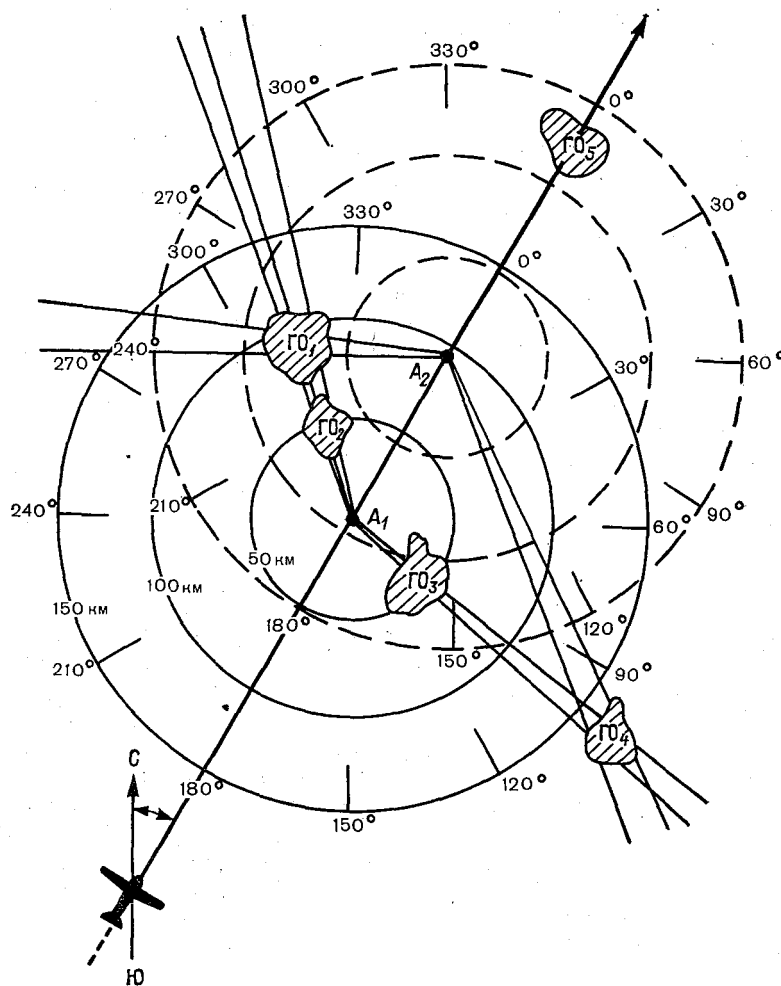


Рис. 6.18. Совместное использование бортового грозопеленгатора и самолетной РЛС.

вым. В этом случае без дальномера к пеленгатору гроз трудно оперативно установить, в каком из очагов присутствуют грозовые разряды.

При аналогичной обстановке в районе полета самолета, когда на одном азимуте расположены два очага, определение принад-

лежности одного из них к грозовым может быть осуществлено успешнее. Например, если самолет находится в точке A_1 (рис. 6.18) и на экране его бортового радиолокатора обнаружены два грозовых очага $ГО_1$ и $ГО_2$, пересекаемые пеленгами, при этом неизвестно, какой из очагов грозовой, то к моменту времени появления самолета над точкой A_2 пеленги только через очаг $ГО_1$ позволят утверждать, что он является грозовым.

Возможно, что обнаруженный в точке A_1 СМРЛС очаг, например, $ГО_3$ (рис. 6.18), пересекаемый пеленгами, будет принят за грозовой. На самом деле таким является $ГО_4$, находящийся за предельной дальностью обнаружения бортового локатора. При нахождении самолета в точке A_2 на основе данных грозопеленгатора можно будет установить, что очаг $ГО_3$ принят за грозовой ошибочно и таким, как видно из рис. 6.18, является очаг $ГО_4$.

Наиболее благоприятный эффект использования грозопеленгатора совместно с СМРЛС, вероятно, будет иметь место в том случае, когда в полете наблюдается смещение радиоэха облака и аналогичное смещение грозовых пеленгов на него. Здесь принадлежность эхо-сигналов очага к грозовым может быть установлена достовернее.

Рассмотренные выше примеры являются в некотором смысле идеализированными. Действительно, грозовая активность очага относительно продолжительна и к моменту времени нахождения самолета в точке A_2 грозовые разряды в облаке могут прекратиться. Тогда останется неустановленным, какой из очагов, $ГО_1$ или $ГО_2$, является грозовым. Возможны случаи, когда по курсу самолета бортовой радиолокатор обнаружил очаг $ГО_5$ (рис. 6.18), находящийся в стадии роста. По мере приближения самолета к нему он может достигнуть грозовой стадии, но изменение курса самолета в этот момент времени окажется затруднительным.

По нашему мнению, при совместном использовании на борту самолета грозопеленгатора и метеорадиолокатора первостепенное значение будет иметь информация радиолокатора. Его данные об отражаемости в первую очередь позволяют судить об опасности пролета через облако или приближения к нему. Информация о грозовой активности обнаруженного СМРЛС очага в таком случае послужит сигналом о необходимости его обхода на большем удалении от кромки контура радиоэха с отражаемостью, например, $10 \text{ мм}^6/\text{м}^3$, как это рекомендуется в работе [182]. Пока научная основа обхода радиоэха грозового облака из-за существующей вокруг него турбулентности не разработана.

Необходимо отметить, что исследование бортовых грозопеленгаторов находится сейчас в начальной стадии. Причиной этого, возможно, является ограниченный радиус действия бортовых метеорологических РЛС. Без использования бортовых высокопотенциальных метеорологических РЛС грозовые пеленги в некоторых случаях усложнят анализ метеорологической обстановки в полете.

6.3. Радиолокационное обнаружение и исследование грозовых облаков с МИСЗ

В настоящее время для получения информации об облаках с метеорологических ИСЗ широко используются фотоэлектрический и телевизионный методы. Однако эти методы не позволяют обнаруживать очаги осадков и гроз на фоне общей облачности, определять их интенсивность и геометрические размеры. Между тем радиолокационная аппаратура, устанавливаемая на МИСЗ, позволяет получать указанную информацию по аналогии с информацией, которую получают с помощью самолетных РЛС.

Известно, что радиолокационный обзор земной поверхности с ИСЗ, а следовательно, и обзор облаков и связанных с ними опасных явлений (грозы, ливни, шквалы) зависит прежде всего от типа РЛС. Для импульсной РЛС обзор обеспечивается либо неподвижной плоскосекторной, либо игольчатой сканирующей диаграммой направленности. В радиотеплолокаторах (РТЛ) используются только игольчатые сканирующие диаграммы направленности. В импульсных РЛС с целью получения большего выигрыша антенны и обеспечения более обширной зоны обзора целесообразно использовать не один, а два плоскосекторных луча, направленных в сторону и вниз от спутника.

Несмотря на простоту технической реализации антенны РЛС, установленной на МИСЗ, ее основным недостатком при обнаружении облаков, в том числе и грозовых, является плохая разрешающая способность по вертикали. Это обстоятельство не дает возможности определять вертикальные размеры облаков. Кроме того, практически в пределах всей зоны обзора одновременно с полезными эхо-сигналами облаков на вход приемника поступают мешающие эхо-сигналы от земной или водной поверхности, которые ухудшают энергетическое разрешение. Следствием указанных недостатков является уменьшение вероятности обнаружения и распознавания облаков. Поэтому оптимальный метод радиолокационного обзора при наблюдении облаков с метеорологических спутников основан на применении диаграммы направленности типа «игольчатый луч», сканирующей в плоскости, которая перпендикулярна плоскости орбиты МИСЗ.

Учитывая сказанное, в работе [142] был проведен анализ геометрической разрешающей способности для импульсной РЛС и пассивного РТЛ. В этой работе показано, что при длительности зондирующего импульса $\tau \approx 1$ мкс ширина диаграммы направленности $\theta_2 = 0,5^\circ$ в плоскости, перпендикулярной плоскости полярной орбиты, и $\theta_1 = 1,3^\circ$ в плоскости, параллельной плоскости орбиты, разрешающая способность вдоль строки Δx будет изменяться от 4—5 км в центре строки до 0,5 км на краю строки для орбит высотой 400—600 км. Для тех же условий разрешающая способность поперек строки будет в ее центре составлять 24—26 км и на краю строки 30—36 км.

Что же касается разрешающей способности по вертикали Δh , то наилучшие ее значения будут наблюдаться, когда антенна РЛС направлена к центру Земли. В этом случае $\Delta h \approx 350$ м. Однако для края строки $\Delta h \approx 2 \div 3$ км, т. е. заметно ухудшается. Вместе с тем значение Δh в пределах значительной части строки (80 %) не хуже 1—1,5 км. Это достаточно приемлемо, для обнаружения, распознавания грозовых облаков и определения их вертикальных размеров. При высоте орбиты $H = 300$ км для РТЛ с шириной сканирующей диаграммы направленности $\theta_1 = \theta_2 \approx 3^\circ$ разрешающие способности Δx и Δy примерно равны и составляют 15 км в центре строки и 18—20 км на краю строки.

Если установить РЛС и РТЛ на геостационарном МИСЗ с высотой орбиты 35 700 км, то за несколько десятков секунд можно просмотреть территорию, площадь которой соизмерима с площадью материков, и практически в квазиреальном масштабе времени получать информацию о грозовых облаках с геометрическим разрешением $\Delta x = 0,2 \div 6,5$ км и $\Delta y \approx 80 \div 90$ км при $\theta_1 = \theta_2 = 0,0025$ рад.

Энергетическое разрешение спутниковых РЛС при обнаружении грозовых облаков может быть определено с помощью основного уравнения радиолокации метеоцелей (3.1). При этом необходимо знать статистические характеристики отражаемости Z этих облаков. Известно, что минимальная высота орбиты МИСЗ составляет примерно 200 км. Следовательно, такой же всегда будет и минимальная дальность спутниковой РЛС. Это является недостатком, который при существующем уровне развития радиолокационной техники исключает возможность обнаружения с МИСЗ слабо отражающих объектов. Этот недостаток отсутствует в случаях установки РЛС на земле или на самолете.

Однако одним из преимуществ использования РЛС со спутника является значительно большие значения коэффициента заполнения зондирующего импульса по вертикали $k_{з.в}$ по сравнению со значениями $k_{з.в}$ у наземной РЛС. Действительно, $R_{\max}$ грозовых очагов, имеющих вертикальные размеры около 8—10 км, не могут превышать 300—350 км, так как на больших расстояниях они находятся ниже радиолуча ($k_{з.в} \approx 0$). На меньших расстояниях, а именно на 200—250 км, $k_{з.в}$ даже для узких диаграмм направленности ($\theta = 1^\circ$) составляет несколько сотых. В то же время для спутниковой РЛС $k_{з.в}$ может быть на порядок больше.

Другим преимуществом спутниковых РЛС является возможность обнаружения грозовых облаков сверху, т. е. при больших углах визирования. Вследствие этого путь микрорадиоволн в ослабляющем слое атмосферы (тропосфере) значительно меньше, чем для наземной РЛС. Это обстоятельство сдвигает оптимальный диапазон волн в сторону более коротких волн.

В работе [142] показано, что для обеспечения беспропускного просмотра поверхности земли за сутки необходимая ширина диаграммы направленности РЛС зависит от угла сканирования, высоты орбиты, числа посылаемых и принимаемых импульсов. Это

накладывает свои ограничения на применение узких диаграмм направленности с целью обеспечения необходимых дальностей обнаружения и удовлетворительного разрешения.

Например, для одноразового просмотра поверхности Земли за сутки с помощью четырех МИСЗ при 10 импульсах, приходящих на цель, угле сканирования $\gamma = 78^\circ$, $H = 400$ км, частоте посылок МРЛС, равных 1150 Гц, скорости движения проекции $v_{пр} = 7,2$ км/с можно получить, что $\theta_1 \theta_2 = 1,78^\circ$. Это обеспечивается при $\theta_2 = 0,51^\circ$ и $\theta_1 = 3,5^\circ$.

При данных технических характеристиках РЛС, а также при условии, что $\tau = 1$ мкс, из выражения (3.1) можно легко получить отношение принимаемой мощности эхо-сигнала к излученной мощности при вероятности обнаружения 0,9. Тогда

$$\frac{P_r}{P_t} = 5,2 \cdot 10^{-16} \frac{Z}{R^2} k k_3,$$

где R дано в км, а Z — в мм⁶/м³.

Согласно экспериментальным данным, радиолокационная отражаемость Z на данной высоте грозовых облаков изменяется от единиц до 10^6 мм⁶/м³, а среднее ее значение составляет 5×10^3 мм⁶/м³. С обеспеченностью близкой к 100 % среднее значение отражаемости в грозовых облаках на данной высоте $Z \geq 10$ — 10^2 мм⁶/м³ (см. табл. 3.8). Тогда при $H = 400$ км, коэффициенте заполнения $k_3 = 0,3$ и коэффициенте ослабления $k = 0,5$ отношение P_r/P_t с указанной обеспеченностью будет находиться в пределах $5 \cdot 10^{-20}$ — $5 \cdot 10^{-16}$, а при $H = 1000$ км — в пределах $7,8 \times 10^{-21}$ — $7,8 \cdot 10^{-17}$.

Если взять чувствительность приемного устройства РЛС $P_{мин} = 10^{-14}$ Вт и излучаемую мощность передатчика в импульсе $P_t = 3 \cdot 10^5$ Вт, то $P_r/P_t = 3,3 \cdot 10^{-20}$. Сравнивая это технически достижимое отношение с потребным для грозовых облаков, можно убедиться в том, что эти облака будут обнаруживаться с ИСЗ, находящихся на указанных орбитах, с обеспеченностью, близкой к 100 %.

Выше рассматривались возможности применения на ИСЗ радиолокатора со сканирующей диаграммой направленности. Однако с точки зрения простоты конструкции антенного узла и обеспечения необходимого минимального числа импульсов, приходящихся на цель, на первом этапе, по-видимому, целесообразно использовать РЛС с неподвижными плоскосекторными диаграммами направленности. Обзор земной поверхности с МИСЗ такая РЛС производит одним или двумя плоскосекторными радиолучами, ориентированными перпендикулярно плоскости орбиты спутника.

Предположим, что РЛС имеет следующие технические параметры. Излучаемая мощность в импульсе 300 кВт, чувствительность приемника $P_{мин} = 10^{-14}$ Вт, длительность зондирующего импульса 4—5 мкс, ширина диаграммы направленности в горизонтальной плоскости $\theta_1 = 0,23^\circ$, в вертикальной плоскости $\theta_2 = 30^\circ$.

РЛС имеет две антенны, которые поочередно подключаются к приемопередатчику. Несложно показать, что при высоте орбиты $H = 400$ км частота подключения равна 16 Гц, чтобы обеспечивать беспрерывный обзор земной поверхности в пределах просматриваемой полосы.

Существенным недостатком указанной РЛС является то, что на вход ее приемного устройства почти всегда вместе с полезными эхо-сигналами от облаков, осадков, ионизированных каналов молний и др. приходят мешающие отражения от участков водной или земной поверхности, расположенных на том же расстоянии от РЛС, что и рассматриваемые метеорообъекты.

Как показано в работе [142], обнаруживаемую отражаемость облаков и осадков $Z_{\min}$ можно в этом случае выразить следующим образом:

$$Z_{\min} = \frac{8\pi\theta_1^2\theta_2^2\lambda^2 m_1 \bar{P}_r R_{\max}^3 + m_2 \lambda^4 P_t h \operatorname{tg} \beta S(\beta) k}{8\pi \cdot 10^{-6} P_t h \theta_2 R_{\max} k k_3}, \quad (6.8)$$

где β — угол визирования, $S(\beta)$ — коэффициент диффузного отражения земной поверхности.

Анализ решения уравнения (6.8) показывает, что второе слагаемое числителя, учитывающее вклад мешающих эхо-сигналов, гораздо больше первого слагаемого при относительно малых расстояниях (порядка нескольких десятков километров), характерных для самолетных РЛС. В то же время при больших расстояниях обнаружения зон осадков с МИСЗ (несколько сотен километров и более) первое слагаемое за счет $R_{\max}^3$ существенно возрастает и становится больше второго слагаемого.

Решая уравнение (6.8) с помощью выбранных технических параметров РЛС и полагая $m_1 = m_2 = 1$, $k = 0,4$, $\beta = 40^\circ$; $S(\beta) = 10^{-1,8}$ для травяного покрова и $S(\beta) = 10^{-3,4}$ для водной поверхности [72], получим значения $Z_{\min}$, приведенные в (табл. 6.4).

Таблица 6.4

Результаты расчета $Z_{\min}$ по формуле (6.8) ($\text{мм}^6/\text{м}^3$)

Помеха	$R_{\max}$ км			
	300	400	500	600
От суши	$6 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^3$	$4 \cdot 10^3$	$4,2 \cdot 10^3$
Без помехи	$4 \cdot 10^2$	$6 \cdot 10^2$	10^3	$1,3 \cdot 10^3$
От водной поверхности	$6 \cdot 10^2$	$1,1 \cdot 10^3$	10^3	$1,5 \cdot 10^3$

Анализ данных табл. 6.4 показывает, что вклад помех оказывается существенным. В результате минимально обнаруживаемая отражаемость $Z_{\min}$ возрастает при $R_{\max} = 300 \div 400$ км почти в 10 раз, а при $R_{\max} = 500 \div 600$ км — в 3—4 раза по сравнению с $Z_{\min}$ без помех.

Заметно также несколько меньшее влияние эхо-сигналов от водной поверхности при выбранном угле визирования β .

В общем же применение РЛС с плоскосекторным радиолучом позволяет в среднем обнаруживать около 85 % грозовых облаков в полосе обзора. Повысить процент их обнаружения можно, если, в частности, использовать с ИСЗ двухдиапазонную РЛС с вычитанием эхо-сигналов на выходе приемного устройства [142].

Полезным являлось бы обнаружение ионизированных каналов молний с помощью спутниковых РЛС, работающих в метровом или дециметровом диапазонах волн, по аналогии с наземными РЛС данного диапазона. Приближенные оценки показывают, что для спутникового радиолокатора, имеющего технические параметры, близкие к наземной РЛС П-12 ($P_t = 200$ кВт, $P_{\min} = 10^{-13}$ Вт, $\tau = 6$ мкс, $\theta_1 = 11^\circ$; $\theta_2 = 30^\circ$), а также при угле визирования $\beta = 40^\circ$ и коэффициенте $S(\beta) \approx 2$, характерном для земной поверхности, покрытой травой и кустарником, отношение сигнал/шум

$$g = \frac{P_m}{P_{\text{ш}} + P_o + P_3} \approx 10^{-2} \div 10^{-3},$$

где P_m — мощность эхо-сигналов молний, $P_{\text{ш}} = P_{\min} = 10^{-14}$ Вт, P_o — эхо-сигналы облаков и осадков, P_3 — эхо-сигналы подстилающей поверхности, которые являются практически единственной помехой, так как $P_3 \gg P_{\text{ш}} + P_o$. Малое значение g и весьма кратковременное существование P_m может исключать надежное обнаружение тех молний, расстояние до которых от РЛС равно расстоянию до мешающего участка земной поверхности. Межоблачные молнии возникают, а наземные молнии зарождаются на высотах, равных нескольким километрам. В этих случаях $P_3 \approx 0$, и тогда отношение сигнал/шум $g \approx 10$, что свидетельствует о реальной возможности обнаружения молний.

6.4. Использование данных наземных грозопеленгаторов при анализе снимков МИСЗ

Несомненный интерес представляет сопоставление данных наземных грозопеленгаторов со снимками облачных полей, получаемыми с помощью метеорологических ИСЗ (МИСЗ). Известно, что при дешифрировании снимков МИСЗ опознавание грозовых облаков носит вероятностный характер. Качество дешифрирования может быть повышено при использовании данных наземных грозопеленгаторов ПАГ-1 и АГПД. Грозопеленгаторы позволяют установить молниевую активность облачных полей и ее продолжительность оперативнее и достовернее, чем сеть метеостанций. Радиус максимального обнаружения грозовых разрядов этими пеленгаторами составляет примерно 400—500 км.

Указанное сопоставление позволяет также оценивать работу грозопеленгаторов, используемых совместно с наземными метео-

рологических радиолокаторами. В секторе грозowych пеленгов на экране ИКО МРЛ нередко отсутствуют эхо-сигналы облаков в радиусе 300 км. В этом случае спутниковые данные о расположении за пределами 300 км фронтальных разделов воздушных масс или отдельных облачных полей позволяют установить, что прослеживаемые на экранах ПАГ-1 и АГПД сектора грозowych пеленгов являются не случайными. При наличии данных о ветре такие пеленги сигнализируют иногда о возможном появлении радиоэха грозowych облаков на экране МРЛ на предельном расстоянии.

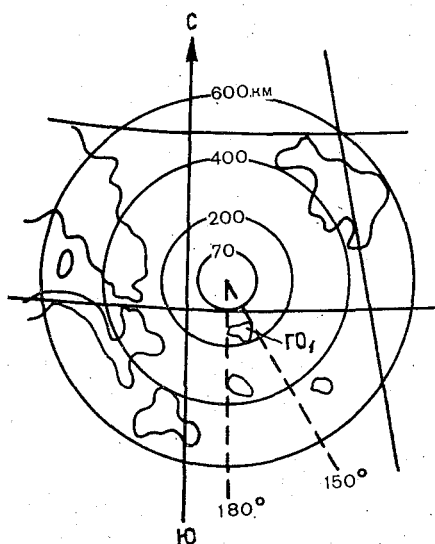


Рис. 6.19. Данные МИСЗ, полученные 13.08.77 г.

В подтверждение вышеизложенного рассмотрим ряд снимков МИСЗ и сопоставим их с наземной радиолокационной информацией, данными гронопеленгаторов и сети наземных метеостанций в тех случаях, когда интервал времени между снимками МИСЗ и данными гронопеленгаторов не превышал 15—20 мин. Такие наблюдения были проведены А. М. Тряховым совместно с авторами летом 1977 г. на Украине. Так, 13 августа 1977 г. на снимках МИСЗ за 20 ч 30 мин (рис. 6.19) в радиусе до 200 км от аэропорта наблюдался только один грозовой очаг (ГО₁) кучево-дождевой облачности в азимутальном секторе 150—180° на расстоянии 160—200 км. По данным МРЛ-1, его высота была равна 8 км, а отражаемость $3,2 \cdot 10^2 \text{ мм}^6/\text{м}^3$. Отсутствие пеленгов на этот очаг дает основание считать его негрозовым, даже не используя радиолокационных данных.

Представляет интерес анализ этого снимка в радиусе 400—500 км. В северо-западном направлении наблюдаются кучево-дождевые облака, которые при дешифрировании могут быть приняты за грозовые. Однако в течение ± 20 мин ко времени получения снимка пеленгаторы ПАГ-1 и АГПД не фиксировали грозовую ак-

тивность в этом и других направлениях. Обобщая данные пассивных (пеленгаторов) и активных (МРЛ-1) РТС и сопоставляя их со снимком спутника можно сказать следующее:

- географическое положение радиозаха на экране ИКО МРЛ-1 ($A = 150 \div 180^\circ$, $R = 160 \div 200$ км), соответствующее координатам этого облака на снимке спутника, иллюстрирует достоверность «привязки» сетки координат к снимку ИСЗ;

- с 20 ч 10 мин до 20 ч 50 мин в радиусе 400–500 км вокруг аэропорта облака были негрозовыми. Наступление электрической активности облаков в указанном радиусе устанавливается с момента появления пеленгов молнии на эти облака.

Рассмотрим случаи, когда ПАГ-1 и АГПД обнаруживали грозы, и проследим, как это способствует дешифрированию снимков МИСЗ. Такого рода наблюдения проводились 15 августа 1977 г. рис. (6.20) и 10 сентября 1977 г. рис. (6.21). На этих рисунках введены следующие обозначения:

- утолщенные части окружности с $R = 600$ км ограничивают азимутальные сектора, в пределах которых пеленгатор гроз ПАГ-1 фиксировал молнии;

- стрелки показывают азимуты одиночных грозовых разрядов, установленные грозопеленгатором АГПД. Положение стрелки в радиальном направлении характеризует расстояние до гро-

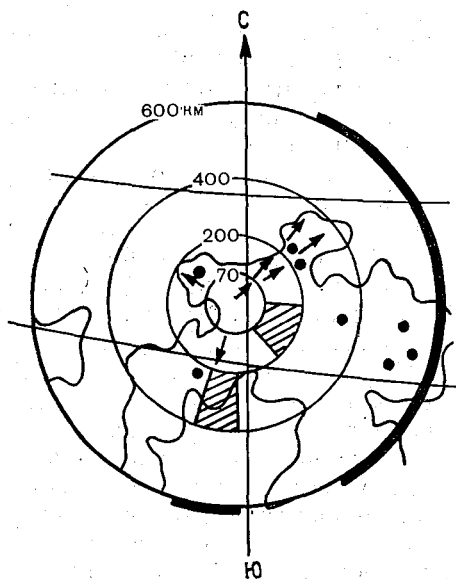


Рис. 6.20. Данные МИСЗ и грозопеленгаторов типа ПАГ-1 и АГПД, полученные 15.08.77 г.

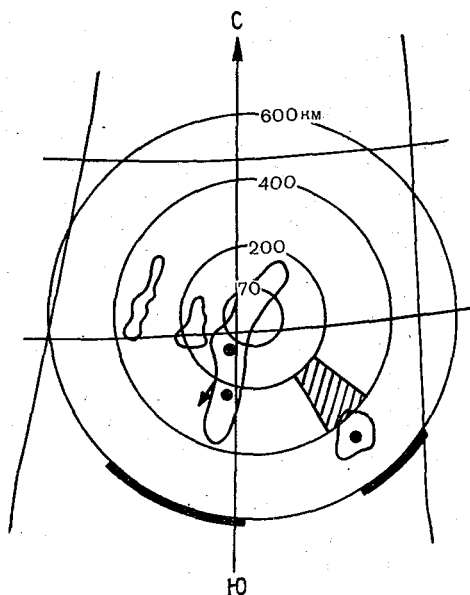


Рис. 6.21. Данные МИСЗ и грозопеленгаторов типа ПАГ-1 и АГПД, полученные 10.09.77 г.

зовых разрядов по четырем градациям дальности АГПД: 0—30, 30—70, 70—200 и 200—400 км;

— усеченные заштрихованные сектора иллюстрируют азимутальные направления и градации дальности многократных сбатований АГПД;

— точки показывают положение метеостанций, зафиксировавших грозы.

15 августа 1977 г. во второй половине дня максимальная грозовая деятельность в районе наблюдений отмечалась в 17—18 ч. К сроку приема карты облачности со спутника (20 ч 30 мин) грозоактивность облаков, находящихся на северо-востоке и юге, продолжалась, что подтверждается показаниями 2, 3 и 4-й градаций АГПД, а также показаниями ПАГ-1 (рис. 6.20). Видно, что грозовые облака находились в основном в секторе 20—190°. Кратковременная гроза наблюдалась по азимуту 300° на $R = 70 \div 180$ км. В этом случае сопоставление данных ПАГ-1 и АГПД со снимками МИСЗ указывает на возможность проведения более качественного дешифрирования снимков облаков. Многие метеостанции, обнаружившие грозы, находятся за пределами штормового кольца. Оперативность поступления от них данных о грозах, которые необходимы для анализа снимков МИСЗ, всегда ниже оперативности, обеспечиваемой грозопеленгаторами.

10 сентября 1977 г. на снимке МИСЗ в 10 ч 08 мин (рис. 6.21) обнаружен фронтальный облачный массив. Он перемещался с северо-востока на юго-запад, причем наиболее плотные (кучево-дождевые) облака были расположены в передней части фронта и имели ширину около 70 км. Эта гряда облаков в радиусе до 200 км хорошо обнаруживалась МРЛ. По его данным, эти облака имели $H_{вг} \approx 7$ км, а по значению отражаемости их следовало отнести к Сб. Однако по показаниям ПАГ-1 и АГПД было установлено, что в этих облаках есть грозовые разряды. Таким образом, показания грозопеленгаторов позволили провести анализ грозовой активности спутникового снимка облаков более достоверно, чем данные МРЛ. Показания грозопеленгатора позволили установить также, что на юго-востоке в облачном массиве, находящемся на расстоянии примерно 400—500 км, тоже есть грозовые разряды.

Обобщая сказанное, можно утверждать, что создание наземных грозопеленгаторов-дальномеров с радиусом действия 800—1000 км способствовало бы более качественному и оперативному дешифрированию снимков МИСЗ для выявления зон грозовой деятельности в тех случаях, когда требуется проведение метеобеспечения полетов на большие расстояния [76]. Указанные данные следует совмещать в тех районах, где отсутствует необходимая сеть метеостанций и где радиус обнаружения МРЛС ограничен рельефом местности.

Глава 7

Комплексное радиотехническое исследование гроз

7.1. Результаты комплексных радиотехнических исследований грозовых облаков

Экспериментальное исследование грозовых облаков связано с определенными трудностями. Хотя полеты в таких облаках в научно-исследовательских целях проводятся на специально оборудованных самолетах, они не позволяют получить всех параметров грозовых облаков. В связи с этим привлекает внимание использование дистанционных наземных активно-пассивных радиотехнических средств.

При проведении исследований грозовых облаков с помощью МРЛ появляется возможность установить изменение геометрических и микрофизических параметров облаков на различных стадиях их эволюции (рост, зрелая стадия, распад).

Возможность обнаружения ГР в облаках с помощью радиолокаторов, грозопеленгаторов-дальномеров и приборов регистрации ЭМИ ГР позволяет более достоверно интерпретировать данные метеорологических радиолокаторов, работающих в сантиметровом диапазоне радиоволн. Известно, что использование МРЛ_{см} для исследования грозовых облаков в основном сводилось к сопоставлению выдаваемых ими данных с неинструментальными наблюдениями за грозами, проводимыми метеостанциями.

Комплексные наблюдения за грозовыми облаками [105] дают возможность определить изменение параметров радиоэха и геометрических размеров облаков на различных высотах до и после появления разрядов в них. Причем с помощью РТС такие наблюдения обеспечивают контроль изменения параметров радиоэха грозовых облаков через короткие интервалы времени в течение периода их существования на экранах индикаторов МРЛ. Необходимо отметить, что временным изменениям параметров радиоэха грозовых облаков, когда полный цикл наблюдений (до пяти горизонтальных и вертикальных разрезов) проводится в течение 5—10 мин, посвящено немного работ [1, 23]. Основной причиной является отсутствие серийной автоматизированной системы обработки радиолокационной информации, которая только в последнее десятилетие стала интенсивно использоваться в радиометеорологии преимущественно в научно-исследовательских целях.

Комплексные наблюдения за грозовыми облаками проводились через короткие интервалы времени, что стало возможным в результате некоторых усовершенствований МРЛ, относящихся к системе регистрации радиоэха облаков (см. п. 4.4).

На первом этапе комплексного исследования грозовых облаков с помощью РТС определялись изменения параметров радиоэха облаков до начала возникновения разрядов, в период их существования и после прекращения. Для этого по горизонтальным разрезам облаков, начиная с высоты нулевой изотермы (H_1) и далее через 2 км (H_2 , H_3 и т. д.), проводились измерения отражаемости через 5 дБ. В результате обработки полученных данных рассчитывались следующие параметры радиоэха грозовых облаков: $Z_{\text{макс}}$, $\frac{dZ}{dR}$, $\frac{d^2Z}{dRdt}$, $\frac{dZ}{dH}$, $\frac{d^2Z}{dHdt}$; площади зоны радиоэха с $Z = 100 \text{ мм}^6/\text{м}^3$; $S_{H_1}^{100}$, $dS_{H_1}^{100}/dt$, $S_{H_2}^{100}$, $dS_{H_2}^{100}/dt$ и т. д.; объемы $V_{\Delta H_i}^{100}$, занимаемые зоной $Z \geq 100 \text{ мм}^6/\text{м}^3$ между H_1 , H_2 и H_3 . Объем аппроксимируется усеченным конусом с высотой h между плоскостями горизонтальных разрезов облака и площадью S^{100} на этих плоскостях. Таким образом, определяется $V_{H_2-H_1}^{100}$, $\frac{dV_{H_2-H_1}^{100}}{dt}$, $V_{H_3-H_2}^{100}$, $\frac{dV_{H_3-H_2}^{100}}{dt}$ и т. д.

На рис. 7.1 приводится изменение всех выше перечисленных параметров радиоэха облака до возникновения ГР в 15 ч 25 мин, во время их существования с 15 ч 25 мин до 16 ч 40 мин и далее, наблюдавшегося 27 июня 1975 г. Не будем останавливаться сейчас на изменениях параметров радиоэха на различных стадиях эволюции грозового облака, что дано в работе [138]. Из анализа рис. 7.1 следует, что комплексный радиотехнический метод исследования гроз позволяет получить новую информацию: точнее устанавливать момент начала ГР и определять изменения числа разрядов в единицу времени (N_p), а на основании этого оценивать эволюцию параметров радиоэха грозового облака.

На последующих этапах комплексного исследования грозовых облаков осуществлялся анализ их ячеистой структуры. За ячейки радиоэха облаков принимались неоднородности отражаемости, ограниченные некоторыми значениями Z_i и диаметра d_i , расположенные на расстоянии r_i друг от друга. Расстояние r_i измерялось между зонами $Z_{\text{макс}}$ соседних ячеек.

В 1975—1976 гг. были проведены одновременные наблюдения грозовых облаков с помощью РЛС МРЛ-1 и П-12. Цель этих исследований — определение взаимосвязи параметров радиоэха облаков, измеряемых с помощью МРЛ-1, с числом эхо-сигналов ГР в этих облаках в единицу времени, обнаруженных П-12; сопоставление местоположения и радиальных размеров эхо-сигналов ГР с ячеистой структурой радиоэха облака на протяжении всего периода его существования; анализ особенностей процесса молниевой активности в одно- и многоячеистых грозовых облаках.

В целом за указанный период в радиусе 200 км исследованы 62 грозовые ячейки, 16 из которых принадлежали к одноячеистым облакам. В 31 случае наблюдения РЛС П-12 начинались до появления в грозовой ячейке эхо-сигналов ГР, в остальных слу-

чаях — при появлении в них ГР. Во всех случаях РЛС П-12 осуществляла регистрацию эхо-сигналов ГР до их прекращения. В целом зарегистрировано 4200 эхо-сигналов ГР. По числу разрядов

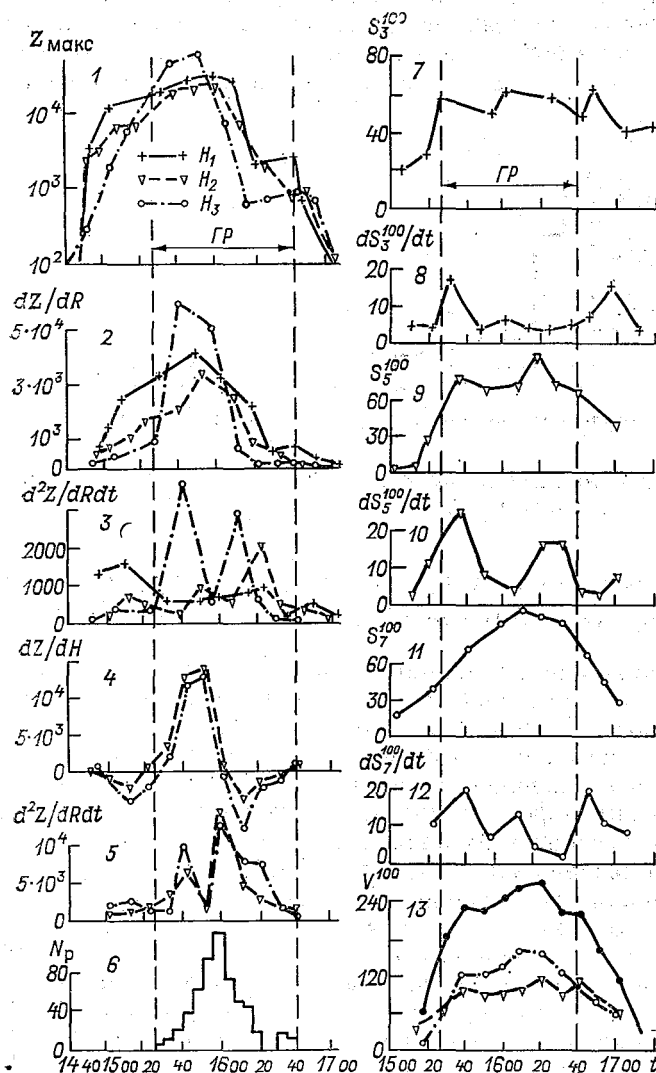


Рис. 7.1. Эволюция параметров радиоэха грозового облака и числа разрядов в нем 27.07.75 г.

в единицу времени ($\Delta N_p/\Delta t$) грозовые ячейки распределялись следующим образом (рис. 7.2): у 66 % ячеек ($\Delta N_p/\Delta t$)_{макс} составляла 2—6 р/мин, у 34 % ячеек — 10 р/мин и более. Отмечались случаи, когда в ячейке ($\Delta N_p/\Delta t$)_{макс} составляла 30—32 р/мин.

Следует отметить, что большие различия $\Delta N_p/\Delta t$ наблюдались не только в разные дни, когда происходила смена воздушной массы, но и в течение одного дня в соседних облаках. Анализ возможных причин, определяющих такое разнообразие значений $\Delta N_p/\Delta t$ в кучево-дождевых облаках, основывался на оценке взаимосвязи измеряемых параметров их радиоэха, в частности критерия грозоопасности $y = H \cdot \lg Z_3$, с числом эхо-сигналов ГР в этих облаках.

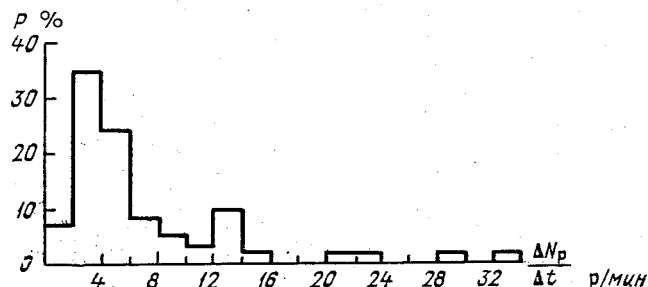


Рис. 7.2. Повторяемость значений $\Delta N_p/\Delta t$ в грозовых ячейках.

Затем сопоставлялись местоположения и размеры эхо-сигналов ГР с ячеистой структурой облака.

7.2. Исследование зависимости радиолокационных характеристик облаков от их грозоактивности

Наблюдая при постоянно направленной антенне РЛС П-12 на облако, в котором фиксируется начало появления эхо-сигналов сильнооточных ГР и их окончание, можно выделить три периода существования данного облака: предгрозовой, грозовой и послегрозовой. Это позволяет установить повторяемость значений измеряемых параметров радиоэха облаков в начале и конце грозы, а также исследовать их зависимость от интенсивности грозы, т. е. частоты появления эхо-сигналов ГР ($\Delta N_p/\Delta t$).

Повторяемость значений параметров радиоэха $\lg Z_{\max}$, $\lg Z_3$, dZ/dR на высотах 5 и 7 км, H и D грозовых ячеек в указанные периоды их существования представлена в табл. 7.1. Здесь средние значения, СКО и коэффициенты вариаций параметров радиоэха ячеек рассчитаны по 5-минутным интервалам относительно моментов начала и окончания грозы (t_n и t_k). На рис. 7.3 приведены средние значения H , $\lg Z_{\max}$ и y , а также пределы их рассеивания.

Из анализа данных рис. 7.3 и табл. 7.1 следует:

- значения параметров радиоэха $\lg Z_{\max}$, $\lg Z_3$, dZ/dR и H в начале грозы в среднем в 1,2—1,6 раз больше, чем в конце;
- рассеивание параметров радиоэха грозовых ячеек, характеризуемое коэффициентом вариации, в предгрозовой стадии в 1,5—2 раза меньше, чем в послегрозовой;

Таблица 7.1
Статистические характеристики параметров радиозах грозных ячеек

Параметр	Предгрозовой период						Грозоактивный период						Послегрозовой период					
	t мин						t мин						t мин					
	-25	-20	-15	-10	-5	t_n	5	10	15	-15	-10	-5	t_n	5	10	15	20	
$\bar{A}$	1,8	2,1	2,4	2,7	3,0	3,2	3,4	3,5	3,6	3,4	3,1	2,9	2,7	2,4	2,2	2,0	1,8	
σ_A	0,2	0,4	0,4	0,4	0,3	0,2	0,2	0,3	0,2	0,4	0,4	0,5	0,6	0,6	0,6	0,4	0,4	
V_A %	11	19	17	15	10	6	6	9	6	12	13	15	22	25	27	20	22	
$\bar{B}$	1,8	2,2	2,3	2,6	2,9	3,2	3,4	3,5	3,5	3,3	3,0	2,8	2,7	2,3	2,3	1,9	1,8	
σ_B	0,4	0,4	0,6	0,6	0,4	0,2	0,2	0,2	0,2	0,4	0,4	0,6	0,6	0,6	0,4	0,4	0,2	
V_B	22	18	26	23	14	6	6	6	6	12	13	21	22	26	17	21	11	
$\bar{C}$	—	1,8	1,8	2,1	2,4	2,6	2,8	3,0	3,0	2,7	2,5	2,3	2,1	1,9	1,7	1,7	—	
σ_C	—	0,5	0,6	0,6	0,6	0,3	0,3	0,2	0,2	0,3	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,4	—	
V_C %	—	28	33	29	25	12	11	7	7	11	16	17	24	26	29	24	—	
$\bar{E}$	—	—	1,6	1,8	2,0	2,3	2,5	2,6	2,8	2,0	1,8	1,6	1,4	1,4	1,1	—	—	
σ_E	—	—	0,4	0,5	0,5	0,4	0,3	0,4	0,3	0,4	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	—	—	
V_E %	—	—	25	28	25	17	12	15	11	20	17	19	21	14	18	—	—	
$\bar{H}$ км	8,5	8,5	9,2	10,2	10,9	11,5	11,9	12,1	12,2	11,4	10,8	10,1	9,2	8,3	7,6	6,9	6,1	
σ_H км	1,2	1,6	1,4	1,2	1,0	1,0	1,4	1,2	1,2	2,0	2,2	2,2	2,4	2,4	2,4	2,2	1,8	
V_H %	14	19	15	12	9	9	12	10	10	18	20	22	26	29	32	32	30	
$\bar{D}$ км	5,0	5,8	6,8	7,5	7,8	8,5	9,6	10,3	11,7	11,1	10,6	9,6	9,2	8,6	8,4	6,9	5,8	
σ_D км	1,2	1,3	1,3	1,7	1,9	2,2	2,4	2,4	2,2	2,9	3,0	2,8	2,8	2,8	2,2	1,5	1,2	
V_D %	24	22	22	23	24	26	25	23	19	26	28	29	30	33	26	22	21	

Примечание. В таблице обозначено: $A = \lg Z_{\max}$, $B = \lg Z_3$, $C = (d \lg Z / dR)_5$, $E = (d \lg Z / dR)_7$.

— к моменту появления ГР в облаке рассеивание параметров радиоэхо уменьшается в 1,5—3 раза и принимает наименьшие значения в первые 15 мин грозы;

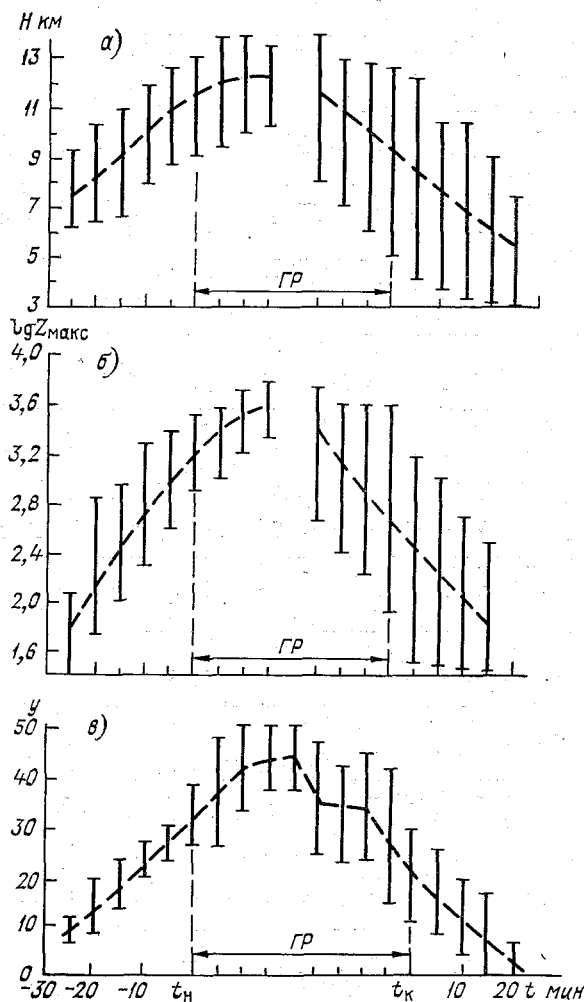


Рис. 7.3. Повторяемость значений H (а), $\lg Z_{\max}$ (б) и y (в) в предгрозовой, грозовой и послегрозовой стадиях.

— рассеивание параметров радиоэхо увеличивается в 2—3 раза к моменту окончания грозоактивности периода.

Представляет интерес определить время появления максимумов Z , dZ/dR , H и D у ячеек относительно моментов начала и окончания в них ГР, т. е. установить, за какое время Δt появляются в ячейке ГР и через какое время $\Delta t'$ после этих моментов

времени прекращаются ГР. Средние значения и средние квадратичные отклонения интервалов времени приведены в табл. 7.2.

Таблица 7.2

Характеристики интервалов времени (мин) начала и окончания ГР относительно появления максимумов параметров радиоэха

Характеристика времени	Параметр радиоэха			
	$Z_{\text{макс}}$	$\left(\frac{dZ}{dR}\right)_{\text{макс}}$	$H_{\text{макс}}$	$D_{\text{макс}}$
$\overline{\Delta t}$	12	10	9	23
$\sigma_{\Delta t}$	9	7	6	8
$\overline{\Delta t'}$	36	37	35	30
$\sigma_{\Delta t'}$	22	16	18	26

Из табл. 7.2 видно, что первые ГР в ячейке появляются примерно за 10 мин до того момента, когда параметры радиоэха Z , dZ/dR , H достигнут максимальных значений. Продолжаться ГР в ячейке могут в течение 30—40 мин после стадии ее максимального развития. При этом Δt характеризуется меньшей, чем $\Delta t'$ степенью рассеивания ($\sigma_{\Delta t'} > \sigma_{\Delta t}$ в 2—3 раза).

По нашим данным, средняя продолжительность существования эхо-сигналов ГР в грозовых ячейках составляет 40—45 мин. Эти значения близки к средней продолжительности молниевой активности в отдельной грозовой ячейке, установленной в работах [113, 165, 192].

Приведенные данные свидетельствуют о существенном различии значений параметров радиоэха ячеек в начале и конце грозы. Они имеют следующее практическое значение. Если наблюдения МРЛ за ячейкой начнутся не с момента начала в ней грозовой активности, а позднее, когда $\Delta N_p/\Delta t$ будет уменьшаться, то в этом случае имеет место большая вероятность получения неверной информации об отсутствии ГР в облаках. По данным табл. 7.1 можно установить значения параметров радиоэха, соответствующие переходу ячейки в грозоактивную стадию, однако, на протяжении большей части периода грозоактивности ячейки эти параметры будут иметь значения меньше, чем в начале грозы (см. табл. 7.2).

В качестве подтверждения вышесказанному рассмотрим повторяемость значений параметра y грозовых ячеек в указанные периоды их существования (рис. 7.3 в). Видно, что грозоактивному периоду соответствует максимальное рассеивание значений y , которое увеличивается с момента появления разрядов в облаке. Пределы рассеивания значений y в послегрозовой период также больше, чем в предгрозовой.

Данные РЛС П-12 подтверждают достоверность критериального значения $y = 25$, определяющего переход облака в грозоактивное состояние [122]. Однако в финальной стадии грозы, когда число N_p значительно уменьшается, т. е. ГР становятся редкими, значения критерия y уменьшаются до 10—20 и не всегда достоверно указывают на отсутствие разрядов в облаках.

Следует отметить, что рассматриваемый критерий y нуждается в сезонной корректировке, при этом значения $y_{кор}$ могут быть меньше 25, но большая дисперсия измеряемых значений y , по-видимому, сохранится.

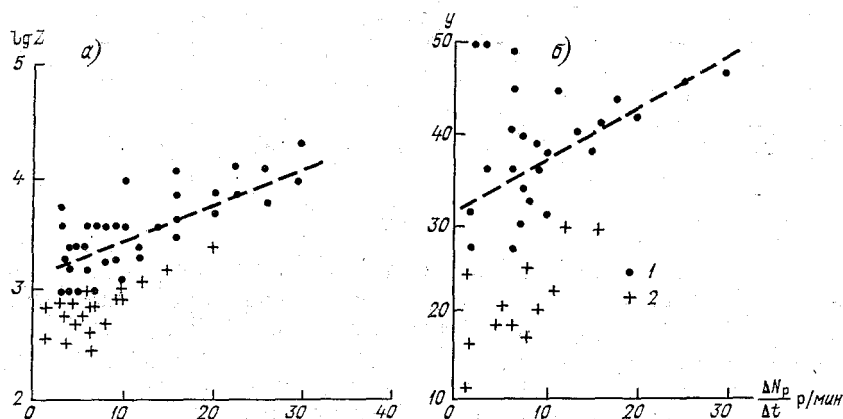


Рис. 7.4. Взаимосвязь значений $\lg Z$ (а) и y (б) с $\Delta N_p/\Delta t$.

1 — данные наблюдений в период от начала появления ГР до $\left(\frac{\Delta N_p}{\Delta t}\right)_{\max}$, 2 — данные наблюдений от $\left(\frac{\Delta N_p}{\Delta t}\right)_{\max}$ до окончания ГР.

Рассмотрим более подробно связь частоты появления эхо-сигналов ГР $\Delta N_p/\Delta t$ с $\lg Z$ и y в грозоактивный период существования ячеек (рис. 7.4). Видно, что ГР начинаются при $\lg Z_{\max} \geq 3$ и $y \geq 25$, а заканчиваются при $\lg Z_{\max} \approx 2$ и $y \approx 10$. Замечено также, что взаимосвязь этих параметров радиоэхо ячеек с частотой появления в них ГР статистически выражена слабо. Проанализируем возможные причины, обуславливающие это.

В работе [138] указывается, что первые ГР в облаке появляются при $Z_{\max.1} > Z_{\max.2}$, где $Z_{\max.1}$ и $Z_{\max.2}$ — максимальные отражаемости облака, соответствующие началу и окончанию в нем ГР. Приведенные в табл. 7.1 данные также свидетельствуют о том, что начало и окончание ГР отмечаются при существенно различающихся значениях параметров радиоэхо ячеек.

Наряду с указанными случаями увеличения $\Delta N_p/\Delta t$ по мере роста $\lg Z_{\max}$ и y наблюдались случаи, когда несмотря на большие значения параметров $\lg Z_{\max}$ (3—4) и y (50), частота появ-

ления ГР оставалась малой (1—5 р/мин) или разряды вовсе отсутствовали. Эти случаи требуют дальнейшего исследования.

Слабая взаимосвязь параметров радиоэхо ячеек с их электрической активностью обусловлена также влиянием ячеистой структуры облака на эволюцию в нем грозовой деятельности. Были

проанализированы изменения $\frac{\Delta N_p^2}{\Delta t}$ в многоячейстом грозовом облаке в зависимости от расстояния r между зонами $Z_{\text{макс}}$ соседних ячеек. Здесь N_p^2 — общее число ГР, обнаруженных в соседних ячейках. Рассматривались только те случаи, когда в пределах диаграммы направленности РЛС П-12 находилось несколько грозовых ячеек. Установлено, что по мере уменьшения расстояния r

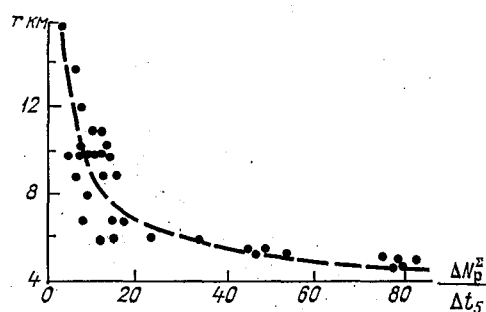


Рис. 7.5. Зависимость $\Delta N_p^2/\Delta t$ от расстояния между ячейками (r).

до 6—7 км отмечается значительный рост $\Delta N_p^2/\Delta t$ без соответствующего увеличения значений измеряемых параметров радиоэхо ячеек.

Зависимость $\Delta N_p^2/\Delta t$ от r между ячейками представлена на рис. 7.5. Видно, что при $r \geq 8$ км значения $\Delta N_p^2/\Delta t \leq 20$ р/5 мин. По мере уменьшения r до 6 км значения $\Delta N_p^2/\Delta t$ увеличились до 80 р/5 мин, в то время как практически у всех изолированных грозовых ячеек $\Delta N_p^2/\Delta t$ не превышает 1—4 р/мин. По-видимому, рост N_p^2 вызван увеличением числа межоблачных разрядов между соседними ячейками в многоячейстом грозовом очаге.

На рис. 7.6 приведена эволюция $Z_{\text{макс}}$ нескольких ячеек и числа ГР в них. На рисунке под каждой ячейкой приведено изменение N_p в ней, суммированное по минутным интервалам. В большинстве ячеек значение $(\Delta N_p/\Delta t)_{\text{макс}}$ не превышало 3—4 р/мин, а у ячеек 38 и 39 оно увеличилось до 16 р/мин без значительного роста $Z_{\text{макс}}$, когда эти ячейки находились на $r = 6$ км.

Измерение параметров радиоэхо грозовых ячеек на различных высотах дает возможность исследовать изменение вертикального профиля отражаемости на протяжении всего периода их существования.

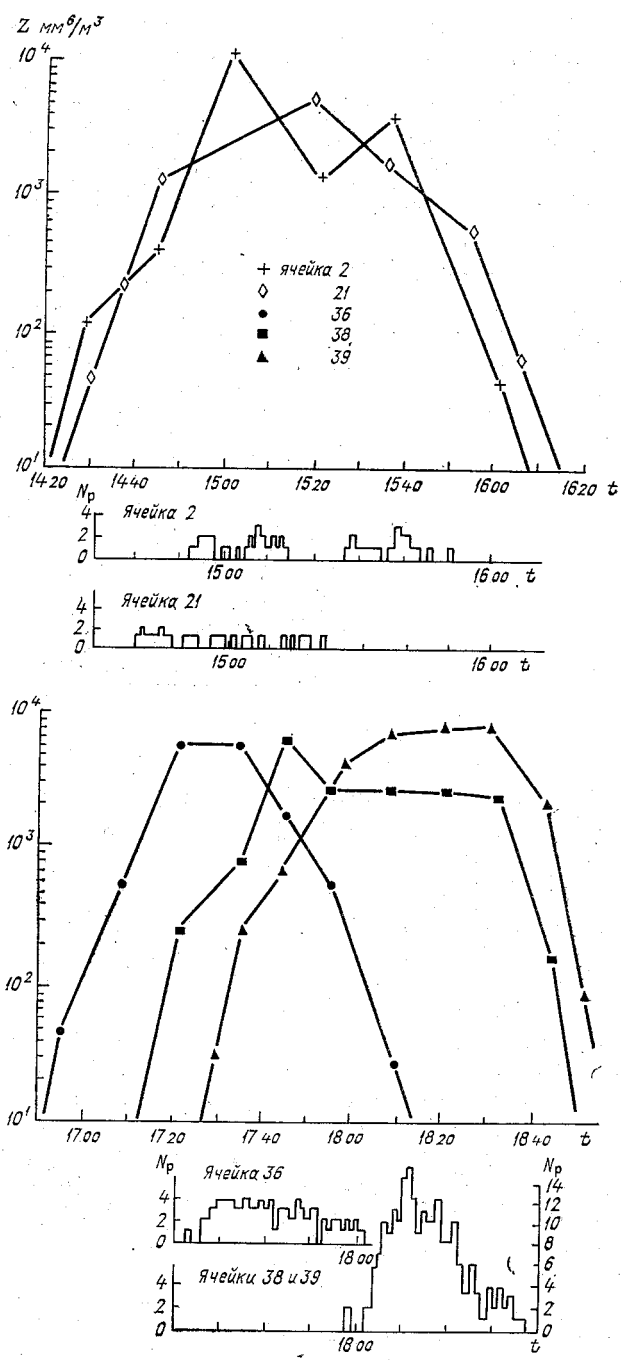


Рис. 7.6. Эволюция Z_{max} грозных ячеек и числа ГР в них.

На рис. 7.7 приведено изменение отношений Z_{H_i}/Z_{H_1} , где Z_{H_i} — измеренные значения на высотах 5, 7 и 9 км, Z_{H_1} — измеренные значения на высоте 3 км на протяжении периода существования грозových ячеек. Это позволяет установить изменение местоположения по высоте зоны $Z_{\text{макс}}$ в процессе эволюции данных ячеек

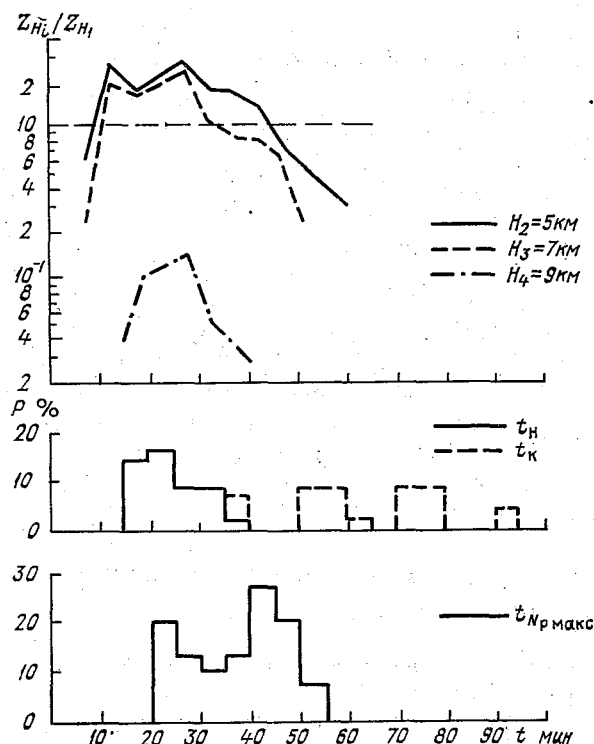


Рис. 7.7. Взаимосвязь $H_{Z_{\text{макс}}}$ с началом, максимумом грозоактивности и ее окончанием в ячейке.

и сопоставить $H_{Z_{\text{макс}}}$ с началом ГР, максимумом грозоактивности и окончанием разрядов в ячейке. На этом рисунке приведены средние значения отношений Z_{H_i}/Z_{H_1} , повторяемости t_H (сплошная линия), t_K (пунктир) и $t_{N_{p, \text{макс}}}$, построенные по 5-минутным интервалам периода существования ячеек. Видно, что:

— в первые 15–25 мин развития грозовой ячейки зона $Z_{\text{макс}}$ находится на высоте примерно 7 км и через 40–50 мин смещается в ее нижнюю часть ($H_{Z_{\text{макс}}} \leq 3$ км);

— через 20 мин с момента появления у ячеек $Z = 10 \text{ мм}^6/\text{м}^3$ первые эхо-сигналы ГР обнаруживаются в них в 30 % случаев, а через 25 мин — уже в 70 % случаев;

— более чем в 70 % случаев максимум грозоактивности в ячейках наблюдается при $H_{Z_{\max}} \geq 5$ км;

— повторяемость t_k в ячейках не имеет явно выраженного максимума по сравнению с t_h , ГР могут возникать в ячейках и при $Z_{H_i}/Z_{H_1} \ll 1$.

Привлекает внимание то обстоятельство, что $(Z_{H_i}/Z_{H_1})_{\max}$ не является показателем немедленного наступления $(\Delta N_p/\Delta t)_{\max}$ в ячейке. Максимум повторяемости $t_{N_{p, \max}}$ наступает лишь через 30 мин после того, как Z_{H_i}/Z_{H_1} достигнут наибольших значений. На протяжении этого интервала времени данные отношения остаются почти неизменными.

Необходимо отметить, что эти данные о малоизменяющемся вертикальном профиле Z грозового облака, находящегося в зрелой стадии развития, совпадают с ранее полученными Е. М. Сальманом и С. Б. Гашиной [129] данными, которые были установлены при сопоставлении информации МРЛ с сообщениями метеостанций о грозах. Новым является то, что ГР возникают в облаке и при значительно изменяющемся вертикальном профиле Z , когда $H_{Z_{\max}}$ равно 2—3 км, как правило, это происходит на спаде грозоактивности. Кроме того, малоизменяющийся вертикальный профиль Z облаков обычно наблюдается и после прекращения ГР. Однако значение $Z_{\max}$ в этот период значительно меньше, чем в стадии зрелости облака.

7.3. Взаимосвязь местоположения, размеров ГР с ячеистой структурой облака

Выполненные ранее исследования грозовых многоячеистых облаков с помощью РЛС П-12 показали, что в течение грозоактивного периода радиальные размеры эхо-сигналов ГР L_p и их местоположение существенно изменяются. В период достижения $N_{p, \max}$ наблюдается тенденция уменьшения радиальных размеров зоны R_N , в которой обнаруживаются ГР [139]. На рис. 7.8 а изображено количество ГР, обнаруженных в многоячеистом очаге радиоэхо, суммированное по интервалам 2 мин. В момент пика грозоактивности $\Delta N_p/\Delta t$ достигало 56. На рис. 7.8 б показаны радиальные размеры зон различной отражаемости (Z) очага на высоте 7 км через порядок величины, начиная с $Z_{\min}$ ($Z_{\min}, 10^1, 10^2, 10^3, 10^4$ мм⁶/м³) и зарегистрированных в этом очаге ГР, которые изображены в виде вертикальных линий. На рис. 7.8 в приведено изменение размеров зоны R_N , в которой обнаруживались ГР в течение грозоактивной стадии. На рис. 7.8 г изображено изменение радиальных размеров ГР L_p .

Грозовой очаг имел многоячеистую структуру. Аналогичный характер носит распределение в нем эхо-сигналов ГР на стадии роста грозоактивности до 15 ч 50 мин, занимающих почти весь очаг и имеющих $\bar{L}_p = 3$ км. Однако по мере усиления грозы, на-

чая с 15 ч 52 мин, пространственная картина расположения ГР в поле радиоэха очага изменяется. Резко уменьшается область, занимаемая ГР, подавляющее число которых в период $N_{p. \text{ макс}}$ (с 15 ч 52 мин до 16 ч 03 мин) появляется в 9-км зоне облака

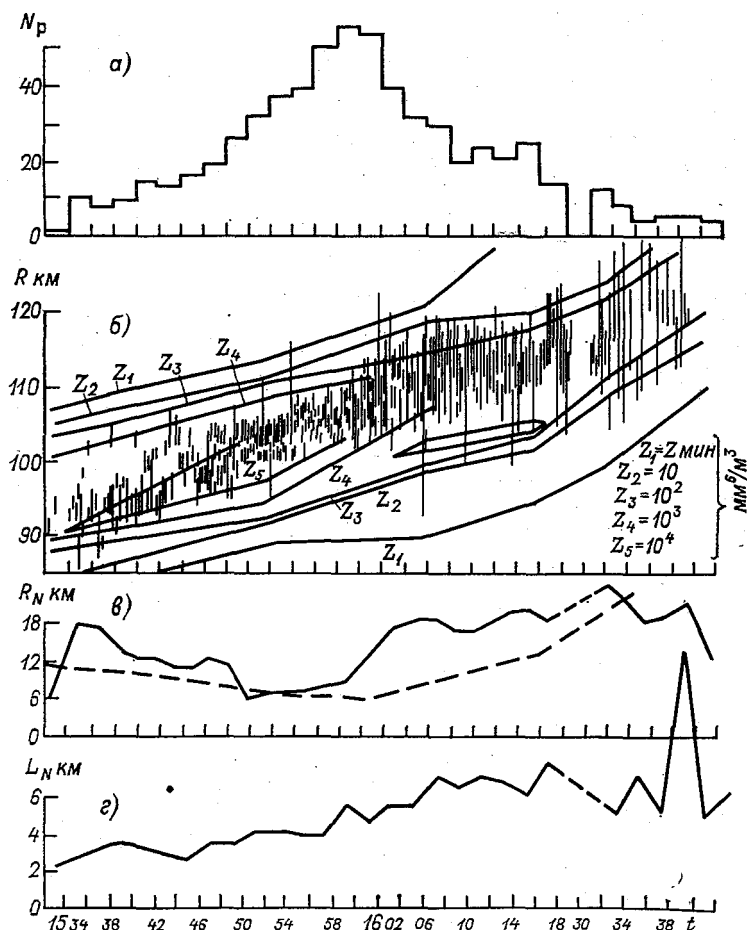


Рис. 7.8. Эволюция числа, расположения, радиальных размеров ГР в грозном облаке 27.07.75 г.

(рис. 7.8 в), расположенной в области максимальных градиентов dZ/dR (рис. 7.8 б это дальняя от наблюдателя граница облака). В течение 10 мин L_p и R_N сохраняют свои минимальные значения. В этот интервал времени расстояние r между двумя ячейками грозного очага, находящимися в пределах диаграммы направленности РЛС П-12, составляло 5—8 км (штриховая кривая на рис. 7.8 в).

С 16 ч 04 мин начинает увеличиваться r и расширяться область R_N , которая к окончанию грозоактивности становится почти в 3 раза больше и достигает 25 км. При этом размеры L_p по мере спада интенсивности ГР возрастают в 2 раза и более (наблюдались разряды с $L_p = 18 \div 20$ км). Так, за период с 15 ч 34 мин до 15 ч 52 мин $\bar{L}_{p.1} = 3,1$ км, за период с 15 ч 52 мин до 16 ч 02 мин — $\bar{L}_{p.2} = 4,4$ км и за период с 16 ч 02 мин до 16 ч 42 мин — $\bar{L}_{p.3} = 6,8$ км. За эти же сроки значения СКО величины L_p равны: $\sigma_{L_1} = 1,8$ км, $\sigma_{L_2} = 2,1$ км и $\sigma_{L_3} = 3,7$ км.

Отметим особо тот факт, что в течение грозоактивного периода наблюдались эхо-сигналы ГР, выходящие за пределы радиоэха

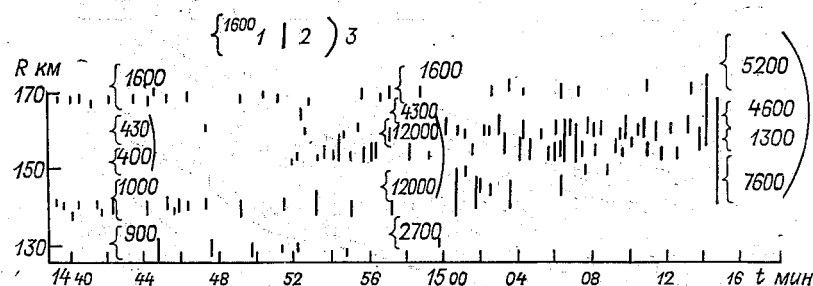


Рис. 7.9. Эволюция числа, расположения, радиальных размеров ГР в многоячейном грозовом очаге.

1 — радиальные размеры зоны радиоэха ячеек с $Z=10^2$ мм³/м³ и значения $Z_{\max}$ ячеек в данный момент времени, 2 — размеры эхо-сигналов ГР, 3 — ячейки, объединенные с течением времени изолинией $Z_i=10$ мм³/м³.

облаков и осадков. Из рис. 7.8 б видно, что в 16 ч 02 мин ГР вышел на 3 км за пределы радиоэха облака, измеренного на $H = 7$ км, где радиоэхо очага имело максимальные размеры. А на высоте 3 км эта разность составляла 6—8 км, причем выходы ГР из облака отмечались с обеих сторон. Эти факты подтверждают справедливость требований Наставления по производству полетов Гражданской авиации о том, что самолет не должен приближаться к грозовому облаку ближе, чем на 10 км.

Выходящие за пределы радиоэха грозового очага эхо-сигналы ГР могут принадлежать разрядам, происходящим между накопительной облака и землей. Сообщение о таких разрядах приводится в работах [189, 191]. Кроме того, наблюдающиеся на спаде грозовой активности ГР с $L_p > 10$ —15 км являются, по-видимому, межоблачными.

Сопоставим местоположение эхо-сигналов ГР с ячеистой структурой радиоэха облаков, а также проследим эволюцию размеров ГР в таких облаках на примере наблюдений за очагом, состоящим из пяти грозоактивных ячеек и ориентированным вдоль диаграммы направленности РЛС П-12, что позволит следить за эволюцией грозоактивности во всех ячейках одновременно. На рис. 7.9

показана эволюция грозоактивности за 40-мин интервал регистрации РЛС П-12 ГР в данном очаге с момента их первого появления. По рис. 7.9 можно проследить изменение местоположения ГР и рост их размеров по мере объединения ячеек в грозовой очаг. Так, в начале грозы в изолированных ячейках отмечались ГР с $L_p = 2 \div 3$ км, а в сформировавшемся очаге (в 15 ч 14 мин) отмечались разряды, соизмеримые с протяженностью радиоэха всего очага ($L_p = 20 \div 25$ км).

Выполним по аналогичной схеме анализ всего экспериментального материала. Как отмечалось ранее, ячейки по числу обнаруженных в них разрядов и времени грозовой активности отличаются друг от друга, поэтому для последующего сравнительного анализа целесообразно выделить у каждой из них интервалы времени, характеризующие определенные стадии эволюции ее грозоактивности. Если принять в ячейке $(\Delta N_p / \Delta t)_{\max} = 1$, то можно выделить пять временных интервалов, в течение которых $\Delta N_p / \Delta t$ не будет превышать заранее заданного уровня на стадиях роста и спада грозовой активности: $t_H - 0,25$; $0,25 - 0,5$; $0,5 - 1 - 0,5$; $0,5 - 0,25$; $0,25 - t_K$.

Далее определялись статистические характеристики (средние значения и СКО) радиальных размеров ГР L_p , зоны R_N , в которых обнаруживались ГР, и расстояния между соседними ячейками исследуемого очага радиоэха r_i в указанные интервалы времени. Результаты подобной обработки данных, полученных при наблюдениях за многоячейстыми грозowymi очагами, приведены в табл. 7.3 и на рис. 7.10.

Таблица 7.3

Статистические характеристики L_p , R_N и r_i (км) в течение периода грозоактивности многоячейстого очага радиоэха

Характеристика	Интервал времени														
	0,25			0,5			1			0,5			0,25		
	Параметр														
	L_p	R_N	r_i	L_p	R_N	r_i	L_p	R_N	r_i	L_p	R_N	r_i	L_p	R_N	r_i
$\bar{x}$	4,4	11,3	9	4,6	11,4	7,4	4,8	8,5	7	6,3	9,1	7,3	7,6	11,2	8,4
σ_x	1,6	3,1	1,2	2,0	4,3	0,9	1,8	2,0	0,8	3,2	3,9	1,0	4,4	4,7	1,5

1. Грозовая активность многоячейстого облака, оцениваемая величиной $\Delta N_p^2 / \Delta t$, усиливается по мере уменьшения расстояния между зонами $Z_{\max}$ соседних ячеек. При последующем удалении зон $Z_{\max}$ ячеек друг от друга и наступлении стадии их диссипации наблюдается обратный эффект — уменьшение частоты появления ГР;

2. Радиальные размеры ГР L_p в среднем мало изменяются с момента начала их появления в облаке и до момента спада их интенсивности до $0,5 (\Delta N_p/\Delta t)_{\text{макс}}$: $\bar{L}_p = 4,5 \div 4,8$ км при $\sigma_L = 1,6 \div 2,0$ км. В интервале времени с $0,5 (\Delta N_p/\Delta t)_{\text{макс}}$ и до окончания грозы значение L_p увеличивается в среднем в 1,7 раза, а σ_L — в 2,8 раза по сравнению с их значениями в начале грозы;

3. Начальный период грозоактивности характеризуется наименьшими значениями L_p и наибольшими значениями R_N ($R_N \approx (1,5 \div 2)r_i$ в интервале времени с $\Delta N_p/\Delta t < 0,5$). Это означает, что первые ГР появляются в отдельных ячейках грозового очага. По мере сближения соседних ячеек до $r_i = 6 \div 7$ км уменьшается

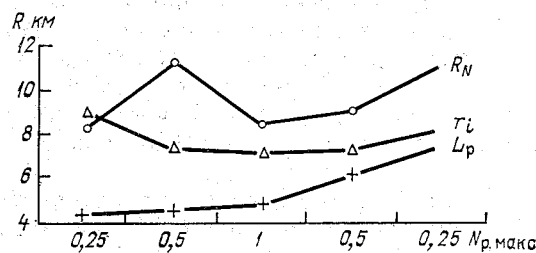


Рис. 7.10. Изменение L_p , R_N и r_i в процессе эволюции грозоактивности многоячейковых облаков.

и R_N , приобретая наименьший размер в период $(\Delta N_p/\Delta t)_{\text{макс}}$, сравнимый со средним расстоянием между ячейками. По-видимому, большинство ГР при этом являются межоблачными (или разряды на землю имеют большие горизонтальные составляющие) и возникают между соседними ячейками. По мере увеличения расстояния r_i уменьшается число разрядов, но их размеры растут и продолжают оставаться сравнимыми со средним расстоянием между ячейками. Следовательно, несмотря на то, что в завершающей стадии грозы у ячеек наступает стадия диссипации и многоячейковый очаг начинает разрушаться, электрическая активность в этих ячейках может сохраняться, при этом значительно увеличиваются горизонтальные составляющие ГР.

Необходимо отметить, что приведенные в табл. 7.3 и на рис. 7.10 данные относятся к тем грозовым очагам, в которых $(\Delta N_p/\Delta t)_{\text{макс}}$ превышала 5—6 р/мин. В то же время наблюдались многоячейковые грозовые очаги с $(\Delta N_p/\Delta t)_{\text{макс}} = 1 \div 3$ р/мин, в которых местоположение и размеры ГР на протяжении всего периода грозоактивности изменялись незначительно. В этих случаях ячейки в очаге располагались друг от друга на $r_i = 9 \div 10$ км; в них $\bar{L}_p = 4,9$ км, а $\bar{R}_N = 7,8$ км.

Практически у всех одноячейковых грозовых облаков $\Delta N_p/\Delta t$ не превышала 1—4 р/мин. Местоположение и размеры ГР в них также мало изменялись: L_p к окончанию грозоактивности увели-

чивалась лишь в 1,5 раза. В целом, для изолированных грозových ячеек $L_p = 2,5$ км, а $R_N = 3,5$ км.

Таким образом, степень грозоактивности в очагах радиоэха и размеры области, в которой появляются эхо-сигналы ГР, в значительной мере определяются структурой этого очага: является он многоячейстым или одноклеточным и как близко друг к другу расположены в нем грозковые ячейки.

Дополнительную информацию об особенностях распространения грозковых разрядов в многоячейстых облаках можно получить при более детальном анализе каждого эхо-сигнала ГР. Было установлено, что с увеличением размеров L_p до 6—8 км и более начи-

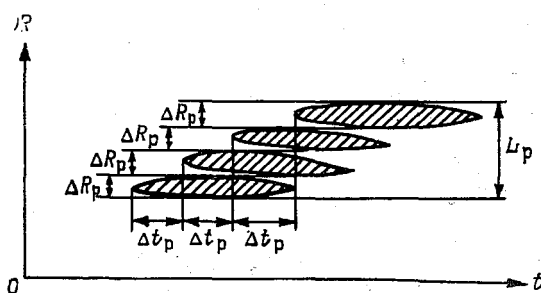


Рис. 7.11. Ступенчатый характер перемещения ГР в многоячейстых грозковых облаках.

нает проявляться ступенчатый характер их перемещения по дальности в радиальном направлении на величину ΔR_p (рис. 7.11). Как правило, такие ГР появляются на стадии спада грозковой активности. Сопоставим их ступенчатое перемещение по дальности на ΔR_p через интервал времени Δt_p с расстоянием r_i между ячейками в многоячейстых грозковых очагах. Для этого было проанализировано 980 ГР из 4200 зарегистрированных, у которых $L_p \geq 6 \div 8$ км. Интегральные распределения значений ΔR_p и Δt_p , измеренных в различные дни, приведены на рис. 7.12. Видно, что распределения ΔR_p и Δt_p не совпадают.

Значения ΔR_p в 80 % случаев близки по величине среднему расстоянию между зонами $Z_{\max}$ ячеек многоячейстых облаков, равному 6—8 км, когда они объединяются изолиниями Z_i , равными 10 и 100 мм⁶/м³. В данный момент времени обычно у ячеек $Z_{\max} > 10^3$ мм⁶/м³ и зоны с такой отражаемостью существуют преимущественно изолированно друг от друга на протяжении периода обнаружения в них ГР. Видимые различия значений ΔR_p от дня ко дню на 2—3 км можно объяснить изменением в среднем на такую же величину расстояний между зонами $Z_{\max}$ ячеек многоячейстых очагов, наблюдавшихся в эти же дни.

Значение $\Delta t_p = 0,27$ с в 80 % случаев отличается от интервала времени между повторными разрядами в одиночной вспышке молнии, который в 80 % случаев менее 0,1 с [50]. Отметим, что

средние значения Δt_p от дня ко дню мало изменяются. Это дает основание считать, что обнаруженное ступенчатое перемещение эхосигналов ГР не связано с повторными разрядами вспышки молнии, появляющейся в одной ячейке.

Возникает предположение, что ступенчатое перемещение на ΔR_p за Δt_p эхо-сигналов ГР определяется последовательным воз-

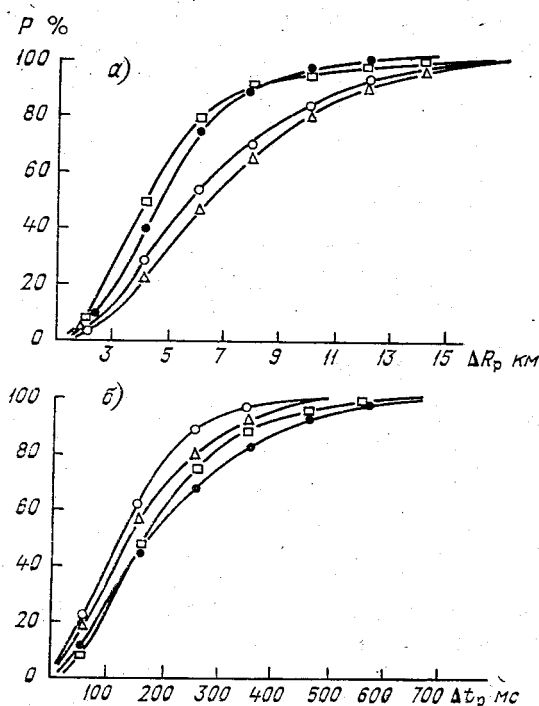


Рис. 7.12. Интегральные распределения измеренных в различные дни значений ΔR_p (а) и Δt_p (б) в многоячейстых грозовых облаках.

никновением разрядов в отдельных ячейках многоячейстого грозового облака, т. е. появление разряда в одной грозовой ячейке инициирует разряд в соседней ячейке. Особенно хорошо это прослеживается во фронтальных облаках, где горизонтальные составляющие эхо-сигналов ГР могут простираются до 80—100 км. Кроме того, в работе [178] указывается на наличие больших горизонтальных участков каналов молний как у межоблачных разрядов, так и у разрядов на землю. Можно предположить, что разряду на землю предшествует возникновение разряда между отдельными ячейками очага. Указанный характер перемещения наблюдается у всех ГР с $L_p \geq 6 \div 8$ км.

Установленные выше значения ΔR_p и Δt_p дают возможность определить радиальную составляющую скорости перемещения эхо-

сигналов ГР. В 80 % случаев $\left(\frac{\Delta R_p}{\Delta t_p}\right)_{\text{макс}} \leq 40$ км/с. Сопоставим эти значения с данными, приведенными в работе [181]. В этой работе с помощью РЛС ($\lambda = 50$ см) была определена скорость перемещения эхо-сигналов соединительных стримеров между локальными объемами зарядов в облаках, равная 40 км/с. По-видимому, обнаруженное с помощью РЛС П-12 ступенчатое перемещение эхо-сигналов ГР может быть связано и с возникновением стримеров между соседними грозowymi ячейками.

7.4. Определение высоты радиоэха грозowych облаков РЛС в дециметровом диапазоне радиоволн

При проведении радиолокационных исследований облаков в летнее время отмечались случаи, когда на экране радиовысотомера ПРВ-10 верхняя граница радиоэха ($H_{\text{вг}}$) простиралась до 17—19 км [7]. Используемые в эксперименте РЛС обнаружения ионизированных каналов молнии П-12 и грозопеленгатор ПАГ-1, как правило, отмечали в таких облаках грозowe разряды. По данным МРЛ-1, в слое от земли до высоты 3—7 км $Z_{\text{макс}} \geq 10^3$ мм⁶/м³.

Естественно, возник вопрос, достоверны ли данные измерения $H_{\text{вг}}$ грозowych облаков, полученные с помощью РЛС ПРВ-10, а также и МРЛ-1.

Известно, что многие годы ведутся наблюдения за верхней границей облаков при специальных самолетных разведках погоды, а также при трассовых полетах самолетов. Анализ таких наблюдений, проведенный в [15], показал, что на северо-западе ЕТС значений $H_{\text{вг}}$, превышающих 13 км, не отмечается. Однако при радиолокационном методе определения верхней границы грозowych облаков [7] получены значения $H_{\text{вг}}$, существенно превышающие 13 км.

Рассмотрим причины, которые могут привести к такому завышению $H_{\text{вг}}$ при использовании радиолокационного метода, в частности, при проведении наблюдений с помощью РЛС ПРВ-10.

Известно, что диаграмма направленности антенны РЛС, кроме главного лепестка, имеет боковые. Выраженное в дБ отношение коэффициентов усиления бокового ($G_{\text{бл}}$) и главного ($G_{\text{гл}}$) лепестков антенны РЛС можно представить в виде

$$A = 10 \lg \left(\frac{G_{\text{бл}}}{G_{\text{гл}}} \right).$$

Обычно значение A для параболических антенн составляет —20 дБ, а для усеченных параболоидов он изменяется от —10 до —15 дБ.

Так как уравнение радиолокации содержит квадрат коэффициента усиления антенны, то при $A_1 = -20$ дБ, $G_{\text{бл}}^2 = 10^{-4} G_{\text{гл}}^2$; при

$$A_2 = -15 \text{ дБ}, \quad G_{16\text{л}}^2 = 9 \cdot 10^{-4} G_{\text{гл}}^2; \quad \text{при } A_3 = -10 \text{ дБ}, \quad G_{16\text{л}}^2 = 10^{-2} G_{\text{гл}}^2.$$

Объем пространства, облучаемый первым боковым лепестком параболической антенной $V_{\text{бл}} = 1,8V_{\text{гл}}$ ($V_{\text{гл}}$ — объем, облучаемый главным лепестком). Когда главный лепесток антенны поднят выше $H_{\text{вг}}$ радиоэха облака, примерно $0,17V_{\text{бл}}$ облучает зону с максимальной отражаемостью. Из этого следует, что часть объема $V_{\text{бл.н.}}$, расположенная ниже объема $V_{\text{гл}}$, составляет $0,3V_{\text{гл}}$.

Подставив в уравнение радиолокации объемной цели (3.1) параметры ПРВ-10 ($G_{\text{бл}}$ и $V_{\text{бл.н.}}$ при облучении метеоцели первым боковым лепестком) и решив уравнение относительно Z , получим в зависимости от коэффициента A соответственно следующие выражения (Z в $\text{мм}^6/\text{м}^3$, а R в км): $Z_1 = 62 \cdot 10^{0,1n} R^2$; $Z_2 = 5,5 \times 10^{0,1n} R^2$; $Z_3 = 0,62 \cdot 10^{0,1n} R^2$. Здесь n — затухание в дБ, вносимое в приемный тракт РЛС при проведении измерений P_r . Если принять $n = 0$ дБ и определить зависимости $Z_i = \psi(R)$, то можно построить кривые, характеризующие ту $Z_{\text{мин}}$, которую можно обнаружить как главным, так и первым боковым лепестком при различных значениях A в зависимости от удаления метеоцели (рис. 7.13).

Из рисунка следует, что для обнаружения метеоцели первым боковым лепестком на $R = 50$ км необходимо выполнение следующих условий: $Z_{1\text{мин}} \geq 1,6 \cdot 10^5 \text{ мм}^6/\text{м}^3$, $Z_{2\text{мин}} \geq 1,8 \cdot 10^4 \text{ мм}^6/\text{м}^3$, $Z_{3\text{мин}} \geq 1,6 \cdot 10^3 \text{ мм}^6/\text{м}^3$. Таким образом, даже при $A_1 = -20$ дБ возможно обнаружение грозowych облаков первым боковым лепестком, если $R < 50$ км. При $A_3 = -10$ дБ такое обнаружение может наблюдаться даже до 300 км.

На рис. 7.13 показаны точками случаи, когда на экране ПРВ-10 грозовые облака имели $H_{\text{вг}} \geq 12$ км на различных удалениях от станции. По оси ординат можно определить $Z_{\text{макс}}$, которая по данным МРЛ-1 соответствовала каждому случаю.

Если считать, что приведенные данные с большими значениями $H_{\text{вг}}$ обусловлены обнаружением первым боковым лепестком, то можно установить более достоверное значение коэффициента A , характеризующего уровень первого бокового лепестка станции ПРВ-10. Это иллюстрируется кривой $A = -13$ дБ (рис. 7.13), что хорошо согласуется с теоретическим значением этого отношения для усеченного параболоида антенны ПРВ-10 [161].

Появление на экране ИДВ ПРВ-10 радиоэха грозowych облаков с $H_{\text{вг}} = 16 \div 18$ км можно объяснить следующим образом.

Известно, что первый боковой лепесток диаграммы направленности отстоит от главного (по углу места) на $\varphi_{\text{бл}} = 4\varphi_0$, где φ_0 — угол, при котором выигрыш антенны падает до половины $G_{\text{гл}}$ [12]. Для ПРВ-10 $\varphi_0 = 0,58^\circ$, следовательно, $\varphi_{\text{бл}} = 2,32^\circ$. Для МРЛ-1 $\varphi_0 = 0,4^\circ$ и $\varphi_{\text{бл}} = 1,6^\circ$. Когда ось главного луча Γ (рис. 7.14) диаграммы направленности антенны находится выше верхней границы облака, первый боковой луч B , отстоящий на $2,32^\circ$ от главного, может оказаться направленным на облако. В таком случае (если

$A = -15$ дБ, а $Z \geq 1,8 \cdot 10^4$ мм⁶/м³) возможен прием сигнала, отраженного от облака при облучении его лепестком Б. Это приве-

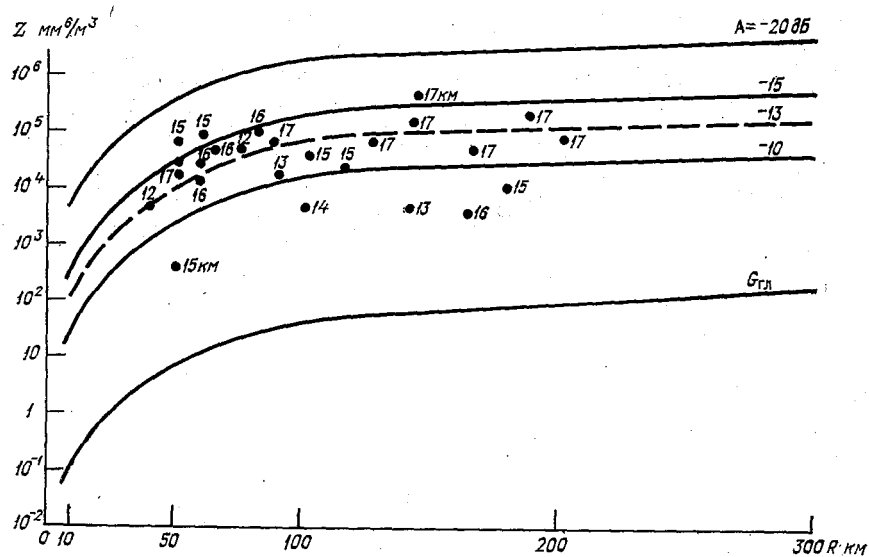


Рис. 7.13. Зависимость $Z_{\min} = f(R)$ для различных A и примеры аномальных высот облаков по данным РЛС ПРВ-10 (цифры — значения $H_{\text{вг}}$ радиоэха грозовых облаков, полученные на различных расстояниях).

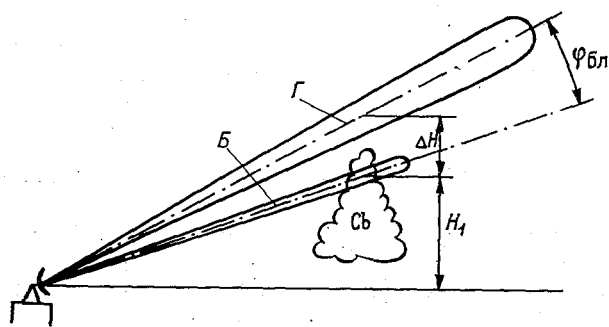


Рис. 7.14. Принцип завышения $H_{\text{вг}}$ грозового облака РЛС ПРВ-10.

дет к тому, что радиоэхо, принятое лепестком Б, воспроизведется на развертке ИДВ, угловое положение которой соответствует лепестку Г.

До тех пор, пока луч Б при сканировании в вертикальной плоскости будет облучать зону облака с $Z \geq 1,8 \cdot 10^4$ мм⁶/м³, можно наблюдать радиоэхо, расположенное выше H_1 на $\Delta H = \varphi(R)$.

Расчетные значения $\Delta H = \varphi(R)$ для ПРВ-10 и МРЛ-1 приведены на рис. 7.15. Так, если зона облака с $Z = 1,8 \cdot 10^4 \text{ мм}^6/\text{м}^3$ простирается до 8 км, а удаление ее составляет 150 км, то $\Delta H = 6,3 \text{ км}$ и, следовательно, радиоэхо такого облака должно прослеживаться до высоты $8 + 6,3 = 14,3 \text{ км}$.

Радиолокатор ПРВ-10 не предназначен для измерения отражаемости, однако, в случаях когда $H_{\text{вг}} \geq 14 \text{ км}$, по зависимости $Z_{1 \text{ мин}} = \varphi(R)$ (кривая $A = -13 \text{ дБ}$ на рис. 7.13), можно установить примерное значение Z облака.

Аналогичное завышение $H_{\text{вг}}$, вероятно, имеет место и при наблюдениях на МРЛ-1. Приблизительные расчеты показывают, что

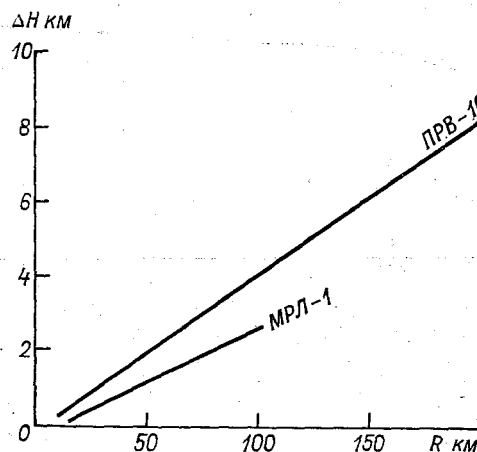


Рис. 7.15. Зависимость $\Delta H = \varphi(R)$ для РЛС ПРВ-10 и МРЛ-1.

для обнаружения грозового облака на $R = 50 \text{ км}$ первым боковым лепестком станции отражаемость $Z_{1 \text{ мин}}$ (при $A = -20 \text{ дБ}$) должна быть не менее $5 \cdot 10^3 \text{ мм}^6/\text{м}^3$. В этом случае может иметь место ослабление радиоволн на 3—5 дБ при протяженности зоны с $Z_{\text{макс}}$, равной 10—15 км. Однако и при этих условиях обнаружение грозового облака первым боковым лепестком не исключается, так как в грозовых облаках нередко $Z \geq 10^4 \text{ мм}^6/\text{м}^3$.

Из работы [30] следует, что на $R > 100 \text{ км}$ возможность завышения верхней границы облаков за счет приема сигналов боковым лепестком исключена. Для уточнения причин завышения $H_{\text{вг}}$ некоторых грозовых облаков станцией ПРВ-10 был поставлен эксперимент, в котором наряду с радиовысотомером использовалась станция МРЛ-1, с помощью которой определялась Z на высотах 3 и 4,5 км примерно через 10 мин. Результаты таких исследований, проведенных 26.07.76 г., приведены на рис. 7.16, где показано расхождение в измерениях $H_{\text{вг}}$, равное $\Delta H'$. К сожалению, досто-

верность измерений $H_{вг}$ станцией МРЛ в этих экспериментах не проверялась. Радиоэхо внутримассового очага появилось в 12 ч 11 мин на $R = 90$ км. С 13 ч 12 мин до 13 ч 30 мин радиолокатор П-12 регистрировал в нем грозовые разряды.

Видно, что с 12 ч 45 мин станция ПРВ-10 начала показывать завышенные значения высоты облака, когда $Z_{\max}$ достигала

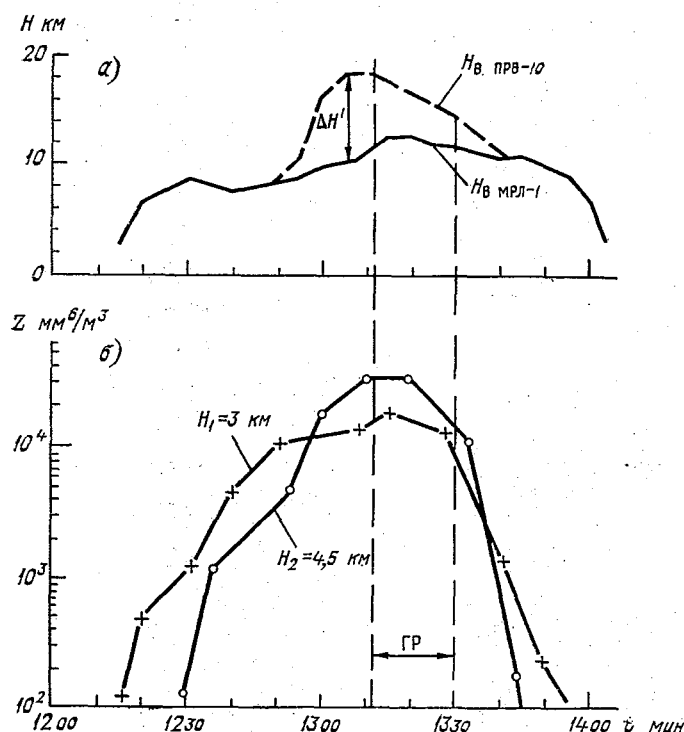


Рис. 7.16. Изменение высоты радиоэха H по данным МРЛ-1 и ПРВ-10 (а) и отражаемости Z на $H=3$ км и $H=4,5$ км (б) грозового облака.

10^4 мм⁶/м³ на уровне 3 км. На дальнейшее увеличение $\Delta H'$ сказывается изменение по вертикали зоны с $Z_{\max}$ в процессе эволюции облака. Ход изменения $\Delta H'$ аналогичен изменению $Z_{\max}$ на высоте 4,5 км. В 13 ч 40 мин при $Z_{\max} < 10^4$ мм⁶/м³ разница в показаниях высоты исчезает.

Следовательно, появление на ИДВ ПРВ-10 «столбов» радиоэха является свидетельством того, что облако имеет большую отражаемость и является грозovým. Эти столбы протяженностью до 18 км и более хорошо видны на рис. 7.17 а при $n = 0$ дБ и $n = 5$ дБ, а также на рис. 7.17 б. На этих рисунках последовательное фотографирование экрана индикатора при различных

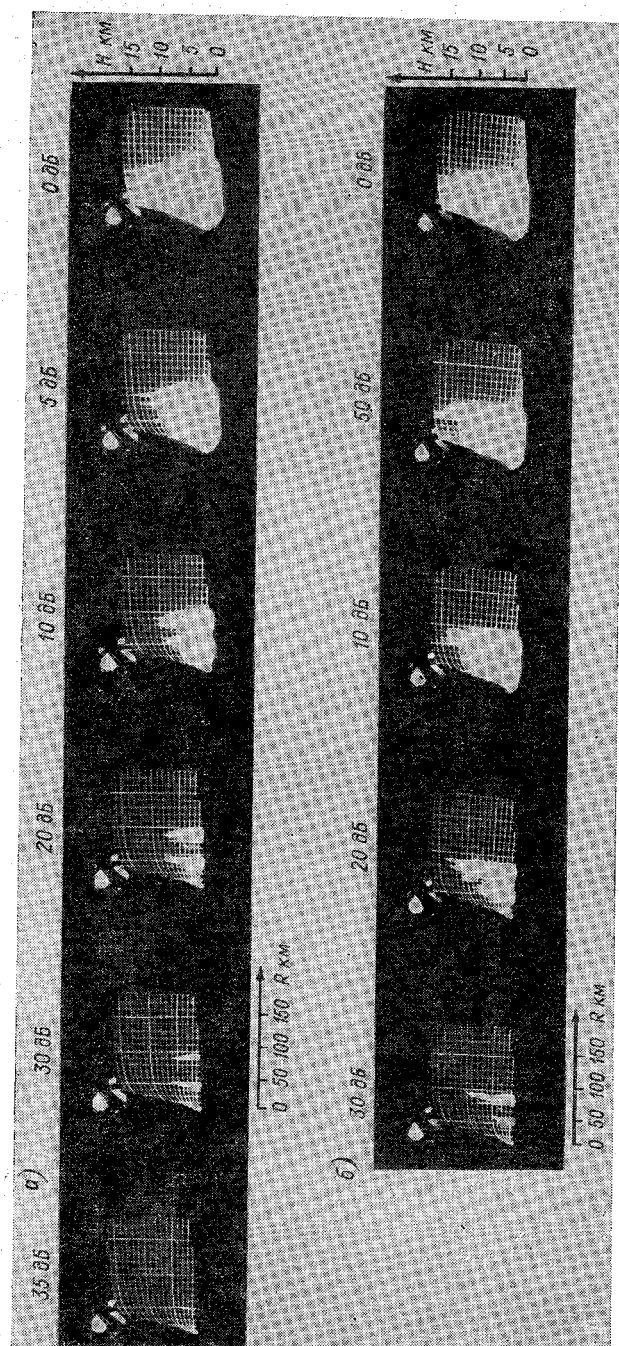


Рис. 7.17. Радиоэхо грозового облака при различных значениях n дБ (метки дальности через 10 км, высоты через 1 км).

дискретных затуханиях (через 5 дБ) позволяет убедиться, что столбы $H_{\text{вг}}$ возникают в том месте, где наблюдается высокая отражаемость.

Интересен случай ложной регистрации облака на высотах 12—14 км над наковальной грозового облака (рис. 7.18). Постепенное ослабление радиозеха в приемном тракте подтверждает влияние бокового лепестка на измерение $H_{\text{вг}}$. Можно согласиться с авто-

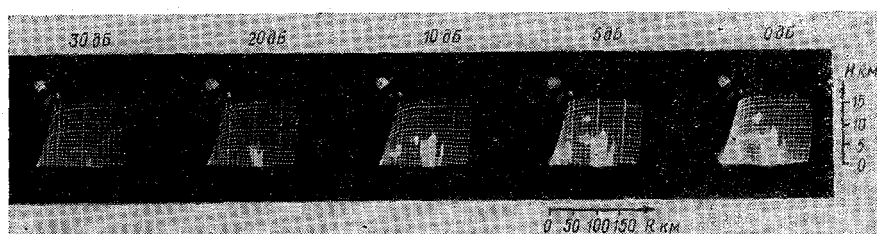


Рис. 7.18. Ложное появление радиозеха облака на $R=70 \div 80$ км и $H=11 \div 13$ км.

ром работы [12], который считает, что не следует учитывать столб радиозеха при определении высоты грозового облака.

Список литературы

1. Абшаев М. Т. и др. Некоторые результаты радиолокационных исследований структуры и динамики грозоградовых процессов на Северном Кавказе/М. Т. Абшаев, М. Д. Атабиев, Н. М. Мальбахова, А. В. Правосудов.— Труды ВГИ, 1976, вып. 33, с. 81—91.
2. Абшаев М. Т. и др. Руководство по применению радиолокаторов МРЛ-4, МРЛ-5, и МРЛ-6 в системе градозащиты/М. П. Абшаев, И. И. Бурцев, С. И. Ваксенбург, Г. Ф. Шевела.— Л.: Гидрометеониздат, 1980.— 230 с.
3. Абшаев М. Т., Пашкевич М. Ю. Способы и устройства отображения радиозахвата метеорологических объектов на черно-белых радиолокационных экранах.— Труды ВГИ, 1976, вып. 33, с. 31—42.
4. Абшаев М. Т., Розенберг В. И. Расчеты характеристик рассеяния и ослабления радиолокационного излучения градинами с поверхностным слоем воды и смесью вода—лед.— Труды ВГИ, 1969, вып. 13, с. 183—191.
5. Абшаев М. Т. и др. Методика и аппаратура доплеровских измерений вертикальных потоков в грозовых и градовых облаках.— Труды ВГИ, 1976, вып. 31, с. 41—55.
6. Александров М. С. и др. Флуктуации электромагнитного поля Земли в диапазоне СНЧ/М. С. Александров, З. М. Бакленева, Н. Д. Гладштейн и др.— М.: Наука, 1972.— 195 с.
7. Алексеев В. А. и др. Измерения высот с помощью радиовысотометра ПРВ-10/В. А. Алексеев, С. М. Гальперин, В. Н. Стасенко, А. М. Тряхов.— Труды ГГО, вып. 30, 1979, с. 6—10.
8. Алибегова Ж. Д. Структура полей жидких осадков за короткие интервалы времени.— Л.: Гидрометеониздат, 1975.— 134 с.
9. Алленов П. А., Зражевская Р. М. К вопросу о радиолокационной эффективности распознавания гроз и облаков.— Труды ГГО, 1973, вып. 281, с. 95—100.
10. Асеев Б. П. Основы радиотехники.— М.: Связьиздат, 1947.— 572 с.
11. Астапенко П. Д., Мошников А. Н. К вопросу об установлении нормативных удалений воздушного судна от границ мощных кучевых и кучево-дождевых облаков.— Труды Академии ГА, сер. «Авиационная метеорология», 1978, с. 3—10.
12. Атлас Д. Успехи радарной метеорологии.— Л.: Гидрометеониздат, 1967.— 193 с.
13. Бадарч М. Радиолокационные характеристики грозовых облаков для условий МНР.— Труды ГГО, 1977, вып. 395, с. 89—92.
14. Баранов А. М., Солонин С. В. Авиационная метеорология.— Л.: Гидрометеониздат, 1981.— 192 с.
15. Баранов А. М., Цивенко Н. В. Характеристики высоты верхней границы и суммарной толщины облаков на различных широтах ЕТС.— Труды ОЛАГА, 1974, вып. 56, с. 19—23.
16. Баранулько В. А. Особенности распространения радиоволн.— М.: Воениздат, 1964.— 191 с.
17. Бару Н. В., Кононов И. И., Соломоник М. Е. Радиопеленгаторы-дальномеры ближних гроз.— Л.: Гидрометеониздат, 1976.— 141 с.
18. Баттан Л. Д. Радиолокационная метеорология.— Л.: Гидрометеониздат, 1962.— 196 с.
19. Белов Н. П. Метеорологические радиолокационные станции.— Л.: Гидрометеониздат, 1976.— 367 с.
20. Бондарчук И. Е., Харин В. И. Авиационное и радиоэлектронное оборудование ЯК-40.— М.: Транспорт, 1976.— 286 с.
21. Брылев Г. Б., Завдовьев А. В., Линев А. Г. Принцип использования совокупности алгоритмов при автоматизации распознавания радиозахвата гроз и осадков.— Труды ГГО, 1979, вып. 430, с. 80—86.

22. Брылев Г. Б. и др. Методические указания по применению грозопеленгатора ПАГ-1 совместно с МРЛ/Г. Б. Брылев, Г. Г. Корниенко, Н. В. Бару, Б. К. Иньков.—Л.: Изд. ГГО, 1974.—28 с.
23. Брылев Г. Б., Михайлова Е. И. Характеристики изолированных очагов осадков по данным учащенных радиолокационных наблюдений.—В кн.: Радиолокационная метеорология. Материалы методического центра по радиолокационной метеорологии соцстран.—Л.: Гидрометеиздат, 1981, с. 81—88.
24. Брылев Г. Б. Некоторые вопросы повышения достоверности метеорологической информации по данным МРЛ.—В кн.: Труды IV Всесоюзного совещания по радиометеорологии. Л.: Гидрометеиздат, 1978, с. 110—111.
25. Брылев Г. Б., Низдойминога Г. Л. Использование радиолокационных данных в синоптической практике. Методическое пособие.—Л.: Гидрометеиздат, 1977.
26. Брылев Г. Б., Низдойминога Г. Л. О связи между скоростью и направлением перемещения радиоэха конвективной облачности и воздушными потоками на стандартных барических уровнях.—Труды ГГО, 1976, вып. 383, с. 52—62.
27. Брылев Г. Б., Низдойминога Г. Л. Некоторые особенности применения радиолокационных данных при анализе синоптических ситуаций.—Труды ГГО, 1975, вып. 328, с. 64—83.
28. Брылев Г. Б., Низдойминога Г. Л., Степаненко В. Д. Вопросы практического применения радиолокационной метеорологической информации.—Обнинск, Изд. Инф. центра, 1978.—60 с.
29. Брылев Г. Б., Огурьев В. С. Радиолокационные критерии шквалов, связанных с кучево-дождевой облачностью.—Труды ГГО, 1976, вып. 383, с. 62—72.
30. Брылев Г. Б., Рыжков А. В. Ошибки определения границ облаков радиолокационным методом.—Труды ГГО, 1979, вып. 430, с. 11—18.
31. Брылев Г. Б., Сергиенко Е. П. Особенность оперативных данных радиолокатора МРЛ-1 о грозах и ливнях.—Труды ГГО, 1975, вып. 328, с. 104—113.
32. Брылев Г. Б., Сергиенко Е. П., Ширяева В. И. Радиолокационные характеристики гроз в районе Киева.—Труды ГГО, 1979, вып. 430, с. 110—116.
33. Брылев Г. Б., Сонечкин Д. М. Предварительные результаты применения техники квадратичного дискриминантного анализа для распознавания грозовых и ливневых радиоэхо.—Труды ГГО, 1976, вып. 383, с. 91—101.
34. Брылев Г. Б., Сонечкин Д. М., Шведов В. В. Влияние обучающей выборки на распознавание радиоэхо гроз и ливней.—Труды ГГО, 1979, вып. 430, с. 86—92.
35. Вангенгейм Г. Я. Долгосрочный прогноз температуры воздуха и вскрытия рек.—Труды ГГИ, 1940, вып. 10.
36. Ватъян М. Р., Песков Б. Е. Об информативности некоторых радиолокационных параметров кучево-дождевых облаков, сопровождающихся порывами ветра различной силы, на Северном Кавказе.—Труды ГГО, 1976, вып. 383, с. 118—127.
37. Высоцкий Б. Ф., Харыбин А. Е. Радиолокационные устройства. Ч. 1.—М.: Оборонгиз, 1960.—161 с.
38. Гайворонский И. И., Зимин В. И. Град, гроза и безопасность полета самолета.—Труды Всесоюзной конференции по вопросам метеорологического обеспечения сверхзвуковой авиации. Л.: Изд. ЛГМИ, 1971, с. 249—254.
39. Гальперин С. М. Использование рамочных антенн с ферритовыми сердечниками для приема СДВ излучения.—Информ. сб. НИО ЛВИКА им. А. Ф. Можайского, 1965, № 76, с. 10—13.
40. Гальперин С. М. Распознавание грозовых разрядов в ливневых очагах при радиолокационных наблюдениях атмосферных образований с помощью

пеленгатора гроз.—Информ. сб. НИО ЛВИКА им. А. Ф. Можайского, 1964, № 68, с. 26—29.

41. Гальперин С. М. Устройство формирования сигналов, образующих однозначный пеленг на грозовые разряды в двухканальных пеленгаторах.—Информ. сб. НИО ЛВИКА им. А. Ф. Можайского, 1966, вып. 83, с. 41—44.

42. Гальперин С. М., Пашенко Е. Г., Соломоник М. Е. Устройство для контроля инструментальных ошибок пеленгатора гроз.—Авт. свид. № 311229 (СССР). Бюллетень открытий, изобретений, промышленных образцов и товарных знаков, 1971, № 24.

43. Гальперин С. М. и др. Оценка точностных характеристик автоматического гронопеленгатора-дальномера/С. М. Гальперин, В. Н. Стасенко, В. Д. Плотиных и др.—Межвузовский сб., 1979, вып. 70, с. 127—138 (ЛПИ).

44. Гальперин С. М., Степаненко В. Д. Усовершенствование методики определения радиолокационной отражаемости облаков и осадков с помощью станции МРЛ-1.—Информ. сб. НИО ЛВИКА им. А. Ф. Можайского, 1965, № 73, с. 27—33.

45. Гальперин С. М. и др.—Результаты радиолокационно-пеленгационных наблюдений за ливнями и грозами с помощью МРЛ-1 и сопряженного с ним гронопеленгатора гроз/С. М. Гальперин, В. Д. Степаненко, М. Е. Соломоник и др.—В кн.: Труды Третьего Всесоюзного совещания по радиолокационной метеорологии. М.: Гидрометеиздат, 1968, с. 62—72.

46. Гальперин С. М., Степаненко В. Д. К вопросу пеленгации гроз с борта самолета.—В кн.: Труды Всесоюзной конференции по вопросам метеорологического обеспечения сверхзвуковой авиации. Л.: Изд. ЛГМИ, 1971, с. 324—326.

47. Гальперин С. М., Степаненко В. Д., Алленов П. А. Использование радиолокационной станции обнаружения и сопровождения самолетов для метеорологических наблюдений.—Труды ЛВИКА им. А. Ф. Можайского, 1969, вып. 549, с. 25—33.

48. Гальперин С. М. и др. Обнаружение грозовых облаков с помощью РЛС метрового диапазона радиоволн/С. М. Гальперин, В. Д. Степаненко, В. Н. Егоров, А. Ф. Гончар. Труды ГГО, вып. 328, 1975, с. 56—63.

49. Гальперин С. М. и др. Радиолокационное обнаружение грозовых облаков/С. М. Гальперин, В. Д. Степаненко, В. П. Егоров, А. Ф. Гончар.—В кн.: Труды I Всесоюзного симпозиума по атмосферному электричеству. Л.: Гидрометеиздат, 1976, с. 170—177.

50. Гальперин С. М. и др. Методика исследования гроз радиотехническими средствами. Атмосферное электричество/С. М. Гальперин, В. Д. Степаненко, В. Н. Егоров и др.—В кн.: Труды I Всесоюзного симпозиума по атмосферному электричеству. Л.: Гидрометеиздат, 1976, с. 161—170.

51. Гальперин С. М., Степаненко В. Д., Осетров А. С. Радиолокационное обнаружение молний.—Труды ГГО, 1974, вып. 301, с. 81—87.

52. Гальперин С. М., Степаненко В. Д., Соломоник М. Е. Сверхдлинноволновый автоматический радиопеленгатор гроз для сопряжения с РЛС метеорологического назначения и телеметрическим каналом.—Авт. свид. № 200633 (СССР). Бюллетень открытий, изобретений, промышленных образцов и товарных знаков, 1967, № 17.

53. Гальперин С. М. и др. Эффективность радиолокационно-пеленгационного метода опознавания грозовых облаков/С. М. Гальперин, В. Д. Степаненко, М. Е. Соломоник и др.—В кн.: Труды Конференции по проблеме авиационной метеорологии. Л.: Изд. ЛГМИ, 1969, с. 228—235.

54. Гальперин С. М. и др. Особенности излучения гроз на частоте 500 кГц/С. М. Гальперин, В. Г. Тугарин, В. Н. Егоров, В. Д. Степаненко.—В кн.: Труды Всесоюзного симпозиума по радиофизическим исследованиям атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1977, с. 257—262.

55. Гашина С. Б. и др. Сравнение эффективности неавтоматизированного и автоматизированного способов получения метеорологической радиолокацион-

ной информации/С. Б. Гашина, Б. Ш. Дивинская, А. Г. Линев, Е. М. Сальман.— Труды ГГО, 1976, вып. 383, с. 34—38.

56. Гашина С. Б. и др. Вопросы автоматизированного получения радиолокационной информации об опасных Сб/С. Б. Гашина, А. Г. Линев, В. А. Петрушевский, Е. М. Сальман.— Труды ГГО, 1974, вып. 327, с. 18—25.

57. Гашина С. Б. и др. Оптимальные численные схемы распознавания класса грозоопасных и негрозоопасных осадков/С. Б. Гашина, А. Г. Линев, В. Г. Оноприенко, Е. М. Сальмен.— Труды ГГО, 1976, вып. 383, с. 18—25.

58. Гашина С. Б., Сальман Е. М. Локализация осадков и грозовых зон по их радиолокационным характеристикам.— Труды ГГО, 1967, вып. 217.

59. Гашина С. Б., Сальман Е. М. Особенности радиолокационных характеристик грозовых облаков.— Труды ГГО, 1965, вып. 173, с. 19—25.

60. Гашина С. Б., Сальман Е. М. Статистические особенности радиолокационных характеристик конвективных облаков в разных физико-географических условиях.— Труды ГГО, 1969, вып. 243.

61. Гирс А. А. Типовые характеристики основных разновидностей форм атмосферной циркуляции в теплое время года.— Проблемы Арктики и Антарктики, 1960, вып. 2.

62. Глушкова Н. И., Лапчева В. Ф. Прогноз фронтальных осадков по данным наблюдений МРЛ и ИСЗ. Методическое письмо.— М.: Гидрометеиздат, 1979.

63. Гончар А. Ф., Гальперин С. М., Егоров В. Н. Возможности повышения точности определения азимута молнии с помощью радиолокационных станций.— Межвузовский сб., 1977, вып. 64, с. 129—134 (ЛПИ).

64. Горелик А. Г., Логунов В. Ф. Определение скорости вертикальных потоков и микроструктуры дождя по доплеровскому спектру и интенсивность радиоэха.— Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана, 1974, т. 10, № 7, с. 742—751.

65. Городенский С. Н. Некоторые вопросы авиационной грозодалнометрии.— В кн.: Труды Всесоюзной конференции по вопросам метеорологического обеспечения сверхзвуковой авиации. Л.: Изд. ЛГМИ, 1971, с. 333—337.

66. Городенский С. Н. Ошибки пеленгации гроз, создаваемые корпусом самолета.— Труды РИИГА, 1970, вып. 165.

67. Городенский С. Н., Крылов В. И., Титов Н. А. Об опыте пеленгации гроз с самолета.— Труды ГГО, 1974, вып. 301, с. 142—148.

68. Дивинская Б. Ш. К вопросу о методике определения частоты гроз в пункте и на ограниченной территории.— Труды ГГО, 1964, вып. 159.

69. Дивинский Л. И. Об эффективной отражающей поверхности канала молнии.— Труды I Всесоюзного симпозиума по атмосферному электричеству.— Л.: Гидрометеиздат, 1976, с. 177—185.

70. Дивинская Б. Ш., Иванова Т. В. К возможности получения режима гроз по данным наблюдений на метеорологических радиолокаторах.— Труды ГГО, 1976, вып. 383, с. 73—78.

71. Зимин Б. И. Регулирование развития грозовой активности конвективных облаков при воздействии льдообразующими аэрозолями.— Труды ЦАО, 1978, вып. 136.

72. Зубкович С. Г. Статические характеристики радиосигналов, отраженных от земной поверхности.— М.: Соврадио, 1968, с. 131—143.

73. Имянитов И. М. Строение и условия развития грозовых облаков.— Метеорология и гидрология, 1981, № 3, с. 5—17.

74. Имянитов И. М., Шварц Я. М., Чубарина Е. В. Электричество облаков.— Л.: Гидрометеиздат, 1971.

75. Имянитов И. М. Электризация самолетов в облаках и осадках.— Л.: Гидрометеиздат, 1970.— 211 с.

76. Иньков Б. К. Результаты выборочного сопоставления материалов наблюдений за дальними грозовыми очагами со спутниковыми данными.— Труды ГГО, 1969, вып. 242, с. 6—8.
77. Иньков В. К. Фазовые методы определения расстояний до очагов атмосфериков.— Труды ГГО, 1973, вып. 319.
78. Камышанова В. А. Грозовая активность на территории СССР и ее связь с формами атмосферной циркуляции северного полушария.— Труды ГГО, 1973, вып. 277, с. 18—26.
79. Капцов Н. А. Электрические явления в газах и вакууме.— М.: ГИТТЛ, 1950.
80. Качурин Л. Г., Кармов М. И., Медалиев Х. Х. О радионизлучении облаков в предгрозовой стадии.— Труды ЛГМИ, 1972, вып. 45, с. 28—37.
81. Качурин Л. Г. и др. Радиолокационные характеристики грозовых облаков в сантиметровом и метровом диапазонах радиоволн/Л. Г. Качурин, А. И. Карцивадзе, Л. И. Дивинский и др.— В кн.: Труды I Всесоюзного симпозиума по атмосферному электричеству. Л.: Гидрометеониздат, 1976, с. 85—190.
82. Качурин Л. Г. и др. Радиолокационные наблюдения за грозовыми очагами в кучево-дождевых облаках/Л. Г. Качурин, А. И. Карцивадзе, Л. И. Дивинский и др.— Труды ЛГМИ, 1975, вып. 54, с. 17—19.
83. Кашпровский В. Е. Определение местоположения гроз радиотехническими методами.— М.: Наука, 1966.— 248 с.
84. Колоколов В. П. О характеристиках глобального распределения грозовой деятельности.— Метеорология и гидрология, 1969, № 11, с. 47—54.
85. Колоколов В. П., Павлова Г. П. Соотношение между некоторыми грозовыми параметрами.— Труды ГГО, 1972, вып. 277, с. 38—41.
86. Колоколов В. П., Симонова Р. И. Методика составления карт грозовых разрядов.— Труды ГГО, 1965, вып. 177, с. 23—30.
87. Корниенко Г. Г., Павлова Г. П. Использование грозопеленгатора-дальномера совместно с метеорологическим радиолокатором МРЛ для повышения эффективности обнаружения гроз.— Труды ГГО, 1975, вып. 358, с. 104—107.
88. Костарев В. В. Опыт радиолокационного зондирования тропосферы.— Труды ЦАО, 1958, вып. 20.
89. Котов Н. Ф., Николаев П. Н. Метод радиолокационных наблюдений ливней и гроз.— Труды ЦАО, 1958, вып. 20.
90. Кукес И. С., Старик М. Е. Основы радиопеленгации.— М.: Соврадио, 1964.— 640 с.
91. Кучумова И. П. Радиооборудование самолетов Ту-134 и Ту-134А и их летная эксплуатация.— М.: Машиностроение, 1978.— 120 с.
92. Лапчева В. Ф. Уточнение интерпретации радиолокационных данных на картах сети МРЛ с целью распознавания кучево-дождевых, грозовых и градовых облаков.— Труды Гидрометцентра СССР, 1977, вып. 176, с. 106—111.
93. Леб Л. Основные процессы электрических разрядов в газах.— М.: ГИТТЛ, 1950.— 672 с.
94. Леушин Н. И., Павловская А. А. Методическое указание № 32 (ЦИП).— М.: Гидрометеониздат, 1958.
95. Лободин Т. В. Размеры грозовых очагов.— Метеорология и гидрология, 1967, № 3, с. 79—81.
96. Лободин Т. В. Распределение суммарного числа разрядов на земном шаре.— Труды ГГО, 1981, вып. 442, с. 44—46.
97. Лободин Т. В., Шлафит М. С., Гинсбург Г. А. Устройство для определения местоположения грозовых очагов.— Авт. свид. № 446004 (СССР). Бюллетень открытий, изобретений, промышленных образцов и товарных знаков, № 16, 1974.
98. Лыдзар П. С. Полупроводниковые грозопеленгаторы.— Труды ГГО, 1964, вып. 157.

99. Максимальная дальность действия РЛС.— М.: Сов. радио, 1947.— 67 с.
100. Макурин М. И., Власов О. П., Матвейчук Н. П. Современные радиолокационные устройства воздушных судов.— Рига, Изд. РИИГА, 1981.— 84 с.
101. Махоткин Л. Г. Дни с грозой, продолжительность гроз и число грозовых разрядов.— Труды ГГО, 1980, вып. 401, с. 11—16.
102. Медалиев Х. Х., Сижажев С. М. Изучение степени грозоопасности облаков и определение времени и места возникновения каналов молнии.— Труды ВГИ, 1975, вып. 29, с. 3—11.
103. Мельничук Ю. В., Черников А. А. Оперативный метод обнаружения турбулентности в облаках и осадках.— Труды ЦАО, 1973, вып. 110, с. 3—11.
104. Метеорологические радиолокационные станции самолетов гражданской авиации США.— Информ. бюлл. НИИ экономики и информации по радиоэлектронике, 1978, вып. 14 (856).
105. Методика исследования гроз радиотехническими средствами.— В кн.: Труды I Всесоюзного симпозиума по атмосферному электричеству. Л.: Гидрометеиздат, 1976, с. 161—170.
106. Методическое письмо (ГГО). Физические и методические условия, приводящие к поражению самолетов атмосферно-электрическими разрядами вне кучево-дождевых облаков.— Л.: Гидрометеиздат, 1981, с. 11—12.
107. Методические указания по использованию радиолокационных данных в синоптическом анализе и краткосрочном прогнозе погоды.— М.: Гидрометеиздат, 1981.
108. Мизюк Л. Я., Ницого В. А. Электрические параметры индукционных низкочастотных магнитоприемников с ферритовыми сердечниками.— Геофизическое приборостроение, 1963, вып. 16.
109. Мик Дж., Крэгс Дж. Электрический пробой в газах.— М.: Изд-во иностр. лит., 1960.
110. Михайлова Г. А. Функция распространения и средняя фазовая скорость электромагнитных волн на сверхнизких частотах.— Геомагнетизм и аэронавтика, 1965, 5, № 1.
111. Мучник В. М. Некоторые радиолокационные характеристики ливней и гроз.— Труды ЦАО, 1958, вып. 20, с. 82—87.
112. Мучник В. М. Определение грозового и ливневого положения радиолокатором штормоповещения.— Труды ЦАО, 1958, вып. 20.
113. Мучник В. М. Физика грозы.— Л.: Гидрометеиздат, 1974.— 351 с.
114. Никандров В. Я. Метеорологический аспект электризации конвективного облака.— Л.: Гидрометеиздат, 1981, с. 22—36.
115. Озорной М. И. и др. Опасность электромагнитных воздействий тока молнии при открытых горных разработках/М. И. Озорной, И. С. Лазовер, М. Н. Бараш и др.— В кн.: Труды I Всесоюзного симпозиума по атмосферному электричеству. Л.: Гидрометеиздат, 1976, с. 278—284.
116. Орвилл Р. Э. Удивительные факты о молнии. Америка, 1978, № 259, с. 8—13.
117. Пастушков Р. С., Шметер С. М. Влияние вертикальных движений в мощных кучевых облаках на поле ветра.— Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана, 1968, № 3, 4.
118. Пащенко Е. Г. К вопросу об измерениях рамочных антенн.— Вопросы радиоэлектроники, 1963, сер. XII, вып. 10, с. 47—53.
119. Радиолокационные метеорологические станции «Метеор» и «Метерит».— М.: Машприборинторг (проспект).
120. Розенберг В. И. Расстояние и ослабление электромагнитного излучения атмосферными частицами.— Л.: Гидрометеиздат, 1972.— 348 с.

121. Руководство по краткосрочным прогнозам погоды. Ч. 2.—Л.: Гидрометеиздат, 1964, с. 519.
122. Руководство по производству наблюдений и применению информации с радиолокаторов МРЛ-1 и МРЛ-2.—Л.: Гидрометеиздат, 1974, с. 344.
123. Рязанов Б. И. Выбор наивыгоднейших размеров и расчет ферритовых антенн.—Электросвязь, 1958, № 2.
124. Сальман Е. М. Некоторые вопросы улучшения службы радиолокационного штормоповещения.—Труды ЦАО, 1958, вып. 20, с. 29—35.
125. Сальман Е. М. Радиолокационные исследования ливней и гроз.—Труды ГГО, 1957, вып. 72.
126. Сальман Е. М. Комплексный радиолокационный метод метеорологического обслуживания авиации.—Труды ГГО, 1962, вып. 28.
127. Сальман Е. М. Способы получения радиолокационных характеристик облаков и облачных систем.—Труды ГГО, 1967, вып. 217.
128. Сальман Е. М. и др. Численный эксперимент по распознаванию грозовых Сб/Е. М. Сальман, С. Б. Гашина, А. Г. Линев, Н. Д. Попова.—Труды ГГО, 1974, вып. 327, с. 32—39.
129. Сальман Е. М., Гашина С. Б. Локализация осадков и грозоопасных зон по их радиолокационным характеристикам.—Труды ГГО, 1967, вып. 217, с. 33—39.
130. Сальман Е. М., Дивинская Б. Ш. Вероятность радиолокационного обнаружения осадков.—Труды ГГО, 1964, вып. 159, с. 40—47.
131. Сальман Е. М., Дивинская Б. Ш. Вопросы метеорологической эффективности радиолокационной системы наблюдений за облачностью и опасными явлениями погоды.—Труды ГГО, 1971, вып. 261, с. 92—107.
132. Сборник научных программ на ФОРТРАНе. Т. 1—М.: Статистика, 1974.
133. Сиверс А. П., Суслов Н. А. Основы радиолокации.—М.: Сов. радио, 1956.—247 с.
134. Современная радиолокация/Пер. с англ. Под ред. Ю. Б. Кобзарева.—М.: Сов. радио, 1969.—704 с.
135. Созин В. И. Из опыта однопунктных наблюдений за близкими грозами.—Труды ГГО, 1974, вып. 301, с. 110—115.
136. Справочник по геофизике/Пер. с англ.—М.: Наука, 1965.
137. Старик М. Е., Кукес И. С. Основы радиопеленгации. Изд. ВКИАС им. С. М. Буденного, Л., 1953.
138. Стасенко В. Н., Гальперин С. М. Динамика грозового облака по данным радиотехнических наблюдений.—Труды ГГО, 1976, вып. 383, с. 129—135.
139. Стасенко В. Н., Гальперин С. М. Исследование эволюции грозовой активности в кучево-дождевых облаках.—Межвузовский сб., 1977, вып. 64, с. 135—140 (ЛПИ).
140. Стасенко В. Н. и др. Совместное обнаружение молний с помощью РЛС метрового и дециметрового диапазонов радиоволн/В. Н. Стасенко, С. М. Гальперин, В. Н. Егоров, А. Ф. Гончар.—Труды ГГО, вып. 430, 1979, с. 3—5.
141. Степаненко В. Д. Радиолокация в метеорологии.—Л.: Гидрометеиздат, 1966. 351 с.
142. Степаненко В. Д. Радиолокация в метеорологии.—Л.: Гидрометеиздат, 1973.—343 с.
143. Степаненко В. Д. Об эффективности получения и использования радиолокационной метеорологической информации.—Труды ГГО, 1976, вып. 383, с. 26—33.
144. Степаненко В. Д. Аэрологические условия развития смерчевого облака 23 июля 1973 г.—Труды ГГО, 1979, вып. 405, с. 141—144.

145. Степаненко В. Д., Астахов В. А. Радиолокационное обнаружение ливневых очагов с самолета.— В кн.: Труды Всесоюзной конференции по вопросам метеорологического обеспечения сверхзвуковой авиации.— Л.: Изд. ЛГМИ, 1971, с. 327—332.
146. Степаненко В. Д., Гальперин С. М. Обнаружение ливней и гроз с помощью радиолокационной станции температурно-ветрового зондирования атмосферы.— Труды ГГО, 1969, вып. 243, с. 49—54.
147. Степаненко В. Д., Гальперин С. М. Радиолокационное обнаружение облаков.— Вопросы радиозлектроники, 1960, сер. XII, вып. 17, с. 46—53.
148. Степаненко В. Д., Гальперин С. М. Радиолокационная отражаемость и геометрические размеры ливней и гроз.— Труды ГГО, 1975, вып. 356, с. 148—154.
149. Степаненко В. Д. и др. Устройство для поимпульсной регистрации радиолокационных сигналов, отраженных от облаков и осадков/В. Д. Степаненко, П. А. Рублев, С. М. Гальперин, Н. Ф. Павлов.— Информ. сб. НИО ЛВИКА им. А. Ф. Можайского, 1964, вып. 68, с. 33—37.
150. Степаненко В. Д., Толмачев П. В., Папков Г. А. Характеристики ослабления микрорадиоволн в осадках по результатам радиолокационных наблюдений с помощью МРЛ.— В кн.: Радиофизические методы исследования атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1977, с. 270—274.
151. Страйд Р. Самолетная радиолокационная станция обнаружения зон, опасных для полетов.— Вопросы радиолокационной техники, 1956, № 4 (34), с. 109—122.
152. Сулаквелидзе Г. К. Ливневые осадки и град.— Л.: Гидрометеиздат, 1967.— 412 с.
153. Техническое описание устройства ПИПР.— Изд. ЦАО, 1976.— 11 с.
154. Тхамоков Б. Х. Радиолокационные методы и аппаратура для исследования движений частиц в кучево-дождевых облаках.— Труды ВГИ, 1973, вып. 22, с. 67—78.
155. Тхамоков Б. Х., Степаненко В. Д. Некоторые результаты экспериментального исследования движения гидрометеоров и воздуха в облаках и осадках радиолокационным методом.— Труды ГГО, 1978, вып. 411, с. 19—26.
156. Тхамоков Б. Х., Степаненко В. Д. Методика и результаты исследования движения гидрометеоров с помощью радиолокационно-оптической системы.— Труды ГГО, 1978, вып. 411, с. 13—18.
157. Файзуллин Н. А., Кононов И. И., Плотников В. Д. Импульсный электромагнитный грозодалномер ближней зоны.— Труды ГГО, 1975, вып. 358, с. 116—123.
158. Федоров Ю. К. Способ автоматической стыковки данных метеорологических радиолокаторов.— Труды Гидрометцентра СССР, 1973, вып. 102, с. 62—74.
159. Фельдман М. Л., Кегельс М. Б. Защита линий электропередачи и подстанций высокого напряжения от атмосферных перенапряжений.— В кн.: Труды I Всесоюзного симпозиума по атмосферному электричеству. Л.: Гидрометеиздат, 1976, с. 275—278.
160. Филиппов А. Х. Грозы Восточной Сибири.— Л.: Гидрометеиздат, 1974, с. 16—36.
161. Фрадин А. З. Антенны сверхвысоких частот.— М.: Сов. радио, 1957.— 352 с.
162. Фролкин В. Т. Индикаторные устройства.— М.: Оборонгиз, 1959.
163. Хомич В. И. Приемные ферритовые антенны.— М.: Энергоиздат, 1960.— 62 с.
164. Хромов С. П., Мамонтова Л. И. Метеорологический словарь.— Л.: Гидрометеиздат, 1974.— 568 с.
165. Чалмерс Дж. А. Атмосферное электричество.— Л.: Гидрометеиздат, 1974.— 420 с.

166. Червонный М. Г. Охрана лесов от пожаров.— М.: Лесная промышленность, 1973.
167. Чистяков А. Д., Минакова Н. Е., Чуприн С. Ф. Методика составления прогноза погоды заблаговременностью 1—4 ч для Москвы.— Труды Гидрометцентра СССР, 1973, вып. 116, с. 91—98.
168. Шифрин К. С. Рассеяние света в мутной среде.— М.: Гостехиздат, 1951.
169. Шишкин Н. С. Облака, осадки и грозовое электричество.— Л.: Гидрометеониздат, 1964, с. 342—369.
170. Шишкин Н. С. Об условиях перехода облака в грозовую стадию.— Труды ГГО, 1971, вып. 262, с. 84—103.
171. Юман М. Молния.— М.: Мир, 1972.— 327 с.
172. Aviation Week, 1969, vd. 91, No 23.
173. Brook M., Holmes C. R., Moore C. B. Lightning and rockets: some implication of the Apollo-12 lightning event.— Nav. Res., 1970, No 4, p. 1—17.
174. Browne J. C. A radar echo from lightning.— Nature, 1951, No 167, p. 438.
175. Burnham S. Atmospheric turbulence with particular reference to SST.— WMO Techn. Note, 1968, No 95.
176. Dawson G. A. Radar as diagnostic tool for lightning.— J. Geophys. Res., 1972, vd. 77, Nn 24, p. 4518.
177. Ferd C. J. How dangerous is lightning.— Aerospace Safety, 1964, vol. 20, No 3, p. 10—12.
178. Few A. A. Lightning channel reconstruction from thunder measurements.— J. Geophys. Res., 1970, vd. 75, p. 7517.
179. Fitzgerald D. R. Probable aircraft triggering of lightning in certain thunderstorms.— Mon. Wea. Rev., v. 95, No 12, p. 835—842.
180. Goodman S. Relationships between lightning activity and storm evolution in a severe Oklahoma thunderstorm.— EOS Trans. Amer. Geophys. Union, 1979, vd. 60, No 46, M.54.
181. Hewitt F. J. Radar echoes from inter-stroke processes in lightning.— Proc. Phys. Soc., London, 1957, B 70, p. 961—979.
182. Lewis W. Development of procedures for vectoring aircraft around thunderstorms.— In: Proc. 14th Radar Meteorol. Conf., Tucson, 1970, p. 301—304.
183. Magono C. Precipitation electricity of thunderclouds and showerclouds.— In: Electrical processes in Atmosphere. Darmstadt, 1977.
184. McCormick K. S. Reflectivity and attenuation observation of hail and the radar bright band.— In: Proc. 14 th Radar Meteorol. Conf., Tucson, 1970, p. 19—24.
185. Moore C. B. An assessment of thunderstorm electrification mechanism.— In: Electrical processes in Atmosphere. Darmstadt, 1977.
186. Pierce E. T. Electrostatic field changes to lightning discharges.— Quart. J. Roy Met. Soc., 1955, vd. 81, No 348.
187. Pierce E. T. Some techniques for locating thunderstorms from a single observing station.— Vistas in Astronomy. Vol. 2, London, New York, 1956, p. 850—855.
188. Rodgers R. R. An extension of the z-r relationship for Doppler radar.— In: Proc. 11th Weather Radar Conf., Boulder, AMS, 1964, p. 158—160.
189. Rust W. D., Taylor W. L., MacGorman D. R., Arnold R. T. Research on electrical properties of severe thunderstorms in Great Plains.— Bull. Amer. Met. Soc., 1981, vol. 62, No 9, p. 1283—1286.
190. Samson C. A., Linfield R. F. Spheric observations of the severe weather on may 19, 1960—1962, Geophys. Res., vol. 67, No 2, Feb.
191. Turman B. N. Detection of lightning superbolts.— J. Geophys. Res., 1977, 82, p. 2566.
192. Workman E. J. The production of thunderstorm electricity.— J. Franklin Inst., 1967, vol. 283, No 6, p. 540—557.

Оглавление

Предисловие	3
<i>Глава 1. Краткая характеристика гроз и их влияние на народное хозяйство</i>	6
1.1. Основные характеристики грозовых облаков и условия возникновения молний	10
1.2. Влияние гроз на отдельные отрасли народного хозяйства	16
1.3. Вероятность появления гроз	16
<i>Глава 2. Радиолокационное обнаружение грозовых облаков</i>	19
2.1. Особенности строения грозового облака как радиолокационной цели	—
2.2. Ослабление радиоволн в облаках и осадках и их отражающая способность	20
2.3. Эффективная площадь рассеяния грозовых облаков	25
2.4. Характеристики канала линейной молнии и ее ЭПР	29
<i>Глава 3. Исследование грозовых облаков РЛС сантиметрового диапазона</i>	38
3.1. Максимальная дальность и вероятность радиолокационного обнаружения грозовых облаков	—
3.2. Наземные РЛС сантиметрового диапазона, используемые для получения информации о грозовых облаках	41
3.3. Распознавание грозовых облаков по данным МРЛ и оценка их грозовой активности	46
3.4. Эффективность радиолокационного получения информации о грозовых облаках	50
3.5. Радиолокационная отражаемость и геометрические размеры ливней и гроз	56
3.6. Результаты экспериментальных измерений движений гидрометеоров и воздушных потоков в грозо-градовых облаках с помощью РЛС	62
3.7. Применение данных МРЛ для диагноза и прогноза грозовых облаков	66
<i>Глава 4. Исследование гроз радиолокационными станциями дециметрового и метрового диапазонов</i>	69
4.1. Наземные РЛС дециметрового и метрового диапазонов, используемые для получения информации о грозах	—
4.2. Вероятность и максимальная дальность обнаружения гидрометеоров и грозовых разрядов	73
4.3. Точность определения координат грозовых разрядов с помощью РЛС	76
4.4. Результаты исследования грозовых облаков и разрядов	82
<i>Глава 5. Исследование электромагнитного излучения гроз с помощью наземных радиотехнических средств</i>	108
5.1. Методика исследования ЭМИ грозовых разрядов и используемая аппаратура	110
5.2. Электромагнитное излучение грозовых разрядов в сверхдлинноволновом диапазоне	119
5.3. Электромагнитное излучение грозовых разрядов в средневолновом диапазоне	125
	203

<i>Глава 6. Исследование гроз с помощью бортовых средств</i>	129
6.1. Обнаружение гроз самолетными РЛС	—
6.2. Обнаружение гроз самолетными грозопеленгаторами	146
6.3. Радиолокационное обнаружение и исследование грозовых облаков с МИСЗ	161
6.4. Использование данных наземных грозопеленгаторов при анализе снимков МИСЗ	165
 <i>Глава 7. Комплексное радиотехническое исследование гроз</i>	 169
7.1. Результаты комплексных радиотехнических исследований грозовых облаков	—
7.2. Исследование зависимости радиолокационных характеристик облаков от их грозоактивности	172
7.3. Взаимосвязь местоположения, размеров ГР с ячеистой структурой облака	180
7.4. Определение высоты радиоэха грозовых облаков РЛС в дециметровом диапазоне радиоволн	187
 <i>Список литературы</i>	 194

Владимир Данилович Степаненко
Семен Михайлович Гальперин

Радиотехнические методы исследования гроз

Редактор Л. И. Штаникова. Художник В. М. Фролов. Художественный редактор В. В. Быков. Технический редактор В. И. Семенова. Корректор Е. А. Жарова.

ИБ № 1435. Сдано в набор 20.01.83. Подписано в печать 24.05.83. М-30857. Формат 60×90^{1/16}. Бум. тип. № 1. Литературная гарнитура. Печать высокая. Печ. л. 12,75. Кр.-отт. 12,75. Уч.-изд. л. 14,02. Тираж 1300 экз. Индекс МОЛ-11. Заказ № 46. Цена 2 р. 40 к. Гидрометеониздат. 199053. Ленинград, 2-я линия, 23.

Ленинградская типография № 8 ордена Трудового Красного Знамени Ленинградского объединения «Техническая книга» им. Евгении Соколовой Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 190000, г. Ленинград, Прачечный переулок, 6.