

ГЛАВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ СЛУЖБЫ
ПРИ СОВЕТЕ МИНИСТРОВ СССР

ТРУДЫ
ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ГЛАВНОЙ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ
им. А. И. ВОЕЙКОВА

Выпуск

395

МЕТОДЫ
АКТИВНОЙ И ПАССИВНОЙ
РАДИОЛОКАЦИИ
В МЕТЕОРОЛОГИИ

Под редакцией
д-ра техн. наук В. Д. СТЕПАНЕНКО
канд. физ.-мат. наук Г. Г. ЩУКИНА

Ленинградский
Гидрометеорологический ин-т
БИБЛИОТЕКА
Л-д 195196 Малоохтинский пр., 98



ГИДРОМЕТЕОИЗДАТ ЛЕНИНГРАД 1977

645462

551.501.8

Содержатся результаты теоретических и экспериментальных исследований метеорологических характеристик безоблачной атмосферы, облаков и связанных с ними опасных явлений погоды методами электромагнитного зондирования атмосферы (лидары, активная и пассивная радиолокация), выполненных в 1974—1975 гг.

Излагаются методические работы по совершенствованию способов радиолокационных наблюдений гидrometeorных образований на сети МРЛ.

Рассматриваются вопросы построения радиофизической аппаратуры.

Рассчитан на научных работников и инженеров, занимающихся вопросами физики атмосферы, радиофизики, радиотехники. Может быть также рекомендован аспирантам и студентам старших курсов соответствующих специальностей.

The results of theoretical and experimental studies of meteorological characteristics are presented for a cloudless atmosphere, clouds and related dangerous weather phenomena using the methods of electromagnetic sounding of the atmosphere (lidars, active and passive radiolocation), which were carried out in 1974—1975. Methods are described for improving the procedures of radar observations of hydrometeor formations at the network of meteorological radars. The problems of constructing radiophysical equipment are discussed.

The publication is intended for researchers and engineers engaged in the problems of atmospheric physics, radiophysics, radio engineering. It could be recommended for post-graduates and senior students of relevant specialties.

*С. Б. Гашина, Т. В. Иванова,
А. Г. Линева, В. А. Петрушевский*

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ АППАРАТУРЫ, АВТОМАТИЗИРУЮЩЕЙ ПРОЦЕСС ПОЛУЧЕНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ (ААОМ), В БССР

В июле 1975 г. в пп. Минск и Гомель на опытно-оперативную эксплуатацию была поставлена аппаратура, автоматизирующая процессы измерений, обработки, представления первичной радиолокационной информации (ААОМ) [1] и осуществляющая классификацию явлений, связанных с облаками.

Наблюдения проводились штатом МРЛ-2 вышеуказанных пунктов под руководством старших инженеров Л. И. Матвеевой, С. В. Артеменок и Д. Я. Богдановой. Методический надзор осуществляли сотрудники ГГО. К моменту подписания актов внедрения ААОМ на территории БССР было проведено 1160 серий наблюдений в Минске, 1247 — в Гомеле, из них по грозоопасным зонам 66 и 103 серии соответственно.

Программа наблюдений предусматривала вывод на печать полного объема информации и данных о грозоопасных зонах в виде цифровой ленты [2]. Часть серий была проведена с частотой 1 раз в 15 мин, остальные — 1 раз в час.

В режиме выделения грозоопасных зон устройство анализа фильтрует массив данных, принимает решение и на печать поступает информация с номерами ячеек и радиолокационными характеристиками грозоопасных облаков. Фильтрация массива осуществляется по следующему алгоритму: значения каждого из шести признаков сравниваются с заданными для этих признаков критериальными значениями на схемах сравнения, и в случае равенства или превышения их схема сравнения формирует сигнал. Выходные сигналы суммируются, и количество превышений сравнивается с заданным критериальным количеством превышений. Правило принятия решения: информация относится к данному классу явлений, если количество превышений больше или равно заданному в критерии.

При проведении испытаний выделялся только класс грозоопасных зон, в то время как устройство анализа может относить информацию к нескольким классам явлений. Разделение на классы происходит следующим образом. Вначале выделяется класс, которому

заданы самые большие критериальные значения. Затем устанавливаются критериальные значения, следующие по величинам за первым классом. Процедура повторяется столько раз, на сколько классов подразделяется метеоинформация. Практику использования этой информации удовлетворяет разделение на четыре класса явлений: грозоопасные Сб, ливневые Сб, Ns с выпадением обложных осадков и облака без явлений.

Критериальные величины шести параметров для трех классов метеоявлений (грозоопасные Сб, ливневые Сб, облака Ns с обложными осадками) были найдены при статистической обработке радиолокационных данных, полученных ранее на ААОМ в Воейково (табл. 1).

Таблица 1

Критериальные величины радиолокационных параметров
трех классов явлений

Класс метеоявлений	$H_{\text{макс}}$	z_1	z_2	z_3	z_4	z_5
Грозоопасные Сб	7	—	12	11	9	9
Ливневые Сб	5	—	10	9	8	8
Облака Ns с возможным выпадением обложных осадков	4	8	8	—	—	—

Метеорологическая эффективность информации [3], получаемой с помощью комплекса МРЛ — ААОМ и МРЛ — оператор, оценивалась путем сопоставления с данными сети метеостанций в следующих кольцах дальности: 0—180, 180—300, 0—300 км (табл. 2).

Сравнение двух способов получения радиолокационной информации дает основание утверждать, что реализация большого количества признаков при классификации явлений, ликвидация фактора асинхронности в получении карт высот и отражаемости, повышение темпа обновления информации, позволяющее получить сведения о кратковременных явлениях, значительно повышают метеорологическую эффективность способа МРЛ — ААОМ.

Очевидно, можно было достигнуть более высоких результатов при применении «пороговых» значений параметров радиоэхо, которые репрезентативны для данного физико-географического района. Нахождение этих значений в зависимости от сезона, от особенностей физических условий, приводящих к образованию и развитию конвективных облаков и протекающих в них процессов, является предметом дальнейшей работы комплекса МРЛ — ААОМ на территории БССР.

Пространственно-временные изменения параметров радиоэхо Сб в «ближней зоне» позволяют получить комплекс численных характеристик в координатах дальность — высота (30—16 км). Принятие решения осуществляется по мажоритарному принципу, используя следующие параметры радиоэхо: максимальную высоту $H_{\text{макс}}$, высо-

ту расположения области с максимальной отражаемостью $H_{z_{\max}}$ и отражаемости на трех уровнях (z_2, z_3, z_4).

Сопоставление качественных оценок интенсивности осадков по трем градациям, полученных двумя способами (МРЛ — ААОМ и МРЛ — оператор) в радиусе 90 км, с данными осадкомерной наземной сети производилось двумя способами. Первый предусматривал сравнение диапазона интенсивности осадков в радиусе 90 км, второй — интенсивности в точке (ячейка дискретизации МРЛ — ААОМ — метеостанция). Результаты сопоставления следующие: отмечено совпадение диапазона интенсивности осадков в 57%, отличие на одну градацию — в 40%, на две — в 6%. Совпадение в точке составило 83%, отличие на одну градацию — 15%, на две — 2%. Эти результаты свидетельствуют о том, что чем меньше площадь, на которой локационно оценивается интенсивность осадков, тем больше вероятность правильной оценки.

Метеорологические испытания позволили оценить эффективность работы аппаратуры, внести коррективы в некоторые технические решения. Режим выбора максимума на километровом интервале оказался неэффективным, потребовалось повышение точности работы квантователя. Для проведения анализа в «ближней зоне» необходимы ввод коррекции на квадрат расстояния, начиная с 3 км, и увеличение дальности до 50 км.

Оценка интенсивности осадков по трем градациям (слабые, умеренные, сильные) может быть произведена с большей эффективностью при организации памяти таким образом, чтобы размер каждой ячейки составлял 5×5 км.

Проведенная опытно-оперативная работа показала, что комплекс МРЛ — ААОМ позволяет заменить наблюдения, производимые оператором на МРЛ, с получением более высоких оценок метеорологической эффективности выходной информации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петрушевский В. А. Принципы автоматизированной обработки и цифрового представления метеоданных. — «Тр. ГГО», 1974, вып. 327, с. 3—18.
2. Гашина С. Б. и др. Вопросы автоматизированного получения радиолокационной информации об опасных Сб. — «Тр. ГГО», 1974, вып. 327, с. 18—26.
3. Гашина С. Б., Матвеева Л. И., Разумовский А. А. Сравнение информации об облаках и явлениях, сопровождающих Сб, получаемой с наземной и радиолокационной сети станций. — «Тр. ГГО», 1973, вып. 281, с. 90—95.

Таблица 2

Метеорологическая эффективность ($P\%$) различных способов получения радиолокационной метеорологической информации

Способ получения информации	Дальность, км		
	0—180	180—300	0—300
МРЛ — ААОМ	93	53	70
МРЛ — оператор	69	38	54

С. Б. Гашина, Б. Ш. Дивинская, А. Г. Линев

О СВЯЗИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК, ПОЛУЧЕННЫХ КОМПЛЕКСОМ МРЛ—ААОМ, С НЕКОТОРЫМИ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ

С появлением аппаратуры, автоматизирующей процесс измерений, обработки и представления первичной радиолокационной информации ААОМ, решился вопрос частоты обновления данных и их объема в задаче распознавания метеообъектов [5]. Численные схемы распознавания облаков и явлений, предложенные ранее [8, 9], основывались на детерминированных описаниях метеоявлений, составленных таким образом, чтобы они взаимно не пересекались. Достигалось это представлением вертикальных профилей отражаемости $Z(H)$ [4, 7, 11], для чего в измеряемой ячейке первичная информация состояла из следующего набора параметров: $H_{\text{макс}}$, Z_1 , Z_2 , Z_3 , Z_4 , Z_5 . Обновление данных, происходящее 1 раз в 15 мин, и ликвидация асинхронности в процессе измерений высот и отражаемостей позволили также улучшить распознавание [6].

Однако эти преимущества автоматизированного способа перед «ручным» не решают окончательно задачу распознавания, поскольку параметры радиоэхо метеоявлений зависят от ряда таких факторов, как синоптическое положение, вертикальные движения, интенсивность явления. Очевидно, учет этих зависимостей повысит надежность распознавания. Рассмотрение этого вопроса явилось целью данной работы.

Материалом для исследования послужили данные автоматизированных радиолокационных наблюдений, проводившихся в течение трех лет (летний и зимний периоды) в Воейково, начиная с 1971 г. Программа наблюдений предусматривала получение цифровых лент каждые 15 мин в радиусе обзора $R=300$ км. Радиолокационная информация сопоставлялась с данными наблюдений метеостанций, находящихся в радиусе обзора радиолокатора (таблицы ТМ-1), синоптическими картами, данными радиозондирования и расчетными картами Гидрометцентра СССР вертикальных токов. Перечисленные материалы характеризовали тип явления (гроза, ливень, обложной дождь, ливневый снег, обложной снег), интенсивность явления по трем градациям (слабые, умеренные, сильные), синоптическое поло-

Таблица I

Зависимость радиолокационных характеристик метеорологических явлений, связанных с облаками,
от синоптического положения в летний и зимний периоды

Синоптическое положение	Статистические радиолокационные характеристики												Число случа- ев	
	$Y = H z_3$													
	$M(H_{\max})$	$D(H_{\max})$	$M(z_1)$	$D(z_1)$	$M(z_2)$	$D(z_2)$	$M(z_3)$	$D(z_3)$	$M(z_4)$	$D(z_4)$	$M(z_5)$	$D(z_5)$		
Летний период														
Внутримассовое (холодная неустой- чивая воздушная масса)	9,8	10,8	12,3	5,2	12,6	3,7	12,3	4,3	11,7	4,6	10,7	4,3	121,0	160
	5,4	6,7	10,8	3,6	10,5	2,9	9,9	3,0	9,1	3,8	8,6	4,6	53,5	296
	4,3	3,0	9,4	1,0	9,5	1,1	8,8	0,3	—	—	—	—	37,8	28
	7,9	9,3	12,2	2,0	11,8	3,0	11,3	3,8	11,0	4,5	11,5	4,5	89,2	73
ТФ	5,0	6,2	10,4	3,8	10,4	2,5	9,8	2,4	8,7	2,0	8,7	4,7	49,0	101
ХФ	4,5	1,5	9,0	1,5	8,9	1,1	7,8	0,7	—	—	—	—	35,1	24
	8,7	8,1	12,9	3,4	12,4	3,0	12,0	3,7	11,3	4,4	10,6	3,6	104,4	131
	4,5	5,5	10,6	3,0	10,1	2,6	9,3	3,0	8,6	3,6	8,0	3,0	41,8	119
	4,5	2,9	9,3	0,8	8,3	1,0	7,3	1,0	—	—	—	—	33,8	24
Стационарный фронт	8,6	2,7	12,7	1,1	12,0	1,8	10,7	2,0	10,3	1,1	9,8	1,8	92,0	48
	5,1	3,9	11,8	3,0	11,0	3,1	9,9	3,1	8,4	3,1	8,6	8,2	50,5	92
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	8,3	3,3	12,6	3,0	12,4	1,9	11,4	2,9	10,3	2,3	9,4	2,2	94,5	158
Фронт окклюзии	4,8	3,1	10,9	2,7	10,7	2,2	9,5	1,4	8,6	2,0	8,0	2,9	45,6	175
	4,9	3,6	11,4	1,7	10,7	2,6	9,4	1,0	8,1	0,7	6,6	0,4	46,0	152
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	2,4	4,1	8,2	0,7	8,2	0,4	6,7	0,2	—	—	—	—	16,0	16
Внутримассовое (теплая устойчивая воздушная масса)	3,4	1,8	9,5	1,3	8,7	0,7	7,7	0,6	—	—	—	—	26,2	52
Зимний период														
Внутримассовое (ХНВМ)	3,6	2,6	10,2	4,5	9,0	0,9	7,8	0,7	6,3	2,0	6,0	3,0	27,8	406
	3,7	2,3	10,7	4,7	9,4	0,9	7,9	0,6	5,8	1,7	6,0	1,0	29,2	95

Таблица 2

Зависимость радиолокационных характеристик грозовых и негрозовых линий
от вертикальных токов

w м/с	Статистические радиолокационные характеристики												Явления
	M(H _{макс})	D(H _{макс})	Z з, уровни										Y=Hz _з
			M(z ₁)	D(z ₁)	M(z ₂)	D(z ₂)	M(z ₃)	D(z ₃)	M(z ₄)	D(z ₄)	M(z ₅)	D(z ₅)	
≥5	13,0	11,6	13,9	4,7	14,0	3,9	14,2	3,3	13,7	6,6	12,3	9,9	184,6
	5,0	5,4	11,3	4,2	11,3	3,2	10,3	3,2	9,1	2,2	8,5	4,6	51,5
<5	8,6	6,8	12,6	1,9	12,5	1,9	10,9	3,9	10,9	2,9	10,8	2,9	93,7
	4,1	4,3	10,7	2,3	10,0	2,1	9,0	1,7	8,4	1,4	—	—	36,9

Таблица 3

Зависимость радиолокационных характеристик гроз от уровня конвекции (H_к), энергии неустойчивости (E)
и высоты изотермы -22° С (H_{-22°С})

Дата	Синоптическое положение	H радиозоно, км			Z з, уровни			H _к км	E Дж/кг	H _{-22°С} км
		H _{мод}	H _{макс}	H _{мин}	Z _{з мод}	Z _{з макс}	Z _{з мин}			
14 VI 1971 г.	ХФ	6	12	4	10	13	9	5,8	40	7,4
12 VIII	ХФ	15	15	14	15	15	9	10,0	700	7,2
21 VII 1972 г.	ТФ	6	7	5	10	12	8	4,0	700	6,4
27 VII	ТФ	7	9	5	11	13	9	9,0	800	6,8

жение (тип фронта или внутримассовое), вертикальные токи ($w < 5$ м/с, $w \geq 5$ м/с), параметры конвекции (уровень конвекции, энергия неустойчивости, уровень расположения изотермы -22°C).

Расчеты функции плотности распределения величин высот $P(H_{\text{макс}})$ и отражаемости $P(Z_i)$ для явлений пяти видов предусматривались в зависимости от синоптического положения, вертикальных токов, интенсивности явлений. Рассчитывались числовые характеристики полученных функций распределения в виде математического ожидания $M(x)$ и дисперсии $D(x)$. Число реализаций, участвующих в расчетах, указано в табл. 1 и 2. Был произведен расчет функций плотности распределения комплексных критериев характера явлений: HZ_1 , HZ_2 , HZ_3 , $HZ_{\text{макс}}$, ΣZ , $H\Sigma Z$, с целью выявления оптимального комплексного критерия распознавания.

Критерием оптимальности служила вероятность суммарной ошибки классификации гроз, ливней и обложных осадков (рассматривались две пары: грозы и ливни, ливни и обложные осадки)

$$P(e) = P(\omega_1)P(e)_{\omega_1} + P(\omega_2)P(e)_{\omega_2}.$$

Расчет $P(e)$ показал, что оптимальным комплексным критерием распознавания можно считать HZ_3 , поэтому в таблицах, характеризующих зависимость радиолокационных характеристик от метеопараметров, приводятся численные значения HZ_3 .

1. *Зависимость радиолокационных характеристик от синоптического положения.* Грозы принято делить на два главных типа: внутримассовые и фронтальные. Также принято считать, что грозы на холодных фронтах наиболее сильные [10, 12]. В это понятие включается следующая совокупность признаков: вертикальная мощность, вероятность выпадения града со шквалом, продолжительность грозовой деятельности, площадь, напряженность электрического поля. Существующие связи интенсивности осадков и напряженности электрического поля с отражаемостью [2, 3] позволили предположить существование самых больших численных характеристик радиоэхо у холодных фронтов. Однако числовые характеристики функций распределения H , Z_i (см. табл. 1) не подтверждают этого предположения. Наибольшие значения максимальной высоты и отражаемости на всех уровнях, за исключением первого, а также оптимального комплекса $Y = HZ_3$ наблюдаются при внутримассовом положении. Лишь отражаемость на первом уровне, характеризующая интенсивность осадков, больше на холодном фронте. Возможно, это обстоятельство послужило поводом считать S_b с явлениями на холодных фронтах самыми интенсивными, поскольку визуально определяется практически только интенсивность осадков.

Сравнение распределений высот радиоэхо S_b фронтального происхождения с распределением высот, измеренных с бортов самолетов [1], указывает на хорошую согласованность данных, полученных разными способами.

Касаясь полученных максимальных значений радиолокационных

характеристик при внутримассовом положении, можно предположить, что при возникновении внутримассовой конвекции происходит вовлечение более сухого воздуха в облачный объем, чем это имеет место при конвекции, связанной с фронтальной облачностью. Это обстоятельство вызывает значительные импульсы конвекции, обуславливающие большие значения радиолокационных характеристик при внутримассовом положении. Радиолокационные характеристики обложных осадков при всех видах синоптического положения примерно одинаковы.

2. *Связь радиолокационных характеристик с вертикальными движениями ω .* Упорядоченные вертикальные движения возникают вследствие турбулентной вязкости в пограничном слое и нестационарности в поле давления. Поскольку с вертикальными токами связано возникновение фронтальной облачности, которая сопровождается ливнями и грозами, представлялось целесообразным установление связи радиолокационных характеристик с ω . Классификация радиолокационных характеристик по ω ($\omega < 5$ м/с, $\omega \geq 5$ м/с) выявила жесткую связь между ними (см. табл. 2).

3. *Зависимость радиолокационных характеристик от параметров конвекции.* Анализу подверглись случаи, когда при одинаковом синоптическом положении и характере явлений радиолокационные характеристики различны. Поскольку рассматривались случаи грозных Сб, к анализу привлекались параметры конвекции — уровень конвекции, энергия неустойчивости, положение изотермы -22°C . Из табл. 3 следует, что величины радиолокационных характеристик определяются не характером синоптического положения вообще, а некоторыми параметрами конвекции, в частности уровнем конвекции и энергией неустойчивости.

Продолжение этих работ нам представляется в нахождении комплекса метеорологических предикторов, определяющих величины радиолокационных характеристик в различных метеорологических условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранов А. М. Фронтальные облака и условия полета в них. Л., Гидрометеоиздат, 1964. 237 с.
2. Боровиков А. М. и др. Радиолокационное измерение осадков. Л., Гидрометеоиздат, 1967. 139 с.
3. Гашина С. Б. и др. Связь радиолокационных характеристик облаков с их турбулентным и электрическим состоянием. — «Тр. ГГО», 1965, вып. 173, с. 58—63.
4. Гашина С. Б., Сальман Е. М. Особенности радиолокационных характеристик грозных облаков. — «Тр. ГГО», 1965, вып. 173, с. 19—26.
5. Гашина С. Б. и др. Вопросы автоматизированного получения радиолокационной информации об опасных Сб. — «Тр. ГГО», 1974, вып. 327, с. 18—26.
6. Петрушевский В. А. Принципы автоматизированной обработки и цифрового представления метеоданных. — «Тр. ГГО», 1974, вып. 327, с. 3—18.
7. Игнатова Р. В., Петрушевский В. А., Сальман Е. М. Радиолокационные признаки характера облачности. — «Тр. ГГО», 1963, вып. 173, с. 26—34.
8. Сальман Е. М. и др. Численный эксперимент по распознаванию грозных Сб. — «Тр. ГГО», 1974, вып. 327, с. 32—40.

9. Сальман Е. М., Гашина С. Б. Применение методов статистического распознавания к задаче радиолокационной классификации облаков.— «Тр. ГГО», 1971, вып. 261, с. 20—29.
10. Руководство по краткосрочным прогнозам погоды, ч. I и II. М., Гидрометеоиздат, 1964. 519 с.
11. Donaldson R. I. Radar Reflectivity Profiles in Thunderstorms.— „J. Met”, 1961, 18, p. 18—23.
12. Kessler E. and Wexler R. Observations of Cold Front.— „Bull. Amer. Met. Soc”, 1960, p. 253—257.

*Г. Б. Брылев, Н. С. Дорожкин,
А. Е. Рыбакова, А. А. Федоров*

**СРАВНЕНИЕ ДАННЫХ МИЛЛИМЕТРОВОГО КАНАЛА
МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ
СТАНЦИИ (МРЛС)
И ДАННЫХ САМОЛЕТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ
О ГРАНИЦАХ ОБЛАЧНОСТИ В РАДИУСЕ 20 км**

Точность измерения границ облаков радиолокационным способом зависит от нескольких одновременно действующих факторов:

- метеорологического потенциала МРЛС Π_m ;
- ширины диаграммы направленности антенны θ ;
- длительности зондирующего импульса τ_z ;
- высоты расположения антенны над поверхностью Земли h_0 ;
- способа отсчета показаний на индикационных шкалах и устройств;
- нелинейности разверток на индикаторах;
- точности выставления углов возвышения антенны ε ;
- точности ориентирования и горизонтирования антенного устройства;
- степени закрытости горизонта в месте установки МРЛС;
- особенностей микро- и макроструктуры границ облаков.

Для измерения высоты нижней границы (ВНГО) необходимо, чтобы в диаграмме направленности не находились местные объекты, отраженные сигналы от которых на индикаторах трудно отделить от радиоэхо облаков. В условиях ровной подстилающей поверхности, чтобы определить минимальную ВНГО ($H_{\text{миннго}}$), которую МРЛС может измерить, нижний край диаграммы направленности должен оторваться от поверхности Земли. Тогда без учета влияния боковых лепестков:

$$H_{\text{миннго}} > R \sin \theta/2 + h_0, \quad (1)$$

где R — наклонная дальность до точки измерения (км).

Выберем для расчетов $h_0 = 5$ м и $\theta = 12'$, тогда $H_{\text{миннго}}$ будет изменяться от $(12,5 \pm 10)$ м на расстоянии $R = 5$ км до (30 ± 23) м на $R = 15$ км. Для оценки ожидаемых инструментальных погрешностей определения ВНГО зададимся точностью измерения ВНГО

$\Delta H = 10\% H_{\text{НГО}}$, тогда при τ_3 , равных 0,5 и 1 мкс, значение ΔR равно $\pm 37,5$ и ± 75 м соответственно.

Расчет средней квадратической ошибки $\Delta \varepsilon$ для установки угла возвышения ε определим по формуле

$$\Delta \varepsilon = \frac{\Delta H - \Delta R \cdot \sin \varepsilon}{R \cdot \cos \varepsilon}. \quad (2)$$

Если задаться максимальной погрешностью установки угла по шкале привода $\Delta \varepsilon = \pm 0,25^\circ$, то на рис. 1 нижний предел измерения ВНГО будет находиться на расчетных линиях 1 и 2. Справа от этих линий находится диапазон значений ВНГО, который нельзя измерить с точностью $\Delta H = 10\% H_{\text{НГО}}$ при заданном значении $\Delta \varepsilon = \pm 0,25^\circ$.

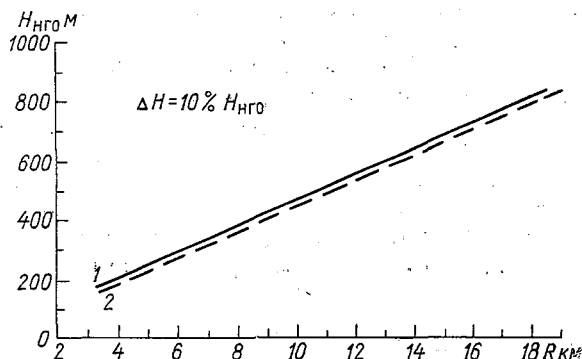


Рис. 1. Изменение нижнего предела измерения границ облачности с расстоянием при заданной точности измерения $H = 10\% H_{\text{НГО}}$ и $\Delta \varepsilon = \pm 0,25^\circ$.

Для достижения максимальной точности определения ВНГО на ИДВ необходимо, чтобы точность соответствия положения развертки на ИДВ с положением оси диаграммы направленности антенны была не хуже точности установки ε по шкале привода. Рассчитанные по формуле (2) инструментальные погрешности отсчета минимальной НГО намного превосходят погрешности за счет увеличения ширины диаграммы направленности с расстоянием, рассчитанные по формуле (1) без учета боковых лепестков. При определении значения ΔH и оценке соответствия визуальных и радиолокационных величин ВНГО большое значение имеет способ отсчета наклонной дальности R до границ облачности с учетом нелинейности разверток индикаторов.

Оценка величины ΔH (рис. 1) предполагала, что все измерения границ и прослоек облачности приведены к оси диаграммы направленности антенны, а коэффициент ее заполнения отражающими частями $K_3 = 1$. В реальных условиях, если значение Π_m достаточно большое (например, при $\Pi_m > 51$ дБ) и измеренное значение $\lg Z > \lg Z_{\text{мин}}(R)$, попадание нескольких крупных облачных частиц

в импульсный объем при касании границ облака диаграммой направленности даст на экранах МРЛС хорошо различимое радиоэхо, нижняя граница которого расположена ниже истинной ВНГО [2]. Уменьшение K_3 от 1 до 0,1 эквивалентно уменьшению Π_m на 10 дБ. Для уменьшения влияния K_3 на точность измерения высот границ и прослоек облачности и для большего соответствия границ радиоэхо границам облачности радиолокационного измерения обычно вводят поправку, равную $\pm (0R/2)$.

Тогда $H_{\text{ВГО}} = H_{\text{ВГО р/э}} - \theta R/2$, а $H_{\text{НГО}} = H_{\text{НГО р/э}} + \theta R/2$. Эти поправки имеет смысл вводить при условии, что во всем диапазоне расстояний измерения границ облаков инструментальные ошибки (2) намного меньше абсолютных значений $(\theta R/2)$. Например, при $\theta = 12$ мин в диапазоне R от 1 до 20 км значение $(\theta R/2)$ будет находиться в пределах от 1,7 до 34 м. Это значение намного меньше рассчитанных выше инструментальных ошибок за счет $\Delta \varepsilon$.

Общепринято, что увеличение потенциала МРЛС Π_m [1] приводит к увеличению дальности обнаружения облачности и точности измерения его геометрических характеристик. Однако начиная с определенных значений Π_m при интерпретации данных о границах облачности и ее прослойках в ближней зоне надо учитывать возможность появления отраженных сигналов, принимаемых боковыми лепестками антенны МРЛС. Для пояснения этого эффекта запишем уравнение радиолокации атмосферных образований относительно $\lg Z$:

$$\lg Z = 0,1 \frac{P_{\text{пр}}}{P_{\text{ш}}} + 2 \lg R - \Pi_m. \quad (3)$$

Если мощность, излучаемая первым боковым лепестком, на 23—27 дБ меньше, чем основным, то $\lg Z_{\text{мин I бок. л.}}$, определенная по сигналам от первого бокового лепестка, будет:

$$\lg Z_{\text{мин I бок. л.}} = \lg Z_{\text{мин}} + (4,6 \div 5,4). \quad (4)$$

Иначе можно представить, что

$$\Pi_{\text{м I бок. л.}} = \Pi_m - (46 \div 54) \text{ дБ}. \quad (5)$$

Таким образом, наличие в облачности зон с $P_{\text{пр}}/P_{\text{ш}} \geq (46 \div 54)$ дБ может привести к искажению на ИДВ геометрических форм облачности. Такой эффект следует из теоретических оценок отражаемости в слоистых и слоисто-дождевых облаках и наблюдался экспериментально. В таких облаках значения $\lg Z$ изменяются от -5 до -2 , а $\lg Z_{\text{мин}}$ в диапазоне R до 15—20 км может находиться в пределах от -6 до -4 . Кроме того, влияние боковых лепестков приводит к тому, что для определения ВНГО угол возвышения $\varepsilon_{\text{мин}}$ должен выбираться более 20.

Методика оценки метеорологической эффективности данных МРЛС является общепринятой и подробно изложена в [2]. Она предполагает теоретическую оценку эффективности, основанную на анализе уравнения радиолокации атмосферных образований с учетом экспериментальных значений отражаемости облаков (Z) и осо-

бенностей распространения радиоволн. Расчетная эффективность обычно проверяется экспериментально в каждом физико-географическом районе, где устанавливается МРЛС.

В течение 1973—1974 гг. проводились испытания миллиметрового канала МРЛС. В процессе испытаний МРЛС была размещена в аэропорту и работала в условиях нулевых углов закрытия. Для

Таблица 1

Сравнение эффективности обнаружения облачности на миллиметровом (мм) и сантиметровом (см) каналах МРЛС

Тип облачности и явления	$R_{\text{обн}}$ км		Выигрыш по расстоянию, км	мм			см			Выигрыш по расстоянию, км		
	мм	см		$R_{\text{макс}}$	$R_{\text{мин}}$	R	$R_{\text{макс}}$	$R_{\text{мин}}$	R	$\Delta_{\text{макс}}$	$\Delta_{\text{мин}}$	Δ
Туман	10 6	4 6	6 0	10	6	8	6	4	5	6	0	3
St	20 4 17 5 5 18 9	15	5 4 17 5 5 18 9	20	4	9,9	15	0	2,1	18	4	8,3
St (дымка)	9 8 7 17 10 18 10 5	17 3	9 8 7 0 10 18 7 5	18	5	9,3	17	0	3,3	18	0	6,6
St (снег)	20 5 50 50 50 40 75	28 50 50 50 50 38 75	—8 0 0 0 0 2 0	75	20	49	75	28	50	—8	0	1,1
Cs—As	35 22 30 60 20	30 8 15 40 18	5 14 15 20 2	60	22	34	40	8	22	20	2	11,2
Ns	75 65 80 75	60 65 80 100	15 0 0 —25	80	65	74	100	60	76	—25	0	5

Примечание. Для $R_{\text{обн}}$ приведены средние значения по часовым сериям по четырем независимым измерениям, полученные при работе в одном зимуте.

а

Сравнение данных о высотах границ облачности, измеренных миллиметровым каналом МРДС и самолетом (1974 г.)

Форма облаков	НГО			ВГО		
	МРДС		самолет	МРДС		самолет
	Н км	$\pm \Delta H$ км		Н км	$\pm \Delta H$ км	
Sc	0,5—0,57	0,15	0,5—0,52	0,7—1,3	0,15	0,92—1,35
Sc	1,6	0,15	1,8—1,85	1,72—1,8	0,15	1,9—1,92
St	0,2	0,15	0,2—0,25	0,8	0,15	0,5—0,7
St	1,8	0,15	2,0	2,0—2,4	0,15	2,1
St	0,3	0,15	0,07—0,26	0,6—0,8	0,15	0,4—0,5
Sc осадками в системе Cs—As—Sc	Не определено	—	0,1—0,35	Не определено	—	0,6—0,9
As—Sc	2,0—2,16	0,1	2,0—2,1 2,1 (ИРЧ)	5,6—5,8	0,3	6,0
As—Sc	Не определено	—	—	2,8—2,9	0,13	5,6 (ИРЧ)
As	1,8—1,9	0,15	1,5—1,75	2,5—3,0	0,2	2,6—2,75
As	2,3	0,1	2,5 (ИРЧ)	3,1	0,15	2,24—2,6
As	2,8—3,15	0,16	2,9	—	—	3,0 (ИРЧ)
Ns прослойка	1,55	0,1	1,5	2,0	0,1	—
As	2,3—2,5	0,1	2,5	3,3	0,16	1,9
						3,2

сравнения данных о границах облачности были использованы различные методы сравнения: самолетный, вертолетный, шаропилотный и светолокационный. За временной интервал, когда наблюдения считаются независимыми, был принят 15 мин интервал времени. В пространстве этот интервал был определен в 90° . Некоторые результаты по определению максимального радиуса обнаружения $R_{обн}$ облачности на миллиметровом и сантиметровом каналах МРЛС приведены в табл. 1.

Из табл. 1 следует основной вывод — миллиметровый канал обнаруживает мелкокапельную облачность чаще и дальше, чем сантиметровый. Однако величина $R_{обн}$ на миллиметровом канале в ряде случаев недостаточно высока (5—8 км) для практических целей. Во всех случаях, когда отмечались облака, содержащие частицы осадков, $R_{обн}$ сантиметрового и миллиметрового каналов был примерно одинаков, с небольшим преимуществом миллиметрового канала (на 5—20 км). Когда в зоне МРЛС выпадали осадки, $R_{обн}$ сантиметрового канала всегда был больше, чем миллиметрового.

На самолете-лаборатории был установлен прибор ИРЧ для определения размера крупных частиц, разработанный в ЦАО [2] и несколько модернизированный. С его помощью определялось наличие крупных частиц под облаками и в прослойках облачности. Во время экспедиционных работ было проведено 13 серий совместных самолетных и радиолокационных наблюдений (табл. 2), получено более 700 фотокадров с экранов ИКО и ИДВ при различных синоптических ситуациях. В связи с сильной изменчивостью границ облаков и их быстрым перемещением в районе исследования сравнивались наименьшие и наибольшие значения границ и прослоек облачности во время полетов самолета на удалении до 20 км от МРЛС.

Как следует из табл. 2, в большинстве случаев при $H_{нго} > 500$ м эти границы совпадали, т. е. находились в пределах точности радиолокационного метода. При $H_{нго} < 500$ м было практически невозможно определить по радиолокационным данным $H_{нго}$, хотя и в этом случае отмечались отдельные совпадения $H_{нго}$ с радиолокационными данными.

При выпадении морсящих осадков или отдельных капель дождя зона радиоэхо простиралась до поверхности Земли и ВНГО определить на миллиметровом канале не удавалось. Наличие отдельных крупных подоблачных частиц приводит к тому, что ВНГО радиоэхо обычно меньше ВНГО, а толщина радиоэхо прослоек облачности меньше толщины истинных (визуальных) прослоек. Каждые прослойки облачности толщиной более 100 м отмечались на миллиметровом канале МРЛС и совпадали с определенными на самолете.

В качестве примера на рис. 2 и 3 приведены экспериментальные зависимости измерений высот различными способами и изменчивость границ облаков верхнего, среднего и нижнего ярусов. Слабые морсящие осадки, которые отмечались в начале срока наблюдения, и редкие капли, в дальнейшем выпадающие на землю, приводили к тому, что на миллиметровом канале МРЛС ВНГО нижнего яруса

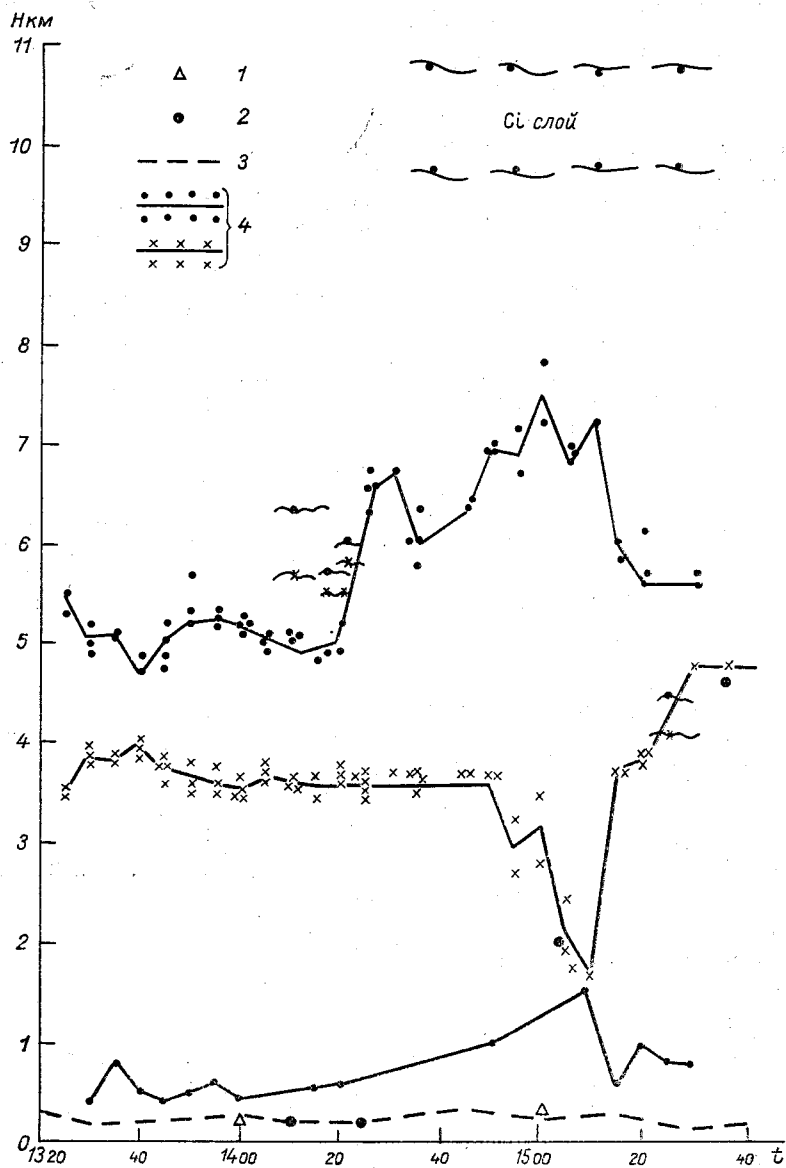


Рис. 2. Изменчивость высот облачности, измеренной различными способами (7 октября 1974 г).

1 — данные ИВО, 2 — данные самолетных наблюдений, 3 — НГО по данным шаропилотных наблюдений, 4 — данные МРЛС.

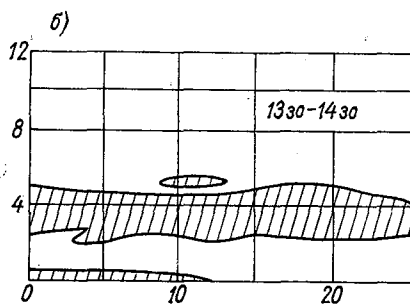
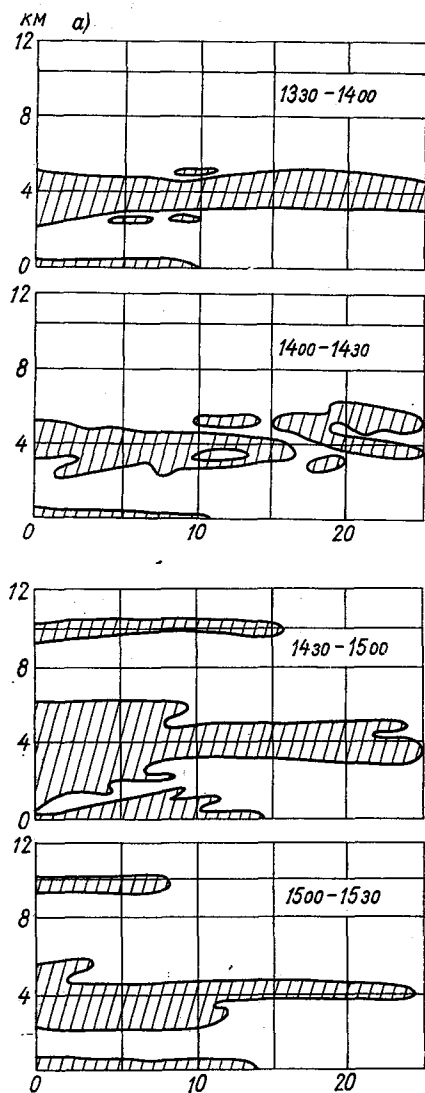


Рис. 3. Сборные карты радиоэхо облачности за получасовые (а) и часовые (б) интервалы времени (7 октября 1974 г.).

не определялось в течение большей части срока наблюдений. Заметна изменчивость границ облаков среднего яруса (МРЛС работала в постоянном азимуте, антенна сканировала по углу места).

На рис. 3 даны сборные карты радиоэхо за 15 и 30-минутные интервалы, полученные при осреднении данных, снятых с фотографий экрана ИДВ через 5 мин. По сборным картам легче судить о характере изменчивости облачных параметров.

Измерение высот верхней и нижней границ облачности производилось при фиксированном азимуте и углах возвышения 21 и 60° через 3—5 мин. После обработки были получены средние значения высот за 15 мин и отклонения ΔH от этих средних за 5-минутные интервалы. Повторяемости ΔH приведены на рис. 4. Из рис. 4 следует, что подавляющее число ΔH (80,1%) для НГО приходится на градацию 0—0,3 км, а для ВГО (91,3%) — на 0—0,4 км, для НГО при этом 48,5% случаев не превосходит 0,1 км. Для ВГО отмечается большой разброс ΔH . Это можно объяснить возможным ослаблением миллиметровых радиоволн в толще облака (при наблюдениях толщина облаков изменялась от 1,5 до 4 км). Поэтому для большей репрезентативности радиолокационных данных о ВГО и НГО следует производить несколько замеров высот на ИДВ и выдавать потребителю, кроме максимальных (ВГО) и минимальных (НГО), еще и осредненные значения H .

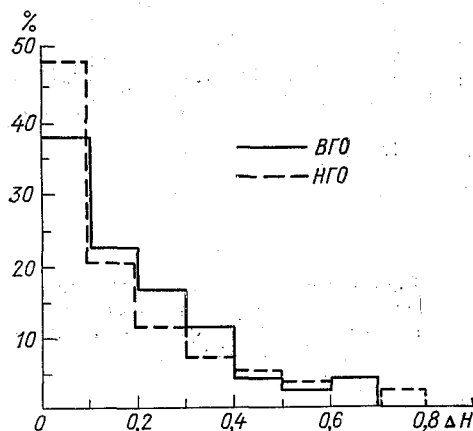


Рис. 4. Отклонения повторяемостей ΔH для верхней и нижней границ облаков.

Оптимальный режим оперативной работы миллиметрового канала МРЛС — «патрульный» круговой обзор при нескольких углах возвышения антенны (от 0 до 15°) для определения скорости и направления смещения облачной системы и вертикальные разрезы в азимутах, которые в первую очередь требуются при обслуживании аэропорта. Это поможет дать оценку распределения границ облаков на площади и в ряде случаев прогнозировать их изменения. Основные преимущества миллиметрового канала — более точные по сравнению с сантиметровым каналом данные о ВГО и НГО облаков верхнего, среднего ярусов и облачных прослоек, ВГО нижнего яруса и НГО > 500 м. Использовать миллиметровый канал для измерения НГО нижнего яруса с точностью $\Delta H = 10\% H_{\text{НГО}}$ нельзя. При определении НГО необходимо выбирать азимуты с нулевыми углами закрытия $\epsilon_{\text{закр}}$. Величины $\epsilon_{\text{закр}} \geq 0,5^\circ$ практически исключают возможность определения НГО нижнего яруса даже в тех 20—30% случаев, когда они возможны [2]. Поэтому при установке МРЛС необходимо тщательно снимать все $\epsilon_{\text{закр}}$, чтобы не определить ВНГО в азимутах «тени» от местных предметов.

По-видимому, требуемая в оперативной практике точность и надежность определения и прогнозирования нижних границ облаков

может быть достигнута при методическом и техническом объединении радиолокационных и других методов, работающих в световом диапазоне волн.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Степаненко В. Д. Радиолокация в метеорологии. Л., Гидрометеиздат, 1973. 343 с.
2. Руководство по производству наблюдений и применению информации с радиолокаторов МРЛ-1 и МРЛ-2. Л., Гидрометеиздат, 1974. 344 с.

*Г. Б. Брылев, В. Е. Зуев, И. В. Самохвалов,
В. Д. Степаненко, А. А. Федоров, В. Я. Шапарев*

ОБ ИЗМЕРЕНИИ ПАРАМЕТРОВ ОБЛАКОВ КОМПЛЕКСОМ МРЛС — ЛИДАР

Общий анализ явлений взаимодействия электромагнитного излучения оптического и радиодиапазонов с облачной средой показывает, что одновременное зондирование в двух различных диапазонах длин волн позволит увеличить надежность, достоверность и объем информации об облачности. Техническая реализация подобного устройства может быть осуществлена путем объединения метеорологической радиолокационной станции (МРЛС) и лазерного локатора для зондирования атмосферы (лидара).

Основные преимущества такого комплекса обусловлены практическим устранением серьезных недостатков, присущих разделному использованию МРЛС и оптического локатора типа ИВО. Как известно, МРЛС имеет относительно большую «слепую» зону за счет отражения от местных предметов и конечного времени восстановления разрядника. Радиус этой зоны даже при больших углах места, как правило, не бывает меньше 1—1,5 км. Также известно, что часть мелкокапельных слабоотражающих недождевых облаков не обнаруживается МРЛС вследствие малой мощности отраженного сигнала. Наконец, при наличии крупных сверхоблачных частиц под облаками или частиц осадков нижняя граница облаков занижается МРЛС либо ее измерения становятся невозможны [5].

Указанные недостатки почти отсутствуют у оптических локаторов типа ИВО. Однако вследствие своих конструктивных особенностей они позволяют приводить измерения только в вертикальном направлении. По этой причине при относительно большой изменчивости ВНГО результаты измерений одного прибора являются мало репрезентативными. Повышение репрезентативности достигается сейчас при одновременном применении нескольких светолокаторов, установленных на определенных расстояниях друг от друга. Рассматриваемая система МРЛС — лидар, осуществляющая сканирование в горизонтальной и вертикальной плоскостях, в принципе из одной точки позволяет проводить измерения в радиусе нескольких километров и получать топографию ВНГО.

Комплекс МРЛС — лидар, работающий синхронно в оптическом

и микроволновом диапазонах, позволит, по-видимому, более точно определять в ближней зоне интенсивность осадков, водность облаков, видимость в осадках, мощность облаков по сравнению с существующими радиолокационными методами [2, 3, 5, 6, 7]. Кроме того, будет достигнута возможность получения взаимоподтверждающей информации об этих явлениях, что приведет к более глубокому исследованию механизма отражений.

Можно надеяться, что методика использования данных, получаемых комплексом МРЛС—лидар, в принципе позволит после опреде-

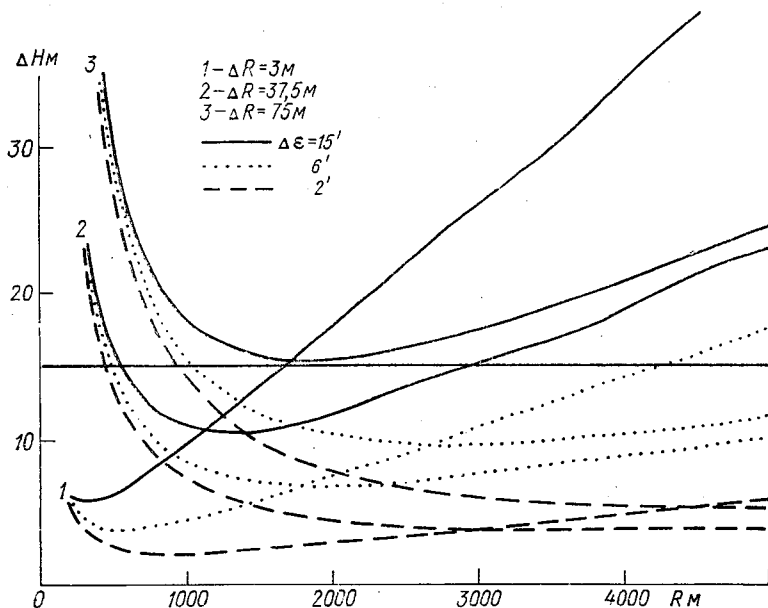


Рис. 1. Погрешности определения высоты нижней границы облаков ΔH в зависимости от наклонной дальности R при разной разрешающей способности по дальности ΔR и точности установки угла возвышения антенны $\Delta \epsilon$ при постоянной высоте НГО, равной 180 м.

Линия $\Delta H=15$ м параллельна оси R .

ления ВНГО по лидару в радиусе нескольких километров от комплекса и ее привязки к данным МРЛС прогнозировать изменение ВНГО только по радиолокационным наблюдениям с учетом отмечаемой перестройки облачности, скорости и направления ее перемещения и определять таким образом тенденцию изменения ВНГО на 10—20-минутный период.

Из-за большой пространственной изменчивости ВНГО с целью максимального упрощения алгоритмов обработки и интерпретации данных комплекса МРЛС—лидар необходимо в первую очередь провести сопряжение оптических осей диаграммы направленности антенн МРЛС и лидара.

К другим требованиям, обеспечивающим оперативность наблюдений, относятся: необходимость временного совмещения отраженных сигналов оптического и радиоканалов; вывод информации обо-их каналов на индикаторы дальность — высота (ИДВ) и кругового обзора (ИКО); возможность предельно точного измерения амплитудно-временных параметров отраженных от облачности сигналов

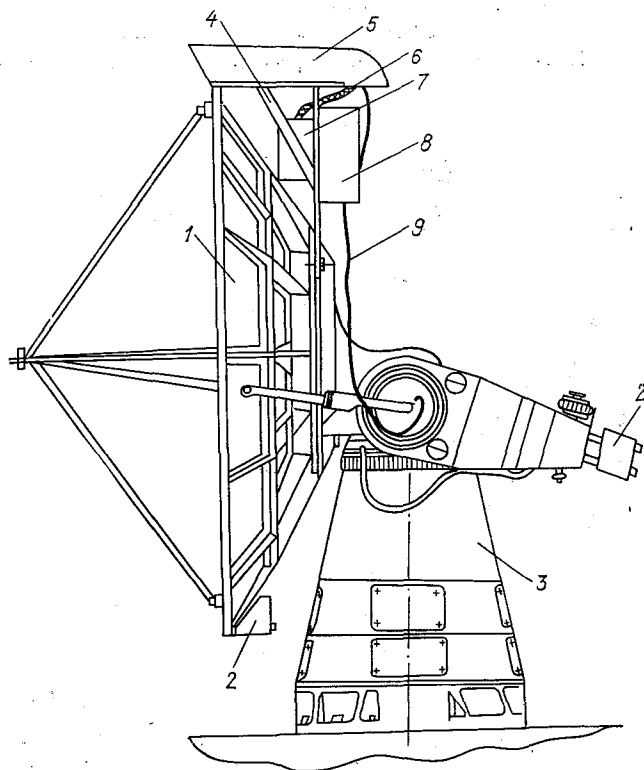


Рис. 2. Схема механического сопряжения МРЛС и лидара.

1 — антенна МРЛС; 2 — противовес; 3 — антенная колонка; 4 — рама;
5 — приемопередатчик лидара; 6 — шланги; 7 — помпа; 8 — блок
накачки; 9 — кабели.

на контрольном амплитудном индикаторе типа А; возможность работы приемопередатчика лидара в тех же метеоусловиях, что и антенна МРЛС; достижение полной электромагнитной совместимости обоих каналов или по крайней мере минимума взаимных помех, обеспечивающего устойчивую работу комплекса; необходимость автоматической юстировки лидара.

Одним из возможных вариантов решения этого вопроса является установка приемопередатчика лидара на базе рубинового ОКГ на механизме качания и вращения антенны МРЛС. Такое решение

позволяет наиболее простым способом добиться совмещения оптических осей обоих каналов с помощью специальных юстировочных устройств. Проверка совмещения осуществляется сравнительно легко по отраженным сигналам от местных предметов, а также визуально с помощью оптического прицела, установленного на антенне МРЛС.

К недостаткам такого варианта совмещения следует отнести сравнительно более низкую точность установки и отсчетов углов возвышения антенны ε , которая будет одинакова и для МРЛС и для лидара. Это может увеличить погрешность измерения высоты НГО лидаром в случае использования при наклонном зондировании расчетной формулы $H = R \sin \varepsilon$, где H — высота НГО, R — наклонная дальность до НГО. Анализ погрешностей ΔH , следующих из этой формулы (рис. 1), показывает, что инструментальные точности установки $\Delta \varepsilon$ имеют значительный вклад в определение ВНГО и особенно сказываются при небольших ε .

Для примера на рис. 1 приведены зависимости $\Delta H(R)$ при $H = 180$ м и разных значениях ΔR и $\Delta \varepsilon$. Как следует из рис. 1, на $R = 1000$ м при ΔR , равных 37,5 и 75 м, значение $\Delta H > 15$ м. Для данной H в соответствии с требованиями ИКАО ΔH должно быть ≤ 15 м.

В созданном комплексе механическое сопряжение лидара с МРЛС выполнено размещением и креплением приемо-передающей части лидара на антенне МРЛС с помощью фигурного кронштейна. Приемо-передающая головка лидара, включающая передатчик и приемник, крепится по касательной к внешнему диаметру зеркала антенны. Совмещение оптической оси лидара с электрической осью антенны МРЛС и жесткое крепление производится с помощью винтов крепления приемо-передающей головки к верхней плоскости фигурного кронштейна. К вертикальной плоскости кронштейна крепятся блоки накачки и охлаждения, что упрощает подачу энергии и хладагента к головке ОКГ передатчика (рис. 2).

Такое сопряжение позволило расположить блоки питания, управления, индикации и регистрации оптического канала в кабине МРЛС. Цепи питания и управления лидара проведены через низкочастотные панели токосъемника антенной колонки МРЛС. Видео-сигнал, опорный импульс оптического канала и синхроимпульс блока запуска МРЛС проходят по высокочастотному кабелю токосъемника. Блок-схема комплекса показана на рис. 3.

Работа комплекса по блок-схеме заключается в следующем:

Антенна МРЛС (1) излучает в атмосферу зондирующие радиоимпульсы передатчика (2), запуск которых с частотой 600 Гц осуществляется с блока запуска (3). Опорные импульсы блока запуска поступают на блок синхронизации и выбора канала регистрации (15), а также через электронные коммутаторы (8) и (22) на блоки разверток ИДВ и ИКО (23) и (24), где формируются напряжения развертки. Отраженные радиосигналы поступают на приемный тракт радиоканала (4) и через электронные коммутаторы (5) и (19) и оконечные видеоусилители (6) и (20) на ИКО и ИДВ.

1 — антенна МРЛС; 2 — передатчик МРЛС; 3 — блок запуска; 4 — приемник; 5, 8, 19, 22 — электронные коммутаторы; 6, 20 — видеоусилители; 7, 21, 23, 24 — блок разверток ИДВ и ИКО; 9 — передатчик лидара; 10 — синхронизатор; 11 — приемник лидара; 12 — амплитудный индикатор; 13 — дифференциальный усилитель; 14, 25 — цифровой усилитель ВЧГО; 15 — блок синхронизации и выбора канала регистрации; 16 — схема включения лидара в автоматическом режиме; 18 — блок индикации угла включения лидара.

Для точного определения амплитудно-временных параметров импульсов видеосигналов двух каналов осуществлен одновременный вывод их на индикатор типа А (12), в качестве которого используется двухлучевой осциллограф С8-2. Запись видеосигналов на индикаторе типа А от оптического и радиоканалов происходит через период следования МРЛС, предотвращая этим запись помехи, возникающей в момент излучения радиоимпульса.

26

В связи с малой частотой следования зондирующих импульсов оптического канала (0,1 Гц) при проведении измерений регистрация отраженных сигналов осуществляется в основном на индикаторе типа А, а видеосигналов радиоканала на всех трех типах индикаторов. Для проведения совместного анализа данных и документирования в моменты посылки зондирующих импульсов лидара происходит высвечивание развертки на ИДВ под углом возвышения, равным углу работы оптического канала (рис. 4 а, г). Эту функцию выполняет блок индикации угла включения лидара (18).

Для фоторегистрации информации с индикаторов МРЛС используются автоматические фотокамеры (17). Аппаратура комплекса

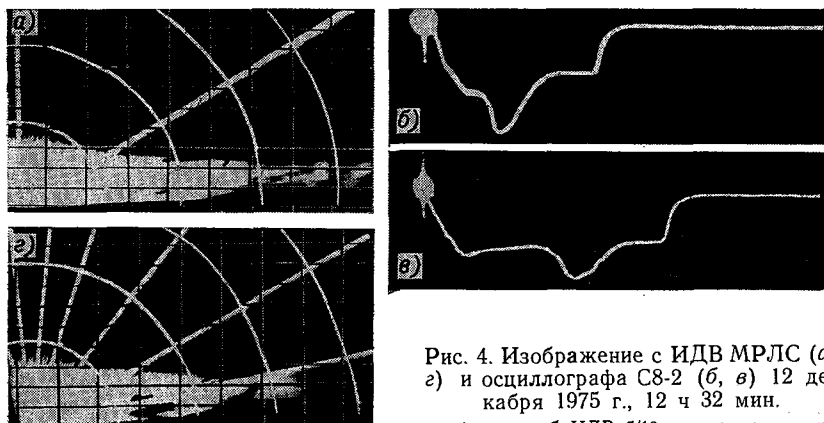


Рис. 4. Изображение с ИДВ МРЛС (а, г) и осциллографа С8-2 (б, в) 12 декабря 1975 г., 12 ч 32 мин.

а, г) масштаб ИДВ 5/10 км, яркие линии фиксируют момент работы лидара, б) сделан при угле возвышения $\varepsilon=90^\circ$ (ВНГО равна 128 м), в) сделан при угле возвышения $\varepsilon=29^\circ$ (ВНГО равна 128 м).

может работать как в автоматическом, так и ручном режимах управления. При работе в автоматическом режиме включение оптического канала и соответственно включение аппаратуры фоторегистрации через (16) производится с периодами 10—20 секунд. Ручной режим управления применяется для зондирования атмосферы в любой плоскости обзора.

Рассмотрим примеры экспериментальных данных комплекса по изменению ВНГО. Они представлены на рис. 4—6 и в табл. 1.

При обработке данных высоты НГО по эхо-сигналам лидара определялась по середине переднего фронта отраженного импульса. ВНГО при этом должна получаться выше нижней кромки облака на переменную величину ΔH^* , которая зависит от оптической плотности нижней части облака и длительности зондирующего импульса. Анализ данных показал, что во всем рабочем диапазоне расстояний и высот отраженные сигналы лидара от НГО имеют фронты с крутизной значительно большей, чем фронты эхо-сигналов на МРЛС.

Результаты наблюдений за ВНГО на комплексе МРЛС — лидар

Дата	Время (мск), ч мин	ВНГО, м			Данные метеостанции				
		МРЛС	лидар	ИВс	Видимость, км	Облачность	Явления	Ветер	Влажность, %
30/XI 1975 г.	12 45—12 43	270 (1-й слой)	190—240	200—310	8	$\frac{100}{Frnb} / \frac{100}{St}$	Дымка	ЮЮЗ 5 м/с	89
		460 (2-й слой)	110—150 (дымка)						
		3100 (средний ярус)							
2/XII 1975 г.	13 25—13 35	Не определ.	250—450	380—410	1,8	10/10 St	Дымка (умеренная)	ЮВ 1 м/с	98
		160—530	112—242 (1-й слой)	590	28	10/10 Sc		ЮЗ 3 м/с	88
12/XII 1975 г.	9 40—10 00		508—564 (2-й слой)						
		60—650	90—240 (1-й слой)	180—190	27	10/10 St, Sc		ЮЗ 4 м/с	91
			450—645 (2-й слой)						

Примечание. Измерение ВНГО на МРЛС производилось на удалении 2,5—3 км от места установки комплекса. Пределы изменения ВНГО по лидару получены не менее чем по 50 отсчетам.

Более значительная крутизна отмечается и при сравнении эхо-сигналов лидара и ИВО. Из-за меньшей длительности зондирующего импульса лидар должен давать более точное значение ВНГО, чем ИВО и МРЛС. По данным [1, 4], при ВНГО 200—600 м значение среднего квадратического отклонения отсчетов лидара относительно ИВО изменяется от 17 до 34 м [4] и равно 35 м [1] для ВНГО 200—2000 м.

Из табл. 1 видно, что данные ИВО, расположенного в 200 м от комплекса, в среднем дают более высокие значения ВНГО и не отмечают дымки. В то же время лидар чаще отмечает второй слой облаков.

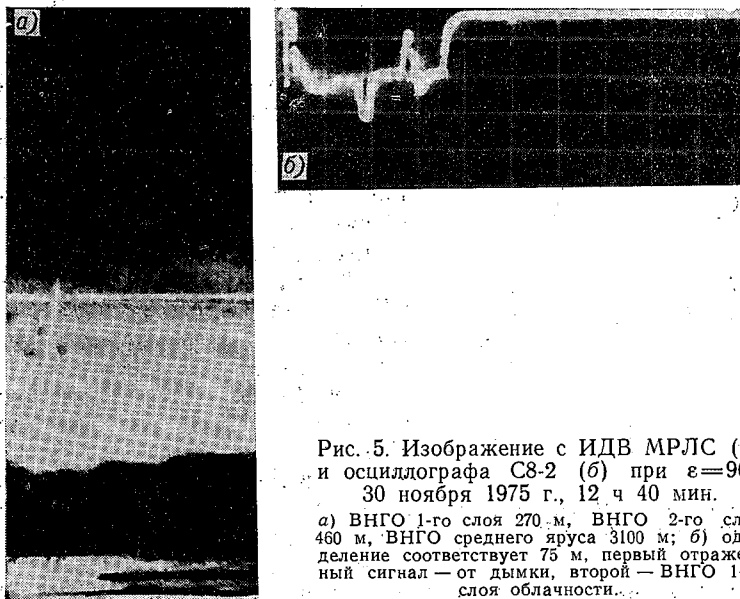


Рис. 5. Изображение с ИДВ МРЛС (а) и осциллографа С8-2 (б) при $\varepsilon=90^\circ$ 30 ноября 1975 г., 12 ч 40 мин.

а) ВНГО 1-го слоя 270 м, ВНГО 2-го слоя 460 м, ВНГО среднего яруса 3100 м; б) одно деление соответствует 75 м, первый отраженный сигнал — от дымки, второй — ВНГО 1-го слоя облачности.

При отсутствии сильных осадков в случае вертикального зондирования ВНГО по лидару должна быть близка к вертикальной видимости снизу вверх. В проведенных сериях ВНГО, измеренная при углах возвышения антенны $\varepsilon < 40^\circ$, иногда ниже на 10—20 м, чем при $\varepsilon = 90^\circ$. Это объясняется, по-видимому, как неоднородностью НГО, так и ослаблением волн оптического диапазона при распространении на больших участках.

На рис. 4 а, г приведены фотографии с экрана ИДВ в масштабе 5/10 км за 12 ч 32 мин 12/XII 1975 г. На них четко фиксируется в виде ярких линий «подсвеченная» развертка в момент работы лидара. Она хорошо видна на фоне радиоэхо слоисто-кучевой облачности, радиус обнаружения которой на миллиметровом канале

МРЛС в этот срок не превышала 8 км. На рис. 4 б, в даны фотографии эхо-сигналов лидара под $\epsilon=90^\circ$ (рис. 4 б) и $\epsilon=29^\circ$ (рис. 4 в), им соответствует рис. 4 а. ВНГО по лидару равна 128 м.

На рис. 5 а, б приведены фотографии с экрана ИДВ (рис. 5 а) и эхо-сигналы лидара (рис. 5 б) на осциллографе С8-2 за 12 ч 40 мин 30/XI 1975 г. При облачности Frnb и Sc ВНГО первого слоя на миллиметровом канале МРЛС равна 270 м, второго слоя — 460 м, ВНГО среднего яруса — 3100 м. На рис. 5 б первый эхо-сигнал от дымки, которую МРЛС не обнаруживает, с ВНГО=120 м и второй от НГО первого слоя облачности, ВНГО=215 м.

Как следует из рис. 4 и 5, данные лидара дополняют сведения МРЛС о расслоенности облачности и позволяют дать более точные значения ВНГО. Измерение ВНГО на миллиметровом канале МРЛС в этих примерах было возможно только на удалениях 2,5—3 км, а азимут вертикальных разрезов был выбран таким, что не позволил учесть перемещение облачности для прогнозирования ВНГО.

На рис. 6 приведено изменение ВНГО за 25-минутный период 12/XII 1975 г., по данным лидара, ИВО и МРЛС. Оценки ВНГО с помощью МРЛС были получены на расстоянии 2,5—3 км от комплекса. Как следует из рис. 6, по данным МРЛС и лидара ВНГО испытывала за этот период резкие и значительные колебания с явной тенденцией к уменьшению ВНГО. Такая тенденция

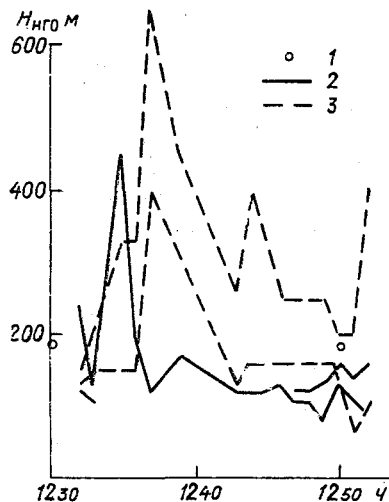


Рис. 6. Изменение $H_{НГО}$ по ИВО (1), лидару (2) и МРЛС (3).

прослеживается по всем трем видам измерений ВНГО. Лидар отмечает в ряде случаев ВНГО и второго слоя облачности.

Для определения тенденции изменения ВНГО необходимо получить топографию ВНГО по лидару в первую очередь в азимутах приближающейся облачности. С учетом оценки скорости и направления ее перемещения, полученных по МРЛС (или с учетом аэрологических данных), можно в ряде случаев оценивать тенденцию ВНГО над заданной площадью. Наиболее сложным при этом будет оценка тенденции при облаках Sc и Ns с Frnb.

Работа комплекса МРЛС — лидар показала перспективность его использования для обеспечения наблюдения за ВНГО в сложных метеорологических условиях и увеличения степени однозначности при интерпретации данных лидара. Для получения наибольшей информативности необходимо увеличить частоту посылок ОКГ (особенно при малых углах возвышения) и автоматизировать процесс регистрации и представления ВНГО.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Будза А. А. и др. Применение оптических квантовых локаторов для измерения высот облаков и характеристик прозрачности атмосферы.— «Тр. ЛГМИ», 1970, вып. 42.
2. Васильев В. В., Степаненко В. Д. Возможности определения некоторых характеристик облачности с помощью лидаров.— «Тр. ГГО», 1975, вып. 328, с. 3—13.
3. Зуев В. Е. Лазер-метеоролог. Л., Гидрометеиздат, 1974. 179 с.
4. Самохвалов И. В., Шапарев В. Я. Лидарный облакомер. Тезисы докладов 3-го Всесоюзного симпозиума по лазерному зондированию атмосферы. Томск, 1974.
5. Степаненко В. Д. Радиолокация в метеорологии. Л., Гидрометеиздат, 1973, с. 342.
6. Noonkester V. R., Jensen D. R., Richter J. M. Simultaneous FM—CW Radar and lidar observation.— In: Proceedings of the 15th Radar Meteorology Conference. Oct. 1972, p. 335—340.
7. Полякова Е. А. Об изучении микроструктуры и интегральных характеристик водных аэрозолей.— «Тр. ГГО», 1976, вып. 357, с. 181—186.

В. А. Ковалев, Е. Е. Рыбаков, Г. Г. Шукин

НЕКОТОРЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛИДАРНЫХ СИГНАЛОВ ПРИ НИЗКОЙ ОБЛАЧНОСТИ

Для определения высоты нижней границы облачности (НГО) преимущественное распространение получили светолокационные методы измерения. В настоящее время на смену традиционным светолокаторам приходят лазерные локации (лидары), потенциально обладающие значительно большими возможностями и значительно большей чувствительностью. Но в то же время не следует забывать, что в основу их действия заложены те же самые принципы импульсной светолокации, что и в традиционных светолокаторах. Применяемые сейчас светолокаторы вполне удовлетворительно работают в слабо замутненной атмосфере и при не слишком низкой облачности, т. е. в «простых метеорологических условиях». Но авиацию в значительно большей степени интересуют сложные метеорологические условия, которые характеризуются низкой облачностью и малой метеорологической дальностью видимости (S_m) в приземном слое.

Применяемые сейчас светолокаторы в таких условиях, в частности при сильных дождях, метелях, густых дымках и туманах, в ряде случаев дают грубые ошибки или вообще не позволяют определить высоту НГО. Очевидно, что при переходе к лазерному зондированию трудности, связанные с работой в сложных метеорологических условиях, полностью остаются.

В данной статье рассматриваются некоторые вопросы работы лазерных локации при низкой облачности, связанные с извлечением полезной для авиационной метеорологии информации из результатов лазерного зондирования.

Воспользуемся уравнением лазерной локации в приближении однократного рассеяния

$$P(z) = Ax(z) \alpha(z) \frac{q(z)}{z^2} e^{-2 \int_0^z \alpha(z') dz'} \quad (1)$$

Здесь $P(z)$ — мощность отраженного сигнала; $x(z)$ — параметр индикатрисы рассеяния для угла 180° ; $\alpha(z)$ — объемный коэффициент

ент рассеяния (поглощение считаем пренебрежимо малым); $q(z)$ — геометрическая функция системы, обусловленная несовместностью оптических осей передатчика и приемника; A — постоянный коэффициент, определяемый параметрами локатора.

Для простоты далее будем считать, что на трассе зондирования выполняется условие $x(z) = \text{const}$, поскольку влияние колебаний этого параметра на форму отраженного сигнала незначительно. Форма отраженного сигнала будет определяться поведением с расстоянием трех функций: произведения $z^{-2} \cdot q(z)$, коэффициента рас-

сеяния $\alpha(z)$ и прозрачности $e^{-2 \int_0^z \alpha(z') dz'}$.

В простых метеорологических условиях облачная атмосфера достаточно хорошо описывается двухслойной моделью. В этом случае в ближней зоне отраженный сигнал имеет максимум (местный сигнал), обусловленный, с одной стороны, постепенностью пересечения полей зрения приемника и передатчика (монотонно возрастающая функция $q(z)$) и, с другой стороны, ослаблением сигнала пропорционально z^{-2} , на которое накладывается дополнительное ослаб-

ление атмосферой $e^{-2 \int_0^z \alpha(z') dz'}$. В зоне облака отраженный сигнал имеет максимум, обусловленный резким скачком коэффициента рассеяния $\alpha(z)$ при переходе от подоблачной атмосферы к облаку. В таких простых ситуациях положение этого максимума однозначно связано с высотой НГО.

В реальной атмосфере и особенно в сложных метеорологических условиях не наблюдается резкого скачка коэффициента рассеяния при переходе от подоблачной атмосферы к облаку [1]. Однако до настоящего времени систематизированные экспериментальные данные о высотном ходе коэффициентов рассеяния при низкой облачности практически отсутствуют. Чтобы в какой-то мере ответить на вопрос о том, что можно ожидать от лазерного локатора в сложных метеоусловиях, привлечем экспериментальные данные измерений горизонтальной метеорологической дальности видимости в темное время суток на различных высотах в нижнем слое тропосферы, полученные М. Я. Рациморов [1].

S_m измерялась нефелометрической установкой обратного рассеяния, установленной на борту самолета-зондировщика. Инструментально было подтверждено, что НГО является размытым слоем переменной оптической плотности. И эта подоблачная дымка оказывает существенное влияние на распределение S_m с высотой в случае низкой облачности.

По данным измерений автором [1] были построены осредненные и сглаженные кривые распределения S_m с высотой под низкими слоистыми и слоисто-кучевыми облаками при различных высотах основания облаков. Для расчетов мы будем использовать три следующие модели подоблачной атмосферы.

Модель I описывает распределение горизонтальной S_m с высотой под St высотой меньше 150 м. В этом случае подоблачная дымка

достигает поверхности Земли, и распределение S_M с высотой во всем подоблачном слое в основном определяется ее влиянием — наблюдается непрерывное уменьшение S_M от земной поверхности до основания облаков, а модуль производной $\left| \frac{dS_M(z)}{dz} \right|$ также непрерывно уменьшается.

Модель II — для высоты облаков выше 150 м. Она отличается от модели I поведением производной $\frac{dS_M(z)}{dz}$. Ее модуль достигает максимального значения примерно посередине слоя от земной поверхности до основания облаков.

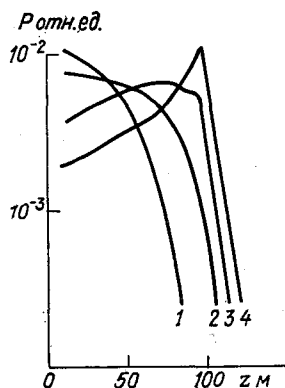


Рис. 1. Отраженные сигналы для прибора с скомпенсированной геометрией (идеального прибора) при различных наземных S_M . Модель I. St высотой 100 м.

1) $S_M = 300$ м, 2) $S_M = 500$ м, 3) $S_M = 1000$ м, 4) $S_M = 2000$ м.

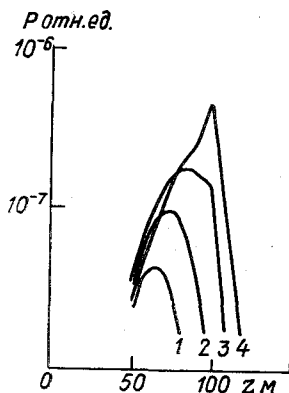


Рис. 2. Отраженные сигналы для прибора с реальной геометрией. Модель I. St высотой 100 м.

Усл. обознач. см. рис. 1.

Модель III — для облаков Sc высотой менее 400 м. В этом случае подоблачная дымка не достигает поверхности Земли и характер распределения S_M с высотой в прилегающем к подстилающей поверхности слое воздуха обусловливается влиянием только приземного помутнения (S_M растет с высотой); лишь начиная с некоторой высоты сказывается влияние подоблачной дымки.

Рассмотрим идеальный прибор, для которого $q(z)/z^2 = 1$. Для такого прибора были рассчитаны формы отраженных сигналов по формуле (1) для вышеуказанных моделей атмосферы в подоблачном слое. Видимость внутри облака принималась постоянной. Рассматривалось зондирование в зенит.

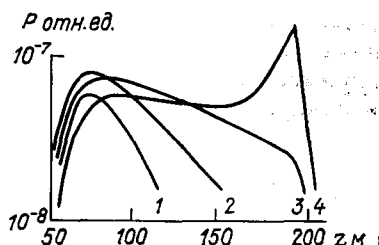
Расчеты показывают, что для таких моделей положение максимума отраженного сигнала даже для идеального прибора определяет высоту НГО лишь при наземных S_M более 1 км. Для примера на рис. 1 представлены сигналы от облаков St высотой 100 м при раз-

личных наземных S_m . Расчет проведен для модели I. Рисунок хорошо иллюстрирует влияние протяженного подоблачного слоя на форму отраженного сигнала. Наличие подоблачного слоя приводит к появлению широкого переднего фронта отраженного сигнала, что является существенным отличием от двухслойной модели (кривая 4). По мере ухудшения наземной S_m (кривая 3) увеличивается вклад в отраженный сигнал подоблачного слоя, а максимум сигнала от облака размывается. При наземных S_m менее 1 км (кривые 1 и 2) отраженный сигнал монотонно затухает.

В реальных лазерных локахторах обычно нет компенсации множителя $q(z)/z^2$. В этом случае отраженный сигнал быстрее затухает и, кроме того, появляется дополнительный максимум в ближней зоне, что затрудняет определение высоты НГО по положению максимума отраженного сигнала в случае низкой облачности.

Рис. 3. Отраженные сигналы для прибора с реальной геометрией. Модель II. St высотой 200 м.

Усл. обознач. см. рис. 1.



На рис. 2 и 3 представлены отраженные сигналы (модели атмосферы те же, что и выше) для лазерного локахтора со следующими геометрическими параметрами: база между приемником и передатчиком 40 см, диаметр оптики приемника 10 см, оптики передатчика 10 см, угол расходимости приемника 0,003 рад, угол расходимости передатчика 0,003 рад.

Оптические оси приемника и передатчика параллельны. Функция $q(z)$ рассчитывалась в предположении о равномерном распределении интенсивности излучения по диаметру лучей передатчика и приемника.

Из анализа рисунков также следует вывод, что положение максимума отраженного сигнала для прибора с реальной геометрией определяет высоту НГО лишь при наземных S_m более 1 км. Кроме того, при низкой облачности (рис. 2) происходит наложение сигналов от облака и местного сигнала, что затрудняет определение высоты НГО. Следует, однако, отметить, что отсутствие достаточного статистического материала об оптических характеристиках подоблачной дымки не дает пока возможности ответить на вопрос, какова вероятность обнаружения светолокахтором облачности при той или иной ее высоте и значении МДВ у поверхности земли. Чтобы ответить на этот вопрос, необходимы дальнейшие экспериментальные исследования. При этом наиболее важной характеристикой, подлежащей изучению, является не общий характер изменения мутности

с высотой во всем приземном слое, а протяженность подоблачной дымки и градиент ее прозрачности непосредственно вблизи плотной части облака.

В сложных метеорологических условиях при низкой облачности в ряде случаев, в частности в авиационной метеорологии, вопрос об определении высоты НГО переходит в вопрос об измерении, например, среднего коэффициента ослабления на трассе, или оптической толщины атмосферы на трассе, или каких-либо других оптических параметров атмосферы. В этом случае может оказаться полезной информация о сигнале из ближней зоны. Идея использовать положения максимума отраженного сигнала из ближней зоны для определения параметров атмосферы была выдвинута Брауном и др. [2]. Впоследствии ряд исследователей развивали этот метод и пытались применить его практически (см., например, [3, 6]).

Рассмотрим, какую информацию можно извлечь из положения максимума местного сигнала в сложных метеорологических условиях, основываясь на результатах описанного выше численного эксперимента. Как известно, условие максимума местного сигнала в однородной атмосфере определяется соотношением [4]

$$\frac{1}{2} \left\{ \frac{d}{dz} [\ln q(z)]_{z=z_{\max}} - \frac{2}{z_{\max}} \right\} - \bar{\alpha} = 0, \quad (2)$$

которое справедливо при $x(z) = \text{const}$. Здесь $\bar{\alpha} = \frac{1}{z} \int_0^z \alpha(z') dz$ — средний объемный коэффициент рассеяния. В общем случае неоднородной атмосферы справедливо выражение

$$\frac{1}{2} \left\{ \frac{d}{dz} [\ln q(z) + \ln x(z) + \ln \alpha(z)]_{z=z_{\max}} - \frac{2}{z_{\max}} \right\} - \bar{\alpha} = 0, \quad (3)$$

которое при введенном выше ограничении $x(z) = \text{const}$ переходит в

$$\frac{1}{2} \left\{ \frac{d}{dz} [\ln q(z) + \ln \alpha(z)]_{z=z_{\max}} - \frac{2}{z_{\max}} \right\} - \bar{\alpha} = 0. \quad (4)$$

Из (2) и (4) следуют формулы для $z_{\max}$ в однородной атмосфере

$$z_{\max} = \frac{1}{\frac{1}{2} \frac{d}{dz} [\ln q(z)]_{z=z_{\max}} - \bar{\alpha}} \quad (5)$$

и неоднородной атмосфере

$$z_{\max} = \frac{1}{\frac{1}{2} \frac{d}{dz} [\ln q(z) + \ln \alpha(z)]_{z=z_{\max}} - \bar{\alpha}}. \quad (6)$$

Таким образом, в однородной атмосфере существует однозначная зависимость положения максимума местного сигнала от коэффициента рассеяния на трассе. В неоднородной атмосфере положение максимума местного сигнала зависит как от величины инте-

грального коэффициента рассеяния $\bar{\alpha}$ на трассе, так и от величины и знака производной $\frac{d}{dz} [\ln \alpha(z)]_{z=z_{\max}}$. Поэтому в общем случае можно говорить о корреляционных связях величины $z_{\max}$ с коэффициентом рассеяния.

На рис. 4 представлены значения $z_{\max}$ при различных S_M у поверхности Земли, рассчитанные по результатам описанного выше численного эксперимента для низкой облачности для лазерного локатора с реальной геометрией. Видно, что, несмотря на значительное различие вертикального хода S_M для разных моделей, связь между $z_{\max}$ и S_M довольно сильная. Интересно отметить, что в работе [5] на основании экспериментальных данных была получена подобная зависимость между глубиной проникновения луча в тумане для светолокатора «Облако» и горизонтальной видимостью у поверхности Земли.

Представляет интерес оценить положение максимума местного сигнала в зависимости от оптической толщины $\tau(z_{\max})$ слоя от поверхности Земли до высоты $z_{\max}$ в условиях низкой облачности. Из (2) и (4) следуют выражения для $\tau(z_{\max})$ в однородной атмосфере

$$\tau(z_{\max}) = \frac{z_{\max}}{2} \frac{d}{dz} [\ln q(z)]_{z=z_{\max}} - 1 \quad (7)$$

и в неоднородной атмосфере

$$\tau(z_{\max}) = \frac{z_{\max}}{2} \frac{d}{dz} [\ln q(z) + \ln \alpha(z)]_{z=z_{\max}} - 1. \quad (8)$$

Однозначная зависимость существует только в однородной атмосфере. Величина $\tau(z_{\max})$ определяется произведением двух сомножителей, один из которых ($z_{\max}/2$) увеличивается с ростом $z_{\max}$, а другой $\left(\frac{d}{dz} [\ln q(z)]_{z=z_{\max}}\right)$ резко падает, причем превалирующим является второй сомножитель. Это подтверждается ходом кривых на рис. 5. Здесь представлена связь между оптической толщиной $\tau(z_{\max})$ и положением максимума местного сигнала для различных моделей атмосферы при низкой облачности, построенная по результатам описанного выше численного эксперимента. В предельных случаях прозрачной атмосферы ($\tau(z_{\max}) \rightarrow 0$) и оптически очень плотной ($\tau(z_{\max}) \rightarrow \infty$) положение максимума местного сигнала, очевидно, не должно зависеть от стратификации коэффициента рассеяния на трассе и определяется только геометрией эксперимента.

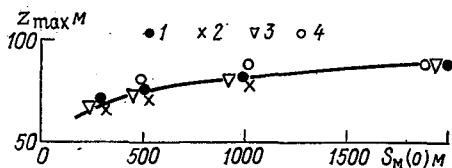


Рис. 4. Зависимость положения максимума местного сигнала от наземной дальности видимости.

1 — однородная атмосфера; 2 — St высотой 100 м (модель I); 3 — St высотой 200 м (модель II); 4 — Sc высотой 300 м (модель III).

Для рассмотренных моделей атмосферы величина $z_{\max}$ практически не зависит от выбора модели при $\tau(z_{\max}) < 0,2$ и при $\tau(z_{\max}) > 1$. При промежуточных значениях $\tau(z_{\max})$ имеется некоторая корреляционная связь между положением максимума на осциллограмме отраженного сигнала и оптической толщиной слоя от лазера до точки максимума. При этом оказывается, что характер этой связи, вообще говоря, слабо зависит от степени неоднородности атмосферы и точки для однородной атмосферы почти совпадают с точками, полученными для рассмотренных выше моделей неоднородной атмосферы.

Такое положение легко объясняется, если учесть, как это следует из формул (7) и (8), что наличие градиента прозрачности приводит лишь к некоторому сдвигу кривых $\tau(z_{\max}) = f(z_{\max})$ относительно случая однородной атмосферы; этот сдвиг определяется величиной и знаком параметра $\frac{d}{dz} [\ln \alpha(z)]_{z=z_{\max}}$ (равным нулю в однородной

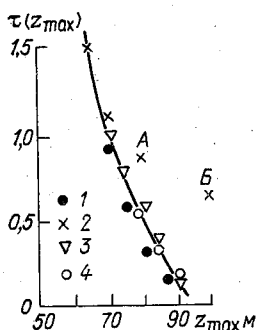


Рис. 5. Зависимость оптической толщины $\tau(z_{\max})$ от $z_{\max}$.

Усл. обознач. см. рис. 4.

атмосфере). Однако достаточно хорошая корреляция $\tau(z_{\max}) = f(z_{\max})$ имеет место лишь до тех пор, пока точка $z_{\max}$, соответствующая максимуму отраженного сигнала, не попадает в слой атмосферы с большим градиентом прозрачности (точки A и B на рис. 5). Выброс этих двух точек для модели I (St высотой 100 м) обусловлен наложением максимума местного сигнала и сигнала от низкой облачности.

Таким образом, на основании рассмотренных выше положений можно сделать следующие выводы.

1. В сложных метеорологических условиях при низкой облачности и распределении видимости в подоблачном слое, близком к моделям I—III, характер кривой отраженного сигнала лазерного лоатора зависит от высоты основания облаков, видимости у поверхности Земли и геометрии лазерного лоатора. Кривая имеет вид либо двухвершинной, либо одновершинной (при наземной S_m менее 1 км) кривой. Положение ближнего максимума определяется геометрией лоатора, оптической толщиной нижнего слоя и градиентом изменения прозрачности атмосферы в районе максимума; положение второго максимума практически зависит лишь от высоты основания облаков.

2. Положение максимума в ближней зоне (местный сигнал) может дать дополнительную информацию об оптических параметрах атмосферы в ближней зоне как в однородной, так и в неоднородной атмосфере, однако для неоднородной атмосферы необходимо дополнительно рассчитать параметр $\frac{d}{dz} [\ln \alpha(z)]$ в точке, соответствующей максимуму сигнала. Эта величина, в принципе, может быть определена по той же кривой отраженного сигнала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рацимор М. Я. Вертикальное распределение горизонтальной видимости под облаками и в облаке. — «Тр. ЦИП», 1966, вып. 157, с. 57—70.
2. Brown R. G., Hazel R. F., Landon H. Visibility measuring system. Pat. USA, No 351. 93. 54, 1965.
3. Скрябин А. Л. и др. Некоторые результаты лазерного зондирования по вертикальным и наклонным трассам. — «Изв. АН СССР. Физика атм. и океана», 1975, т. 11, № 4.
4. Степаненко В. Д. Радиолокация в метеорологии. Л., Гидрометеиздат, 1973, 342 с.
5. Рубинштейн М. В. О сравнимости высот нижней границы облаков, определенных с помощью прибора и с самолета — «Тр. ЦИП», 1966, вып. 157, с. 45—56.
6. Шулейкин В. Н. Измерение прозрачности атмосферы лазерным локатором. 4-й Всесоюзный симпозиум по лазерному зондированию атмосферы. Тезисы докладов. Томск, 1976, с. 24—27.

*В. К. Завируха, В. А. Сарычев,
В. Д. Степаненко, Ю. Н. Щепкин*

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК РАССЕЯНИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ И ОРНИТОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ В БЕЗЭХОВЫХ КАМЕРАХ

При решении задач радиолокационной метеорологии необходима априорная информация о рассеивающих свойствах метеорологических и орнитологических объектов [1]. Эта информация может быть представлена радиолокационными сигналами от указанных объектов или некоторыми функционалами, описывающими реализации сигналов. Поскольку число параметров сигнала, используемых радиолокационными системами, постоянно растет, то приходится повышать «размерность» применяемых характеристик рассеяния.

Чаще всего в качестве характеристик рассеяния используются зависимости отражающих свойств метеорологических объектов от угла поворота (статистические характеристики рассеяния). Наиболее полную информацию о статических характеристиках объекта дает использование матрицы рассеяния [2]. Элементы матрицы рассеяния являются функциями углов поворота и двухпозиционности, а также направлений облучения объекта. Диаграмму матрицы рассеяния, получаемую при повороте объекта, назовем поляризационной характеристикой (ПХ).

При определении ПХ метеорологических объектов поляризационные базисы падающей и рассеянной волн не обязательно должны совпадать, как в случае измерения обычной радиолокационной матрицы рассеяния [2]. В этом случае для них введем обозначение κQ , где $\kappa=1,2$ указывает на одно- или двухпозиционный режим измерения ПХ.

Метеорологические и орнитологические объекты отличаются от традиционно рассматриваемых радиолокационных целей малыми значениями эффективной площади рассеяния (ЭПР) и более сложной структурой отраженного сигнала. Кроме этого, в настоящее время отсутствуют достаточно точные методы расчета рассеивающих свойств таких объектов, что значительно затрудняет оценку качества полученных результатов.

Выше перечисленные особенности потребовали создания достаточно сложных систем измерения, состоящих из большого числа

различных элементов, связанных друг с другом сетью функциональных связей. Эти системы в качестве одного из своих важнейших элементов содержат безэховую камеру, которая позволяет имитировать условия распространения радиоволн в свободном пространстве [3, 4].

Многоканальность и многофункциональность таких систем, включение в их состав ЭВМ, высокая степень автоматизации процедур измерений позволяют сделать вывод о том, что измеритель ПХ метеорологических объектов является измерительной информационной системой [5].

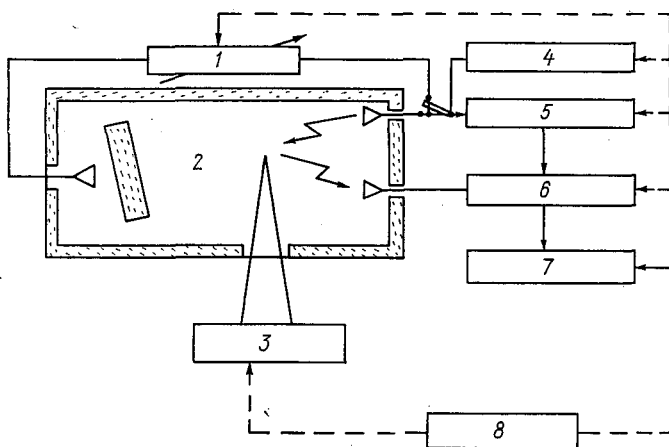


Рис. 1. Экстенсивная структура измерителя поляризационных характеристик.

1 — аттенуатор, 2 — безэховая камера, 3 — поворотное устройство, 4 — передатчик, 5 — система компенсации, 6 — приемник, 7 — ЭВМ, 8 — пульт управления.

Несмотря на обилие работ, посвященных измерениям в безэховых камерах, в настоящее время нет теории, которая бы позволяла решать методологические проблемы, определяющие специфику измерения ПХ метеорологических объектов.

В качестве методологической основы описания и анализа измерительных информационных систем обычно используется системный подход. Основное внимание при этом уделяется выявлению структуры системы [6]. Поскольку одновременно нельзя анализировать состояние объекта и происходящие с ним изменения [7], то при системном подходе приходится выделять два вида структур системы: экстенсивную и интенсивную.

Экстенсивная структура нашей системы измерений определяет расположение элементов системы и сеть связей между ними (рис. 1). Интенсивная структура (рис. 2) определяет последовательность про-

ведения процесса преобразования измерительного сигнала во времени.

Экстенсивная структура измерителя ПХ довольно подробно рассмотрена в работах [3, 4, 8], поэтому основное внимание уделим анализу интенсивной структуры, определяющей принципы коррекции погрешностей измерения ПХ.

Интенсивная структура измерителя ПХ представлена в виде четырех иерархически расположенных уровней (страты) [9]. На каждой страте исследуется процесс преобразования как единого целого

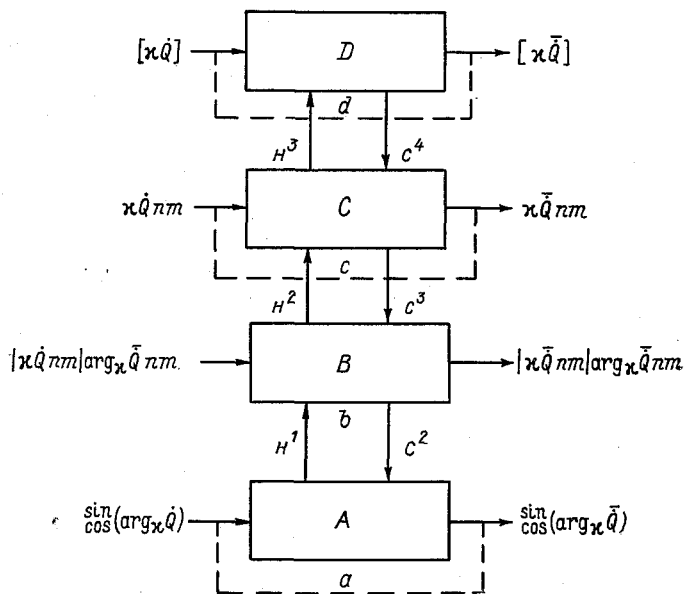


Рис. 2. Интенсивная структура преобразования измерительного сигнала.

A — предварительные преобразования при получении аргументов и модулей, *a* — вспомогательный уровень; *B* — преобразование модулей и аргументов элементов матриц, *b* — основной уровень; *C* — преобразование элементов матрицы рассеяния, *c* — элементный уровень; *D* — матричные преобразования, *d* — матричный уровень.

и описывается совокупностью двух операторов: оператора преобразования $T(\cdot)$, оператора обработки $F(\cdot)$.

Оператор преобразования матричной страты можно представить в виде:

$$\kappa \bar{Q} = R(\kappa Q) + \Psi,$$

где $\kappa \bar{Q}$ — матрица выходных сигналов измерительной системы, $R(\cdot)$ — матричная функция, определяющая мультипликативную со-

ставляющую погрешности измерения ПХ, Ψ — матрица аддитивной составляющей погрешности измерений.

Мультипликативная составляющая погрешности ПХ появляется в основном из-за неточности изготовления модели и используемых эталонов. Аддитивная составляющая определяется фоновым сигналом безэховой камеры.

Соответственно для элементной страты оператор преобразования можно записать в следующей форме:

$$\text{vec } \bar{Q} = \mu \text{ vec } Q,$$

где vec — кронекеровский вектор [10] матрицы рассеяния, μ — матрица чувствительности элементной страты,

$$\mu = \begin{bmatrix} 1, & \alpha_1, & \beta_1, & 0 \\ \alpha_2, & 1, & 0, & \beta_2 \\ \beta_1, & 0, & 1, & \alpha_1 \\ 0, & \beta_2, & \alpha_2, & 1 \end{bmatrix},$$

α_h и β_h соответственно уровни кроссовой компоненты в диаграмме излучения и коэффициенты связи между приемными поляризационными каналами измерителя ПХ.

Таблица 1

Классификация ошибок поляризационных характеристик

Уровень описания	Рассматриваемые ошибки
Четвертый (матричный)	1. Ошибки, возникающие при преобразовании поляризационных базисов 2. Ошибки моделирования 3. Погрешности из-за отличия падающей на объект волны от плоской 4. Погрешности из-за наличия фонового сигнала
Третий (элементный)	1. Ошибки, обусловленные наличием кроссовой компоненты в диаграмме излучения 2. Ошибки, обусловленные связью между приемными каналами и измерительной системой
Второй (основной)	1. Ошибки, вызванные аналого-цифровым преобразователем 2. Ошибки, вызванные взаимным влиянием каналов амплитудных и фазовых измерений 3. Динамические погрешности
Первый (вспомогательный)	1. Погрешности неквадратурности настройки фазовых детекторов 2. Ошибки из-за несимметричности настройки фазовых детекторов

Отличие произведения операторов обработки и преобразования от единичного оператора определяет погрешность измерения, которая может быть представлена на каждой страте соответственно как комплексное число (элементарная страта), или как вещественное число (основная и вспомогательная страты).

Страты взаимодействуют друг с другом с помощью функциональных связей, одни из которых — информационные функции h_k ($k = 1, 2, 3$) описывают воздействие нижестоящих страт на вышестоящие, другие — распределительные функции C^k ($k = 2, 3, 4$) определяют обратные воздействия (рис. 2).

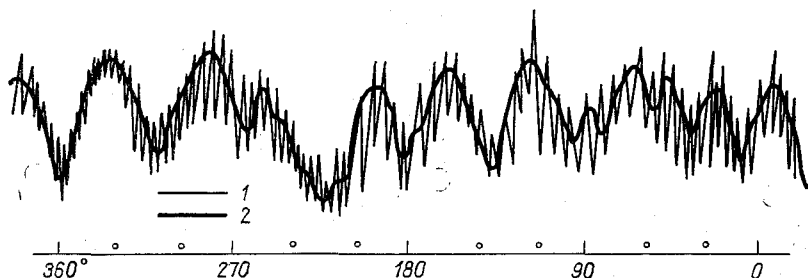


Рис. 3. Запись отраженного сигнала от искусственных градин до коррекции (1) и после коррекции (2).

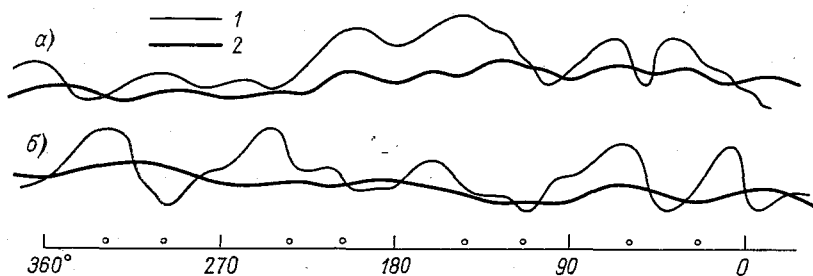


Рис. 4. Запись отраженного сигнала от голубя при различных ракурсах наблюдений до коррекции (1) и после коррекции (2).

а — диаметр 3 см, б — диаметр 1 см.

Анализ интенсивной структуры позволяет:

- а) разбить задачу коррекции результатов измерения на более простые подзадачи, содержащие малое число переменных;
- б) определить порядок проведения всех этапов коррекции ошибок измерения;
- в) осуществить классификацию источников ошибок по стратам (уровням описания) (табл. 1), на которых эти ошибки исследуются;
- г) определить параметры измерительной установки, подлежащие аттестации при ее паспортизации.

Таблица 2

ЭПР птиц (см²) на длине волны 3,2 см

Птица	Вес, г	Горизонтальная поляризация			Вертикальная поляризация		
		$\sigma_{\text{макс}}$	$\sigma_{\text{мин}}$	$\bar{\sigma}$	$\sigma_{\text{макс}}$	$\sigma_{\text{мин}}$	$\bar{\sigma}$
Голубь	690	240,8	0,9	48,6	280,0	0,6	41,4
	320	88,1	0,3	17,5	60,5	0,1	14,4
	150	64,1	0,14	19,0	56,0	0,4	16,6
Дрозд	90	13,6	0,11	4,0	44,8	0,5	5,1
Клест	44	10,9	0,2	4,5	48,2	0,1	7,6
Щегол	17	11,1	0,9	7,5	45,2	0,1	7,3

Указанный подход применялся при настройке радиолокационного измерительного комплекса «Цунами» [11] для решения задач измерения ПХ метеорологических и орнитологических объектов.

По выше изложенной методике произведена коррекция результатов записи отраженных сигналов от искусственных градин и некоторых видов птиц (примеры коррекции представлены на рис. 3 и 4).

Результаты коррекции показывают, что в отдельных случаях (рис. 4) необходимо вводить поправки до 3—5 дБ.

Обобщенные результаты обработки скорректированных записей отраженных сигналов представлены в табл. 2 и 3.

Из анализа табл. 2 и 3 прежде всего видна зависимость ЭПР объектов от веса и размеров. С увеличением веса объекта ЭПР в общем случае возрастает. Однако наблюдаются отдельные выбросы максимальных и средних значений ЭПР щегла и клеста. Это, по-видимому, указывает на наличие резонансных режимов отражения при определенных ракурсах наблюдения и требует дальнейшего исследования [12, 13].

Таблица 3

ЭПР искусственных градин (см²) на длине волны 3,2 см

Диаметр градины, см	Вертикальная поляризация		
	$\sigma_{\text{макс}}$	$\sigma_{\text{мин}}$	$\bar{\sigma}$
1	0,5	0,2	0,3
3	1,5	0,3	0,8

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Степаненко В. Д. Радиолокация в метеорологии. Л., Гидрометеиздат, 1973, с. 143—150.
2. Канарейкин Д. Б., Павлов Н. Ф., Потехин В. А. Поляризация радиолокационных сигналов. М., «Сов. радио», 1966, с. 34—136.
3. Майзельс Е. Н., Торгованов В. А. Измерение характеристик рассеяния радиолокационных целей. М., «Сов. радио», 1972, с. 164.

4. Торгованов В. А. Безэховые камеры.— «Зарубежная радиоэлектроника», № 12, 1974, с. 20—46.
5. Цапенко М. П. Измерительные информационные системы. М., «Энергия», 1974, с. 320.
6. Сетров М. И. Основы функциональной теории организации. Л., Наука, 1972, 164 с.
7. Зиновьев А. А. Логическая физика. М., «Наука», 1973. 168 с.
8. Хойнен. Измерение матрицы рассеяния целей. ТИИЭР, т. 53, № 8, 1965, с. 393—412.
9. Месарович М., Мако Д., Такахара И. Теория иерархических многоуровневых систем. М., «Мир» 1973. 347 с.
10. Neudcker R. A. Note on kroncer MOTRIX products and MOTRIX equation systems.— „SIAM”, 1969, 17, N 3. 603 p.
11. Тучков Л. Т. и др. Измерительный комплекс «Цунами» для исследования отражательной способности различных тел.— «Тр. X Всесоюзной конференции по распространению радиоволн.» М., «Наука», 1972, с. 153—157.
12. Блэксмит, Мак. К вопросу об измерении радиолокационных поперечных сечений уток и цыплят. ТИИЭР, т. 53, № 8, 1965, с. 1277.
13. Waggen Z. The detection and indentification of birds in flight using coherent and noncoherent radar.— „IEEE”, 1974, 62, N 6, p. 745—753.

Л. П. Бобылев, А. О. Изюмов, Г. Г. Щукин

ФЛУКТУАЦИИ ОПТИЧЕСКОЙ ТОЛЩИНЫ И РАДИОЯРКОСТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ АТМОСФЕРЫ В МИЛЛИМЕТРОВOM И СУБМИЛЛИМЕТРОВOM ДИАПАЗОНАХ ВОЛН

В последние годы широкое применение находят методы дистанционного исследования метеорологических характеристик атмосферы в видимом, инфракрасном и микроволновом диапазонах длин волн. Наряду с этим в настоящее время интенсивно осваивается и субмиллиметровый диапазон.

Работы по освоению коротковолновой части миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов касались в основном исследования поглощения этих волн. При этом фактически отсутствуют данные по ослаблению интенсивности сигналов, прошедших через атмосферу под малыми углами. Слабо исследованы вопросы флуктуаций полной оптической толщины и теплового излучения атмосферы.

Изучение этих вопросов позволит исследовать влагосодержание пограничного слоя атмосферы, а также с помощью аппаратуры, установленной на летательных аппаратах, интегральное содержание водяного пара в стратосфере, т. е. ответить на вопрос, влажная она или сухая, определить содержание малых газовых примесей и исследовать некоторые динамические характеристики атмосферы. Знание этих параметров является также необходимым условием правильного расчета и проектирования целого ряда радиотехнических систем.

1. Среднее значение и флуктуации полной оптической толщины атмосферы

Предположим, что атмосферу можно разбить на сферические слои малой толщины Δz , в пределах которых температура T , влажность ρ и давление P , а следовательно, и коэффициенты поглощения α и преломления n остаются неизменными. Тогда из закона Снелля

[1] нетрудно показать, что элемент пути, проходимый лучом в пределах i -го слоя при зенитном угле θ равен

$$\Delta l_i = r_i / \sqrt{1 - \frac{n_1^2 r_0^2}{n_i^2 r_i^2} \sin^2 \theta} - r_{i-1} / \sqrt{1 - \frac{n_1^2 r_0^2}{n_i^2 r_{i-1}^2} \sin^2 \theta}, \quad (1)$$

где r_0 — радиус Земли; $r_i = r_0 + \sum_{j=1}^i \Delta z_j$ — радиус из центра Земли до верхней границы i -го слоя; $r_{i-1} = r_0 + \sum_{j=1}^{i-1} \Delta z_j$ — радиус из центра Земли до нижней границы i -го слоя; Δz_j — толщина каждого выделенного слоя; n_1 — коэффициент преломления в первом выделенном слое (у Земли); n_i — коэффициент преломления в i -м слое. При этом

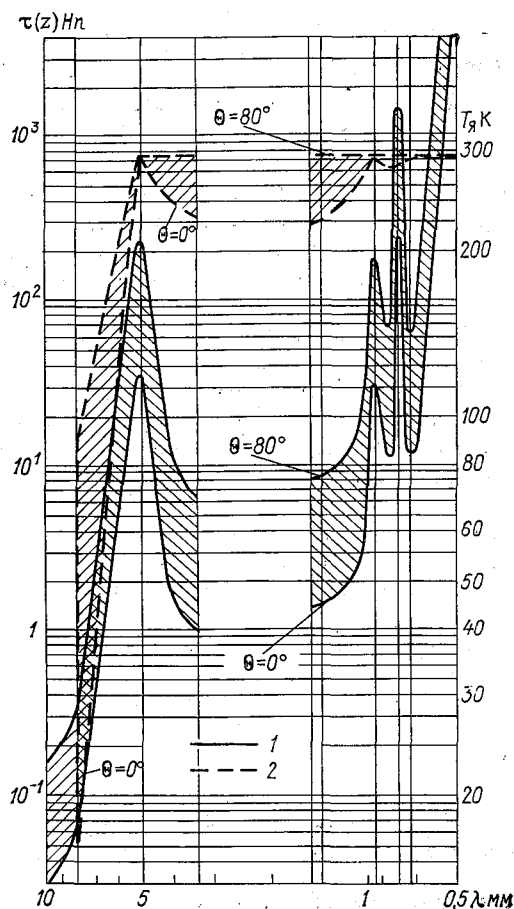


Рис. 1. Зависимость оптической толщины (1) и радиояркостной температуры (2) безоблачной атмосферы от длины волны.

численные значения T , P и ρ в дальнейших расчетах будем выбирать исходя из реальных высотных профилей метеополей.

Исходя из модели сферически слоистой атмосферы, можно записать выражение для ее полной оптической толщины

$$\tau = \sum_{i=1}^k \alpha(z_i) \Delta l_i, \quad (2)$$

где $\alpha(z_i)$ — коэффициент поглощения в i -м слое; Δl_i — элемент пути в i -м слое, определяемый выражением (1); k — число выделенных слоев.

При зенитных углах $\theta \lesssim 80^\circ$ рефракцию можно не учитывать и выражение (2) приобретает вид

$$\tau_0(\theta) = \sec \theta \sum_{i=1}^k \alpha(z_i) \Delta z_i. \quad (3)$$

На рис. 1 представлена зависимость полной оптической толщины безоблачной атмосферы от длины волны. Нижняя граница зачерченной области соответствует зенитному углу $\theta = 0^\circ$, верхняя — углу $\theta = 80^\circ$. Расчеты выполнены для усредненных летних метеоусловий, полученных по результатам зондирования атмосферы за 11-летний период в ГГО [2]. Из представленных зависимостей следует, что в области линий поглощения кислорода и водяного пара, особенно при наблюдении под малыми углами к горизонту, атмосфера становится практически непрозрачной, а для физических наблюдений остаются доступными лишь узкие области «окон» прозрачности. В диапазоне $\lambda = 1,4 \div 3$ мм расчеты не производились.

Заметим, что подобные расчеты можно провести и для любых других метеоусловий, а также учесть влияние различных метеобразований, задав соответствующие α и n в различных выделенных слоях.

Здесь и далее коэффициенты поглощения в атмосферном водяном паре рассчитывались по инженерной методике, разработанной А. Ю. Зражевским и описанной в [3]. Поглощение в кислороде вычислялось по методике, описанной в [4].

Приведенная в качестве примера зависимость $\tau(\lambda)$, а также методика ее расчета может оказаться полезной при оценках энергетики различных систем и условий наблюдений.

Основываясь на теории турбулентного перемешивания [5] можно записать выражение для флуктуаций оптической толщины

$$\begin{aligned} \Delta \tau(z) = & \left(\frac{\partial \tau(z)}{\partial \alpha} \frac{\partial \alpha(z)}{\partial H} + \frac{\partial \tau(z)}{\partial n} \frac{\partial n(z)}{\partial H} \right) \Delta H(z) + \\ & + \left(\frac{\partial \tau(z)}{\partial \alpha} \frac{\partial \alpha(z)}{\partial q} + \frac{\partial \tau(z)}{\partial n} \frac{\partial n(z)}{\partial q} \right) \Delta q(z), \end{aligned} \quad (4)$$

где H — потенциальная температура, а q — удельная влажность, которые можно считать консервативными примесями.

Учитывая малость адиабатического градиента температуры и относительную малость толщины выделенных слоев атмосферы, можно считать в пределах каждого слоя, что

$$H(z_i) \simeq T(z_i)$$

и заменить вычисление производных по H на вычисление производных по T , а величину ΔH на флуктуации ΔT .

Вычисляя входящие в (4) производные и преобразовывая, получаем

$$\Delta \tau = \sum_{i=1}^k [f(T_i) \Delta T(z_i) + f(q_i) \Delta q(z_i)] \Delta l_i, \quad (5)$$

где введены следующие обозначения:

$$f(T_i) = \frac{\partial \alpha(z_i)}{\partial T} - \frac{\alpha(z_i)}{n(z_i)} \frac{1}{\sqrt{(1-R_i^2)(1-R_{i-1}^2)}} \frac{\partial n(z_i)}{\partial T}, \quad (6a)$$

$$f(q_i) = \frac{\partial \alpha(z_i)}{\partial q} - \frac{\alpha(z_i)}{n(z_i)} \frac{1}{\sqrt{(1-R_i^2)(1-R_{i-1}^2)}} \frac{\partial n(z_i)}{\partial q}, \quad (6b)$$

а

$$R_i^2 = \frac{n^2(z_i) r_i^2}{n_1^2 r_0^2} \sec^2 \theta, \quad R_{i-1}^2 = \frac{n^2(z_i) r_{i-1}^2}{n_1^2 r_0^2} \sec^2 \theta. \quad (7)$$

Считая случайные поля температуры и влажности локально изотропными, можно представить их в виде стохастических интегралов Фурье — Стильтьеса и, используя обычную процедуру получения спектра флуктуаций [5] и свойства спектральных амплитуд, записать выражение для спектра флуктуаций оптической толщины атмосферы в следующем виде:

$$\Phi_\tau(x) = \sum_{i=1}^k \Delta l_i^2 [f^2(T_i) \Phi_T(x, z_i) + f^2(q_i) \Phi_q(x, z_i)], \quad (8)$$

где x — волновое число; Φ_T и Φ_q — спектры флуктуаций соответственно температуры и влажности.

Введем кармановскую аппроксимацию спектра флуктуаций температуры и влажности

$$\Phi_{T,q} = 0,033 C_{T,q}^2 L_0^{11/3} (1 + x L_0^2)^{-11/6}, \quad (9)$$

где C_T и C_q — структурные функции флуктуаций соответственно температуры и влажности; L_0 — внешний масштаб турбулентности.

Заметим, что в литературе отсутствуют данные о высотных зависимостях C_T и C_q . Для дальнейших численных оценок принимаем значения C_T и C_q у Земли равными средним значениям: $C_T = 5 \cdot 10^{-2} \text{ К} \cdot \text{см}^{-1/3}$, $C_q = 1,24 \cdot 10^{-5} \text{ см}^{-1/3}$, а их изменение с высотой, исходя из тех соображений, что на границе верхнего выделенного слоя они принимают минимально наблюдавшиеся значения: $C_T = 0,02 \text{ К} \cdot \text{см}^{-1/3}$, $C_q = 0,6 \cdot 10^{-5} \text{ см}^{-1/3}$.

Подставляя (9) в (8), получаем следующее выражение для спектра флуктуаций оптической толщины атмосферы:

$$\Phi_{\tau}(x) = 0,033 \sum_{i=1}^k L_{0i}^{11/3} (1 + x^2 L_{0i}^2)^{-11/6} M_i, \quad (10)$$

где

$$M_i = \Delta l_i^2 [f^2(T_i) C_T^2(z_i) + f^2(q_i) C_q^2(z_i)]. \quad (11)$$

На рис. 2 представлены относительные пространственные спектры флуктуаций оптической толщины атмосферы, рассчитанные для различных длин волн. Из анализа этих зависимостей следует, что нали-

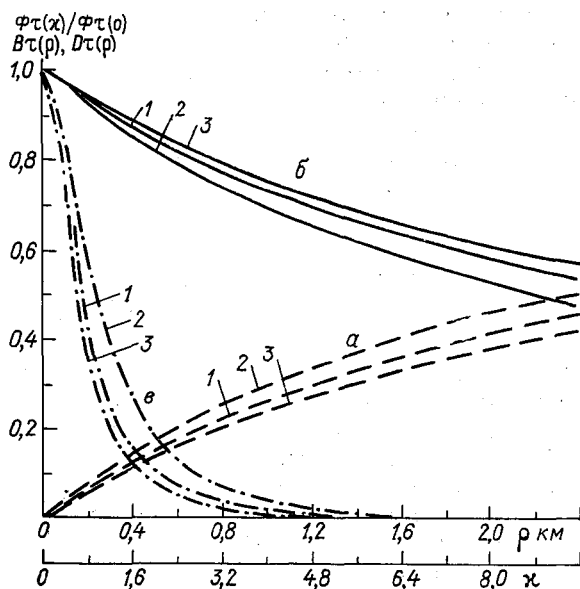


Рис. 2. Относительные пространственные спектры (а), нормированные корреляционные (б) и структурные (в) функции флуктуаций полной оптической толщины атмосферы на различных длинах волн.

1) $\lambda = 8$ мм и $\lambda = 1,36$ мм («окна» прозрачности атмосферы);
2) $\lambda = 5$ мм (линия поглощения O_2); 3) $\lambda = 0,921$ мм (линия поглощения H_2O).

чие поглощения приводит к относительному перераспределению энергии по спектру, причем поглощение в кислороде обуславливает увеличение роли мелкомасштабной части спектра неоднородностей, а поглощение в водяном паре — к увеличению роли крупных вихрей. Физическое объяснение зависимости ширины спектра флуктуаций от природы поглощения рассматривалось в работе [6] и может служить мерой наличия консервативных примесей.

В случае локально-изотропного поля флуктуаций температуры и влажности можно получить структурную функцию флуктуаций полной оптической толщины атмосферы

$$D_{\tau}(\rho) = 0,264 \pi \sum_{i=1}^k L_{0i}^{2/3} M_i I_{1i}, \quad (12)$$

где

$$I_{1i} = \int_0^{\infty} \left(1 - \frac{\sin(\beta_i x)}{\beta_i x}\right) x^2 (1 + x^2)^{-11/6} dx, \quad \beta_i = \rho/L_{0i}, \quad (13)$$

ρ — расстояние разнота точек наблюдения в плоскости, перпендикулярной направлению прихода луча.

В предположении однородного изотропного поля флуктуаций температуры и влажности может быть определена корреляционная функция флуктуаций полной оптической толщины атмосферы

$$B_{\tau}(\rho) = 0,132 \pi \sum_{i=1}^k L_{0i}^{2/3} M_i I_{2i}, \quad (14)$$

где

$$I_{2i} = \int_0^{\infty} \frac{\sin(\beta_i x)}{\beta_i} x (1 + x^2)^{-11/6} dx. \quad (15)$$

На рис. 2 изображены нормированные корреляционные (б) и структурные (а) функции флуктуаций полной оптической толщины атмосферы для различных длин волн. Анализ этих зависимостей показывает, что наличие поглощения, а точнее природа этого поглощения приводят к различному характеру их поведения в пространстве. Полученные зависимости, а также методика их расчета могут оказаться полезными при выборе точек наблюдения и расчетах требуемых размеров апертур антенных систем при организации различных физических исследований.

Дисперсия флуктуаций полной оптической толщины атмосферы выражается зависимостью

$$\sigma_{\tau}^2 = 0,132 \pi \sum_{i=1}^k L_{0i}^{2/3} M_i I_{3i}, \quad (16)$$

где

$$I_{3i} = \int_0^{\infty} x^2 (1 + x^2)^{-11/6} dx. \quad (17)$$

На рис. 3 представлена зависимость дисперсии флуктуаций полной оптической толщины атмосферы от длины волны, рассчитанная при различных значениях зенитных углов, и глубина хаотической модуляции $m = \sqrt{\sigma_{\tau}^2}/\tau$ выражающая относительную величину

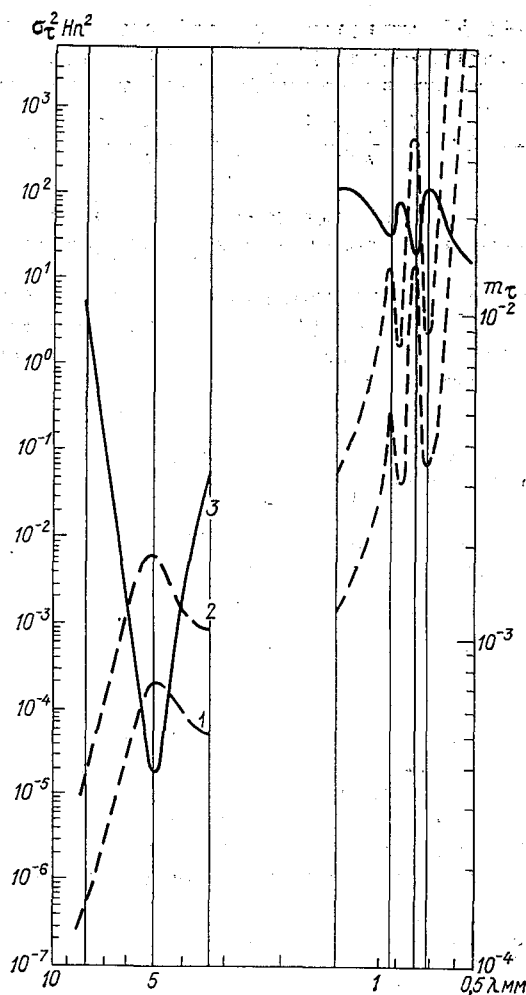


Рис. 3. Зависимость дисперсии флуктуаций полной оптической толщины атмосферы σ^2 при $\theta=0^\circ$ (1) и $\theta=80^\circ$ (2) и глубины хаотической модуляции m (3) от длины волны.

флуктуаций полной оптической толщины. Из анализа этих зависимостей видно, что поглощение приводит к уменьшению глубины хаотической модуляции, причем это уменьшение в наибольшей степени проявляется в области линии поглощения кислорода, где прозрачность атмосферы еще довольно высока. Заметим, что в этой области уменьшение флуктуаций связано с содержанием кислорода и флуктуациями температуры, тогда как на волнах 0,921; 0,79 и 0,538 мм — с содержанием водяного пара в атмосфере и с флуктуациями влажности.

При углах $0 \lesssim 80^\circ$ отпадает необходимость в учете рефракции. В этом случае зависимости (10), (12), (14) и (16) сохраняют свой внешний вид, но вместо величины M_i следует подставлять

$$M'_i = (\Delta z_i)^2 \left[\left(\frac{\partial \alpha(z_i)}{\partial T} \right)^2 C_T^2(z_i) + \left(\frac{\partial \alpha(z_i)}{\partial q} \right)^2 C_q^2(z_i) \right]. \quad (18)$$

2. Средние значения и флуктуации радиояростной температуры атмосферы

Поступая таким же образом, как и в предыдущем разделе, т. е. заменяя $\alpha(z)$, $n(z)$, $T(z)$ и $q(z)$ средними значениями в пределах выделенных слоев, можем записать радиояростную температуру атмосферы в следующем виде

$$T_{\text{я}} = \sum_{i=1}^k T(z_i) (1 - e^{-\alpha(z_i) \Delta l_i}) e^{-\sum_{j=1}^{i-1} \alpha(z_j) \Delta l_j}, \quad (19)$$

где $\Delta l_{i,j}$ определяется соотношением (1).

Без учета рефракции это выражение существенно упрощается

$$T_{\text{я}0} = \sum_{i=1}^k T(z_i) (1 - e^{-\alpha(z_i) \Delta z_i \sec \theta}) e^{-\sec \theta \sum_{j=1}^{i-1} \alpha(z_j) \Delta z_j}. \quad (20)$$

На рис. 1 представлена зависимость радиояростной температуры безоблачной атмосферы от длины волны для тех же условий, что и приведенная зависимость τ от λ . По отношению к приведенной зависимости и методике ее расчета можно сделать те же самые замечания, которые были высказаны относительно $\tau = f(\lambda)$.

Перейдем к флуктуациям радиояростной температуры. Поступая аналогично тому, как это делалось при выводе $\Delta \tau$, получаем

$$\Delta T_{\text{я}} = \left(\frac{\partial T_{\text{я}}}{\partial \alpha} \frac{\partial \alpha(z)}{\partial T} + \frac{\partial T_{\text{я}}}{\partial n} \frac{\partial n(z)}{\partial T} + \frac{\partial T_{\text{я}}}{\partial T} \right) \Delta T(z) + \\ + \left(\frac{\partial T_{\text{я}}}{\partial \alpha} \frac{\partial \alpha(z)}{\partial q} + \frac{\partial T_{\text{я}}}{\partial n} \frac{\partial n(z)}{\partial q} \right) \Delta q(z). \quad (21)$$

Подставляя в (21) значения производных и упрощая, имеем

$$\Delta T_{\text{я}} = \sum_{i=1}^k e^{-\sum_{j=1}^{i-1} \alpha_j} \left\{ \Delta T(z_i) [(1 - e^{-\alpha_i}) + T(z_i) b_{T_i} e^{-\alpha_i}] - \right. \\ \left. - (1 - e^{-\alpha_i}) T(z_i) \sum_{j=1}^{i-1} \Delta T(z_j) b_{T_j} + T(z_i) \times \right. \\ \left. \times \left[\Delta q(z_i) b_{q_i} e^{-\alpha_i} - (1 - e^{-\alpha_i}) \sum_{j=1}^{i-1} \Delta q(z_j) b_{q_j} \right] \right\}, \quad (22)$$

где

$$a_i = \alpha(z_i) \Delta l_i; \quad b_{T_i} = \Delta l_i f(T_i); \quad b_{q_i} = \Delta l_i f(q_i); \quad (23)$$

Δl_i определяется соотношением (1); $a f(T_i)$ и $f(q_i)$ — выражениями (7а) и (7б).

Дальнейшая процедура получения спектра состоит в замене $\Delta T_{\text{я}}$, ΔT и Δq их спектральными разложениями, выделении спектральных амплитуд $dv_{T_{\text{я}}}$ и $dv_{T_{\text{я}}}^*$, в их перемножении и усреднении.

При этом учтем упрощающее предположение, что

$$\langle dv_{T, q(z_i)} dv_{T, q(z_j)}^* \rangle = 0 \quad \text{при } j \neq i,$$

т. е. предполагаем, что спектральные амплитуды случайных полей δ -коррелированы.

Тогда нетрудно показать, что имеет место равенство

$$\begin{aligned} & \left\langle \sum_{i=1}^k \left(a_i - \sum_{j=1}^{i-1} b_j \right) \sum_{i=1}^k \left(a_i^* - \sum_{j=1}^{i-1} b_j^* \right) \right\rangle = \\ & = \sum_{i=1}^k \left[\langle a_i a_i^* \rangle + (k-i)^2 \langle b_i b_i^* \rangle - 2(k-i) \langle a_i b_i^* \rangle \right]. \end{aligned}$$

С учетом всех сделанных выше предположений и последнего соотношения получаем следующее выражение для спектра флуктуаций радиояркой температуры атмосферы

$$\Phi_{T_{\text{я}}}(x) = 0,033 \sum_{i=1}^k L_{0i}^{11/3} (1 + x^2 L_{0i}^2)^{-11/6} N_i, \quad (24)$$

где

$$\begin{aligned} N_i = e^{-2 \sum_{j=1}^{i-1} a_j} & \left(\left\{ (1 - e^{-a_i}) + b_{T_i} T(z_i) [e^{-a_i} - (k-i)(1 - e^{-a_i})] \right\}^2 \times \right. \\ & \left. \times C_T^2(z_i) + b_{q_i} T^2(z_i) [e^{-a_i} - (k-i)(1 - e^{-a_i})]^2 C_q^2(z_i) \right). \end{aligned} \quad (25)$$

На рис. 4 представлены спектры флуктуаций радиояркой температуры атмосферы на различных длинах волн. Из анализа этих зависимостей следует, что, в отличие от спектра флуктуаций полной оптической толщины, спектры флуктуаций радиояркой температуры не зависят от природы поглощения, а определяются только величиной самого поглощения. При этом ширина спектра увеличивается примерно пропорционально поглощению и достигает насыщения на этих длинах волн, т. е. при тех поглощениях, когда сама радиояркая температура атмосферы достигает термодинамической температуры у поверхности Земли.

Структурная функция флуктуаций радиояркой температуры атмосферы выражается зависимостью

$$D_{T_{\text{я}}}(\rho) = 0,264 \pi \sum_{i=1}^k L_{0i}^{2/3} N_i I_{1i}, \quad (26)$$

где I_{1i} определяется интегралом (13).

В случае однородного изотропного поля флуктуаций температуры и влажности может быть также определена и корреляционная функция:

$$B_{T_{\text{я}}}(\rho) = 0,132 \pi \sum_{i=1}^k L_{0i}^{2/3} N_i I_{2i}, \quad (27)$$

где I_{2i} определяется интегралом (15).

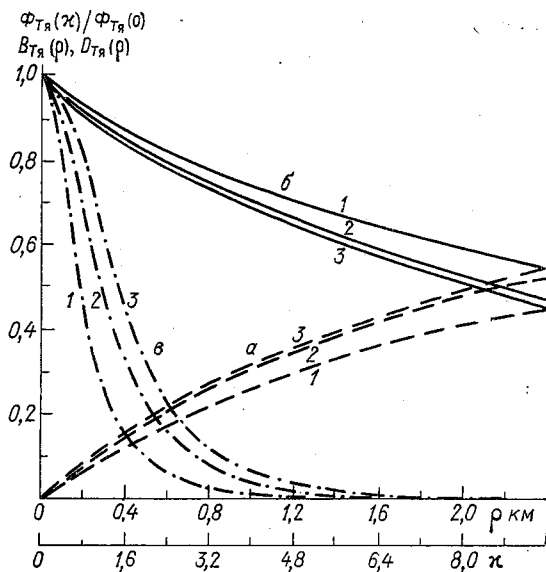


Рис. 4. Относительные пространственные спектры (а), нормированные корреляционные (б) и структурные (в) функции флуктуаций радиояркой температуры атмосферы на различных длинах волн.

1) $\lambda = 8$ мм и $\lambda = 1,36$ мм; 2) $\lambda = 5$ мм; 3) $\lambda = 0,921$ мм.

На рис. 4 представлены нормированные корреляционные и структурные функции флуктуаций радиояркой температуры атмосферы для различных длин волн. Из проведенных расчетов следует, что по мере продвижения от 8 мм в сторону более коротких длин волн наблюдается более быстрый спад корреляции флук-

туаций, причем тенденция к уменьшению корреляции затухает с увеличением поглощения и остается постоянной там, где T_a достигает термодинамической температуры у поверхности Земли. Физически это означает, что оптическая толщина атмосферы столь велика, что вклад в суммарную величину флуктуаций от верхних выделенных слоев ничтожно мал и в формировании флуктуаций принимают участие только нижние слои с ограниченными внешними масштабами турбулентности.

Дисперсия флуктуаций радиояркостной температуры атмосферы равна

$$\sigma_{T_a}^2 = 0,132 \pi \sum_{i=1}^k L_{0i}^{2/3} N_i I_{3i}, \quad (28)$$

где I_{3i} определяется интегралом (17).

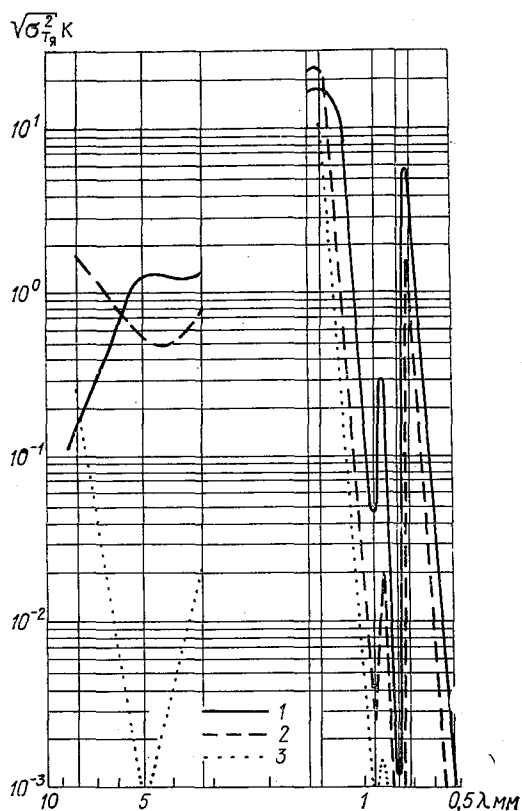


Рис. 5. Зависимость средней квадратической величины флуктуаций радиояркостной температуры атмосферы от длины волны при различных зенитных углах.

1) $\theta = 0^\circ$; 2) $\theta = 40^\circ$; 3) $\theta = 80^\circ$.

На рис. 5 представлена зависимость средней квадратической величины флуктуаций радиояркой температуры от длины волны при различных зенитных углах. Из анализа приведенных данных следует, что существует критическое значение оптической толщины атмосферы, при котором флуктуации радиояркой температуры достигают максимальной величины, а затем начинают уменьшаться. Ясно, что для каждой длины волны существует свой зенитный угол, при котором τ достигает критического значения. Уменьшение флуктуаций с ростом поглощения можно объяснить тем, что по мере роста τ уменьшается вклад в суммарную величину флуктуаций от всех вышележащих от точки наблюдения слоев, т. е. происходит уменьшение эквивалентного расстояния, участвующего в формировании флуктуаций, что согласуется с зависимостью величины флуктуаций от длины трассы распространения волны [5].

Как уже отмечалось, при зенитных углах $\theta \lesssim 86^\circ$ рефракцию можно не учитывать. Без учета рефракции выражения (24) — (28) сохраняют свой внешний вид, но входящие в них обозначения изменяются на следующие:

$$\begin{aligned} a'_i &= \alpha(z_i) \Delta z_i \sec \theta, \\ b'_{T_i} &= \frac{\partial \alpha(z_i)}{\partial T} \Delta z_i \sec \theta, \\ b'_{q_i} &= \frac{\partial \alpha(z_i)}{\partial q} \Delta z_i \sec \theta. \end{aligned} \quad (29)$$

В заключение следует отметить, что проведенные исследования свидетельствуют о том, что флуктуационные характеристики атмосферы могут явиться инструментом дистанционного исследования ее структуры и параметров и несут информацию не только о величине поглощения падающего излучения, но и о природе этого поглощения.

Полученные данные могут также найти применение при выборе рабочего диапазона длин волн и расчете энергетики различных радиосистем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бреховских Л. М. Волны в слоистых средах. Изд. АН СССР, 1957. 501 с.
2. Бобылёв Л. П. и др. Расчет характеристик радиотеплового излучения для различных моделей облачной атмосферы. — «Тр. ГГО», 1975, вып. 328, с. 22—49.
3. Зражевский А. Ю. Методика инженерного расчета поглощения в атмосферных парах воды. XI Всесоюзная конференция по распространению радиоволн. Тезисы докладов, т. 2. Изд. Казанского ун-та, 1975, с. 20—22.
4. Бобылёв Л. П., Щукин Г. Г. Определение интегральных параметров влагосодержания облачной атмосферы непосредственно по значениям радиояркой температуры. См. настоящий сборник.
5. Татарский В. И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. М., «Наука», 1967. 548 с.
6. Арманд Н. А. и др. Флуктуации миллиметровых радиоволн вблизи линии поглощения кислорода с центром на волне 5 мм при распространении в турбулентной атмосфере. — «Радиотехника и электроника», 1973, т. XVIII, № 4, с. 680—686.

Л. П. Бобылев, М. А. Васищева, Г. Г. Щукин

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ ОБЛАЧНОЙ АТМОСФЕРЫ НЕПОСРЕДСТВЕННО ПО ЗНАЧЕНИЯМ РАДИОЯРКОСТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

1. Целью работы является построение и анализ методики раздельного определения интегрального содержания водяного пара в облачной атмосфере (Q) и водозапаса облаков (W) непосредственно по значениям радиояркостной температуры. Эта методика может быть применена для оперативного получения информации о влагосодержании облачной атмосферы, которую можно использовать при решении проблем прогнозирования погоды, влаго- и теплообмена в атмосфере и контроля результатов активных воздействий.

Поэтому важным требованием, предъявляемым к методике, является простота ее практического использования.

2. Ограничимся случаем нисходящего радиотеплового излучения в зените, радиояркостная температура которого представлена выражением

$$T_{\pi} = \int_0^H T(z) \alpha(z) e^{-\tau(z)} dz, \quad (1)$$

где T — термодинамическая температура атмосферы; α — объемный коэффициент поглощения; τ — оптическая толщина; z — вертикальная координата и H — высота «излучающей» атмосферы.

Для решения поставленной задачи выберем наиболее освоенный технически диапазон длин волн $\lambda = 0,3 \div 3$ см, исключая кислородный комплекс на $\lambda \approx 0,5$ см. Индекс, характеризующий спектральную зависимость величин, опустим.

Задача заключается в том, чтобы представить радиояркостную температуру в виде линейной комбинации от некоторых вспомогательных параметров, характеризующих влагосодержание атмосферы. Очевидно, что эта линейная зависимость должна носить корреляционный характер. Учитывая, что в микроволновом диапазоне поглощение излучения производится в основном водяным паром, кис-

лородом и жидкокапельной влагой облаков, и применяя теорему о среднем, выражение (1) можно представить в виде:

$$T_{я} = T_{яQ} e^{-[\tau_W(\xi_1) + \tau_K(\xi_1)]} + T_{яW} e^{-[\tau_Q(\xi_2) + \tau_K(\xi_2)]} + T_{яK} e^{-[\tau_Q(\xi_3) + \tau_W(\xi_3)]}. \quad (2)$$

Здесь

$$T_{яQ} = \int_0^H T(z) \alpha_{H_2O}(z) e^{-\tau_Q(z)} dz, \quad (3)$$

$$T_{яW} = \int_{z_H}^{z_B} T(z) \alpha_w(z) e^{-\tau_W(z)} dz, \quad (4)$$

$$T_{яK} = \int_0^H T(z) \alpha_{O_2}(z) e^{-\tau_K(z)} dz \quad (5)$$

есть вклады в излучение H_2O , жидкокапельной влаги и кислорода; z_H, z_B — границы облачности; α_{H_2O} , α_{O_2} и α_w — коэффициенты поглощения H_2O , O_2 и воды; τ_Q , τ_K и τ_W — соответствующие оптические толщины; $\xi_1, \xi_2 \in [0, H]$; $\xi_3 \in [z_H, z_B]$.

Учитывая зависимость между τ_Q и Q [1, 2], которая имеет вид

$$\tau_Q = aQ, \quad (6)$$

вклад водяного пара в излучение можно представить как

$$T_{яQ} = T_{эQ} [1 - e^{-aQ}]. \quad (7)$$

Величина a есть эффективное значение удельного коэффициента поглощения H_2O . Аналогичным образом выражения для вкладов жидкокапельной влаги и кислорода приводятся к виду:

$$T_{яW} = T_{эW} [1 - e^{-\Psi(t_э)W}], \quad (8)$$

$$T_{яK} = T_{эK} \tau_K, \quad (9)$$

где $\Psi(t_э)$ — коэффициент пропорциональности между τ_W и W , зависящий от эффективной температуры облаков $t_э$ [2].

В формулах (7) — (9) $T_{эQ}$, $T_{эW}$ и $T_{эK}$ — эффективные температуры излучения H_2O , воды и кислорода. В последней формуле экспонента представлена двумя первыми членами разложения ввиду малости τ_K [2, 3] (см. также табл. 2).

Нелинейная зависимость $T_{яQ}$ и $T_{яW}$ от Q и W может привести при определенных условиях к «насыщению» радиоярких температур: $T_{яQ} = T_{эQ}$, $T_{яW} = T_{эW}$. В этом случае определить Q и W по радиояркой температуре невозможно. Оценки, проведенные на основании статистического метеорологического материала для Ленинградской области [2, 3] (см. также табл. 2), показывают следующее.

Среднее значение $\bar{a}$ в выбранном диапазоне спектра не превышает $0,01 \text{ м}^2/\text{кг}$ (для $\lambda \approx 0,3 \text{ см}$). Для условий тропической атмосферы

над океаном значение Q может достигать 60 кг/м^2 [4]. В этом случае $T_{яQ} \approx 0,45 T_{эQ}$, что далеко от насыщения. Это тем более будет оправдываться для случая меньших значений влажности в умеренных широтах над континентом.

Величина Ψ в том же диапазоне не превышает значения $1,6 \text{ м}^2/\text{кг}$ (для $\lambda \approx 0,3 \text{ см}$). Статистические данные для Ленинградской области показывают, что водозапас облаков в этом районе в среднем равен $0,8 \text{ кг/м}^2$, исключая Сб. Отсюда следует, что $T_{яW} \approx 0,7 T_{эW}$,

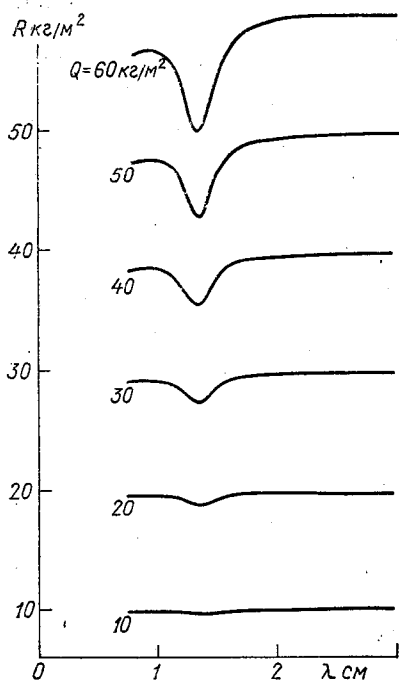


Рис. 1. Зависимость R от λ при разных Q .

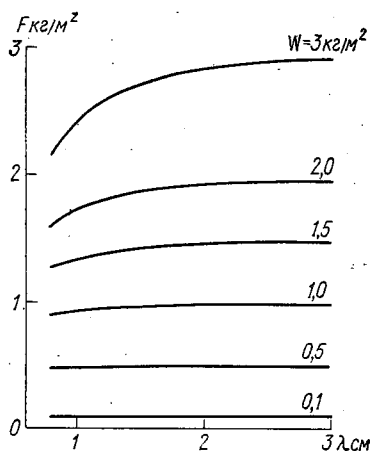


Рис. 2. Зависимость F от λ при разных W .

что уже приближается к насыщению. Если же учесть кучево-дождевую облачность, средний водозапас которой по тем же данным оценивается в $2,1 \text{ кг/м}^2$ (а для тропической облачности еще больше [5]), то в данном случае насыщение уже очевидно. От этого можно избавиться, ограничиться участком спектра $\lambda = 0,78 \div 3 \text{ см}$. На самом деле, в данном случае Ψ не превышает значения $0,26 \text{ м}^2/\text{кг}$ и $T_{яW} \approx 0,5 T_{эW}$. Этот участок спектра в дальнейшем и будем рассматривать.

Для линейаризации выражения для радиояркостной температуры можно ввести вместо Q и W новые величины:

$$R = \frac{1}{a} (1 - e^{-aQ}), \quad (10)$$

$$F = \frac{1}{\Psi} (1 - e^{-\Psi W}). \quad (11)$$

Тогда выражение (2) можно представить в виде

$$T_{\text{я}} = T_{\text{э} Q} a e^{-[\tau_W(\xi_1) + \tau_K(\xi_1)]} R + T_{\text{э} W} \Psi(t_{\text{э}}) e^{-[\tau_Q(\xi_2) + \tau_K(\xi_2)]} F + \\ + T_{\text{э} K} \tau_K e^{-[\tau_Q(\xi_3) + \tau_W(\xi_3)]}. \quad (12)$$

Для решения поставленной задачи необходимо чтобы R и F не зависели от длины волны. Однако в действительности такая зависимость наблюдается. Она представлена на рис. 1 и 2 для наборов значений Q и W . При расчете величин R и F использовались средние климатические значения $\bar{a}$ и $\bar{\Psi}$. Для длин волн 0,8 и 1,4 см (ниже будет показано, что они являются оптимальными) вариации R не превышают 5% для $Q \leq 40$ кг/м², а F 13% для $W \leq 2$ кг/м². Очевидно, что эти вариации, хотя и небольшие, приведут к определенному ухудшению точности.

Эффективную температуру излучения можно представить в виде разности между температурой у поверхности Земли T_0 и поправкой на неизотермичность атмосферы ΔT . Обозначая через ΔT_Q , ΔT_K и ΔT_W эффективные температуры излучения H_2O , O_2 и жидкокапельной влаги, выражение (12) можно окончательно представить в виде

$$\frac{T_{\text{я}}}{T_0} - \varepsilon_K = \varepsilon_R R + \varepsilon_F F, \quad (13)$$

где

$$\varepsilon_R = \left(1 - \frac{\Delta T_Q}{T_0}\right) a e^{-[\tau_W(\xi_1) + \tau_K(\xi_1)]}, \quad (14)$$

$$\varepsilon_F = \left(1 - \frac{\Delta T_W}{T_0}\right) \Psi(t_{\text{э}}) e^{-[\tau_Q(\xi_2) + \tau_K(\xi_2)]}, \quad (15)$$

$$\varepsilon_K = \left(1 - \frac{\Delta T_K}{T_0}\right) \tau_K e^{-[\tau_Q(\xi_3) + \tau_W(\xi_3)]}. \quad (16)$$

Коэффициенты ε_R , ε_F и ε_K можно рассчитать по методу наименьших квадратов, либо на основании статистического метеорологического материала, либо по экспериментальным данным.

Для нахождения двух величин R и F требуется производить измерения на двух длинах волн и затем решать систему уравнений типа (13).

Для перехода от F к W необходимо знание эффективной температуры облаков. В работе [2] предлагается способ оценки $t_{\text{э}}$, основанный на измерении с помощью МРЛ и лидара средней высоты облачности. Эффективная температура считается равной в этом случае температуре среднего слоя облачности, которая находится по значению температуры у поверхности Земли и среднеклиматическому температурному градиенту. Однако расчеты, произведенные на основании статистического материала, показывают, что этот способ дает результат не лучший, чем использование просто среднеклиматических значений $\bar{\Psi}$ для различных моделей облачной атмосферы.

Из табл. 2 видно, что отношение среднеквадратического отклонения σ_{Ψ} к $\bar{\Psi}$ для облачности C_u и C_b равно примерно 4%. Если оценивать ошибку определения Ψ по среднеклиматическим данным в $2\sigma_{\Psi}$, то эта ошибка не превысит 10%.

3. Для выбора оптимальных длин волн, оценки точности методики и расчета коэффициентов ϵ_R , ϵ_F и ϵ_K по МНК на ЭВМ БЭСМ-6 был проведен численный эксперимент.

В качестве моделей облачной атмосферы были использованы две модели с существенно различным водозапасом: модель кучевой облачности (C_u) 8—10 баллов и модель кучево-дождевой облачности (C_b), не дающей осадков. Эти модели были получены для Ленинградской области для летнего сезона способом, аналогичным тому, который описан в работе [3].

Таблица 1

Параметры моделей облачности C_u и C_b для июля по Ленинградской области

Тип облачности	$\bar{z}_H$ км	σ_{z_H} км	$\bar{z}_B$ км	σ_{z_B} км	$\bar{W}$ кг/м ²	σ_W кг/м ²
C_u	1,0	0,8	1,5	0,8	0,17	0,16
C_b	1,0	0,8	3,8	0,9	2,10	0,50

Профили метеопараметров брались по радиозондовым данным Воейково за 14 лет для тех случаев, когда наблюдалась указанная облачность. Параметры облачности, приведенные в табл. 1, были получены из данных самолетного зондирования в Ленинградской области и Риге, а также из литературных данных.

Объем выборки для модели C_u составил 32 радиозонда, а для C_b — 39 радиозондов. Каждому результату радиозондирования присваивалось значение водозапаса и высот облаков в пределах $\pm$ СКО от средних величин.

Расчет объемного коэффициента поглощения H_2O производился по инженерной методике, описанной в работе [6]. Эта методика дает значения α_{H_2O} , близкие к экспериментальным. Коэффициент поглощения O_2 рассчитывался по полной квантовомеханической формуле [7] до значения вращательного квантового числа $N=49$. Частоты резонансных переходов O_2 находились по формуле Циммерера—Мицусимы [8], а полуширины линий по формуле Картера—Митчелла—Ребера [9]. Наконец, коэффициент поглощения жидкокапельной влаги рассчитывался по методике, описанной в работе [3]. Для расчета радиоярких температур и оптических толщин по дискретным радиозондовым данным была применена сплайн-аппроксимация подынтегральных функций [10]. Применение сплайн-аппроксимации позволяет в силу присущих ей свойств существенно упростить расчетную схему и сократить требующееся машинное время.

4. Для нахождения оптимальных длин волн рассчитывалась средняя ошибка определения Q и W

$$\varphi = 1/2 \left\{ \left| \frac{\delta Q}{Q} \right| + \left| \frac{\delta W}{W} \right| \right\}$$

как функция комбинаций длин волн (λ_1, λ_2). Оптимальная комбинация находилась по минимуму этой ошибки. Ошибка в значениях радиояркостной температуры принималась равной $\pm 10\%$; причем ее знак выбирался случайным образом. Для иллюстрации поведения функции $\varphi(\lambda_1, \lambda_2)$ на рис. 3 представлен ее график для модели облачности Си. Анализ полученных зависимостей $\varphi(\lambda_1, \lambda_2)$ для обеих

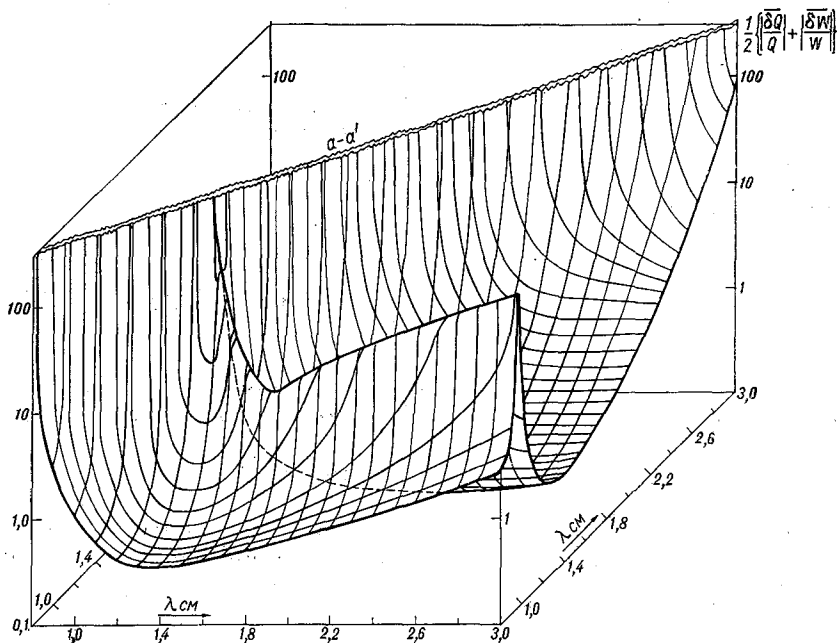


Рис. 3. График зависимости средней ошибки определения Q и W от комбинаций длин волн (λ_1, λ_2) для облачности Си.

$a-a'$ — линия симметрии и разрыва непрерывности.

моделей облачной атмосферы показал, что оптимальными длинами волн являются: $\lambda_{1 \text{ опт}} = 0,8$ см и $\lambda_{2 \text{ опт}} = 1,4$ см. Это, в частности, видно и на рис. 3.

Средняя ошибка определения Q и W на оптимальных длинах волн при ошибке измерения радиояркостных температур 10% при использовании среднеклиматических значений $\Psi(t_0)$ оказалась равной 30% . Это — большая ошибка. Однако сравнительная простота методики и возможность получения информации одновременно о содержании воды в атмосфере в парообразной и жидкокапельной фазах делает целесообразным ее практическое использование.

В табл. 2 представлены полученные в результате расчетов среднеклиматические значения и среднеквадратические отклонения всех величин, использованных при построении данной методики. Величины $\bar{e}_R$, $\bar{e}_F$ и $\bar{e}_K$ есть коэффициенты пропорциональности между эффективными оптическими толщинами и их полными значениями (см. формулы (14) — (16)):

$$\bar{e}_R = \frac{\tau_W(\xi_1) + \tau_K(\xi_1)}{\tau_W + \tau_K}, \quad (17)$$

$$\bar{e}_F = \frac{\tau_Q(\xi_2) + \tau_K(\xi_2)}{\tau_Q + \tau_K}, \quad (18)$$

$$\bar{e}_K = \frac{\tau_Q(\xi_3) + \tau_W(\xi_3)}{\tau_Q + \tau_W}. \quad (19)$$

Как видно из таблицы, наиболее существенные различия между моделями наблюдаются в значениях $\bar{e}_R$, $\bar{e}_K$, $\bar{e}_F$, $\bar{e}_K$, а также в ΔT_W , что вполне естественно. Среднеклиматические значения поправок на неизотермичность не превышают 10% величины температуры воздуха у поверхности земли, что согласуется с выводами, сделанными в работах [11, 12]. Среднеклиматические значения оптической толщины кислорода, а также $\bar{a}$ практически одинаковы для обеих моделей. Мало отличаются и значения поправок на неизотермичность ΔT_Q и ΔT_K . Небольшие величины дисперсий коэффициентов $\bar{e}_R$, $\bar{e}_F$ и $\bar{e}_K$ указывают на существование достаточно хорошей линейной зависимости между радиояростной температурой и параметрами R и F . Отсюда можно сделать вывод о возможности повышения точности методики за счет уменьшения ошибок измерения T_π и применения более точных методов оценки эффективной температуры облаков.

5. Повышение точности методики может быть достигнуто также с помощью применения итерационного способа. Этот способ заключается в следующем. На первом шаге по исходным значениям $T_{\pi 1}$ находятся в результате решения системы уравнений типа (13) приближенные значения Q_1 и W_1 . По ним, используя среднеклиматические значения $\bar{a}$ и $\bar{\Psi}$, вычисляются оптические толщины $\tau_{Q 1}$ и $\tau_{W 1}$, по которым в свою очередь с помощью соотношений (17) — (19) оцениваются эффективные значения оптических толщин. После этого с помощью формул (14) — (16) рассчитываются коэффициенты $\bar{e}_{R 1}$, $\bar{e}_{F 1}$ и $\bar{e}_{K 1}$. При их расчете используются полученные значения эффективных оптических толщин и среднеклиматические значения ΔT_Q , ΔT_W , ΔT_K , $\bar{a}$, $\bar{\Psi}$ и τ_K . Это позволяет уточнить радиояростные температуры с помощью уравнений (13), в которых используются оцененные значения $\bar{e}_{R 1}$, $\bar{e}_{F 1}$ и $\bar{e}_{K 1}$. На втором шаге по уточненным радиояростным температурам $T_{\pi 2}$ вновь находятся Q_2 и W_2 . Далее весь процесс повторяется.

Таблица 2

Среднеклиматические значения и среднеквадратические отклонения величин, использованных
при построении методики определения интегральных параметров влагосодержания облачной атмосферы

Тип облачности	Длина волны, см	$\overline{\varepsilon_R}$	$\overline{\varepsilon_F}$	$\overline{\varepsilon_K}$	σ_{ε_R}	σ_{ε_F}	σ_{ε_K}	$\Delta \overline{T}_Q^K$	$\Delta \overline{T}_{\Psi}^K$	$\Delta \overline{T}_K^K$	$\sigma_{\Delta T_Q^K}$	$\sigma_{\Delta T_{\Psi}^K}$
Cu	0,8	0,00123	0,87722	0,03395	$5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	12,16	11,25	26,82	1,74	1,54
	1,4	0,00530	0,93458	0,01048	$7 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-4}$	14,51	11,26	27,03	2,03	1,54
Cb	0,8	0,00098	0,87751	0,01370	$9 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$	11,33	16,15	25,14	2,06	1,92
	1,4	0,00496	0,81852	0,02091	$1 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-4}$	13,81	16,66	25,34	2,88	1,99

Тип облач- ности	Длина вол- ны, см	$\sigma_{\Delta T_K^K}$	$\overline{\alpha}$ м ² /кг	σ_a м ² /кг	τ_K Нп	σ_{τ_K} Нп	$\overline{\Psi}$ м ² /кг	σ_{Ψ} м ² /кг	$\overline{e_R}$	$\overline{e_F}$	$\overline{e_K}$	σ_{e_R}	σ_{e_F}	σ_{e_K}
Cu	0,8	2,35	0,00147	$4 \cdot 10^{-5}$	0,0341	$8 \cdot 10^{-4}$	0,2142	0,0093	0,27	0,38	0,72	0,03	0,03	0,02
	1,4	2,36	0,00569	$1 \cdot 10^{-4}$	0,0120	$3 \cdot 10^{-4}$	0,0727	0,0034	0,32	0,43	0,67	0,04	0,06	0,04
Cb	0,8	1,97	0,00147	$5 \cdot 10^{-5}$	0,0342	$7 \cdot 10^{-4}$	0,2391	0,0098	0,23	0,55	0,52	0,02	0,02	0,02
	1,4	1,98	0,00581	$1,7 \cdot 10^{-4}$	0,0121	$2 \cdot 10^{-4}$	0,0821	0,0037	0,33	0,57	0,57	0,03	0,03	0,02

Сходимость рассмотренного итерационного процесса, количество шагов и окончательную точность определения Q и W можно исследовать с помощью численного эксперимента на тех же моделях облачной атмосферы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Наумов А. П. О методике определения влагосодержания атмосферы при измерениях поглощения радиоволн вблизи $\lambda = 1,35$ см.—Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана», 1968, т. IV, № 2, с. 170—181.
2. Щукин Г. Г., Бобылев Л. П. К вопросу определения влагосодержания облачной атмосферы по радиотепловому излучению. Тезисы докладов Всесоюзного симпозиума: «Радиофизические исследования атмосферы», Л., 1975, с. 111—113.
3. Бобылев Л. П. и др. Расчет характеристик радиотеплового излучения для различных моделей облачной атмосферы.—«Тр. ГГО», 1975, вып. 328, с. 22—49.
4. Обухов А. М. и др. Исследование атмосферы по собственному радиотепловому излучению на ИСЗ «Космос-243». — «Космические исследования», 1971, т. 9, вып. 1, с. 66—73.
5. Аквилонова А. Б., Кутуза Б. Г., Митник Л. М. Широтное распределение интегральной водности облаков над земным шаром по данным измерений с ИСЗ «Космос-243». — Изв. АН СССР. «Физика атмосферы и океана». 1971, т. 7, № 2, с. 139—144.
6. Зражевский А. Ю. Методика инженерного расчета поглощения в атмосферных парах воды. Тезисы докладов XI Всесоюзной конференции по распространению радиоволн. Изд. Казанского ун-та, 1975, ч. II, с. 20—22.
7. Van Vleck J. H. The Absorption of Microwaves by Oxygen.—Physical Review", 1947, vol. 71, N 7, p. 413—424.
8. Zimmerer R. W., Mizushima M. Precise Measurment of the Microwave Absorption Frequencies of the Oxygen Molecule and the Velocity of Light.— „Phys. Review", 1961, vol. 121, N 1, p. 152—155.
9. Carter C. J., Mitchell R. Z., Reber E. E. Oxygen Absorption Measurements in the Lower Atmosphere.—„J. Geoph. Res." 1968, vol. 73, N 10, p. 3113—3120.
10. Уолт Д. ж. и др. Теория сплайнов и ее приложения. М., «Мир», 1972. 316 с.
11. Жевакин С. А., Наумов А. П. К расчету коэффициента поглощения в атмосферном кислороде. — «Радиотехника и электроника», 1965, т. 10, № 6, с. 987—996.
12. Кисляков А. Г. Эффективная длина пути и средняя температура атмосферы. — «Радиофизика», 1966, т. 9, № 3, с. 451—461.

Н. Д. Попова, Г. Г. Щукин

К МЕТОДИКЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОФИЛЯ ВОДНОСТИ В ОБЛАКАХ МЕТОДОМ ПАССИВНО-АКТИВНОЙ РАДИОЛОКАЦИИ

В настоящее время предложено достаточно большое число моделей отдельного конвективного облака. Критерием работоспособности этих моделей является степень согласия данных теоретических расчетов с данными наблюдений за такими характеристиками облаков, как вертикальная мощность облака, высота его нижней границы, а также водность облака, интенсивность выпадающих осадков и др. Из перечисленных характеристик наиболее чутко реагируют на процессы, происходящие в облаке, водность, спектр и концентрация облачных частиц. Водность облака, которая является третьим моментом функции распределения капель по размерам, может быть использована для оценки взаимодействия облака с окружающей средой, а профиль водности и его изменчивость во времени позволяют проследить и за изменением характера взаимодействия облака с окружением. Кроме того, данные об изменчивости профиля водности не только во времени, но и в пространстве существенно расширяют наши знания о тонкой структуре облаков, о процессах, протекающих в облаках, и позволят уточнить существующие модели облаков. Наконец, данные о водности являются исходными для оценки ресурсов облаков как источников влаги. Все это говорит о важности получения данных о водности облаков.

В настоящее время не существует метода, позволяющего оперативно получать информацию о распределении водности в облаках. Существующие самолетные измерители водности дают информацию, осредненную за большой промежуток времени (десятки минут), что обусловлено, во-первых, инерцией самого прибора и, во-вторых, временем самолетного зондирования облачности.

Рассмотрим возможность применения пассивно-активного радиолокационного метода для исследования вертикального распределения водности в жидко-капельных облаках без привлечения данных об их микроструктуре.

Пассивный радиолокатор позволяет определить интегральное значение водности в облаке W с точностью не хуже 20% [1]. С по-

мощью радиолокационной аппаратуры можно получить профиль отражаемости Z и геометрические характеристики облака. В работе [2] подробно проанализированы эмпирические соотношения для определения водности облаков w по их радиолокационной отражаемости Z . Эти формулы имеют вид:

$$Z = A w^b, \quad (1)$$

где A и b — постоянные величины.

Исходя из определения водности облаков и их радиолокационной отражаемости, с помощью гамма-функций можно получить следующие выражения для Z и w :

$$Z = \frac{N_0 \Gamma(\mu + 7)}{\beta^6 \Gamma(\mu + 1)}, \quad (2)$$

$$w = \frac{\pi}{6} \frac{N_0}{\beta^3} \rho \frac{\Gamma(\mu + 4)}{\Gamma(\mu + 1)} \cdot 10^{-3}, \quad (3)$$

где $[Z] = \text{мм}^6/\text{м}^3$; $[N_0] = 1/\text{м}^3$ — концентрация капель; μ и $[\beta] = 1/\text{мм}$ — параметры распределения капель по размерам; $[w] = \text{г}/\text{м}^3$; $\rho = 1 \text{ г}/\text{см}^3$ — плотность воды.

Из формул (2) и (3), исключая поочередно N_0 и β и опуская ρ , можно получить два выражения для соотношений Z и w :

$$Z = \frac{36 \cdot 10^6 \Gamma(\mu + 7) \Gamma(\mu + 1)}{\pi^2 N_0 [\Gamma(\mu + 4)]^2} w^2, \quad (4)$$

$$Z = \frac{6 \cdot 10^3 \Gamma(\mu + 7)}{\pi \beta^3 \Gamma(\mu + 4)} w. \quad (5)$$

На основании формул (4) и (5) можно сделать вывод, что параметр b в выражении (1) может меняться от 1 до 2. Используя данные пассивно-активного радиолокационного зондирования (W , Z_i — отражаемость в каждом i -том слое облака, l — протяженность облака в направлении зондирования) и придавая параметру b постоянное значение, можно определить коэффициент A для каждого зондирования.

Считая, что формула (1) справедлива для средних значений входящих в нее величин, запишем ее в следующем виде:

$$\sqrt[b]{Z} = \sqrt[b]{A w}, \quad (6)$$

где

$$\sqrt[b]{Z} = \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt[b]{Z_i}}{n}, \quad \bar{w} = \frac{W}{l}.$$

Переходя к данным зондирования, из формулы (6) можно получить выражение для A

$$\sqrt[b]{A} = \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt[b]{Z_i}}{n} \cdot \frac{l}{W}. \quad (7)$$

Обозначая $\frac{\sum_{i=1}^n \sqrt[b]{Z_i}}{n} l$ через L , на основании формул (1) и (7) получим выражение для расчета водности в облаке вдоль направления зондирования:

$$w_i = \frac{\sqrt[b]{Z_i}}{L} W. \quad (8)$$

По этой методике был проведен численный эксперимент. Исходными параметрами являлись профиль отражаемости Z_i и интегральное значение водности W . Затем, меняя значение b от 1 до 2 с шагом 0,1, определялись коэффициенты A и рассчитывались соответствующие им профили водности.

На рис. 1 приведены два профиля водности для крайних значений b , равных 1 и 2. Для этих случаев получено максимальное различие в профилях водности.

В отдельных точках значения водности различаются на $\pm 60\%$. Если принять $b=1,5$, то это различие уменьшится в 2 раза.

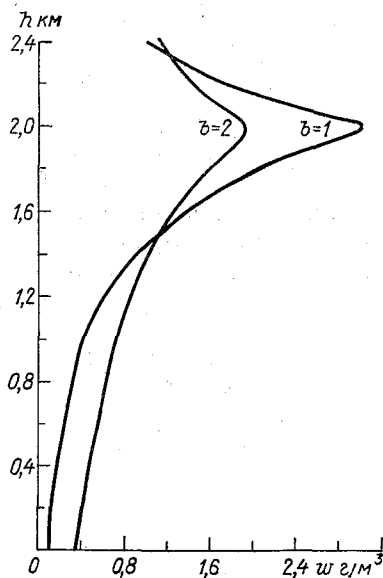


Рис. 1. Профили водности для $b=1$ и $b=2$.

Оценим ошибки в определении водности облаков. Логарифмически продифференцировав формулу (8), получим выражение для относительной погрешности $\Delta w_i/w_i$:

$$\frac{\Delta w_i}{w_i} = \frac{1}{b} \frac{\Delta Z_i}{Z_i} + \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta W}{W}. \quad (9)$$

Оценим $\Delta L/L$:

$$L = \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt[b]{Z_i}}{n} l = \sqrt[b]{\bar{Z}} l.$$

Тогда

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{1}{b} \frac{\Delta Z}{Z} + \frac{\Delta l}{l}.$$

Подставляя последнее выражение в (9), получим:

$$\frac{\Delta w_i}{w_i} = \frac{2}{b} \frac{\Delta Z_i}{Z_i} + \frac{\Delta W}{W} + \frac{\Delta l}{l}. \quad (10)$$

Согласно работе [2], величина погрешности $\Delta Z/Z$ составляет около 60%, а величина $\Delta l/l$ находится в пределах 2—4%.

Тогда максимальная относительная погрешность в определении единичного значения w_i будет равна

$$\begin{aligned} \Delta w_i/w_i &= 2 \times 0,6 + 0,20 + 0,04 = 1,44 \quad \text{при } b = 1, \\ \Delta w_i/w_i &= 0,6 + 0,20 + 0,04 = 0,84 \quad \text{при } b = 2. \end{aligned}$$

Таким образом, основной вклад в погрешность определения водности облаков вносят ошибки измерений радиолокационной отражаемости, а также выбор параметра b , который, очевидно, надо дифференцировать по типам облаков. Для недождевых облаков $b=2$, при этом учитывается общая водность; для кучево-дождевых облаков при $b=1,46$ учитывается водность крупных капель; для слоисто-дождевых предлагается $b=1,07$ [2].

Данная методика позволяет определять коэффициент A для каждого зондирования, т. е. учитывать динамику развития облака за малые промежутки времени порядка нескольких секунд.

Для окончательного ответа о перспективности предложенной методики необходимо проведение эксперимента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бобылев Л. П. и др. Исследование водности облаков с помощью трехсантиметрового радиометра. — «Тр. ГГО», 1975, вып. 328, с. 50—55.
2. Степаненко В. Д. Радиолокация в метеорологии. Л., Гидрометеиздат, 1973. 343 с.

**Б. М. Воробьев, Г. Я. Наровлянский,
В. Д. Степаненко**

К РАСЧЕТУ ВЕРОЯТНОСТИ ЗАТУХАНИЯ САНТИМЕТРОВЫХ РАДИОВОЛН В ДОЖДЯХ ДЛЯ ОТДЕЛЬНЫХ РАЙОНОВ ЕТС

Постоянное совершенствование и все более широкое использование различных радиотехнических систем и средств связи требуют обстоятельного изучения влияния метеорологических условий на устойчивость и надежность их эксплуатации.

Среди метеорологических факторов, влияющих на эффективность использования радиолокационных систем, наибольшее значение имеют атмосферные осадки, оценке влияния которых на затухание радиоволн в различных районах ЕТС посвящена данная работа.

1. Суммарная продолжительность осадков различной интенсивности

При оценке влияния атмосферных осадков на затухание электромагнитных излучений важно знать, какую долю времени занимают осадки различной интенсивности, в том числе такой, которая оказывает наиболее существенное влияние на ослабление радиосигналов.

По результатам плевниографических измерений на большом числе станций Европейской территории СССР за 5-летний период (1965—1969 гг.) был вычислен ряд показателей, характеризующих суммарную продолжительность осадков, по градациям их интенсивности.

Обработка материалов производилась по характерным точкам на плевниограмме. При этом между каждой парой характерных точек определялась интенсивность и соответствующая ей продолжительность осадков. Для всех случаев, когда интенсивность попадала в данную градацию, подсчитывалась суммарная продолжительность осадков, которая делилась на число лет и рассматривалась как среднегодовая суммарная продолжительность осадков данной интенсивности t_j . Суммирование по всем градациям дает среднегодовую суммарную продолжительность жидких осадков T . Поэтому повторяемость (вероятность) суммарной продолжительности осадков данной интенсивности P_j может быть выражена как отношение t_j к T .

Таблица 1

Распределение осадков по градациям интенсивности

ΔI_j мм/мин	Мурманск		Витебск	
	P_j	t_j мин	P_j	t_j мин
0,00—0,04	$9,82 \cdot 10^{-1}$	16047,0	$9,38 \cdot 10^{-1}$	14262,9
0,04—0,08	$9,01 \cdot 10^{-3}$	147,3	$2,64 \cdot 10^{-2}$	400,8
0,08—0,12	3,45	56,5	1,09	165,2
0,12—0,16	1,91	31,2	$6,42 \cdot 10^{-3}$	97,7
0,16—0,20	1,20	19,6	4,30	65,4
0,20—0,24	$8,04 \cdot 10^{-4}$	13,1	3,08	46,8
0,24—0,28	5,62	9,2	2,29	34,9
0,28—0,32	4,05	6,6	1,76	26,7
0,32—0,36	2,98	4,9	1,38	20,9
0,36—0,40	2,22	3,6	1,09	16,7
0,40—0,44	1,68	2,8	$8,80 \cdot 10^{-4}$	13,4
0,44—0,48	1,28	2,1	7,15	10,8
0,48—0,52	$9,89 \cdot 10^{-5}$	1,6	5,85	8,9
0,52—0,56	7,67	1,3	4,83	7,4
0,56—0,60	5,98	0,9	4,00	6,1
0,60—0,64	4,69	0,8	3,34	5,1
0,64—0,68	3,70	0,6	2,80	4,2
0,68—0,72	2,92	0,5	2,35	3,6
0,72—0,76	1,32	0,4	1,98	3,0
0,76—0,80	1,84	0,3	1,68	2,6
0,80—0,84	1,47	0,2	1,42	2,1
0,84—0,88	1,18	0,2	1,21	1,9
0,88—0,92	$9,45 \cdot 10^{-6}$	0,2	1,03	1,5
0,92—0,96	7,59	0,1	$8,81 \cdot 10^{-5}$	1,4
0,96—1,00	6,11	0,1	7,53	1,1
1,00—1,20	$1,68 \cdot 10^{-5}$	0,3	$2,44 \cdot 10^{-4}$	3,7
1,20—1,40	$5,93 \cdot 10^{-6}$	0,05	1,16	1,8
1,40—1,60	2,14	0,03	$5,69 \cdot 10^{-5}$	0,9
1,60—1,80	$7,88 \cdot 10^{-7}$	0,015	2,83	0,4
1,80—2,00	2,94	0,005	1,43	0,2

Анализ эмпирических данных распределения суммарной продолжительности осадков по градациям их интенсивности показывает, что подавляющая доля времени, занятого жидкими осадками, приходится на интенсивность до 1,5 мм/ч. По мере роста интенсивности вероятность осадков резко убывает. Это особенно четко видно на при-

мере северных станций (Мурманск), где повторяемость осадков интенсивностью $I \geq 1,6$ мм/ч составляет лишь 4—8%. На юге повторяемость такой интенсивности достигает 20% (Ставрополь).

Изучение эмпирических распределений продолжительности осадков разной интенсивности по большому числу станций ЕТС привело к выводу о том, что выравнивание этих распределений наиболее целесообразно производить с помощью кривой Пирсона III типа, для которой уравнение плотности вероятности имеет вид:

$$f(x) = \frac{\gamma^{\gamma}}{\Gamma(\gamma)(m-l)} \left(\frac{x-l}{m-l} \right)^{\gamma-1} \cdot \exp\left(-\gamma \frac{x-l}{m-l}\right) \quad \text{при } x > l, \quad (1)$$

где m — среднее арифметическое значение интенсивности осадков; параметры γ и l вычисляются по формулам:

$$\gamma = \frac{L}{C_s^2}, \quad l = m \left(1 - \frac{2C_v}{C_s} \right),$$

где C_v — коэффициент вариации; C_s — коэффициент асимметрии. Формула (1) использовалась как для вычисления выраженной в долях единицы вероятности P_j некоторой градации интенсивности осадков ΔI_j , так и для расчета суммарной продолжительности осадков данной интенсивности t_j , которая получена по формуле

$$t_j = P_j T. \quad (2)$$

Результаты расчетов на примере станций Мурманск и Витебск приведены в табл. 1.

2. Погонный и интегральный коэффициенты затухания радиоволн в дождях с различной микроструктурой

Как известно [1, 2], ослабление электромагнитных волн в атмосфере происходит вследствие их рассеяния и поглощения гидromетео-реорными частицами (каплями дождя, тумана, снегом, градом и др.), а также резонансного поглощения молекулами атмосферных газов. Для волн сантиметрового диапазона, исключая интенсивную полосу поглощения водяным паром на $\lambda = 1,35$ см, ослаблением атмосферными газами и туманом можно пренебречь по сравнению с затуханием, вызываемым атмосферными осадками.

Основными параметрами, влияющими на ослабление сантиметровых волн в дождях, следует считать [3—5] интенсивность дождя и длину волны излучения. Функция распределения капель дождя по размерам, их форма и температура, хотя и оказывают некоторое влияние на радиолокационные свойства дождя, однако оно носит второстепенный характер. В связи с этим при конкретных расчетах погонного коэффициента затухания γ (дБ/км) была использована полуэмпирическая формула вида

$$\gamma = KI^{\alpha}, \quad (3)$$

где I — интенсивность дождя (мм/ч); K, α — некоторые коэффициенты, зависящие от длины волны и температуры капель.

Таблица 2

Численные значения коэффициентов K и α по данным Атласа — Улбриха

λ см	$t^{\circ}\text{C}$			
	0	+10	+18	+40
$K \cdot 10^3$				
2	31,2	29,6	29,1	26,7
6	1,757	1,2000	0,988	0,571
α				
2	1,134	1,152	1,170	1,212
6	1,101	1,134	1,146	1,131

Таблица 3

Значения погонного коэффициента затухания γ (дБ/км) радиоволн длиной 2 и 6 см в дождях с различной интенсивностью I и температурой t

I мм/ч	$t^{\circ}\text{C}$			
	0	10	18	40
$\lambda = 2$ см				
1	$3,12 \cdot 10^{-2}$	$2,96 \cdot 10^{-2}$	$2,92 \cdot 10^{-2}$	$2,67 \cdot 10^{-2}$
2	8,86	6,57	6,55	6,18
5	$1,94 \cdot 10^{-1}$	$1,89 \cdot 10^{-1}$	$1,91 \cdot 10^{-1}$	$1,88 \cdot 10^{-1}$
10	4,24	4,20	4,31	4,35
20	9,33	9,31	9,69	9,99
30	$1,48 \cdot 10^0$	$1,49 \cdot 10^0$	$1,56 \cdot 10^0$	$1,65 \cdot 10^0$
50	2,63	2,68	2,83	3,06
100	5,18	5,95	6,37	7,09
150	9,16	9,50	$1,02 \cdot 10$	$1,16 \cdot 10$
$\lambda = 6$ см				
1	$1,67 \cdot 10^{-3}$	$1,20 \cdot 10^{-3}$	$9,88 \cdot 10^{-4}$	$5,71 \cdot 10^{-4}$
2	3,77	2,64	$2,18 \cdot 10^{-3}$	$1,25 \cdot 10^{-3}$
5	$1,03 \cdot 10^{-2}$	7,45	6,25	3,54
10	2,21	$1,64 \cdot 10^{-2}$	$1,38 \cdot 10^{-2}$	7,76
20	4,76	3,59	3,06	$1,71 \cdot 10^{-2}$
30	7,43	5,68	4,87	2,70
50	$1,30 \cdot 10^{-1}$	$1,01 \cdot 10^{-1}$	8,74	4,82
100	2,80	2,23	$1,94 \cdot 10^{-1}$	$1,06 \cdot 10^{-1}$
150	4,38	3,52	3,08	1,67

Значения коэффициентов K и α для длин волн 2 и 6 см представлены в табл. 2. Они были получены недавно в обзорной работе Атласа и Улбрича [5] при использовании экспериментальных данных Маршалла — Пальмера по спектрам капель в дождях, а также результатов вычислений радиолокационных сечений ослабления для отдельных капель по точным формулам Ми.

Результаты расчетов по формуле (3) для дождей с различной интенсивностью и температурой представлены в табл. 3.

Отметим прежде всего существенно меньшие (примерно на полтора порядка) значения γ на $\lambda=6$ см, по сравнению с $\lambda=2$ см. Так, например, дождь интенсивностью 10 мм/ч и температурой капель 10°C вызывает ослабление радиоволн длиной 6 см на 0,016 дБ/км, в то время как на $\lambda=2$ см затухание в аналогичных условиях становится равным 0,42 дБ/км, т. е. почти в 30 раз больше.

Интересно отметить влияние температуры дождя на затухание в нем радиоволн. Для $\lambda=2$ см это влияние, особенно в диапазоне интенсивности от 1 до 30 мм/ч, практически отсутствует. Лишь в области очень больших интенсивностей дождя, превышающих 50—100 мм/ч, оно становится заметным. Любопытно также, что в области малых значений интенсивности ($I < 6$ —10 мм/ч) повышение температуры капель приводит к уменьшению коэффициента затухания, в то время как при больших интенсивностях наблюдается обратная зависимость — увеличение γ с ростом температуры.

Совершенно иной характер температурной зависимости коэффициента ослабления на $\lambda=6$ см. Во-первых, влияние температуры здесь выражено значительно сильнее. В среднем изменение γ при вариации температуры от 0 до 40°C составляет 50—70% по отношению к γ при $t=+10^\circ\text{C}$. Кроме того, во всем рассматриваемом диапазоне интенсивности ($1 \text{ мм/ч} < I < 200 \text{ мм/ч}$) повышение температуры вызывает уменьшение ослабления.

При расчетах интегрального коэффициента затухания Γ (дБ) полагаем, что вся наземная трасса длиной L (км) заполнена однородными по интенсивности жидкими осадками. При таком допущении расчетная формула для Γ может быть представлена в виде

$$\Gamma(I, \lambda) = \int_0^L \gamma(I, \lambda) dl = \gamma(I, \lambda) L. \quad (4)$$

При расчетах по формуле (4) температура дождя принималась равной во всех случаях $+18^\circ\text{C}$ — типичное ее значение при интенсивных ливневых дождях, вызывающих наиболее сильное затухание радиолокационных сигналов.

Закономерности поведения интегрального коэффициента ослабления сравнительно просты и целиком повторяют свойства рассмотренной выше функции $\gamma(I, \lambda)$.

3. Продолжительность затуханий сантиметровых радиоволн в дождях для отдельных районов ЕТС

Представленные в табл. 3 значения погонного коэффициента затухания в дождях сами по себе не позволяют судить о надежности работы наземной линии радиосвязи в определенном районе. Для того чтобы связать затухание в дожде с надежностью работы канала связи, необходимо располагать статистическими данными о продолжительности (вероятности) выпадения дождя той или иной интенсивности для разных районов.

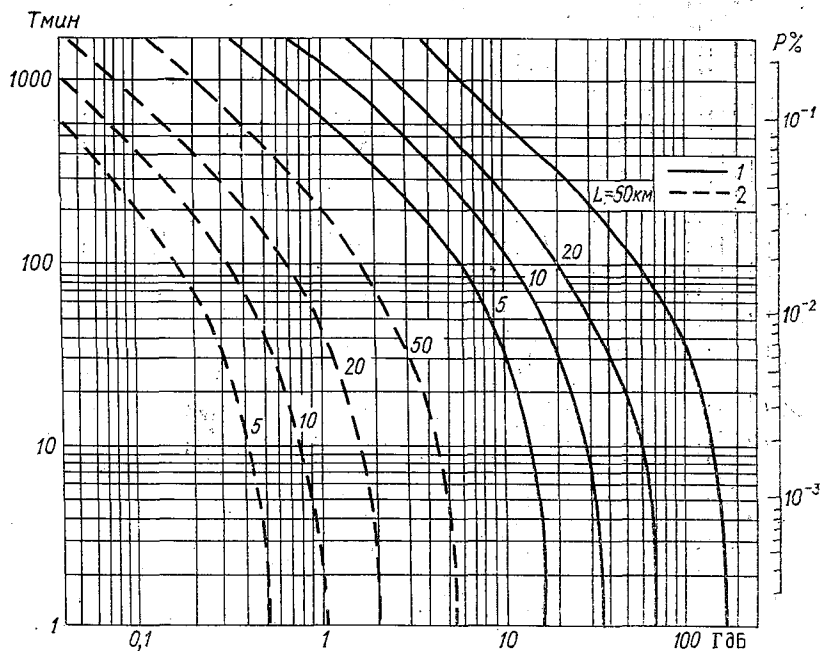


Рис. 1. Среднегодовая продолжительность T (либо вероятность P) затуханий, превышающих заданный уровень Γ , на горизонтальных трассах различной протяженности L для длин волн 2 см (1) и 6 см (2). Москва.

Выше была рассмотрена методика статистической обработки данных об осадках и приведены примеры распределения суммарной продолжительности жидких осадков разной интенсивности для отдельных физико-географических районов ЕТС. Используя эти данные, а также рассчитанные по (3) и (4) значения коэффициентов затухания, можно построить дифференциальную либо интегральную функции распределения затуханий.

Типовые примеры таких построений показаны на рис. 1—2. Здесь представлены значения среднегодовой продолжительности, (T мин) либо вероятности ($P\%$) затуханий, превышающих опре-

деленный уровень (Г дБ) на трассах различной протяженности (L км), заполненных однородными по интенсивности жидкими осадками.

На рис. 1 показана статистика затуханий на трассах различной длины для района Москвы.

Видно, в частности, что трассам с большой протяженностью соответствуют и большие величины затуханий, а затухание на $\lambda=6$ см

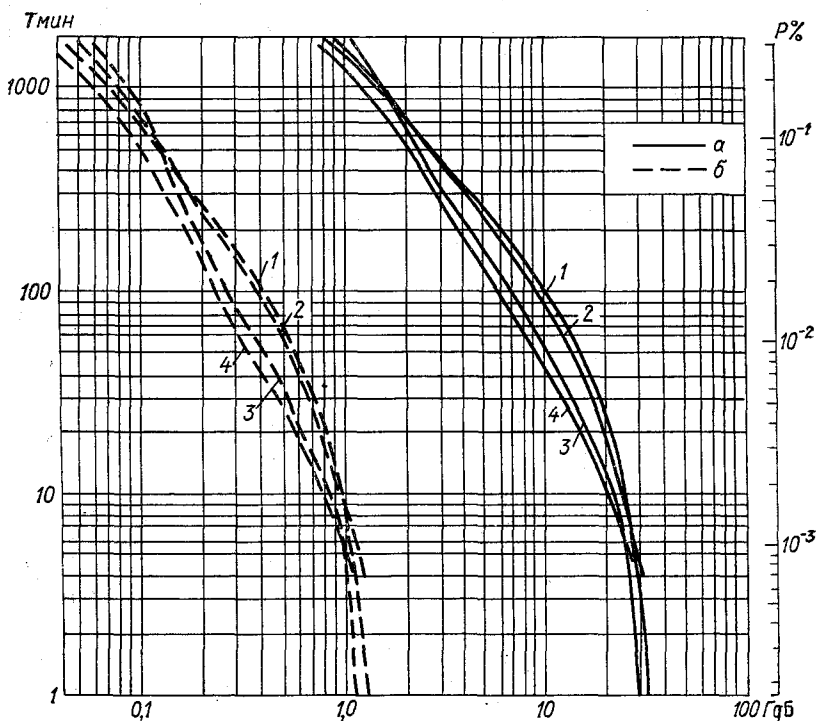


Рис. 2. Среднегодовая продолжительность затуханий на 10-км трассе для пунктов, находящихся в близких климатических условиях для длин волн 2 см (а) и 6 см (б).

1 — Москва, 2 — Серпухов, 3 — Дмитров, 4 — Ковров.

намного меньше, чем на $\lambda=2$ см. Из рис. 1 видно также, что продолжительность (либо вероятность) затуханий резко уменьшается по мере увеличения заданного значения коэффициента затухания. Так, например, на трассе длиной 50 км радиоизлучение с $\lambda=2$ см будет затухать на 10 дБ и более в течение времени около 850 мин за год, что составляет около 0,16% всего годового времени. В аналогичных условиях затухание в 50 дБ и более будет встречаться в течение времени около 100 мин (0,019%), а 100 дБ и более — лишь 20 мин, что составляет всего 0,004% годового времени.

С укорочением трассы продолжительность затуханий, превышающих определенный уровень, также довольно быстро убывает.

Так, затухание 20 дБ и более будет встречаться на $\lambda=2$ см в течение времени около 350 мин (0,065% годового) на трассе длиной 50 км, 100 мин (0,019%) на 20-км трассе и всего 22 мин (около 0,004%) на трассе длиной 10 км.

Значительно меньшие и по величине и продолжительности затухания испытывают радиоволны в диапазоне 6 см. Так, даже на самой длинной трассе протяженностью 50 км практически не встречаются значения затуханий, превышающих 6 дБ, а затухания 5 дБ и более наблюдаются лишь в течение времени около 9 мин (0,0016% годового).

Рассмотренные выше особенности статистики затухания относятся к заданному району. Представляет определенный интерес сравнить эти характеристики для разных районов. В качестве такого примера на рис. 2 показана продолжительность затуханий на 10-км трассе для четырех пунктов Московской области. Близость климатических условий (в том числе и режима жидких осадков) обуславливает в конечном итоге и сходство статистических характеристик затухания. Наибольшие различия продолжительности затуханий приходятся на интервал 3—20 дБ. Например, затухание 10 дБ и более в Москве наблюдается в течение примерно 100 мин за год, а в Коврове — примерно 45 мин.

Представленные на рис. 2 данные относятся к трассе протяженностью 10 км. Для трасс другой длины эти закономерности сохранятся, хотя абсолютные значения статистических характеристик затухания, естественно, будут иными.

Существенно большие различия продолжительности затуханий, как показывает анализ, имеют место для пунктов, находящихся в различных по климатическим условиям районах. Использование приведенных выше характеристик затухания радиоволн по большому числу станций делает принципиально возможным районирование исследуемой территории по степени затухания сантиметровых радиоволн под влиянием осадков на трассах различной протяженности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Распространение ультракоротких радиоволн. Пер. с англ. Под ред. Б. А. Шиллерова. М., «Сов. Радио», 1954.
2. Степаненко В. Д. Радиолокация в метеорологии. Л. Гидрометеиздат, 1973. 343 с.
3. Розенберг В. И. Рассеяние и ослабление электромагнитных волн атмосферными частицами. Л., Гидрометеиздат, 1972. 348 с.
4. Атлас Д. Успехи радарной метеорологии. Пер. с англ. Л., Гидрометеиздат, 1967. 150 с.
5. Atlas D., Ulbrich G. W. The physical basis for attenuation—rainfall relationships and the measurement of rainfall parameters by combined attenuation and radar methods.— „I. Rech. Atmosph.“, 1974, vol. VIII, N 1—2, p. 275—298.

В. В. Березкин, М. Р. Ватъян, Е. Д. Либровский

**ИССЛЕДОВАНИЕ
НЕКОТОРЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ
ЛИВНЕВЫХ И ГРАДОВЫХ ОБЛАКОВ
НА СЕВЕРНОМ КAVKAZE**

В данной работе изучается информативность отдельных радиолокационных параметров ливневых и градовых облаков и комплексов (групп) этих же параметров с целью выявления наиболее информативных.

В дальнейшем ливневыми облаками будем называть грозовые облака, из которых выпадали жидкие осадки; градовыми — грозовые облака, из которых выпадали твердые осадки диаметром более 0,4 см.

Материалы исследования

Материалами исследования послужили: площади радиоэхо изолированных ливневых и градовых облаков, снятые с индикатора кругового обзора (ИКО) РЛС; радиолокационные характеристики кучево-дождевых облаков, зафиксированные в журналах наблюдений отрядов Северо-Кавказской противоградовой экспедиции (СКТПЭ) в 1974—1975 гг.; данные радиозондирования атмосферы на станциях Минеральные Воды (юг Ставропольского края), Куба-Таба (КБ АССР) и Ардон (СОАССР), близкие к моменту начала развития мощной конвекции; информация о виде выпавших осадков, получаемая по каналам связи с огневых точек противоградовых отрядов в момент измерения радиолокационных параметров кучево-дождевых облаков; акты результатов объезда (автотранспорт) и облета (вертолет) территории, подвергшейся грозо-градовому процессу, составленные представителями групп контроля и воздействия противоградовых отрядов (объезд и облет территории совершался по намеченному маршруту, совпадающему с траекторией перемещения ливневых и градовых облаков); акты повреждений сельскохозяйственных культур, составленные представителями Госстраха и управлений сельского хозяйства; информация об опасных явле-

ниях, получаемая с метеостанций Нальчик, Каменомостское, Прохладный, Новопавловская.

Наблюдения за развитием кучево-дождевой облачности проводились в Куба-Табинском и Урванском противоградовых отрядах СКТПЭ с помощью двухволновых сантиметровых (см) и дециметровых (дм) РЛС с мая по сентябрь 1974—1975 гг. в радиусе от 10 до 70 км от РЛС. Для статистического анализа было оставлено 298 случаев с ливневыми и градовыми облаками, из них 159 ливневых и 139 градовых.

Значения некоторых радиолокационных параметров ливневых и градовых облаков

В табл. 1 представлены средние, минимальные и максимальные значения девяти радиолокационных параметров ливневых и градовых облаков, а также интервалы их неоднозначности. Измерения параметров проводились в зрелой стадии развития кучево-дождевых

Таблица 1

Некоторые радиолокационные характеристики ливневых и градовых облаков по данным наблюдений за 1974—1975 гг. на Северном Кавказе

Характеристика	РЛС	Ливни			Град			Интервал неоднозначности	
		ср.	мин.	макс.	ср.	мин.	макс.	от	до
$S_{\text{см}}$ км ²	см	518	44	4450	1258	448	4800	448	4450
$H_{\text{в}}$ км		8,9	5,1	12,7	11,3	7,6	15,6	7,6	12,7
$t_{H_{\text{в}}}$ °C		—38	—61	—11	—51	—65	—30	—30	—61
$\Delta h - \Delta h +$	дм	1,9	0,5	3,2	2,6	1,3	4,0	1,3	3,2
$S_{\text{дм}}$ км ²		48	2	224	227	40	850	40	224
$H_{\Delta\eta}$ км		4,5	1,6	8,2	7,1	4,1	11,7	4,1	8,2
$t_{H_{\Delta\eta}}$ °C		—7	—38	+15	—21	—65	—9	—9	—38
H_m км		3,0	0,7	6,0	3,7	1,1	7,5	1,1	6,0
t_{H_m} °C		—1	—19	+18	—2	—35	+16	+16	—19

облаков. Видно, что площади (S) радиоэхо ливневых облаков на ИКО дм РЛС колеблются от 2 до 224 км², в то время как площадь радиоэхо градовых облаков составляет 40—850 км². Средняя площадь радиоэхо ливневых облаков (48 км²) в 4,5 раза меньше площади радиоэхо градовых облаков (227 км²). Интервал неоднозначности намного меньше интервала значений, принимаемых этим параметром. Средние площади радиоэхо ливневых и градовых облаков на см РЛС равны 518 и 1258 км² соответственно.

Для ливневых облаков $H_{\Delta\eta}$ расположена значительно ниже (1,6—8,2 км). В среднем $H_{\Delta\eta}$ градовых облаков на 2,6 км превышает $H_{\Delta\eta}$ ливневых.

Анализ 304 разрезов радиоэхо кучево-дождевых облаков на ИКО показал, что выделить какие-либо различия в геометрической форме радиоэхо ливневых и градовых облаков при использовании имеющихся РЛС не представляется возможным. В большинстве случаев (64%) как ливневые, так и градовые облака имеют форму овала (соотношение между большой и малой осями составляет 1,5—5,0 и более); в 24% случаев — неопределенную форму, в 9% случаев — форму «неправильных треугольников» [4] и только в 3% случаев — форму круга, когда соотношение осей не превышает 1,5.

Расчет информативности радиолокационных параметров ливневых и градовых облаков

Информативность ($I-I^*$) радиолокационных параметров кучево-дождевых облаков, сопровождающихся выпадением ливневых осадков и града, рассчитывалась по формулам, приведенным в работах А. И. Буза [2, 3] (I — индекс информативности, I^* — погрешность его расчета).

Самой высокой информативностью обладают $S_{\text{дм}}$ ($I-I^*=0,487$), $t_{H_{\Delta\eta}}$ (0,455) и $H_{\Delta\eta}$ (0,442), т. е. такие параметры, которые измерялись на дм РЛС.

Несколько меньшую информативность имеют параметры, измеренные с помощью см РЛС. $S_{\text{см}}$ (0,299), $H_{\text{в}}$ (0,275), $\Delta h \rightarrow \Delta h + + (0,248)$ и $t_{H_{\text{в}}}$ (0,232), но все же их информативность остается довольно высокой. Низкую информативность имеют $H_{\text{м}}$ (0,100) и $t_{H_{\text{м}}}$ (0,063), что подтверждает выводы, полученные в [1, 4].

В табл. 2 дается распределение ливневых и градовых облаков при различных значениях $S_{\text{дм}}$. Ливневые облака в 84% случаев наблюдаются при значениях площади радиоэхо менее 76 км², а градовые облака в 88% случаев — при значениях площади радиоэхо более 76 км². С уменьшением $S_{\text{дм}}$ повторяемость градовых облаков падает и при $S_{\text{дм}}$ менее 25 км² остается равной нулю.

Повторяемость ливневых и градовых облаков при различных значениях $S_{\text{см}}$ дается в табл. 3. Ливневые облака в 83% случаев могут встречаться при значениях $S_{\text{см}}$ менее 800 км², в то время как градовые в 65% случаев встречаются при значениях $S_{\text{см}}$ больше 800 км² и практически не встречаются при $S_{\text{см}}$ меньше 400 км.

Расчет информативности комплекса радиолокационных параметров ливневых и градовых облаков

Информативность комплекса (в каждый комплекс входили по два параметра) радиолокационных параметров ливневых и градовых облаков рассчитывалась по тем же формулам, по каким рассчитывалась информативность отдельных параметров.

Таблица 2

Повторяемость (%) ливневых и градовых облаков при различных значениях $S_{\text{дм}}$
за период 1974—1975 гг. (в скобках — число случаев)

Явление	$S_{\text{дм}}$ км ²								Сумма
	≤25	26—50	51—75	76—100	101—125	126—150	151—175	>175	
Ливень	39(84)	26(55)	19(41)	8(17)	2,5(5)	1,5(3)	0,5(4)	3,5(8)	100(214)
Град	—	6,5(9)	5,5(8)	12(17)	10(14)	9(13)	12(17)	45(64)	100(142)

Таблица 3

Повторяемость (%) ливневых и градовых облаков при различных значениях $S_{\text{см}}$
за период 1974—1975 гг. (в скобках — число случаев)

Явление	$S_{\text{см}}$ км ²								Сумма
	<400	401—800	801—1200	1201—1600	1601—2000	2001—2400	>2400		
Ливень	63(47)	20(15)	8(6)	2,5(2)	2,5(2)	1,5(1)	2,5(2)	100 (75)	
Град	—	34,5(8)	13(3)	34,5(8)	9(2)	4,5(1)	4,5(1)	100 (23)	

Высокую информативность имеют комплексы параметров $S_{\text{дм}}$, $t_{H_{\Delta\eta}}$ и $S_{\text{дм}}$, $H_{\Delta\eta}$. Информативности больше 0,690. Менее информативны комплексы параметров, измеренные см РЛС $S_{\text{см}}$, $H_{\text{в}}$ (0,592) и $S_{\text{см}}$, $t_{H_{\text{в}}}$ (0,548). Информативности комплексов смешанных параметров (один измерялся см РЛС, а другой — дм РЛС): $S_{\text{дм}}$, $H_{\text{в}}$; $S_{\text{дм}}$, $t_{H_{\text{в}}}$ и $S_{\text{дм}}$, $\Delta h - / \Delta h +$ соответственно равны 0,569; 0,599; 0,543. Анализируя полученные результаты, убеждаемся, что информативность комплекса параметров больше информативности самого информативного одиночного параметра.

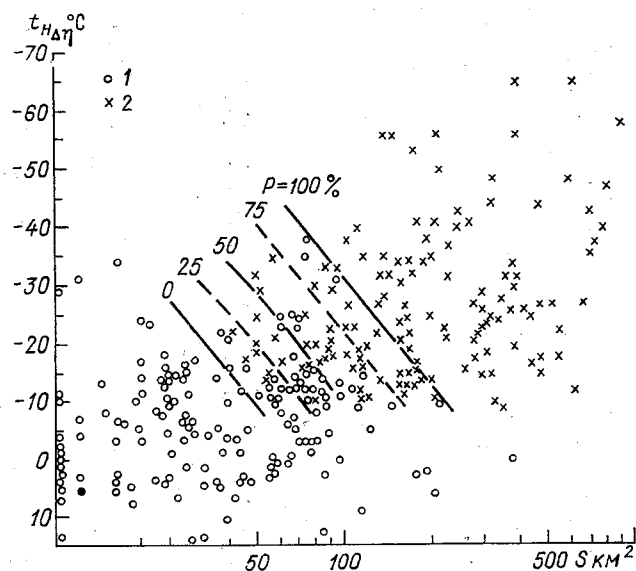


Рис. 1. Ливневые (1) и градовые (2) облака с комплексом $t_{H_{\Delta\eta}}$, $S_{\text{дм}}$.

Были построены графики связи ливневых и градовых облаков с комплексом наиболее информативных радиолокационных параметров. На рис. 1 представлен график такой связи. На этом графике в зависимости от величины $S_{\text{дм}}$ и $t_{H_{\Delta\eta}}$ выделены области, где с вероятностью 0; 25; 50; 75 и 100% наблюдаются градовые облака. Выпадение града с вероятностью более 50% наблюдается из такого облака, у которого $S_{\text{дм}}$ больше 80 км^2 и $t_{H_{\Delta\eta}}$ меньше — 15 $^{\circ}\text{C}$, $S_{\text{дм}}$ больше 50 км^2 и $t_{H_{\Delta\eta}}$ меньше — 29 $^{\circ}\text{C}$. Выпадение града с вероятностью 100% отмечается, когда $S_{\text{дм}}$ больше 200 км^2 и $t_{H_{\Delta\eta}}$ меньше — 12 $^{\circ}\text{C}$, $S_{\text{дм}}$ больше 60 км^2 и $t_{H_{\Delta\eta}}$ меньше — 44 $^{\circ}\text{C}$.

Выводы

1. Наиболее информативными радиолокационными параметрами, косвенно характеризующими выпадение ливневых осадков и града, являются параметры $S_{\text{дм}}$, $H_{\Delta\eta}$ и $t_{H_{\Delta\eta}}$, полученные дм РЛС. Индекс информативности этих параметров больше 0,4. Менее информативными оказались параметры, полученные см РЛС. Значения индекса информативности $S_{\text{см}}$, $H_{\text{в}}$, $t_{H_{\text{в}}}$ $\Delta h - |\Delta h|$ колеблются в пределах от 0,248 до 0,299. Малоинформативными оказались параметры $H_{\text{т}}$ и $t_{H_{\text{т}}} - (I - I^*)$ меньше 0,1.

2. Индекс информативности самого информативного комплекса параметров $S_{\text{дм}}$, $t_{H_{\Delta\eta}}$ (0,698) выше I самого информативного отдельно взятого параметра $S_{\text{дм}}$ (0,487).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абашев М. Т., Кучмезов О. М., Пинхасов А. М. Вероятностно-статистический метод индикации градовых облаков. — «Тр. ВГИ», 1969, вып. 13, с. 230—248.
2. Буз А. И. Применение некоторых статистик к анализу и прогнозу условий возникновения метеорологических явлений. — В кн.: Вопросы метеорологии, агрометеорологии и гидрологии. М., Гидрометеиздат, 1965, с. 65—74.
3. Буз А. И. О роли атмосферных фронтов и некоторых циркуляционных факторов в развитии конвекции. — «Метеорол. и гидрол.», 1975, вып. 9, с. 21—30.
4. Сулаквелидзе Г. К. Ливневые осадки и град. Л., Гидрометеиздат, 1967. 412 с.

М. Бадарч (МНР)

РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГРОВОВЫХ ОБЛАКОВ ДЛЯ УСЛОВИЙ МНР

Проблема изучения кучево-дождевых облаков и сопровождающих их явлений представляет большой интерес как с теоретической, так и с практической точки зрения.

Но, как известно, непосредственные наблюдения в кучево-дождевых облаках сопряжены с большой опасностью из-за сильной конвективной деятельности и высоких напряжений электрических полей. Поэтому исследование их представляет значительные трудности. Радиолокационный метод изучения облаков, который позволяет избежать этих трудностей, получил широкое распространение в последние годы. Имеется немалое количество работ по исследованию радиолокационной структуры кучево-дождевых облаков [1—5]. Результаты этих работ показывают, что радиолокационные характеристики грозовых облаков для разных географических районов различны.

В настоящей работе сделаны попытки определить критериальные значения радиолокационных характеристик грозовых облаков для условий МНР. При анализе были использованы радиолокационные характеристики ($H_{\text{макс}}$, $\lg Z_1$, $\lg Z_2$), полученные по данным оперативных радиолокационных наблюдений в Институте метеорологии и гидрологии МНР за летние сезоны 1971—1974 гг. Было проанализировано 190 случаев, в том числе 115 с грозовыми, 75 с ливневыми очагами. Для определения характера облаков и сопровождающих их явлений привлекались данные сети метеостанций, расположенных в радиусе действия радиолокаторов. Для увеличения достоверности результатов в исследовании использовались радиолокационные данные в радиусе 150 км, так как на больших расстояниях существенно возрастают ошибки измерения радиозоха.

В табл. 1 приведены средние, максимальные и минимальные значения радиолокационных характеристик кучево-дождевых облаков, сопровождающихся грозой и ливнем. Из табл. 1 видно, что для грозовых облаков на территории МНР характерны средние высоты около 8,5 км, а для ливней — 6,5 км, средние значения отражаемости для грозового облака — 2,2—2,8, а для ливня — 1,6—2,2 км. Сле-

дует отметить, что высота верхней границы радиоэхо грозовых облаков для рассматриваемой территории колеблется в пределах 7—12 км. Подобное положение можно объяснить тем, что радиолокатор обнаруживает грозовые очаги на разных стадиях их развития. Полученные результаты показывают, что по мере развития конвективных облаков и их перехода из одной стадии в другую структура радиоэхо трансформируется, что связано с тенденцией изменения радиолокационных характеристик.

Таблица 1

Средние, максимальные и минимальные значения радиолокационных характеристик кучево-дождевых облаков, сопровождающихся грозой и ливнем по данным ст. Улан-Батор

Явления	$H_{\text{макс}}$ км			$\lg Z_1$			$\lg Z_2$		
	ср.	макс.	мин.	ср.	макс.	мин.	ср.	макс.	мин.
Сб с грозой . . .	8,5	12	7	2,8	4,0	1,0	2,2	3,4	1,0
Сб с ливнем . . .	6,3	10	4,5	2,2	3,4	0,4	1,0	2,2	0,4

В связи с этим возникла необходимость определить значения комплексного радиолокационного критерия. С этой целью найдены численные значения радиолокационного критерия грозоопасности Y по методике ГГО [5]

$$Y = \frac{H_{\text{макс}} \lg Z_{\text{макс}}}{\lg Z_1 - \lg Z_2},$$

где $H_{\text{макс}}$ — верхняя граница радиоэхо в км; $\lg Z_1$ — отражаемость в $\text{мм}^6/\text{м}^3$, определенная на уровне нулевой изотермы; $\lg Z_2$ — отражаемость на уровне, превышающем высоту нулевой изотермы на 2,5—3 км.

В табл. 2 приведена повторяемость явлений погоды при различных значениях Y , полученная путем сопоставления синхронных радиолокационных и визуальных наблюдений в районах г. Улан-Батора.

Таблица 2

Повторяемость P (%) явлений, связанных с Сб, при различных значениях критерия распознавания Y

Y	Гроза с ливнем	Ливневый дождь	Сб без явлений
10	25	21	54
10,1—20	37	14	49
20,1—30	56	12	32
30	95	5	10

На основании результатов этого исследования можно сделать следующие выводы:

1. При переходе облаков от ливневых к грозовым отмечается сдвиг величины высоты радиоэхо и радиолокационной отражаемости в сторону больших значений.

2. Установлено, что если величина грозоопасности $Y \geq 30$ или верхняя граница радиоэхо располагается в среднем выше 8 км при $\lg Z_1 \geq 3,2$ и $\lg Z_2 \geq 2,6$, то такие облака всегда достигают стадии активной грозы в данном районе.

Следует отметить, что эти выводы носят пока предварительный характер, так как они получены на сравнительно ограниченном материале наблюдений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гашина С. Б., Сальман Е. М. Особенности радиолокационных характеристик грозовых облаков. — «Тр. ГГО», 1965, вып. 173, с. 19—26.
2. Гашина С. Б., Сальман Е. М. Статистические особенности радиолокационных характеристик конвективных облаков в разных физико-географических условиях. — «Тр. ГГО», 1969, вып. 243, с. 12—15.
3. Котов Н. Ф. Радиолокационные характеристики ливней и гроз. — «Тр. ГГО», 1960, вып. 102.
4. Мучник В. М. Некоторые радиолокационные характеристики очагов ливней и гроз. — «Тр. ЦАО», 1958, вып. 20.
5. Сальман Е. М., Гашина С. Б. Локализация осадков и грозоопасных зон по их радиолокационным характеристикам. — «Тр. ГГО», 1967, вып. 217, с. 33—39.

М. Бадарч (МНР)

РАДИОЛОКАЦИОННЫЙ СПОСОБ РАСПОЗНАВАНИЯ ГРОЗ

Невозможность получения прямых характеристик грозовой активности облаков непосредственно на индикаторе радиолокационной станции заставляет искать косвенные признаки гроз в структурных особенностях их радиоэхо. В настоящее время существует немало методов распознавания гроз с помощью радиолокатора, основанных на получении комплекса радиолокационных характеристик облаков. Несмотря на то что определение грозового состояния кучво-дождевых облаков по их радиолокационным характеристикам дает в среднем за летний период высокую оправдываемость [3, 6], но

Т а б л и ц а 1

Определение ($p - p_k$) по данным ($T - T_d$)

$T - T_d$	p мб		$T - T_d$	p мб	
	850	500		850	500
1	10	10	16	175	115
2	22	18	17	190	120
3	35	28	18	200	125
4	48	35	19	208	130
5	58	40	20	220	138
6	70	48	21	228	141
7	80	53	22	238	148
8	92	62	23	245	152
9	110	69	24	255	159
10	118	75	25	260	165
11	128	83	26	272	170
12	138	89	27	280	175
13	148	96	28	290	180
14	160	100	29	299	185
15	165	108	30	302	190

в оперативной работе встречаются трудности при ежедневном определении критерия грозоопасности, значения которого меняются в зависимости от региональных особенностей развития конвекции и сезона года [2].

В настоящей работе сделана попытка разработать способ распознавания гроз, основанный на статистических связях между максимальной отражаемостью радиозо $\lg Z_{\max}$ и характеристиками физического состояния грозовых облаков в радиусе действия радиолокатора. В основу методики распознавания гроз положена гипотеза об образовании грозового электричества при разбрызгивании

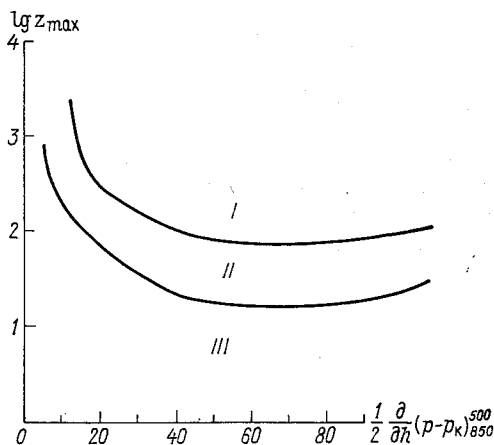


Рис. 1. Зависимость между радиолокационной отражаемостью и значением

$$\frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial h} (p - p_k) \frac{500}{850}$$

I — гроза, II — ливень, III — обложной дождь.

дождевых капель восходящими потоками воздуха. Как показано в [4], вертикальные движения воздуха хорошо коррелируются с изменением влагонасыщенности воздуха с высотой.

Используя выводы Байерса [1], который показал, что для изэнтропической поверхности ($\Theta = \text{const}$), $q = f(p_k)$, где q — удельная влажность, а p_k — давление на уровне конденсации, было рассмотрено вместо $\frac{\partial}{\partial h} (T - T_d)$ изменение $\frac{\partial}{\partial h} (p - p_k) \frac{500}{850}$ и была установлена зависимость между вертикальными движениями, рассчитанными по методу Марчука — Булеева [5], с изменением $\frac{\partial}{\partial h} (p - p_k)$ в слое 900—500 мб. Нами рассматривалась зависимость значения $\frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial h} (p - p_k) \frac{500}{850}$ от радиолокационной отражаемости $\lg Z_{\max}$.

Для установления искомых связей вышеуказанных характеристик было отобрано 200 случаев радиолокационных наблюдений,

проводившихся в сроки выпуска радиозонда. Значения $\frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial h} (p - p_k)_{850}^{500}$ рассчитывались по данным температурно-ветрового зондирования ст. Улан-Хуарана. Значения $(p - p_k)$ были получены по значениям дефицита точки росы (табл. 1).

На рис. 1 представлена зависимость между скоростью вертикального потока, выраженной через значения $\frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial h} (p - p_k)_{850}^{500}$ и радиолокационной отражаемостью, позволяющая разделить явления по видам (гроза, ливень, обложной дождь).

В заключение можно сделать следующие выводы:

1. Найдена связь между радиолокационной отражаемостью и значением $\frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial h} (p - p_k)_{850}^{500}$.

2. Грозам соответствуют значения $\frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial h} (p - p_k)_{850}^{500}$ от 15 до 90 при $\lg Z_{\text{макс}} \geq 2,0$. Эти величины могут служить критериями распознавания.

3. Испытание предлагаемого способа распознавания гроз следует провести в различных районах с различными физико-географическими условиями для выяснения вопроса о целесообразности использования его в оперативной практике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бугаев В. А. Техника синоптического анализа и прогноза. Л., Гидрометеоиздат, 1947.
2. Гашина С. Б. и др. К вопросу о корректировке критерия распознавания явлений, сопровождающих летние Сб. — «Тр. ГГО», 1973, вып. 281, с. 75—82.
3. Гашина С. Б., Матвеева Л. И., Разумовский А. А. Сравнение информации об облаках и явлениях, сопровождающих Сб, получаемой с наземной и радиолокационной сети станций. — «Тр. ГГО», 1973, вып. 281, с. 90—95.
4. Голубов Р. С. Методика прогноза количества ливневых осадков в горных районах Юго-Восточного Казахстана на 24—36 ч. — «Тр. КазНИГМИ», 1967, вып. 29.
5. Марчук Г. И., Булеев Н. И. О динамике крупномасштабных атмосферных процессов. — «Тр. ИФА АН СССР», 1958, вып. 2.
6. Сальман Е. М., Гашина С. Б., Дивинская Б. Ш. Радиолокационные критерии разделения грозовой и ливневой деятельности. — «Метеор. и гидрол.», 1969, № 4.

Г. Б. Брылев, Г. Л. Низдойминой

О ПОВЫШЕНИИ ЗАБЛАГОВРЕМЕННОСТИ ПРОГНОЗА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ НЕБОЛЬШИХ ЗОН РАДИОЭХО С УЧЕТОМ ДАННЫХ АЭРОЛОГИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Известно, что максимальная заблаговременность прогноза перемещения зон радиоэхо с помощью МРЛ не может превышать времени их существования. Согласно работе [3], время существования небольших зон (ячеек) площадью $S \leq 50 \text{ км}^2$ оценивается $0,7-1 \text{ ч}$ для ММП с $S=100-1000 \text{ км}^2-1-2 \text{ ч}$ и для БМП с $S=10^3-10^4 \text{ км}^2-2-4 \text{ ч}$. Высокая быстротечность процессов, связанных с развитием и распадом ММП и особенно ячеек радиоэхо позволяет надеяться, что применение определенных правил и приемов с использованием данных аэрологического зондирования несколько повысит заблаговременность прогноза.

Такие рекомендации разрабатывались на основе экспериментальных данных о характеристиках перемещения ячеек и ММП радиоэхо φ_p (направление движения) и V_p (скорость), а также аэрологических наблюдений за ветром на стандартных барических уровнях (V_{pi}, dd_i).

Первичные данные включали 103 случая перемещения РКО, площадь которых находилась в интервале от 10 до 1000 км^2 при среднем значении $\bar{S}=165 \text{ км}^2$, высота радиоэхо H — в пределах $2-7 \text{ км}$, среднее значение $\bar{H}=4,5 \text{ км}$.

Определение характеристик перемещения РКО по изменению положения их центров тяжести производилось на масштабе ИКО 100 км. Распределение направлений воздушных потоков на уровнях $1,5-3 \text{ км}$ не носило кругового характера, поэтому приведенные ниже соотношения, устанавливающие зависимость φ_p от внешних условий, справедливы лишь в диапазоне направлений dd западной и южной четверти. Именно эти направления воздушных потоков были преобладающими в течение периода получения данных о φ_p и V_p .

Кроме того, для анализа дополнительно были привлечены характеристика $\Delta\varphi_{850}=\varphi_p-dd_{850}$ — отклонение радиоэхо ячейки и ММП от направления ветра на изобарическом уровне 850 мб и $\Delta S/\Delta t$ — величина изменения площади радиоэхо за единицу времени.

Уравнения регрессии приведены в табл. 1.

Анализ уравнений 1.1 и 1.2 указывает на существование надежной связи между направлением потока dd_{850} и dd_{700} , а также направлением перемещения ячеек и ММП радиоэхо. Кроме того, из уравнения 1.1 следует, что ячейки и ММП, как правило, незначительно отклоняются от потока на $H=1,5$ км (850 мб) вправо. Если сравнить направление движения ячеек и ММП радиоэхо с потоком на $H=3$ км (700 мб), то незначительное отклонение РКО от потока на $H=3$ км вправо имеет место только для значений dd_{700} от 0 до 120° . Для других направлений в пределах рассмотренного диапазона направлений более типично отклонение радиоэхо влево от потока на $H=3$ км.

Таблица 1

Уравнения регрессии для φ_p , V_p и $\Delta\varphi_{850}$

№	Уравнения регрессии
1.1	$\varphi_p = 1,04 dd_{850} + 0,3$
1.2	$\varphi_p = 0,92 dd_{700} + 8$
2.1	$\varphi_p = dd_{850} + 0,97 V_{850} - 29$
2.2	$\varphi_p = 0,9 dd_{700} + 0,24 V_{850} + 4$
2.3	$\varphi_p = dd_{850} + V_{700} - 40$
2.4	$\varphi_p = 0,9 dd_{700} + 0,16 V_{700} + 4$
3.1	$V_p = 0,42 V_{850} + 22$
3.2	$V_p = 0,37 V_{700} + 20$
4.1	$\Delta\varphi_{850} = 0,5 \Delta d_1 + 0,14 \Delta S/\Delta t + 8$, где $\Delta d_1 = dd_{500} - dd_{850}$

Из уравнений 2.1 и 2.3 вытекает, что направление движения РКО с $H=4,5$ км наиболее точно будет совпадать с направлением потока на $H=1,5$ км, если V_{Π} на уровнях 850—700 мб будет изменяться от 30 до 40 км/ч.

Для воздушного потока на AT_{700} на основе уравнений (2.2) и (2.4) нельзя назвать оптимальный диапазон скоростей V_{Π} (850—700 мб), при котором направление движения РКО будет точно совпадать с направлением потока на $H=3$ км.

Уравнения регрессии 3.1—3.2 устанавливают зависимость скорости радиоэхо ячеек и ММП от скорости ветра на уровнях 1,5 и 3 км. Согласно уравнениям 3.1 и 3.2 скорость V_p совпадает со скоростью потока на AT_{850} или AT_{700} , когда последние достигают значений 38 и 32 км/ч соответственно. При меньших значениях V_{Π} величина V_p может превышать скорость ветра на любом из этих уровней. Это целиком соответствует выводам работы [1]. При отсутствии потока в условиях размытых барических полей радиоэхо ячеек РКО могут

иметь скорости до 20—22 км/ч, которые обусловлены составляющей распространения [2].

Уравнение 4.1 позволяет оценивать возможные отклонения ячеек и ММП радиоэхо от спрогнозированного или первоначально измененного направления движения РКО в зависимости от характеристики $\Delta d_1 = dd_{500} - dd_{850}$ и изменения площади РКО $\Delta S/\Delta t$. Из уравнения 4.1 следует, что существует постоянное положительное отклонение между направлением движения РКО и потоком на $H=1,5$ км величина $\varphi_p - dd_{850} = 8^\circ$.

Анализ уравнения регрессии 4.1 показывает, что при правом повороте ветра с высотой в слое 1,5—5 км ($\Delta d_1 > 0$) зоны радиоэхо находящиеся в стадии развития $\Delta S/\Delta t > 0$, могут отклоняться вправо. При левом повороте ветра в слое 1,5—5 км и диссипации радиоэхо ячейки или ММП $\Delta S/\Delta t < 0$ должно происходить некоторое отклонение направления движения РКО влево от потока на AT_{850} если $-(0,5 \Delta d_1 + 0,14 \Delta S/\Delta t) > 8^\circ$.

Для описания характеристик движения небольших мезомасштабных зон радиоэхо могут быть рекомендованы простейшие эмпирические зависимости, приведенные в табл. 1, которые достаточно надежно описывают движение ячеек и малых мезомасштабных площадей радиоэхо в радиусе 100 км от пункта аэрологического зондирования.

Использование в прогнозе движения радиоэхо приведенных эмпирических зависимостей позволит приблизить заблаговременность прогноза прихода локальных ливней и гроз в пункт прогноза к ее максимально возможному значению. Последнее целиком зависит от времени существования мезомасштабной площади радиоэхо, а также от расстояния, на котором оно было обнаружено, и скорости перемещения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брылев Г. Б., Низдойминога Г. Л. О связи скорости и направления перемещения зон радиоэхо с воздушными потоками на стандартных барических уровнях.— «Тр. ГГО», 1975, вып. 328, с. 84—94.
2. Степаненко В. Д. Радиолокация в метеорологии. Л., Гидрометеониздат, 1973. 344 с.
3. Hurreld T. W., Austin P. M. The Structure of precipitation System.— Rev. J. rech. atmosph." 1974, vol. 8, N 1—2, p. 41—57.

Б. Ш. Дивинская

ОБОСНОВАНИЕ ЧИСЛЕННЫХ АЛГОРИТМОВ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБЛАЧНЫХ СИСТЕМ И ИХ ТРАНСФОРМАЦИИ

В ГГО разработана методика распознавания облачных систем (ОС) и их тенденции развития (ТР) [3, 10]. Использование методики в оперативной практике выявило высокую достоверность распознавания ОС при условии ее обнаружения [7] и большую вероятность правильной оценки ТР малоподвижных ОС. Методика анализа ОС основана на связи радиолокационных характеристик с генетикой образования ОС [2, 3]. Для анализа необходимо знание численных характеристик и картин радиоэхо [3, 10].

С появлением аппаратуры, автоматизирующей процесс наблюдений и обработки (ААОМ) [1], в ГГО проводились исследования с целью нахождения алгоритмов автоматизированного анализа данных [1, 4, 5, 8, 11]. В частности, для распознавания ОС и ТР предлагалось использовать данные о пространственном распределении двух характеристик — высоты радиоэхо (H) и интегральной взвешенной отражаемости (z_H) [4], и их изменении во времени [5].

В данной работе рассматриваются более простые алгоритмы анализа.

Анализ ОС. В радиолокационном методе облака классифицируются на пять форм (C, A, S, N, Q) [6]. Считая, что ОС есть сочетание различных форм облаков, задача распознавания была сведена к определению форм облаков.

Известно, что ААОМ представляет данные об отражаемости на высотах залегания облаков C, A, S и существуют отличия отражающих свойств облаков и явлений [8, 9, 11]. Поэтому предполагалось возможным определять формы облаков по спектру численных характеристик отражаемости на разных высотах.

В табл. 1 приведены спектры отражаемости (в условных уровнях z) [1], характеризующие определенное метеообразование с 70—75%-ной достоверностью. Учитывая предельно малые значения отражаемости облаков, одинаковые на всех высотах, значения отражаемости облаков с ливнями и обложными осадками и частую

регистрацию ААОМ неметеорологического радиоэхо в первом слое для распознавания ОС дополнительно использовались известные закономерности пространственной структуры радиоэхо облаков и явлений.

1. Нижняя граница радиоэхо явлений < 3 км, а верхняя ≥ 3 км. Поэтому, обнаружив радиоэхо явлений во втором слое, можно считать, что оно имеется и в первом слое.

2. Верхняя граница радиоэхо осадков чаще всего < 5 км. Это означает, что приведенные в табл. 1 значения отражаемости осадков на высотах 7 и 9 км фактически характеризуют радиоэхо облаков. По-видимому, правильнее считать радиоэхо облаков на всех высотах, если значения отражаемости ≤ 8 , как это принято при выделении зон осадков [10].

Таблица 1

Численные значения отражаемости (в условных уровнях z [1]), характеризующие грозу, осадки и облака с 70—75 %-ной достоверностью

Высота слоя, км	Номер слоя	Гроза	Осадки	Облака
0—2	1	15—12	11—9	≤ 8
2—4	2	15—12	11—9	≤ 8
4—6	3	15—11	10—9	≤ 8
6—8	4	15—11	10—8	≤ 7
8—10	5	15—10	9—8	≤ 7

3. Численные значения $z \leq 8$ с вероятностью примерно 0,8 характеризуют облачное поле без осадков. Поэтому, если в поле радиоэхо повторяемость $z \leq 8$ более 0,4, велика вероятность существования там облаков без явлений.

4. Радиоэхо слоисто-дождевых облаков обладает большой горизонтальной протяженностью и максимальными значениями отражаемости (летом) на высоте нулевой изотермы (примерно в слое 2—4 км).

С учетом указанных закономерностей анализ ОС в радиусе 150—180 км предлагается проводить следующим образом:

Классифицировать радиоэхо на три типа по табл. 1. На всех высотах считать радиоэхо облаков ячейки со значениями $z \leq 8$. Подсчитать число ячеек радиоэхо ($n_{\text{яэ}}$), гроз ($n_{\text{г}}$), осадков ($n_{\text{д}}$) и облаков ($n_{\text{о}}$), а также повторяемость облаков ($P_{\text{о}}$).

Определить, имеются ли формы облаков S, A, C. Если $P_{\text{о}} \geq 0,4$ на каком-либо уровне, то соответствующие данному уровню высоты облака имеются. Если $P_{\text{о}} < 0,4$, используется второй признак, по которому выявляются лишь формы облаков S и A. Если $n_{\text{г}}$ и $n_{\text{д}}$ на втором уровне меньше, чем $n_{\text{рв}}$ на первом уровне, имеется форма S;

если n_r и n_d на втором уровне меньше, чем n_{p9} на третьем, имеется форма А.

Определяется наличие облаков N . Положительное решение принимается, если на втором уровне число ячеек с явлениями $n_r + n_d = n_{я} \geq 20$ и отношение $\frac{n_{я} \text{ (на втором уровне)}}{n_{я} \text{ (на третьем уровне)}} > 1$.

Определяется наличие облаков Q по наличию n_r на втором и третьем уровнях, либо по алгоритмам H и $\{z_H$ [4, 5].

Сравнение полученных таким образом характеристик облачного поля (по 84 сериям наблюдений) с проанализированными данными МРЛ [3] и большинства гидрометеостанций, оказавшихся в зоне радиоэхо, выявили хорошее совпадение.

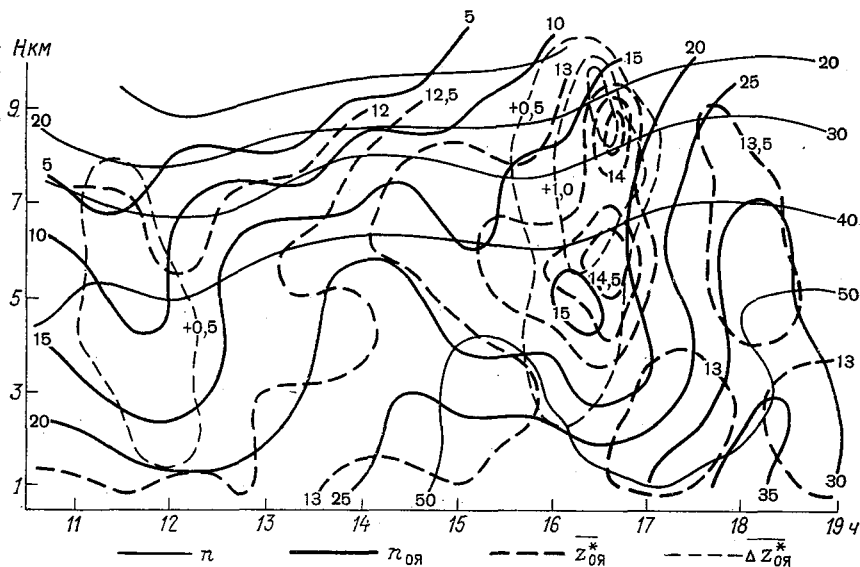


Рис. 1. Изоплеты численных характеристик радиоэхо.

Анализ ТР. Тенденция развития облачной системы достаточно хорошо определяется по изменению радиолокационных характеристик при малых скоростях перемещения облачного поля [10]. Для исключения влияния перемещения облачного поля на численные радиолокационные характеристики (отражаемость, площади) анализировалось радиоэхо наиболее опасных явлений. Распространение в пространстве опасных явлений определялось по числу ячеек, занятых ими ($n_{оя}$), степень опасности — по средним приведенным* значениям отражаемости ($\bar{z}_{оя}^*$) в выделенных ячейках $n_{оя}$. Оче-

* Для исключения существующих отличий минимальных значений отражаемости одного и того же явления на разных высотах было приведено z ко второму слою. Приведенное значение отражаемости $z^* = z_i (z_{2 \text{ мин } я} / z_{i \text{ мин } я})$. Здесь z_i — значение измеренной отражаемости в i -том слое, $z_{i \text{ мин } я}$ и $z_{2 \text{ мин } я}$ — минимальные значения отражаемости данного явления в i -том и втором слоях.

Численные характеристики $\bar{z}_{оя}^*$ и $n_{оя}$, рассчитанные по данным, зафиксированным с помощью ААОМ в период резких изменений условий погоды

Время, ч мин	Слой								
	2	3	4	5	2	3	4	5	
	$\bar{z}_{оя}^*$				$n_{оя}$				
15 30	13,0	13,6	13,3	12,7	23	18	19	12	
15 45	12,6	14,0	13,1	12,7	22	18	19	12	
16 00	13,2	14,0	13,4	13,0	20	16	16	15	
16 15	13,2	13,6	13,6	13,2	19	14	16	14	
16 30	13,4	14,4	14,6	14,4	18	17	17	15	
16 45	13,3	14,4	14,5	14,6	17	17	17	13	
17 00	12,9	13,2	13,3	13,3	18	22	20	18	
17 15	12,8	13,0	13,0	13,1	20	23	20	20	
17 30	12,6	13,2	13,2	12,8	26	30	28	20	
17 45	12,9	14,0	13,6	13,8	26	24	27	21	
18 00	13,2	13,8	13,5	13,4	27	31	28	26	
18 15	13,0	13,8	13,5	13,4	25	28	27	27	

видно явная трансформация ОС будет наблюдаться при переходе численных характеристик из одного класса явлений в другой (гроза → осадки или осадки → облака и наоборот) (см. табл. 1). Тенденцию развития ОС — по знаку изменения $\bar{z}_{оя}^*$ и $n_{оя}$.

Анализ ТР по изменению указанных характеристик подтвердил перспективность его проведения. Последнее иллюстрируется рис. 1, на котором приведены некоторые радиолокационные характеристики, зафиксированные ААОМ 24 VI 1973 г. Этот день характеризовался грозовой обстановкой. По данным сети гидрометеостанций, грозы наблюдались с 12 до 14 и с 16 до 19 ч, по данным МРЛ с 11 30 мин до 19 ч. Максимум грозовой активности обоими методами наблюдался с 13 до 14 и с 17 до 19 ч.

Анализ изоплет $n_{рз}$, $n_{оя}$, $\bar{z}_{ся}^*$ и $\Delta z_{оя}^*$ указывает на то, что $n_{оя}$ лучше, чем $n_{рз}$, характеризует условия погоды и их изменения. Так, при малых изменениях $n_{рз}$ в течение всего дня $n_{оя}$ существенно изменялось именно в сроки наибольшей грозовой активности. Наибольшие значения $\bar{z}_{оя}^*$ и $\Delta z_{оя}^*$ предшествовали максимуму грозовой активности с заблаговременностью 1,5—1 ч. Это согласуется с существующими представлениями [10].

Был обнаружен ряд новых закономерностей, иллюстрирующий-ся табл. 2.

1. Трансформация ОС взаимосвязана с изменением высоты расположения максимальных значений $\bar{z}_{\text{оя}}^*$ ($\bar{z}_{\text{оя}}^*$)_м. Изменение высоты ($\bar{z}_{\text{оя}}^*$)_м предшествует перестройке ОС. Этот эффект вызван перемещением крупных облачных элементов в процессе развития ОС в более высокие слои, в процессе распада — в более низкие.

2. Наблюдается сдвиг по фазе $z_{\text{оя}}^*$ и $n_{\text{оя}}$. Изменения $\bar{z}_{\text{оя}}^*$ предшествуют изменениям $n_{\text{оя}}$. Этот эффект вызван переходом части ячеек из одного класса явлений в другой при соответствующих изменениях отражаемости.

3. Наблюдается нивелировка численных характеристик радиоэхо при анализе ТР по часовым интервалам (как это рекомендуется Руководством [10]) и возникают малообъяснимые колебания численных характеристик радиоэхо, полученных ААОМ по 15-минутным интервалам.

Указанные здесь закономерности не использовались при анализе ТР. По-видимому, целесообразно провести специальные исследования и выявить пределы возможного использования этих характеристик для определения тенденции развития облачных систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гашина С. Б. и др. Вопросы автоматизированного получения радиолокационной информации об опасных Сб. — «Тр. ГГО», 1974, вып. 327, с. 18—25.
2. Дивинская Б. Ш. Радиолокационные характеристики полей облачности. — «Тр. ГГО», 1973, вып. 281, с. 34—47.
3. Дивинская Б. Ш. К методике распознавания облачной системы по их радиолокационным характеристикам. — «Тр. ГГО», 1973, вып. 281, с. 48—57.
4. Дивинская Б. Ш. К возможности использования в метеорологическом анализе комплексной характеристики радиоэхо облачного поля. — «Тр. ГГО», 1974, вып. 227, с. 40—46.
5. Дивинская Б. Ш. и др. Алгоритмы численного анализа радиоэхо облачных полей. — «Тр. ГГО», 1974, вып. 327, с. 47—58.
6. Дивинская Б. Ш., Сальман Е. М. К вопросу режимных обобщений данных радиолокационных наблюдений. — «Тр. ГГО», 1973, вып. 281, с. 58—65.
7. Дивинская Б. Ш., Иванова Т. В. Особенности совместного использования данных метеорологических радиолокаторов (МРЛ) и гидрометеорологических станций (ГМС). См. наст. сборник.
8. Иванова Т. В., Линев А. Г., Попова Н. Д. Характеристика радиоэхо облаков и осадков по данным автоматизированных наблюдений. — «Тр. ГГО», 1974, вып. 327, с. 26—32.
9. Игнатова Р. В., Петрущевский В. А., Сальман Е. М. Радиолокационные признаки характера облачности. — «Тр. ГГО», 1965, вып. 173, с. 26—33.
10. Руководство по производству наблюдений и применению информации с радиолокаторов МРЛ-1 и МРЛ-2. Л., Гидрометеониздат, 1974. 333 с.
11. Сальман Е. М., Гашина С. Б. Применение методов статистического распознавания к задаче радиолокационной классификации облаков. — «Тр. ГГО», 1971, вып. 261.

Б. Ш. Дивинская, Т. В. Иванова

ОСОБЕННОСТИ СОВМЕСТНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДАННЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ РАДИОЛОКАТОРОВ (МРЛ) И ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ (ГМС)

Согласно рекомендациям ГГО [1, 10, 6] рациональная сеть наблюдений за облаками — один МРЛ на 300 км и одна ГМС на 60 км. Недостатки наблюдений за облаками известны [8, 9], однако отсутствуют работы с количественной оценкой эффективности данных, получаемых на рекомендуемой сети станций.

Количественная оценка данных визуальных наблюдений (ВН) имеет самостоятельное значение и необходима для более точного определения эффективности радиолокационных наблюдений (РН). Эффективность ВН выявлялась по информации группы ГМС (n), расположенных на площади 60×60 км. По ней рассчитывалась повторяемость P_i случаев совместного обнаружения одинаковых характеристик облаков на ограниченной площади различным числом ГМС и вероятность $P_{пр}$ правильной оценки характеристик облаков над всей площадью, обслуживаемой одной ГМС, по ее наблюдениям: $P_{пр} = P_i \cdot P_{ni}$; $P_{ni} = n_i/n$, где n_i — число ГМС, для которого рассчитано численное значение P_i [2].

При классификации облаков по принятым в радиометеорологии формам (С—Сi, Cs, Cc; А—As, Ac; S—Sc, St; N—Ns; Q—Cu, Cu cong., Cb) P_i и $P_{пр}$ имеют значения, приведенные в табл. 1. При классификации облаков, согласно принятым в метеорологии формам, $P_{пр}$ уменьшается на 0,25—0,30 [4].

Анализ исходных материалов показал, что малые значения $P_{пр}$ облаков А и С обусловлены преимущественно десятибалльной облачностью нижнего яруса, а облаков S и Q — трудностями распознавания их особенно в случаях трансформации. Исключение случаев с десятибалльной облачностью при обработке данных об облаках типа А и С и взаимная корректировка некоторых форм облаков, по данным наблюдений большинства ГМС, расположенных над исследуемой площадью, увеличивает значения $P_{пр}$ (см. $P_{пр}^*$ в табл. 1).

Численные значения $P_{пр}^*$ указывают на большую вероятность существования одинаковых характеристик облаков над площадями,

обслуживаемыми одной ГМС, а большие контрасты $P_{пр}$ и $P_{пр}^*$ свидетельствуют о трудностях проведения визуальных наблюдений за облаками в реальных условиях, что зависит как от объективных, так и субъективных факторов.

Рассчитывались P_i и $P_{пр}$ облаков с явлениями по данным наблюдений четырех ГМС над площадью 30×30 км (рациональная сеть наблюдений за явлениями). Значения $P_{пр}$ гроз (∇), ливней (∇) и обложных осадков ($:$) оказались 0,52; 0,46 и 0,56 соответственно. Незначительно большие значения (0,60; 0,54 и 0,70) получены для дня с явлениями. После взаимной корректировки осадков по данным большинства ГМС $P_{пр}^*$ увеличилось до 0,69 и 0,84 по ВН за синхронные сроки и для дня с осадками. Результаты расчетов свидетельствуют о малой вероятности одновременного существования явлений (особенно ∇ и ∇) над площадью 30×30 км и субъективности ВН за осадками.

Таблица 1

Повторяемость (P_i) совместного обнаружения фиксированных форм облаков различным числом ГМС и вероятность $P_{пр}$ правильной оценки форм облаков над площадью 60×60 км по данным наблюдений одной ГМС

Форма облаков	Число ГМС				$P_{пр}$	$P_{пр}^*$
	3	4	5	6		
С	0,44	0,10	0,25	0,21	0,62	0,87
А	0,60	0,14	0,20	0,06	0,54	0,79
С	0,50	0,11	0,17	0,22	0,65	0,80
Q	0,64	0,16	0,10	0,10	0,59	0,83

С целью выявления возможности повышения достоверности ВН путем увеличения густоты сети ГМС рассчитывалась повторяемость $V(\rho)$ совместного наблюдения одинаковых форм облаков парами ГМС, расположенных на разных расстояниях (табл. 2).

Оказалось, что даже на небольших (< 10 км) расстояниях V облаков мала и практически не изменяется до больших расстояний. V явлений претерпевает значительные изменения с расстоянием даже по данным за сутки. Эти данные помогли выявить радиус r действия ГМС (расстояние, в пределах которого достоверность информации практически не меняется) для различных метеобъектов.

Проведенные исследования сделали очевидным:

1. Принимать за эталон ВН формы облаков можно только в тех случаях, когда представляется возможность оперировать информацией группы ГМС, выявляя достоверные данные по информации большинства ГМС.

2. Достоверность ВН повышается с уменьшением сложности метеорологической обстановки.

Повторяемость $V(p)$ совместных наблюдений одинаковых форм облаков на двух ГМС в зависимости от расстояния

Облака и явления	Расстояние, км										
	0—10	11—20	21—30	31—40	41—50*	51—60	61—70	71—80	81—90	91—100	101—110
$V(p)$ за синхронные сроки											
Зима											
S	0,57	0,56	0,56	0,51	0,52	0,53	0,46	0,40	0,37	0,32	0,32
A	0,51	0,49	0,47	0,48	0,47	0,45	0,49	0,44	0,43	0,42	0,42
C	0,68	0,61	0,64	0,66	0,65	0,64	0,67	0,66	0,65	0,64	0,63
Лето											
S	0,59	0,57	0,52	0,50	0,50	0,51	0,55	0,61	0,63	0,63	0,60
A	0,50	0,57	0,58	0,57	0,55	0,53	0,49	0,43	0,42	0,40	0,35
C	0,61	0,64	0,63	0,63	0,62	0,60	0,52	0,53	0,52	0,51	0,52
$V(p)$ по данным за сутки											
☐	0,66	0,50	0,47	0,41	0,30	0,35	0,33				
▽	0,50	0,50	0,40	0,35	0,32	0,29	0,27				
:	0,64	0,59	0,64	0,54	0,55	0,57	0,48				

* Данные, интерполированные по соседним градациям.

3. Оптимальный радиус действия ГМС для облаков без явлений ≈ 60 км, для явлений, обусловленных слоистообразными облаками ≈ 25 —30 км, кучевообразными облаками — < 10 км.

4. Увеличение плотности сети ГМС по сравнению с указанной в п. 3 не повысит достоверность данных, увеличит лишь вероятность обнаружения ∇ и $\square$.

Эффективности РН за облаками посвящен ряд работ [9, 5, 11]. Использование на практике новой методики распознавания облачных систем [3] и полученные в работе новые представления о достоверности ВН создали предпосылки для пересмотра ранее полученных сведений об эффективности РН.

Оценка достоверности РН— P_d осуществлялась в предположении однородности облачного поля в зоне расположения однотипного радиозеха (ОР) [3]. Сравнивались данные МРЛ, интерпретированные по методике ГГО [3, 10], с данными ВН. За эталон принималась информация большинства ГМС, расположенных в зоне ОР. В некоторых случаях (при небольшом числе ГМС в зоне ОР) ВН корректировались по синоптической обстановке.

P_d рассчитывалось как отношение числа случаев совпадений информации МРЛ и ВН (n_d) к числу всех серий РН с фиксируемой

облачной системой ($n_{\text{МРЛ}}$); $P_{\text{д}} = n_{\text{д}}/n_{\text{МРЛ}}$. Высокая достоверность распознавания облачных систем выявлена по 865 сериям РН при условии их обнаружения (табл. 3). Однако в радиусе 150 км отсутствие радиоэхо отмечалось в 35% случаев, в то время как ВН зафиксировали лишь 11% случаев безоблачной погоды. Более того, для серии наблюдений с радиоэхо оно не охватывало весь район с облаками по ВН.

Анализ РН с полным или частичным необнаружением облачности выявил, что в преобладающем большинстве случаев это были облака без явлений.

Таблица 3

Достоверность распознавания облачных систем $P_{\text{д}}$,
вероятность их обнаружения P_0 и эффективность $P_{\text{э}}$
радиолокационного метода наблюдений

P		Форма облаков по данным МРЛ					
		C, A или C+A	S	A+N или C+A+N	A+N+Q или C+A+N+Q	A+Q или C+A+Q	Q
$P_{\text{д}}$	Лето	0,94	0,92	0,88	0,90	0,82	0,89
	Зима	0,93	0,65	0,87	0,86	0,74	0,77
P_0	Лето	0,45	0,60	1,00	1,00	1,00	0,90
	Зима	0,27	0,39	1,00	1,00	1,00	0,78
$P_{\text{э}}$	Лето	0,43	0,55	0,88	0,90	0,82	0,80
	Зима	0,25	0,34	0,87	0,86	0,74	0,60

Приняв за единицу число случаев фиксации облачной системы ВН — ($n_{\text{ГМС}}$), подсчитывалась вероятность обнаружения их МРЛ (P_0) и эффективность РН ($P_{\text{э}}$) (табл. 3):

$$P_0 = \frac{n_{\text{МРЛ}}}{n_{\text{ГМС}}};$$

$$P_{\text{э}} = P_0 \cdot P_{\text{д}}.$$

Сравнение эффективности ВН и РН (см. табл. 1, 2, 3) выявило большую эффективность РН именно в случаях малой эффективности ВН и наоборот. Это послужило основанием для разработки методики совместного анализа двух видов информации.

Проверка выигрыша данных, полученных при совместной обработке ВН и РН, осуществлялась по материалам МРЛ п. Борисполь и сети ГМС в радиусе 150 км от п. Борисполь. В частности, рассчитывалась повторяемость совместного обнаружения одинаковых форм облаков ГМС и МРЛ ($P_{\text{МРЛ+ГМС}}$) и обнаружение их только

ГМС ($P_{\text{ГМС}}$) или МРЛ ($P_{\text{МРЛ}}$) (табл. 4). Оказалось, что как МРЛ, так и ГМС могут не обнаруживать отдельные формы облаков.

Анализ каждой серии наблюдений выявил возможность корректировки данных некоторых ГМС (либо на основе ВН большинства ГМС в зоне ОР, либо на основе данных МРЛ, определяемых с достоверностью, близкой к единице). Корректировка ВН по информации МРЛ уже давно производится в БТГМЦ [7]. Следует отметить, что после корректировки данных $P_{\text{МРЛ+ГМС}}$ существенно возросла (табл. 4, $P_{\text{кор}}$).

Анализ серий наблюдений, в которых отдельные формы облаков не обнаруживаются либо МРЛ, либо ГМС, выявил возможность взаимного пополнения данных об облаках (это проверялось по синоптической обстановке).

Таблица 4

Вероятность одновременного обнаружения облаков в зоне однотипного радиоэхо МРЛ и ГМС ($P_{\text{МРЛ+ГМС}}$), только МРЛ ($P_{\text{МРЛ}}$) и только ГМС — ($P_{\text{ГМС}}$)

Форма облаков	$P_{\text{МРЛ+ГМС}}$	$P_{\text{МРЛ}}$	$P_{\text{ГМС}}$	$P_{\text{кор}}$	$P_{\text{МРЛ+ГМС}}$	$P_{\text{МРЛ}}$	$P_{\text{ГМС}}$	$P_{\text{кор}}$
Лето					Зима			
Q	0,57	0,40	0,03	—	0,07	0,77	0,16	—
N	0,50	0,30	0,20	0,83	0,43	0,27	0,66	—
S	0,10	0,32	0,58	0,31	0,15	0,10	0,75	0,23
A	0,22	0,27	0,51	—	0,02	0,63	0,35	—
C	0,11	0,34	0,45	—	0,04	0,64	0,32	—

В заключение необходимо отметить, что приведенные в таблице расчеты производились только для ячеек пространства, в которых имеются ГМС. Большой выигрыш получился бы в случае проведения расчетов для всех ячеек пространства, в том числе и тех, где нет ГМС.

Выводы

1. Данные наблюдений за облаками одной ГМС не могут являться эталоном для проведения сравнений с другими методами.
2. Порознь полученная информация об облаках (с помощью МРЛ или ГМС) недостаточно достоверна и не всегда характеризует облачное поле над обслуживаемой территорией.
3. Проведение совместной обработки двух видов наблюдений повышает достоверность и полноту информации об облаках, особенно в сложной метеорологической обстановке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Г ан д и н Л. С. О принципах рационального размещения сети метеорологических станций. — «Тр. ГГО», 1961, вып. 111, с. 81—98.
2. Гнеденко Б. В. Курс теории вероятности. М., Физматгиз, 1961. 406 с.
3. Дивинская Б. Ш. К методике распознавания облачных систем по их радиолокационным характеристикам. — «Тр. ГГО», 1973, вып. 281, с. 48—57.
4. Дивинская Б. Ш. Алгоритмы комплексной обработки данных наблюдений за облаками на сети метеостанций и метеорологических радиолокаторов. — «Тр. ГГО», 1976, вып. 383, с. 85—91.
5. Дивинская Б. Ш., Сальман Е. М. Сравнение радиолокационной и метеорологической информации об облачности. — «Тр. ГГО», 1969, вып. 243, с. 3—7.
6. Дроздов О. А. О принципах рациональной сети метеорологических станций. — «Тр. ГГО», 1961, вып. 123, с. 33—45.
7. Меджитов Р. М. Использование данных автоматизированных средств наблюдений в оперативной практике. Разработка и эксплуатация автоматических метеорологических станций. Л., Гидрометеиздат, 1974.
8. Новожилов Н. И. О причинах неоднородности режимных материалов по формам облаков. — «Тр. ГГО», 1970, вып. 266, с. 133—145.
9. Сальман Е. М., Дивинская Б. Ш. Вопросы метеорологической эффективности радиолокационной системы наблюдений за облачностью и опасными явлениями погоды. — «Тр. ГГО», 1971, вып. 261, с. 92—107.
10. Сальман Е. М., Дивинская Б. Ш. Оптимальная форма и частота представления радиолокационных данных об облаках и связанных с ними явлениях. — «Тр. ГГО», 1973, вып. 281, с. 65—74.
11. Степаненко В. Д. Радиолокация в метеорологии. Л., Гидрометеиздат, 1973. 343 с.

Г. Б. Брылев, Г. И. Куликов

О КРИТИЧЕСКОМ КОНТРОЛЕ ДАННЫХ СЕТЕВЫХ МРЛ ПО СТАТИСТИЧЕСКИМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ РАДИОЭХО ОПАСНЫХ ЯВЛЕНИЙ

1. Постановка задачи

В результате обработки данных оперативных наблюдений на каждой МРЛ получается большой объем статистических характеристик радиоэхо гроз и ливней. Статистический анализ максимальных высот радиоэхо (H км), отражаемостей ($\lg Z$), критерия радиолокационной опасности ($Y = H \cdot \lg Z_3$) [1] в ячейках 30×30 км позволяет получить характеристики радиоэхо в виде параметров распределений. В свою очередь эти параметры при их большой статистической обеспеченности могут быть приняты за норму при оценке метеорологической эффективности МРЛ за длительные сроки (от месяца до сезона).

Основной трудностью при оценке достоверности радиолокационных данных о грозах является выработка критерия пространственного и временного совпадения результатов разных видов наблюдений.

Для обоснования этих положений оценим погрешности соответствия положения точки на ИКО МРЛ положению этой точки в пространстве ($\Delta r_{\text{макс}}$) без учета погрешности ориентирования МРЛ. Зададимся точностью определения расстояния $\Delta R = \pm 5\% R$ (км), а точность соответствия развертки на ИКО положению оси диаграммы направленности антенны МРЛ примем равной $3R\theta$, где θ — ширина диаграммы направленности.

Максимальную погрешность $\Delta r_{\text{макс}}$ можно характеризовать радиусом окружности и площадью круга ΔS , внутри которых может оказаться измеряемая точка в пространстве:

$$\Delta r_{\text{макс}} = \pm \sqrt{(\Delta R)^2 + (3R\theta)^2}. \quad (1)$$

Как следует из табл. 1, в которой приведены максимальные и среднеквадратичные значения погрешностей Δr и ΔS в зависимости от удаления от МРЛ, значения этих погрешностей существенны. Отсюда будет разумным считать наземные и радиолокационные

данные о грозах и ливнях совпавшими, если за пределами 50 км от МРЛ в радиусе 30 км от зоны максимальной отражаемости $\lg Z_{\text{макс}}$ в Сб одна из метеостанций отмечала грозу или ливень, а на МРЛ $Y \geq Y_{\text{кр}}(\kappa)$ [1]. Ограниченный радиус наблюдений одной метеостанцией за грозой (10—15 км) позволяет считать совпавшими по времени грозы по МРЛ и МС, которые зафиксированы в течение ± 30 мин от начала и конца их наблюдений на МС.

Таблица 1

Погрешности соответствия точки в пространстве и на ИКО МРЛ
(М:300 км)

Расстояние от МРЛ, км	Максимальные ошибки				Среднеквадратичные ошибки			
	$2\Delta R$ км	$6R\theta$ км	ΔS км ²	Δr км	R км	$R\theta$ км	ΔS км ²	Δr км
60	6	10,4	36	4,25	2	3,4	12	1,44
90	9	15,3	84	6,5	3	5,1	28	2,16
120	12	20,4	108	8,7	4	6,8	36	2,9
180	18	30,6	424	13,0	6	10,2	108	4,3
240	24	40,8	576	17,4	8	13,6	192	5,8

Таблица 2

Радиолокационные характеристики гроз по территории СССР,
подтвержденные наземной сетью за грозовые сезоны 1974—1975 гг.
в радиусе 150 км от МРЛ

Параметр радиоэхо	Характеристики распределения	1974 г.	1975 г.
H км	$\bar{H}$	9,11	9,13
	σ_H	1,97	1,95
	$v = (\sigma_H/\bar{H})\%$	21,6	21,3
	$\overline{\Delta H}$	2,70	2,61
$\Delta H = H - H_{-22^\circ\text{C}}$ км	$\sigma_{\Delta H}$	1,90	1,92
	$v = (\sigma_{\Delta H}/\overline{\Delta H})\%$	70	74
	$\overline{\lg Z_3}$	2,25	2,03
$\lg Z_3$	$\sigma_{\lg Z_3}$	0,83	0,77
	$v = (\sigma_{\lg Z_3}/\overline{\lg Z_3})\%$	37	34
$Y = H \lg Z_3$	$\bar{Y}$	20,8	20,6
	σ_Y	9,67	9,46
	$v = (\sigma_Y/\bar{Y})\%$	47	46
Число случаев		11 070	11 650

2. Особенности распределений характеристик радиоэхо

Основные параметры распределений H , $\lg Z_3$ и Y приведены в табл. 2, которая составлена по данным более чем 11 000 очагов гроз. Как следует из табл. 2, эти параметры практически неизменны в течение двух грозовых сезонов.

Гистограмма повторяемости H (рис. 1) в грозах, измеряемой относительно уровня места установки МРЛ, имеет два максимума на $H=8$ и 10 км. Их можно объяснить особенностями таблиц измерения высот, приведенных в [1], в которых в результате округления пересчетной формулы $H=R \cdot \sin \varepsilon + 6 \cdot 10^{-5} R^2$ значений с $H=8$ и 10 км оказалось больше, чем с $H=9$ км. По данным сети МРЛ гроз с $H \geq 13$ км отмечается не более 4%, число гроз с $H < H_{-22}^{\circ}$ не превышает 8% их общего количества.

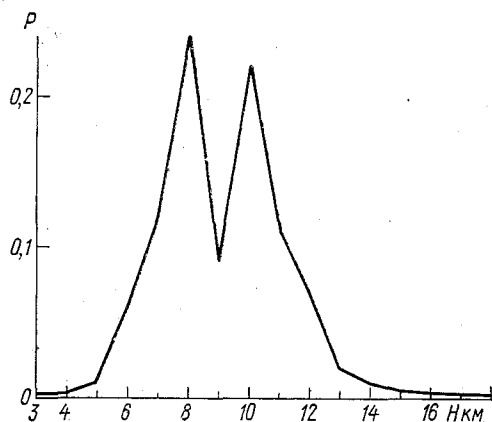


Рис. 1. Повторяемость максимальных высот радиоэхо H в км в грозах по 11 000 грозovým очагам.

При критконтроле данных МРЛ о грозах по параметрам распределений результаты табл. 2 могут быть приняты за эталон. Большие, чем в табл. 2, значения σ и ν покажут, что в течение сезона МРЛ работала с отклонениями от технических норм. Значительные завышения или занижения параметров распределений (больше, чем на $\pm 5\%$) по сравнению с табл. 2 и данными ближней зоны могут указывать на наличие систематической ошибки. Ее причину необходимо выяснять в каждом отдельном случае с учетом всех известных фактов и их всестороннего анализа.

В зоне до 50 км от МРЛ $H_{50}=9,2$ км. Если разбить радиус наблюдений 200 км на четыре равных интервала $i=1, 2, 3, 4$ по 50 км и нормировать среднее значение H_i в каждом интервале на H_{50} первого интервала, то результаты данных всех МРЛ можно разделить на три группы. У первой отношение H_i/H_{50} возрастает с расстоянием R от МРЛ, у второй — практически не меняется, у третьей — убывает. Анализ показал, что в третьей группе потенциал МРЛ — Π_m был ниже нормы Π_{MN} , а в первой группе измерение H велось при неподвижной антенне. При таком режиме работы из измеренной H необходимо вычитать поправку, равную $\theta R/2$, т. е. половине ширины диаграммы направленности антенны. Отсюда, если величина H_i/H_{50} в грозах в радиусе 200 км от МРЛ убывает или возрастает с расстоя-

нием больше, чем на $\pm 5\%$, то это объясняется или неправильным горизонтированием антенны или значением $\Pi_M < \Pi_{MN}$, или нарушением методики съема данных высот радиоэхо.

Анализ отношения $\bar{Y}_i/\bar{Y}_{50}$ показал, что часто Y является результатом компенсации завышенных значений $\lg Z_3$ и заниженных Π в грозах. В результате качество информации о грозах по величине Y даже на МРЛ с $\Pi_M < \Pi_{MN}$ становится близким к среднестатистическому уровню.

Таблица 3

Сезонный ход нормированных радиолокационных характеристик гроз
($R=150$ км) по данным 1974 г.

Характеристика	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	$\Delta=(\text{макс.} - \text{мин.})\%$
$\bar{H}/9,2$	0,92	0,99	1,07	1,0	0,92	15
$\lg Z_3/2,2$	1,04	1,00	1,00	0,96	0,88	16
$Y = H \cdot \lg Z_3/21,4$	0,93	0,98	1,06	0,96	0,81	25
$H_{-22^\circ\text{C}}/6,3$	0,90	0,99	1,03	1,04	1,02	14
Число случаев	614	1122	1754	483	85	

При анализе параметров распределения часто приходится сталкиваться с необходимостью учета сезонного хода радиолокационных характеристик гроз и их зависимостью от повторяемости различных фронтов в каждом регионе (табл. 3 и 4). В табл. 3 средмесячные радиолокационные параметры нормированы относительно средних за сезон, а в табл. 4 — относительно средних по всем фронтам.

Как следует из табл. 3, составленной по данным 20 МРЛ, наибольшая амплитуда колебаний $\Delta=(\text{макс.} - \text{мин.})\%$ приходится на Y

Таблица 4

Нормированные радиолокационные характеристики гроз
в зависимости от типа фронта по данным 1974—1975 гг. ($R=200$ км)

Типы фронта	Число случаев	$\bar{H}/9,4$	$\lg Z_3/2,1$	$\bar{Y}_{20,6}$
Стационарный с волнами	3715	1,03	1,05	1,05
Теплый	1503	1,01	1,05	1,0
Холодный	2347	0,98	1,0	0,98
Вторичный холодный	1647	0,95	1,05	0,93
Фронт окклюзии	618	0,90	0,95	0,89
Все фронты	9830	1,0	1,0	1,0
$\Delta=(\text{макс.} - \text{мин.})\%$		13	10	16

**Сопоставление радиолокационной и наземной информации
по данным сети МРЛ за 1974 г. (числитель) и 1975 г. (знаменатель)
в летние периоды в радиусе 200 км (%)**

МРЛ	МС				
	К	▽	:	▲	Q
К	47,0	6,5	2,5	31,3	10,6
	43,4	6,6	1,0	27,7	11,0
К)	23,2	9,7	5,6	14,1	12,4
	30,6	9,3	2,9	13,4	15,0
(К)	13,8	8,1	3,3	5,1	13,9
	13,5	4,6	1,3	5,0	8,1
К _{общ}	84,0	24,3	11,4	50,5	36,9
	87,5	20,5	5,2	46,1	34,1
▽	9,3	65,3	45,4	5,1	30,9
	7,2	61,1	25,0	6,8	41,2
:	0,2	3,0	21,2	2,0	0,3
	0,2	10,3	57,5	—	1,3
▲	3,6	0,3	0,1	41,4	0,7
	2,5	0,2	1,0	44,6	3,3
Q	3,0	7,1	21,9	1,0	31,2
	2,6	7,9	11,3	2,5	20,1
Число случаев	19 743	6605	1138	99	2677
за 1974 г.	100%	100%	100%	100%	100%
Число случаев	16 060	6074	1111	119	2093
за 1975 г.	100%	100%	100%	100%	100%
Не определено радиоэхо в 1975 г. (чис- ло случаев)	543	239	94	—	42

и равна 25%. Это происходит в основном за счет майских и сентябрьских гроз. В целом же за грозовой сезон эти колебания не настолько значительны, как ожидалось. Однако анализ данных отдельно взятой МРЛ показывает, что величина Δ может достигать 50%, особенно при резких колебаниях погодных условий в районе работы МРЛ.

Сравнение зависимости параметров радиоэхо гроз по фронтам проведено по выборочным данным нескольких МРЛ (табл. 4). Величина Δ и здесь не превосходит 16%. Однако если взять отдельную МРЛ, то Δ может увеличиться до 25—30%.

Из анализа табл. 2—4 следует, что для того чтобы сделать вывод о правильности полученных данных о грозах, необходим сравнительно большой объем исходного материала, подтвержденного на-

емными наблюдениями с учетом особенностей синоптических процессов и сезонного хода параметров радиоэхо гроз.

3. Сопоставление радиолокационных и наземных данных

В табл. 5 сопоставляются наземные (МС) и радиолокационные (МРЛ) данные за 1974—1975 гг. В ней приведено отношение (%) числа явлений по данным МРЛ к числу явлений по данным наземных наблюдений, принятых за 100%.

Анализируя данные табл. 5 за 1974 г., можно сделать следующие выводы:

1) при относительно высокой оправдываемости информации МРЛ о грозах (84%) и ливнях (65,2%) информация по обложным осадкам и конвективным облакам оправдывается только на 21,2 и 31,2% соответственно;

2) по данным МРЛ ∇ превращаются в ∇ в 9,3%, в то время как $\nabla \rightarrow \nabla$ в 24,3%;

3) из всех случаев гроз (16596=100%) в 56% операторы МРЛ дают ∇ , в 27,6 — ∇ и в 16,4% — (∇).

Сравним данные метеостанций и МРЛ, на основе которых составлена табл. 5. Всего было зафиксировано 30262 случая наблюдений (100%). В табл. 6 приведено, как эти случаи распределились по явлениям.

Если данные о ∇ , ∇ и конвективных облаках практически совпадают, то обложные осадки МРЛ дает в 2,4 раза меньше, а град в 8 раз больше по сравнению с МС. Это следует из характера самих явлений. МРЛ четко фиксирует перестройку облачной системы As—Ns в As—Ns—Cb и выделяет зоны с ∇ , в то время как регистрация перехода $\nabla \rightarrow \nabla$ наземным наблюдателем не всегда объективна. Зона выпавшего на землю града обычно занимает слишком малую площадь, вероятность ее попадания непосредственно над МС небольшая, в то время как МРЛ фиксирует факт наличия града в облаке и его выпадение рядом с МС.

Данные за 1975 г. отличаются незначительно, за исключением обложных осадков, оправдываемость в них возросла с 21,2% до 57,5%.

Таблица 5 может быть принята за эталон, по которому можно сравнивать данные отдельной МРЛ со среднестатистическими данными по всей сети МРЛ.

Необходимо отметить, что значительное изменение соотношения гроз ∇ , ∇ и (∇) относительно приведенных в табл. 5 указывает на

Таблица 6

Обнаружение данных об опасных явлениях и облаках (%) по данным МРЛ и МС за 1974 г.

Явление	МС	МРЛ
∇	65,3	64,0
∇	21,8	24,7
:	3,8	1,6
$\blacktriangle$	0,3	2,6
Q	8,8	7,1

неправильную работу измерительных систем МРЛ. Завышение числа гроз $\bar{K}$ и уменьшение соответственно $\bar{K}$ и $(\bar{K})$ говорит о завышении H и $\lg Z_3$ вместе или в отдельности по техническим причинам. И наоборот, увеличение $\bar{K}$ и $(\bar{K})$ по сравнению с $\bar{K}$ свидетельствует о занижении измеренных параметров радиоэхо.

Отклонение $\pm 5\%$ от значений $\bar{K}_{\text{общ}}$ и V , приведенных в табл. 6 является пределом для положительной оценки работы МРЛ и его обслуживающего персонала.

Следует обратить внимание на появление секторов, где эффективность данных МРЛ может быть резко понижена по сравнению с табл. 5, из-за застройки территории вокруг места установки МРЛ или наличия в секторах высоких предметов.

Таблица 7

Сопоставление визуальной и радиолокационной информации о грозах в зависимости от расстояния по данным УАМЦ

Удаление от МРЛ, км	Количество гроз по визуальным данным	Совпадение данных МРЛ и МС, %
0—30	134	93,4
30—100	526	87,1
100—150	652	82,2
150—200	908	71,5
200—300	1033	48,9
0—300	3253	69,9

При сопоставлении данных МРЛ и МС в зависимости от расстояния может быть принята за образец табл. 7 [2] (только для секторов с нулевыми углами закрытия).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Руководство по производству наблюдений и применению информации с радиолокаторов МРЛ-1 и МРЛ-2. Л., Гидрометеиздат, 1974. 344 с.
2. Брылёв Г. Б., Сергиенко Е. П. Особенности оперативных данных радиолокатора МРЛ-1 в грозах и ливнях. — «Тр. ГГО», 1975, вып. 328, с. 104—114.

Н. Д. Попова

О ПАРАМЕТРИЗАЦИИ ВЕРТИКАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОДНОСТИ ОБЛАКОВ С ПОМОЩЬЮ ЕСТЕСТВЕННЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ

Одной из важных задач исследования влагосодержания облачной атмосферы является определение вертикального профиля водности по данным дистанционных методов зондирования атмосферы. В микроволновом диапазоне существует связь между радиотепловым излучением и водностью атмосферы. Однако определение профиля водности по известному радиотепловому излучению является некорректной задачей.

Как известно, водность в облаке величина довольно изменчивая, причем вариации профиля водности $w(H)$ носят случайный характер. Поэтому возник вопрос о параметризации водности. В последнее время для оптимальной параметризации широко используется разложение по естественным ортогональным составляющим (по собственным векторам). В работе Н. А. Багрова [1] изложена идея метода разложения по естественным функциям, дается его описание на основе теории матриц, указаны преимущества этого метода в сравнении с другими способами аналитического представления метеорологических полей. В монографии [2] обобщены основные результаты статистического анализа метеорологических элементов с помощью метода разложения по естественным составляющим, дается обзор работ, в которых он использовался.

Статистический анализ вертикального распределения водности в облаках до сих пор не проводился. В данной работе излагаются результаты статистического исследования структуры вертикального распределения водности облаков для двух физико-географических районов по данным самолетного зондирования, взятыми из таблиц ТАЭ-7. Согласно [3], в I район (Северо-Запад ЕТС) входят пункты зондирования Ленинград и Рига; во II район (Украина) — Киев; Харьков и Львов. Все данные классифицировались по типам облаков и разделены на два периода года (холодный и теплый). Для ис-

следования были взяты слоисто-кучевые облака, так как для этой облачности получен достаточно большой объем выборки:

Период года	I	II
	район	район
Холодный	216	216
Теплый	108	106

При зондировании водность измерялась не на фиксированных высотах, поэтому рассматривались слои по отношению к нижней границе облаков. Были выделены следующие слои по вертикали: 0—0,10 км (1), 0,10—0,25 км (2), 0,25—0,40 км (3), 0,40—0,60 км (4), 0,60—0,80 км (5). Число рассматриваемых уровней определялось объемом выборки и количеством случаев облаков большей мощности. Для Sc анализировалось 5 слоев, что соответствует мощности

Таблица 1

Корреляционные матрицы водности Sc по районам для теплого (Т) и холодного (Х) периодов

Слой	Период	1		2		3		4		5	
		I	II	I	II	I	II	I	II	I	II
1	Х	0,006	0,015	0,009	0,022	0,010	0,017	0,005	0,011	0,002	0,005
	Т	0,012	0,019	0,020	0,028	0,019	0,025	0,011	0,018	0,004	0,004
2	Х	0,87	0,98	0,018	0,039	0,020	0,030	0,010	0,020	0,004	0,009
	Т	0,82	0,84	0,049	0,059	0,049	0,053	0,026	0,035	0,006	0,007
3	Х	0,75	0,70	0,87	0,77	0,029	0,039	0,015	0,027	0,006	0,012
	Т	0,67	0,68	0,85	0,80	0,065	0,073	0,038	0,049	0,009	0,010
4	Х	0,53	0,49	0,61	0,56	0,70	0,74	0,015	0,034	0,007	0,015
	Т	0,45	0,47	0,54	0,58	0,68	0,73	0,048	0,060	0,013	0,011
5	Х	0,29	0,32	0,32	0,36	0,36	0,48	0,66	0,65	0,008	0,015
	Т	0,32	0,28	0,26	0,27	0,34	0,34	0,59	0,43	0,011	0,010

0,80 км. Для случаев меньшей мощности водность на уровнях выше мощности облака считалась равной нулю. Из выборки были исключены облака мощностью менее 150 м и зондирования с отсутствием данных на двух соседних уровнях.

На основе отобранного материала рассчитывались корреляционные матрицы вертикального распределения водности Sc для двух районов и двух периодов года, которые представлены в табл. 1. Расчеты производились по программе, составленной в ОБММ ГГО.

В табл. 1 выделены дисперсии водности в соответствующих слоях, слева от выделенных данных помещены нормированные матрицы

Таблица 2

Собственные векторы X_j , собственные числа λ_j
и распределение дисперсий d вертикального профиля водности Sc
по районам

Слой	X_1		X_2		X_3	
	I	II	I	II	I	II
Холодный период года						
1	0,271	0,315	-0,189	-0,345	0,483	0,308
2	0,513	0,544	-0,334	-0,548	0,488	0,285
3	0,676	0,572	-0,226	0,024	-0,533	-0,680
4	0,415	0,474	0,614	0,603	-0,241	-0,003
5	0,185	0,230	0,651	0,466	0,432	0,602
λ_j	0,059	0,104	0,011	0,022	0,004	0,009
$d\%$	75,6	73,2	89,7	88,6	94,8	94,9
Теплый период года						
1	0,225	0,261	-0,193	-0,286	0,512	0,386
2	0,539	0,531	-0,462	-0,565	0,415	0,355
3	0,653	0,622	-0,173	0,034	-0,641	-0,766
4	0,466	0,502	0,782	0,750	0,067	0,343
5	0,125	0,102	0,329	0,190	0,388	0,143
λ_j	0,141	0,170	0,027	0,028	0,009	0,012
$d\%$	76,2	76,9	90,7	89,5	95,5	94,9

(коэффициенты корреляции), справа — ненормированные. Здесь содержится вся информация, необходимая для корреляционного анализа. Из таблицы видно, что наибольшая корреляция отмечается между смежными слоями. Коэффициенты корреляции уменьшаются с высотой и остаются близкими для обоих районов. Следует отметить, что дисперсия растет до третьего слоя, а затем уменьшается.

Для ковариационных матриц получены системы собственных векторов $\{X_j\}$ и собственные числа λ_j . Три первых вектора приведены в табл. 2. Первые собственные векторы, представляющие основное колебание вертикального распределения водности повторяют ход средних значений водности (рис. 1). Второй и третий векторы характеризуют мелкомасштабные процессы внутри облака, обусловленные его структурой и динамикой, и определяют изменчивость водности. Для обоих районов и периодов года векторы близки между собой, что свидетельствует об устойчивости собственных векторов вертикального распределения водности Sc .

В табл. 2 приведены также значения собственных чисел λ_j и распределение дисперсий $d = \sum_{j=1}^j \lambda_j / \sum_{j=1}^n \lambda_j$, где n — порядок матрицы.

Сходимость разложений, как следует из табл. 2, достаточно хорошая. При использовании трех векторов будет учитываться 95—96% суммарной дисперсии. В табл. 3 приведены примеры восстановленных профилей водности Sc для I и II районов по трем своим и по трем «чужим» (для I района брались вектора II района и наоборот) векторам. Здесь же приведены исходные профили. Восстановление по трем векторам получилось вполне удовлетворительное.

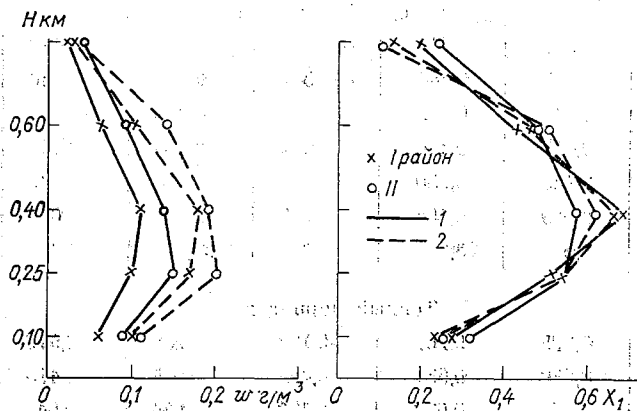


Рис. 1. Профиль средних значений водности w и собственные векторы вертикального распределения водности X_1 .

1 — холодный период года, 2 — теплый период года.

Это позволяет сделать вывод о возможности использования разложения по естественным ортогональным составляющим для оптимальной параметризации профиля водности облаков. Следует заметить, что необходимо провести такие же исследования для всех форм облаков.

Таблица 3
Профили водности исходные и восстановленные

Слой	I район			II район		
	Исходный	Восстановленный по трем векторам		Исходный	Восстановленный по трем векторам	
		своим	«чужим»		своим	«чужим»
1	0,07	0,12	0,14	0,04	0,03	0,02
2	0,32	0,28	0,29	0,05	0,06	0,05
3	0,28	0,30	0,27	0,07	0,07	0,07
4	0,11	0,12	0,14	0	0,003	0,004
5	0	0,02	0,02	0	0	0

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Багров Н. А. Аналитическое представление последовательности метеорологических полей посредством естественных ортогональных составляющих. — «Тр. ЦИП», 1959, вып. 74.
2. Мещерская А. В. и др. Естественные составляющие метеорологических полей. Л., Гидрометеиздат, 1970. 199 с.
3. Дубровина Л. С. Некоторые характеристики водности облаков над территорией СССР. — «Тр. НИИАК», 1967, вып. 44, с. 39—54.

ОБ ОПТИМАЛЬНОМ ПРИЕМЕ СИГНАЛОВ ОТ МЕТЕОЦЕЛЕЙ

При подходе к оптимальному приему радиолокационного сигнала, отраженного от метеоцели, необходимо учитывать, что радиолокационная отражаемость Z облучаемого объема связана со средней мощностью радиоэха через уравнение радиолокации метеоцелей.

Средняя мощность отраженного сигнала $\bar{P}$ получается в результате осреднения в импульсном объеме достаточно большого числа последовательно независимых и флуктуирующих импульсов с мощностью P_i .

При оперативной работе МРЛ в силу выбранного режима работы невозможно получить достаточно большое число отраженных импульсов в одном объеме. За один объем здесь принимается объем, образованный протяженностью зондирующего импульса $h/2$ и шириной диаграммы направленности антенны θ . Для устранения этого явления применяются способы интегрирования сигнала на дискретных интервалах наклонной дальности с усреднением по азимуту за несколько посылок [1, 2]. В этом случае отклонение от среднего значения $\bar{P}$ не превышает ± 3 дБ, однако не наблюдается существенного увеличения отношения сигнал/шум.

Другой подход заключается в том, что на входе приемного устройства сигнал, отраженный от метеоцели, можно представить как сообщение, состоящее из огибающей, определяемой средней мощностью сигнала, на который наложены сигналы, определяемые флуктуирующими свойствами метеоцели и собственным шумом приемного устройства. В этом случае действенный способ увеличения отношения сигнал/шум заключается в согласовании частотной характеристики приемного тракта со спектром принимаемого сигнала.

С достаточной точностью приближения закон изменения огибающей можно аппроксимировать импульсами колоколообразной формы. Аппроксимирующая функция дается выражением

$$S(t) = S_0 \exp\left(-\frac{\pi t^2}{r \tau_n}\right)^2, \quad (1)$$

где τ_n — длительность импульса огибающей сигнала, определяемого пространственной протяженностью радиоэха, отраженного от метео-

цели. Под пространственной протяженностью мы будем понимать тот диаметр отраженного пятна на экране индикатора РЛС, который учитывается при анализе явлений (режим штормоповещения). Для этой цели построим вероятность появления $d_{\max}$ при определенных превышениях пороговой чувствительности $P_{\text{ш}}$. Величина $d_{\max}$ является максимально выбранной в зависимости от угла подъема антенны.

При обработке более 300 серий полученных данных построен график (рис. 1). При уменьшении порога превышения $P_{\text{ш}}$ кривая распределения будет смещаться в сторону больших значений $d_{\max}$.

Были также построены графики зависимости вероятности появления $d_{\max}$ в зависимости от расстояния. В результате анализа материалов можно сказать, что пространственную протяженность радиоэхо от метеоцели можно брать в пределах 1—2 км для $P_{\text{пр}}/P_{\text{ш}}$, превышающего $P_{\text{ш}}$ на 10—15 дБ, и 2—4 км для $P_{\text{пр}}/P_0$ на уровне $P_{\text{ш}}$. Следовательно, в формулу (1) необходимо подставить $\tau_{\text{н}}$ порядка 10—20 мкс.

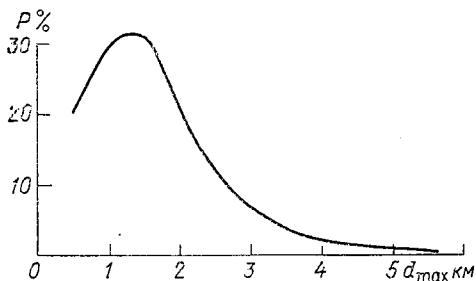


Рис. 1. Гистограмма распределения $d_{\max}$ в кучево-дождевых облаках.

Идеальным примером согласования частотной характеристики со спектром сигнала является прием импульсов (1) усилителем с колоколообразной формой частотной характеристики

$$G(f) = g_0 \exp\left(\frac{\pi f^2}{2 \Delta f}\right) e^{-\gamma f t}, \quad (2)$$

где Δf — эффективная полоса пропускания. Такая частотная характеристика соответствует характеристике тракта УПЧ. В этом случае мы можем считать, что Δf и $\tau_{\text{н}}$ связаны между собой соотношением

$$\Delta f = \frac{1 - 1,2}{\tau_{\text{н}}}.$$

Предельная чувствительность приемного устройства определяется соотношением

$$P_{\text{ш}} = F_{\text{ш}} k T \Delta f.$$

Необходимо отметить, что резонансный усилитель соответствует интегрирующему устройству в оптимальном фильтре для огибающей. Время запаздывания ($\Delta \tau_0$) его будет определяться соотношением

$$\Delta \tau_0 = \frac{1}{\Delta f} \left(\frac{S}{N} \right).$$

Для усреднения по азимуту желательно использовать экспоненциально весовой накопитель с оптимальной обратной связью

$$m_{\text{опт}} = e^{1,27/N},$$

где N — количество импульсов в пачке (можно брать 8—16 при режиме вращения антенны 6 об/мин).

При реализации такого приемного устройства мы получаем достаточный выигрыш отношения сигнал/шум и одновременно приближаемся к получению $\bar{P}$, отличающегося от действительного среднего не хуже ± 3 дБ.

Увеличение потенциала МРЛ по сравнению с существующим произойдет на 10—15 дБ. Необходимо учесть, что при технической реализации такой схемы приемного устройства должна быть повышена общая стабильность частоты примерно до $5 \cdot 10^{-6}$ (с учетом стабильности генератора, гетеродина и системы АПЧ).

В заключение следует отметить, что пространственная протяженность метеоцели дает возможность построить оптимальное устройство с максимальным отношением сигнал/шум при одновременном усреднении мощности отраженного сигнала. Можно воспользоваться выделением 10-й гармоники и использовать ее в численной схеме классификации явлений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петрушевский В. А. Принцип автоматизированной обработки и цифрового представления метеоданных. — «Тр. ГГО», 1974, вып. 327.
2. Shreeve K. H., Erdal A. Weather Radar Video Integrator and Processor. — „IEEE, Trans. Geosci. Electron.”, vol. 6, 1968, N. 3.
3. Лезин Ю. С. Оптимальные фильтры и накопители импульсных сигналов. М., «Сов. радио», 1969.
4. Бакут П. Л. и др. Вопросы статистической теории радиолокации. М., «Сов. радио», 1963.

Ф. И. Бруссер, А. А. Федоров

ПЕРЕДАЧА РАДИОЛОКАЦИОННОЙ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

Одним из главных вопросов при создании сети метеорологических радиолокаторов является передача и представление информации потребителю. При создании сети МРЛ приходится решать два вопроса:

1) передача радиолокационной информации (РЛИ) от аппаратных кабин до КДП;

2) передача обработанной информации с КДП потребителям, а также обмен РЛИ между аэропортами.

Первый вопрос определяется тем, что невозможно размещение МРЛ на зданиях КДП аэропортов из-за следующих причин:

— электромагнитной совместимости МРЛ с другими радиолокационными средствами (необходим определенный порядок их размещения);

— требований наблюдения за метеорологическими процессами над ВПП;

— санитарной зоны ППМ (плотность потока мощности) СВЧ излучения;

— установки МРЛ в условиях наименьших углов закрытия.

Это приводит к необходимости установки МРЛ на расстоянии от КДП до 10 км.

Второй вопрос определяется тем, что количество потребителей увеличивается и появляется возможность обмена информацией между аэропортами. Необходимо учесть, что потребитель предъявляет требование иметь на рабочем месте (кроме обработанной радиолокационной информации) информацию в виде картинок режимов ИКО и ИДВ.

Для получения РЛИ с сохранением «качества» (точных характеристик, разрешающей способности) используется метод непосредственной передачи [1, 2]. Для этого применяются кабельные широкополосные линии связи с частотным и временным разделением каналов и сигналов. Полоса частот, используемых такими системами, составляет сотни кГц, поскольку сигналы с выходов видеодетектора приемного устройства или системы обработки имеют длительность

в пределах 0,3—10 мкс. Радиолокационное изображение на индикаторе, полученное в результате метода непосредственной передачи по точности и разрешающей способности ухудшается незначительно по сравнению с изображением на первичном индикаторе.

Отсутствие развитой сети широкополосных каналов приводит к необходимости разработки средств связи по кабельным линиям для каждой вновь создаваемой системы передачи РЛИ. Достоинством системы с кабельными линиями связи является высокая помехоустойчивость передачи РЛИ. К недостаткам можно отнести следующее: неполное использование пропускной способности каналов обусловленное применением неоптимальных методов передачи и обработки сигналов, высокую стоимость кабелей с малыми значениями затухания на высоких частотах, высокую стоимость работ по прокладке кабелей.

Другой метод передачи РЛИ — использование узкополосных линий связи, который можно реализовать с помощью кадрового или секторного преобразования [1]. В этом случае необходимо определить реальное время передачи или темп обновления информации. В случае работы РЛС в режиме штормоповещения темп обновления информации может составлять 15 мин и выше. При работе МРЛ в ближней зоне, т. е. непосредственно в районе ВПП, необходимый темп обновления информации составит 6 мин и более. В обоих случаях можно считать, что время передачи информации ограничивается пределом 90—120 секунд.

Система с кадровым преобразованием может быть практически реализована с применением как аналоговых, так и цифровых устройств. Метод кадрового преобразования можно использовать для создания системы передачи информации с РЛС по узкополосному каналу связи, пропускная способность которого в

$$K = K_1 K_2 K_3 K_4 \quad (1)$$

раз уменьшена по сравнению с исходной, которая требуется при использовании метода непосредственной передачи, где K_1 — коэффициент азимутальной избыточности

$$K_1 = \Delta \beta / \Delta \beta_{\text{РЛС}}, \quad (2)$$

где $\Delta \beta$ — укрупненный азимутальный строб, $\Delta \beta_{\text{РЛС}}$ — угол поворота антенны за период повторения импульсов запуска (чаще всего его принимают равным ширине диаграммы направленности θ антенны по азимуту или углу места); K_2 — коэффициент сокращения времени

$$K_2 = T_{\text{п}} / T_{\text{р}}, \quad (3)$$

где $T_{\text{п}}$ — период повторения импульсов запуска, $T_{\text{р}}$ — время рабочего хода развертки, соответствующей максимальной дальности; K_3 — коэффициент избыточности по дальности (коэффициент ухудшения разрешающей способности)

$$K_3 = T_{\text{кв. д}} / \tau_{\text{пр}}, \quad (4)$$

где $T_{\text{кв. д}}$ — период укрупненного кванта дальности, $\tau_{\text{пр}}$ — минималь-

ная длительность сигналов с выхода приемного устройства; K_4 — коэффициент амплитудной избыточности

$$K_4 = \log_2 A, \quad (5)$$

где A — необходимое количество различных амплитудных градаций сигнала.

Для МРЛ с параметрами: длительность зондирующего импульса 1 мкс, частота повторения 500 Гц, ширина диаграммы направленности антенны 12—15 мин, выбранные значения укрупненных квантов $\Delta\beta = 2 \div 3^\circ$, $T_{\text{кв.-д}} = 1 \div 3$ км — для масштаба 100 км величины коэффициентов находятся в пределах $K_1 = 10 \div 12$, $K_2 = 3$, $K_3 = 6 \div 20$. При этом требуемая пропускная способность канала оказалась в 180—720 раз меньше по сравнению с применением метода непосредственной передачи (даже без учета коэффициента амплитудной избыточности).

Основной источник ошибок передачи информации кадровым методом — процесс укрупнения элементов зоны обзора. Требование высокой точности и разрешающей способности, с одной стороны, и сокращения пропускной способности канала, с другой стороны, находятся в противоречии. При передаче РЛИ можно найти вариант, близкий к оптимальному, так как:

- имеется возможность предварительной обработки РЛИ (накопление в укрупненных квантах дальности и азимута или угла места и усреднение за несколько периодов импульсов запуска);

- возможен сравнительно невысокий темп обновления информации;

- возможно дальнейшее сокращение избыточности РЛИ с МРЛ в зависимости от ее тактического использования (режим штормоповещения, измерения осадков, работа в ближайшей зоне и т. п.).

Системы передачи по узкополосным каналам строятся на основе заданных, чаще всего двоичных каналов. Модемы (модуляторы-демодуляторы), применяемые в этих каналах, должны обеспечить среднее значение вероятности ошибки символа в пределах от 10^{-4} до 10^{-6} при скоростях от 2400 Бод и выше.

Рассмотрим возможности передачи информации в режиме кругового обзора (КО). Режим КО можно разделить на следующие подрежимы:

- обзор при постоянном угле места (передача картинки под оптимальным углом),

- ступенчатый обзор по определенной программе,

- обзор с постоянным уровнем по высоте.

Передача информации в первых двух подрежимах при предварительном укрупнении квантов по координатам (дальности и азимуту) трудности не представляет. Поэтому рассмотрим подробнее режим кругового обзора с постоянным уровнем по высоте. Введение этого режима автоматически влечет за собой необходимость применения запоминающей электронно-лучевой трубки (ЗЭЛТ) либо цифровой памяти. Для каждого изовысотного слоя применяется отдельный алгоритм по смене (через каждый обзор) положения

антенны по углу места бланкированию выходов приемного устройства вне изовысотного слоя.

Вертикальный разрез для этого режима приведен на рис. 1 в упрощенном виде без учета влияния кривизны земной поверхности. На рисунке приведены данные для слоя $H=5$ км с точностью $\pm 0,5$ км. В этом случае необходимо выполнить программу кругового обзора с автоматической коммутацией положения антенны по углу места через каждый обзор за 15 обзоров по азимуту (до дальности порядка 10 км). При увеличении высоты слоя и требуемой точности количество требуемых обзоров увеличивается. Темп обновления РЛИ увеличивается до 5—6 минут. Введение этого режима может оказаться целесообразным при ширине диаграммы направленности по углу места до 1° и более или при проведении экспериментальных работ по сбору данных для последующей статистической обработки.

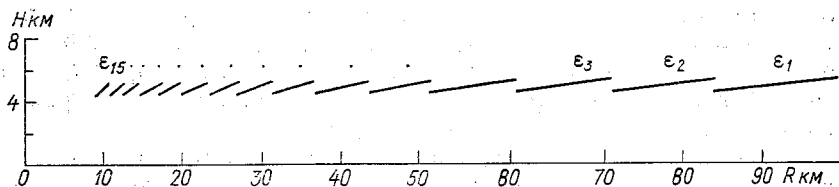


Рис. 1. Вертикальный разрез для режима кругового обзора с постоянным уровнем по высоте.

Оценим требуемые скорости передачи РЛИ в режимах КО. Для исходных данных:

- масштаб $M=100$ км,
- квант площади $\Delta S=0,5 \times 0,5$ км,
- разрядность амплитуды $n_A=3$.

Объем информации, передаваемый на КДП (или другой пункт), составит

$$Q = \frac{(2M)^2}{\Delta S} n_A = 480\,000 \text{ бит (480 кбит)}. \quad (6)$$

Запоминающая электронно-лучевая трубка типа ЛН-19 дает возможность запомнить за обзор объем информации

$$Q_1 = n^2 n_A, \quad (7)$$

где $n \geq 500$ — параметр разрешающей способности ЗЭЛТ (количество линий на диаметр). Для ЗЭЛТ ЛН-19 по (7) $Q_1 = 750\,000 \text{ бит} > Q$ (т. е. применение этой трубки возможно). Время передачи такого объема РЛИ (Q) со скоростью 2400 Бод без учета передачи служебных сигналов и команд составит

$$T_{\text{пер}} = \frac{Q}{2400 \text{ Бод}} = \frac{480\,000}{2400} = 200 \text{ с}, \quad (8)$$

а со скоростью 4800 Бод — 100 с. Однако в режимах ИКО такие точности не требуются. Например, в режиме измерения интенсивности осадков квант площади является переменным (линейно возрастает с увеличением дальности)

$$\Delta S = \Delta R \cdot \Delta \beta, \quad (9)$$

где $\Delta R = 3$ км, $\Delta \beta = 3^\circ$.

Таким образом, возможно применение аппаратуры передачи данных (АПД) со скоростями 2400—4800 Бод для передачи РЛИ в режиме ИКО на КДП и другие посты с темпом обновления РЛИ в пределах 2 мин.

Для масштабов 30 и 300 км (возможны и другие масштабы режима КО) целесообразно не менять структуру кадра передачи, а соответственно уменьшать или укрупнять квант площади.

Для передачи РЛИ предлагается следующая структура кадра малокадровой телевизионной развертки:

- количество элементов в строке 2^{10} (1024),
- количество строк 2^9 (512),
- количество элементов в коде кадра (строки) 24,
- код интенсивности метеоинформации — двоичный безыбыточный,
- разрядность кода интенсивности МИ — 2 или 3.

При этом предполагается использование модемов со скоростями 2400 Бод и выше при вероятности ошибки на знак не более 10^{-5} .

Выбор количества строк и элементов в строке обусловлен стремлением к максимальной простоте устройства временной синхронизации систем передачи. Увеличение объема передаваемой информации за счет служебных сигналов о работоспособности аппаратуры, квитанций об исполнении команд и т. д. не превышает 5—10% от объема РЛИ. Все эти сигналы размещаются в кадре малокадровой развертки.

В режиме вертикального сканирования можно обеспечить передачу РЛИ совместно с введенными на экран индикатора изовысотными метками с дискретностью $\Delta H = 1$ км. В этом случае объем передаваемой информации будет меньше по сравнению с объемом режима кругового обзора.

Для более точного определения высоты и границ облачности можно применить режим вертикального сканирования со специальной аппаратурой обработки. Информацию можно вывести в виде трехразрядного кода интенсивности с квантов площади $\Delta S = \Delta R \times \Delta \varepsilon$, где $\Delta \varepsilon = 12'$, а $\Delta R = 50$ или 100 м. В этом случае оператор КДП должен установить начальные координаты R_0 и ε_0 режима измерений. Для сектора размерами $S = 20^\circ \times 20$ км требуемый объем памяти составит

$$Q = \frac{S}{\Delta \varepsilon \Delta R} n_A = 10^4 \cdot 3 = 30 \cdot 10^3 = 30 \text{ кбит}. \quad (10)$$

При этом может оказаться целесообразным использование специализированных вычислителей, выдающих с высоким темпом обновления картинки

ИДВ для целого ряда аэропортов с высоким темпом взлетов и посадок. Вид РЛИ, поступающей на ЦВМ, представлен на рис. 2.

По РЛИ, накопленной в каждом кванте, усредненной за 5 или более зондирований и представленной в виде 2—4-разрядного кода интенсивности, можно получить более высокую точность определения высоты НГО и границ прослоек облачности по сравнению с точностями режима ИДВ с электронными изовысотными метками.

Возможна проработка системы обработки МИ для ее представления по аналогии с рис. 2 с заменой квантов угла места на кванты высоты ($\Delta H = 20$ или 40 м).

Кванты угла места ($\Delta \epsilon = 12'$)	100	$A_{100,1}$	$A_{100,2}$	$A_{100,3}$	...	$A_{100,n}$	...	$A_{100,100}$
	...	...	...	...	...	...	...	...
	n	$A_{n,1}$	$A_{n,2}$	$A_{n,3}$	...	$A_{n,n}$	...	$A_{n,100}$
	...	...	...	...	...	...	...	...
	3	A_{31}	A_{32}	A_{33}	...	A_{3n}	...	$A_{3,100}$
	2	A_{21}	A_{22}	A_{23}	...	A_{2n}	...	$A_{2,100}$
Кванты дальности ($\Delta R = 50$ или 100 м)	1	A_{11}	A_{12}	A_{13}	...	A_{1n}	...	$A_{1,100}$
	1	2	3	...	n	...	100	

Рис. 2. Вид представления РЛИ, поступающей на ЦВМ.
A — значение интенсивности РЛИ (2—5 разрядов двоичного кода).

Применение режима ИДВ с изовысотными метками одновременно с режимом измерений позволит повысить точность определения координат. При этом добавочный объем информации с устройства обработки, необходимый для передачи с МРЛ на КДП, составляет 20—40 кбит. Это приведет к увеличению времени передачи кадра при скорости передачи 4800 Бод не более чем на 10 секунд.

На этом пути имеется целый ряд трудностей. Одна из них — необходимость наличия аналогового ключа, работающего на частотах 5—10 МГц. Достоинство — отсутствие устройств развертки для записи вертикального разреза в ближней зоне (до 10—15 км) в реальном масштабе времени.

С учетом вышеизложенного на рис. 3 представлена структурная схема аппаратуры преобразования, обработки, передачи и отображения РЛИ с МРЛ.

Из аппаратной кабины МРЛ преобразованная и обработанная РЛИ по отдельной линии связи передается на КДП, где поступает на устройства отображения, документирования и буферной памяти. В буферную память информация поступает выборочно по усмотрению оператора КДП, который селектирует РЛИ по «ценности». С КДП РЛИ можно передавать другим потребителям с помощью АПД со скоростями 2400—4800 Бод по арендованным или коммутируемым каналам тональной частоты или каналам передачи данных.

В заключение можно сделать следующие выводы.

1. Показана возможность передачи радиолокационной метеорологической информации с достаточными для потребителей параметрами по каналам тональной частоты во всех режимах МРЛ.

2. Темп обновления РЛИ ограничивается снизу временем передачи РЛИ за полный обзор по азимуту или углу места, которое составляет 90—120 секунд и ограничивается сверху временем накопления РЛИ в сложных режимах (например, КО с постоянным уровнем о высоте), которое не должно превышать 15 мин, поскольку теря-

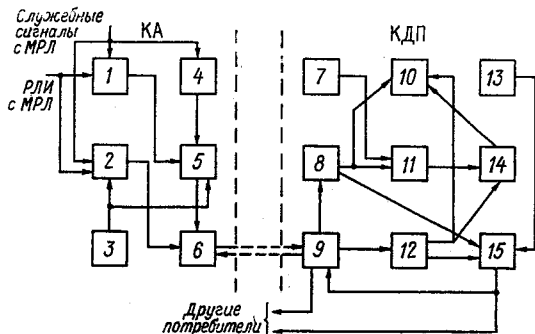


Рис. 3. Структурная схема.

1 — устройство записи РЛИ в КА, 2 — устройство обработки РЛИ в выбранном секторе, 3 — устройство считывания РЛИ в КА, 4 — постоянное запоминающее устройство (например, для хранения изовысотных меток), 5 — запоминающее устройство (аналоговое или цифровое), 6 — АПД КА, 7 — устройство считывания КДП, 8 — устройство записи РЛИ в КДП, 9 — АПД КДП, 10 — устройство документирования, 11 — запоминающее устройство КДП, 12 — устройство обработки РЛИ, 13 — пульт управления, 14 — устройство отображения (видеоконтрольные устройства, телевизоры, экраны-табло и т. п.), 15 — буферная память.

ется «ценность» информации из-за значительного запаздывания представления РЛИ потребителям.

3. Имеется возможность одновременного представления РЛИ на экране индикаторных устройств в традиционной форме (типа экранов ИКО и ИДВ) и экрана-табло для выбранного по усмотрению оператора сектора обзора с повышенными до предельных данными по точности и разрешающей способности. Это представляет особенный интерес для режимов вертикального обзора над ВПП аэропортов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коханский Л. З. Автоматическая передача радиолокационной информации. М., «Сов. радио», 1974.
2. Передача цифровой информации. Под ред. С. И. Самойленко. М., Изд. иностр. лит., 1963.
3. Автоматизация обработки, передачи и отображения радиолокационной информации. Под ред. В. Г. Корякова, М., «Сов. радио», 1975.
4. Проблемы радиолокационной метеорологии. Под ред. Е. М. Сальмана. Л., Гидрометеониздат, 1971.

Я. К. Ильин, Г. Г. Шукин

К ТОЧНОСТИ РАДИОТЕПЛОЛОКАЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ИЗЛУЧЕНИЯ АТМОСФЕРЫ

Задачи исследования радиотеплового излучения атмосферы и особенно его флуктуаций требуют повышения точности в интерпретации радиометрических измерений. В настоящее время достигнуты большие успехи в создании высокочувствительных радиометров и практически имеются возможности измерения величин флуктуаций радиояркой температуры порядка 0,01 К. В связи с этим приобретает большое значение проведение с большой точностью калибровки радиотеплолокационной аппаратуры, а также учет распределения радиояркой температуры внутри главного лепестка диаграммы направленности антенны.

Рассмотрим влияние на точность радиотеплолокационных измерений сглаживания диаграммой направленности антенны реального распределения радиояркой температуры по небосводу.

Воспользуемся известным уравнением антенного сглаживания [3]

$$T_a = T_{\text{гл}}^{\text{я}} \eta (1 - \beta) + T_{\text{б}}^{\text{я}} \eta \beta + T_0 (1 - \eta), \quad (1)$$

где T_a — антенная температура; $T_{\text{гл}}^{\text{я}}$ — осредненная радиояркая температура по главному лепестку диаграммы направленности антенны, $T_{\text{б}}^{\text{я}}$ — осредненная по боковым лепесткам радиояркая температура, η — коэффициент полезного действия антенно-волнового тракта, β — коэффициент бокового рассеяния, T_0 — температура материала антенны и волновода.

Нас интересует радиояркая температура в направлении главного лепестка антенны ($T_{\text{я}}$). Поэтому заменив в формуле (1) $T_{\text{гл}}^{\text{я}}$ на $T_{\text{я}}$ и одновременно введя поправку такого приближения

$$\gamma = T_{\text{я}} - T_{\text{гл}}^{\text{я}}, \quad (2)$$

решим уравнение (1) относительно $T_{\text{я}}$:

$$T_{\text{я}} = [T_a - T_{\text{б}}^{\text{я}} \eta \beta - T_0 (1 - \eta)] \frac{1}{\eta (1 - \beta)} + \gamma. \quad (3)$$

Поправку γ легко найти для безоблачной атмосферы, а также для слоистой облачности. В этих случаях можно пользоваться одномерным приближением, поскольку распределение радиояркостной температуры по небосводу зависит только от угла высоты места наблюдения θ и не зависит от азимута.

Оценим величину γ , когда распределение задано следующим выражением

$$T_{\text{я}} = T_3^{\text{я}} \operatorname{cosec} \theta, \quad (4)$$

где $T_3^{\text{я}}$ — радиояркостная температура в направлении зенита. Диаграмму направленности антенны в главном лепестке аппроксимируем одномерной гауссианой [1]

$$F(\zeta) = \exp[-(a\zeta)^2], \quad \zeta \in \left[-\frac{\zeta_0}{2}, +\frac{\zeta_0}{2}\right], \quad (5)$$

где $\zeta = \theta - \theta_0$, θ_0 — направление главного лепестка диаграммы, a — параметр, характеризующий размер главного лепестка, определяется из условия

$$F\left(\frac{\zeta_0}{2}\right) = \frac{\beta}{D},$$

где D — коэффициент направленного действия, β — коэффициент бокового рассеяния. Подставим выражение (4) и (5) в (2) и используем известное выражение для $T_{\text{гл}}^{\text{я}}$:

$$T_{\text{гл}}^{\text{я}} = \int_{-\frac{\zeta_0}{2}}^{+\frac{\zeta_0}{2}} F(\zeta) T_{\text{я}}(\theta) d\theta / \int_{-\frac{\zeta_0}{2}}^{+\frac{\zeta_0}{2}} F(\zeta) d\theta,$$

$$\gamma = T_3^{\text{я}} \left[\operatorname{cosec} \theta_0 - \int_{-\frac{\zeta_0}{2}}^{+\frac{\zeta_0}{2}} \exp[-(a\zeta)^2] \operatorname{cosec} \theta d\theta / \int_{-\frac{\zeta_0}{2}}^{+\frac{\zeta_0}{2}} \exp[-(a\zeta)^2] d\theta \right]. \quad (6)$$

Для интегрирования можно воспользоваться разложениями функций в степенные ряды:

$$\exp(-x^2) = \sum_{n=0}^{\infty} (-x)^{2n}/n!,$$

$$\operatorname{cosec} x = \sum_{n=0}^{\infty} B_n x^{2n-1} 2(2^{2n-1} - 1)/(2n)!, \quad (7)$$

где B_n — числа Бернулли. Пользуясь этими степенными рядами, поправку γ можно вычислить с необходимой точностью.

На рис. 1 представлены зависимости γ от угла места наблюдения для различных размеров главного лепестка. Из рисунка следует, что при наблюдениях на низких углах места необходимо пользоваться остронаправленными антеннами. В зените поправки достаточно малы и составляют при $T_3^a = 5$ К соответственно $10^{-5}, 2 \times 10^{-5}, 5 \times 10^{-5}, 2 \times 10^{-4}$ К для ζ равных $20', 1', 2', 4'$.

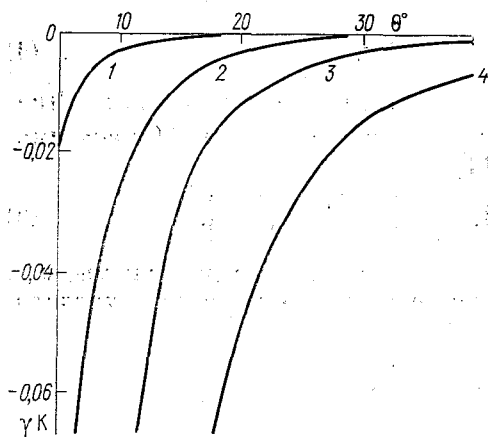


Рис. 1. Зависимость поправки антенного сглаживания от угла места для различных размеров главного лепестка при $T_3^a = 5$ К.

$$F(\zeta) \equiv 1 \quad \zeta \in \left[-\frac{\zeta_0}{2}, +\frac{\zeta_0}{2} \right]$$

1 - $\zeta_0 = 20'$, 2 - $\zeta_0 = 1'$, 3 - $\zeta_0 = 2'$, 4 - $\zeta_0 = 4'$.

Далее оценим относительный вклад погрешностей измерения величин, входящих в формулу (3) в ошибку определения T_j . Для этого воспользуемся максимальной относительной ошибкой определения радиояростной температуры δT_j . Для достаточно малых ошибок можно полагать, что они связаны между собой той же зависимостью, что и дифференциалы величин формулы (3). Взяв логарифмическую производную от (3), после замены дифференциалов малыми ошибками и взятия по модулю все слагаемых, можно получить следующее выражение:

$$\delta T_j = \left| \frac{T_a \delta T_a}{T_j \eta (1 - \beta)} \right| + \left| \frac{T_0 (1 - \eta) \delta T_0}{T_j \eta (1 - \beta)} \right| + \left| \frac{T_6^a \beta \delta T_6^a}{T_j (1 - \beta)} \right| + \left| \frac{(T_0 - T_a) \delta \eta}{T_j \eta (1 - \beta)} \right| + \left| \frac{(T_j - T_6^a - \gamma) \beta \delta \beta}{T_j (1 - \beta)} \right| + \left| \frac{\gamma}{T_j} \delta \gamma \right|, \quad (8)$$

где $\delta T_a, \delta T_0, \delta T_6^a, \delta \eta, \delta \beta, \delta \gamma$ — относительные ошибки измерения соответствующих величин.

Если задать величины $T_0, T_6^a, \eta, \beta, \gamma$, то можно оценить относительные вклады ошибок различных величин в максимальную ошибку определения T_j по весовым коэффициентам k , при соответствующих относительных ошибках величин формулы (8).

На рис. 2 представлены изменения этих весовых коэффициентов в зависимости от значения радиояростной температуры. Как видно из рисунка, наибольший вклад в ошибку δT_j дают неточности в определении η и T_a . По этой причине предпочтительнее методы измерений, не использующие калибровку аппаратуры по антенной температуре и точное значение коэффициентов полезного действия.

Например, в работе [2] рассматривается метод калибровки радиотеплолокационной аппаратуры с радиометром модуляционного

типа по измерениям радиотеплового излучения безоблачной атмосферы в зените и холодного эталона. Используется также горячий эталон, калибруемый в шкале радиоярких температур, служащий своеобразным искусственным зенитом, несущим информацию об изменении коэффициента усиления радиометра. Сначала ка-

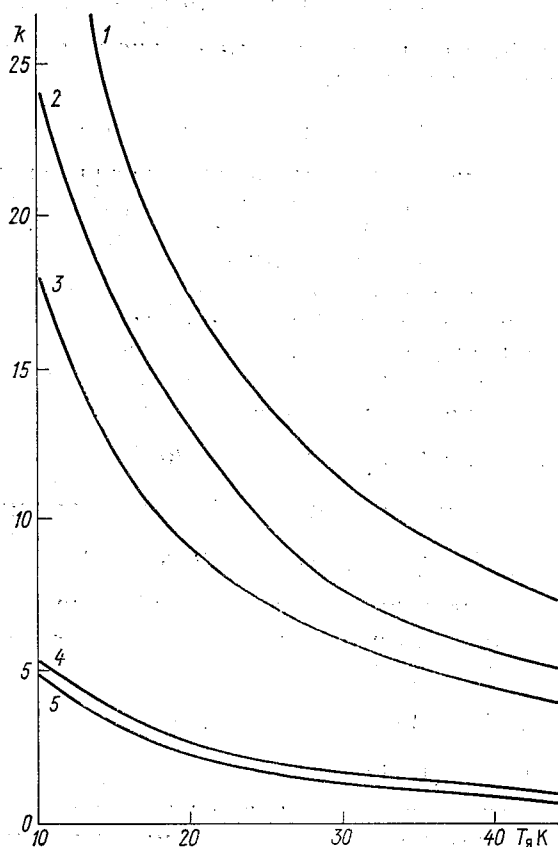


Рис. 2. Зависимость весовых коэффициентов k от $T_{\text{я}}$ для условий $T_0=300$ К, $T_6^{\text{я}}=130$ К, $\eta=0,7$, $\beta=0,3$, $\gamma=0,1$ К.

1) k при $\delta \eta$, 2) k при δT_a , 3) k при δT_0 , 4) k при $\delta T_6^{\text{я}}$,
5) k при $\delta \beta$.

либруется горячий эталон в радиояркой шкале согласно формуле

$$T_{\text{г}}^{\text{я}} = T_{\text{х}} + (T_3^{\text{я}} - T_{\text{х}})(n_{\text{г}} - n_{\text{х}})/(n_3 - n_{\text{х}}), \quad (9)$$

где $T_{\text{х}}$ — антенная температура холодного эталона, $T_{\text{г}}^{\text{я}}$ — температура горячего эталона в радиояркой шкале, $n_{\text{х}}$, $n_{\text{г}}$, n_3 , n — пока-

зания выходного прибора при подключении холодного и горячего эталонов, и антенны, наведенной на зенит и на исследуемую область соответственно. Радиояркая температура исследуемой области неба определяется следующим выражением:

$$T_{\text{я}} = T_{\text{x}} + (T_{\text{г}}^{\text{я}} - T_{\text{x}}) (n - n_{\text{x}}) / (n_{\text{г}} - n_{\text{x}}). \quad (10)$$

Подставляя (9) в (10), получим выражение для $T_{\text{я}}$ через радиояркую температуру зенита:

$$T_{\text{я}} = T_{\text{x}} + (T_{\text{з}}^{\text{я}} - T_{\text{x}}) (n - n_{\text{x}}) / (n_{\text{з}} - n_{\text{x}}). \quad (11)$$

В представленном методе калибровки шкала радиоярких температур создается с помощью двух разнородных эталонов: холодного эталона с антенной температурой T_{x} и безоблачной областью неба в зените с радиояркой температурой $T_{\text{з}}^{\text{я}}$. Это приводит к ошибке в масштабе шкалы радиоярких температур.

Используя понятие антенной температуры, можно получить более корректную формулу для определения радиояркой температуры произвольной области неба ($T'_{\text{я}}$). Сначала калибруем горячий эталон в антенных температурах:

$$T_{\text{г}} = T_{\text{x}} + (T_{\text{з}}^{\text{а}} - T_{\text{x}}) (n_{\text{г}} - n_{\text{x}}) / (n_{\text{з}} - n_{\text{x}}) \quad (12)$$

и теперь используем это значение $T_{\text{г}}$ в формуле для измерений:

$$T_{\text{а}} = T_{\text{x}} + (T_{\text{г}} - T_{\text{x}}) (n - n_{\text{x}}) / (n_{\text{г}} - n_{\text{x}}). \quad (13)$$

Здесь $T_{\text{а}}$, $T_{\text{з}}^{\text{а}}$, $T_{\text{г}}$ — антенные температуры при наведении антенны на произвольную область неба, на зенит и при подключении горячего эталона соответственно:

$$T_{\text{з}}^{\text{а}} = (T_{\text{з}}^{\text{я}} - \gamma_{\text{з}}) \eta (1 - \beta) + T_{\text{б}}^{\text{з}} \eta \beta + T_0 (1 - \eta), \quad (14)$$

$$T_{\text{а}} = (T'_{\text{я}} - \gamma) \eta (1 - \beta) + T_{\text{б}}^{\text{а}} \eta \beta + T_0 (1 - \eta), \quad (15)$$

где γ , $\gamma_{\text{з}}$ — полученные ранее поправки на антенное сглаживание, $T_{\text{б}}^{\text{з}}$ и $T_{\text{б}}^{\text{а}}$ — осредненные по боковым лепесткам распределения радиоярких температур при наведении на исследуемую область и на зенит.

Используя (12) — (15), можно получить выражение для $T'_{\text{я}}$:

$$T'_{\text{я}} = \frac{T_{\text{x}} - T_0 (1 - \eta)}{\eta (1 - \beta)} + \left[T_{\text{з}}^{\text{я}} - \gamma_{\text{з}} + \frac{\gamma}{l} - \frac{T_{\text{x}} - T_0 (1 - \eta)}{\eta (1 - \beta)} \right] l + \frac{\beta}{1 - \beta} (T_{\text{б}}^{\text{з}} l - T_{\text{б}}^{\text{а}}), \quad (16)$$

где $l = \frac{n - n_{\text{x}}}{n_{\text{з}} - n_{\text{x}}}$.

Введем поправку ε :

$$\varepsilon = T - T_{\text{я}}. \quad (17)$$

Подставив в (17) выражения (11) и (16), получим выражение для ϵ :

$$\epsilon = \gamma - l \gamma_3 + \frac{\beta}{1-\beta} (T_0^3 - T_0) + (1-l) \left[\frac{1-\eta}{\eta(1-\beta)} (T_x - T_0) + \frac{\beta}{1-\beta} (T_x - T_0^3) \right]. \quad (18)$$

Видно, что поправкой ϵ можно пренебречь только при малых β и при измерениях радиояркостной температуры вблизи зенита, когда $l \approx 1$ (табл. 1).

Таблица 1

Значения ϵ (К) в зависимости от l и $T_{\text{я}}$

l	$T_{\text{я}}$ К	$\beta=0,1$ $\eta=0,9$	$\beta=0,2$ $\eta=0,9$	$\beta=0,3$ $\eta=0,9$	$\beta=0,1$ $\eta=0,8$	$\beta=0,2$ $\eta=0,8$	$\beta=0,3$ $\eta=0,8$
1	5,7	0	0	0	0	0	0
0,999	6	0,025	0,053	0,088	0,029	0,058	0,098
0,995	7,3	0,12	0,16	0,44	0,14	0,29	0,49
0,99	8,8	0,25	0,53	0,88	0,29	0,58	0,98
0,9	37	2,5	5,3	8,8	2,9	5,8	9,8
0,8	69	5,1	10,6	17,6	5,8	11,6	19,6
0,7	98	7,6	16,5	26,5	8,7	17,4	29,4
0,5	163	12,7	26,4	44,2	14,5	29,0	49,0
0,1	289	22,9	47,6	79,6	26,1	52,3	88,1
0	320	25,4	52,9	88,4	29,0	58,1	97,9

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы.

1. Если известно распределение радиояркостной температуры для фонового радиоизлучения, то можно вводить в измерение точную поправку на антенное сглаживание. Сглаживание антенной распределения по исследуемому источнику можно оценить максимальной ошибкой, получаемой при задании вида распределения радиояркостной температуры. Уменьшения такой ошибки можно добиться путем использования более острых диаграмм направленности.

2. Предпочтительнее методы измерений, не использующие калибровку антенной температуры и η , по крайней мере когда точность их определения невелика.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Краус Дж. Д. Радиоастрономия. М., «Сов. радио», 1973. 456 с.
2. Рабинович Ю. И., Щукин Г. Г., Волков В. Г. О возможных погрешностях абсолютных измерений радиоизлучения. — «Тр. ГГО», 1968, вып. 222, с. 138—150.
3. Цейтлин Н. М. Применение методов радиоастрономии в антенной технике. М., «Сов. радио», 1966.

А. А. Федоров, В. И. Фролов, В. Я. Шапарев

РЕГИСТРАЦИЯ ЭХО-СИГНАЛОВ НА КОМПЛЕКСЕ МРЛС-ЛИДАР

Совмещение радио и оптического каналов обуславливает необходимость последовательной регистрации видеосигналов обоих каналов на одном индикаторе типа А, что уменьшает ошибку считывания амплитудно-временных параметров эхо-сигналов.

Трудности реализации последовательной регистрации эхо-сигналов на индикаторе типа А обусловлены следующими причинами: большая разность частот послышки зондирующих импульсов (ЗИ) радио и оптического каналов, 600 и 0,1 Гц соответственно; появление импульсной помехи в приемном тракте оптического канала длительностью 10 мкс при пиковой амплитуде 10 В в момент излучения радиоимпульса. При проведении работ по сопряжению в качестве индикатора А использовался 2-лучевой осциллограф С8-2 совместно со схемой, приведенной на рис. 1, которая позволяет проводить временное совмещение видеоимпульсов эхо-сигналов двух каналов на одной ЭЛТ осциллографа и исключить запись помехи от радиоканала на сигнале оптического канала.

На транзисторах Т1, 4, 7, 8, 9, 12, 14, 17 собраны токовые усилители; на Т2—3, Т10—11, Т15—16 выполнены одновибраторы; на Т13, 18 — каскады гашения подсветки. Работа схемы заключается в следующем.

В момент излучения ЗИ оптического канала, синхронный импульс (СИ) длительностью 30 нс, амплитудой 60 В с передатчика оптического канала осуществляет запуск развертки осциллографа, запуск одновибраторов на Т2—3, Т15, 16. Одновибратор Т15—16 формирует положительный импульс длительностью 100 мкс, поступающий на каскад гашения подсветки радиоканала и открывающий его. Последний собран на Т18 и представляет собой нормально закрытую схему шунтирования.

В момент формирования импульса развертки осциллографа на модуляторы ЭЛТ через С1 и С2 проходит импульс подсвета положительной полярности, амплитудой 40 В, длительностью, зависящей от скорости развертки. Так как к модулятору параллельно С1 подключен через С3 коллектор нормально закрытого транзистора Т13, имеющего большое сопротивление цепи коллектор-эмиттер, то осу-

цествляется подсветка и запись видеосигнала оптического канала одним из лучей ЭЛТ. В то же время значительное уменьшение сопротивления цепи коллектор-эмиттер $T18$, открытого импульсом одновибратора $T15-16$, приводит к шунтированию амплитуды импульса подсветки до 5 В. Записи информации радиоканала не происходит.

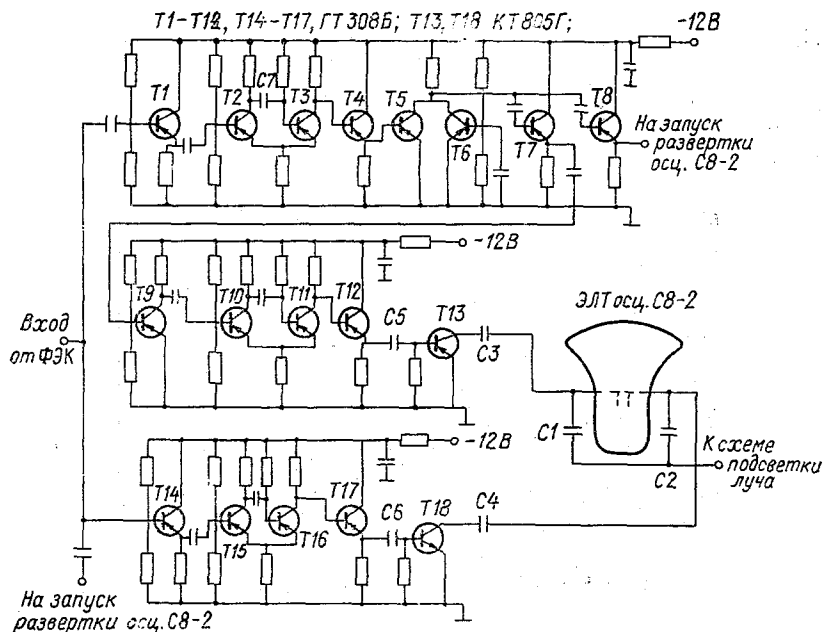


Рис. 1. Схема для последовательного вывода эхо-сигналов оптического и радиоканалов на осциллограф С8-2.

Одновременно СИ оптического канала запускает одновибратор на $T2-3$ формирующий импульс положительной полярности длительностью порядка 3,2 мс, что составляет 1,6 длительности периода следования ЗИ МРЛС. Последний проходит в одно из плеч схемы совпадения, выполненной на $T6$ и $T5$. Импульсы запуска, следующие с блока запуска МРЛС, проходят во второе плечо схемы $И$. Импульсом с выхода схемы $И$, через эмиттерный повторитель $T8$ производится вторичный запуск развертки индикатора и запись видеосигнала радиоканала комплекса. Одновременно импульс со схемы $И$ через фазоинвертор $T9$ запускает одновибратор, собранный на $T10-11$, импульс которого длительностью 100 мкс подается на схему гашения подсветки луча оптического канала $T13$. В результате импульсная помеха, наведенная в приемном тракте оптического канала в момент излучения радиоимпульса, не записывается на ранее зарегистрированный видеосигнал лида. Вид сигналов радио и оп-

тического каналов, совмещенных по времени, зарегистрированных на индикаторе, показан на рис. 2а.

Для увеличения точности отсчета ВНГО, проводимом с помощью радиоканала, применено статистическое накопление сигналов, последнего, которое проводится также на индикаторе осциллографа и осуществляется за счет увеличения длительности импульса, поступающего на схему И с одновибратора на Т2—3. Вид сигналов, полученных в режиме статистического накопления, показан на рис. 2б.

При регистрации информации обоих каналов на ИДВ и ИКО в связи с недостаточной яркостью отраженных сигналов лидара, обусловленной малой частотой посылки ЗИ последнего, вывод видеосигналов обоих каналов осуществлен через электронные коммутаторы.

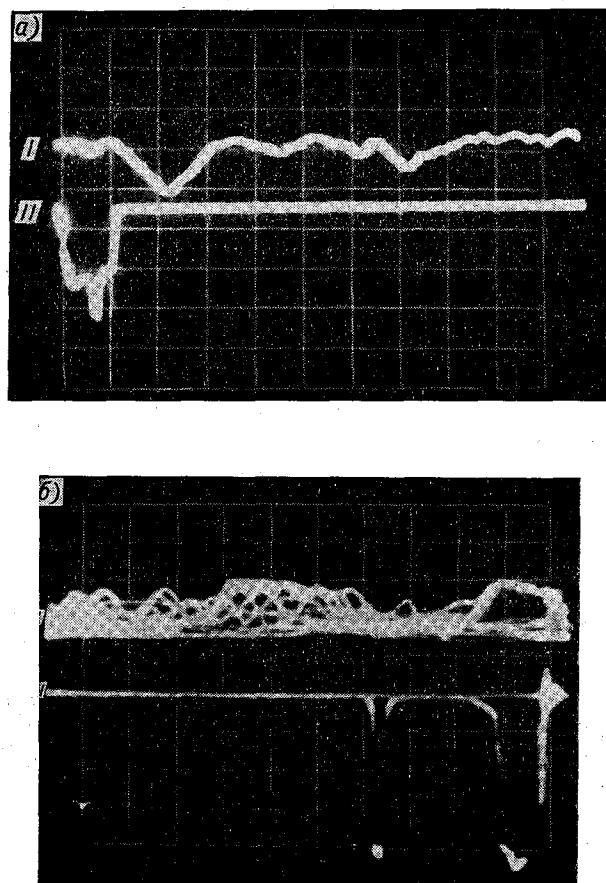
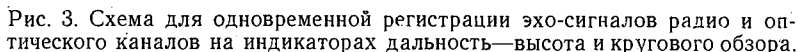


Рис. 2. Эхо-сигналы, зарегистрированные на радио (1) и оптическом (2) каналах в обычном режиме (а) и в режиме статистического накопления (б).

В связи с вышеизложенным для получения отметок дальности от облачных слоев на индикаторах необходимо применение в приемном тракте оптического канала функциональных усилителей



При одновременной индикации видеосигналов двух каналов применена схема (рис. 3), позволяющая запомнить временное положение сигнала от облачности относительно зондирующего импульса и затем воспроизвести его на экранах ИДВ и ИКО необходимое число раз. Этим обеспечивается увеличение яркости сигнальной метки оптического канала на фоне сигналов радиоканала.

137

(Форм. 2) формирует импульс длительностью ~ 200 мс, которая определяет число циклов подсветки. Импульсом одновибратора 2 закрывается клапан I_3 , в результате импульсы с генератора сброса не поступают в цепи сброса триггеров $T_2 1$, $T_2 2$. Импульс запуска МРЛС проходит через открытый клапан I_1 и переводит триггер $T_2 2$ в положение, при котором нормально закрытый клапан I_2 открывается.

Опорный импульс, синхронный с СИ оптического канала, запускает индикатор временных интервалов (ИВИ), начинается отсчет времени, и на входы клапанов I_2 , I_4 подаются тактовые импульсы с частотой следования 15 МГц, калиброванные как по амплитуде, так и по длительности. В момент прихода на вход ИВИ эхо-сигналов от облака отсчет времени прекращается и следование тактовых импульсов на входы интеграторов заканчивается.

За интервал времени начиная с момента посылки ЗИ и до момента прихода эхо-импульса от облака интегратор (Инт. 1) зарядится калиброванными тактовыми импульсами до определенного уровня напряжения, величина которого пропорциональна интервалу времени или расстоянию до облачности. Одновременно Инт. 2 будет заряжаться до уровня напряжения Инт. 1, и в момент сравнения напряжений на интеграторах схема сравнения выдает импульс на Форм. 3, который сбросит Инт. 2 в исходное состояние. Опорным импульсом оптического канала триггер $T_2 1$ переводится в состояние, при котором клапан I_6 открывается. Импульсом, задержанным на 80 мкс относительно опорного импульса оптического канала, триггер $T_2 2$ переводится в исходное состояние. Схема подготовлена к выдаче сигнальных меток.

Импульс запуска МРЛС, синхронный с ЗИ радиоканала, проходит через открытый клапан I_6 и запускает ИВИ. Тактовые импульсы опорной частоты, калиброванные по амплитуде с ИВИ, проходят через открытый клапан I_4 и заряжают интегратор Инт. 2. В момент достижения напряжения на интеграторе Инт. 2 уровня напряжения на опорном интеграторе Инт. 1, схема сравнения выдает импульс на мультивибратор (МВ) подсвета. Так как параметры интеграторов одинаковы, то интервал времени заряда интегратора Инт. 2 будет соответствовать интервалу времени заряда интегратора Инт. 1 и соответствовать расстоянию до облака. МВ подсвета формирует пачку импульсов, поступающих через однокаскадный усилитель на Л1 на смеситель, собранный на лампе Л2. Так как разветвка ИДВ запускается также импульсом запуска МРЛС, то на индикаторе высветится метка, дальность которой будет соответствовать дальности до облака. Импульсом со схемы сравнения запускается Форм. 3, который переводит ИВИ и интегратор Инт. 2 в исходное состояние. Процесс подсветки будет периодически повторяться с частотой следования импульсов запуска МРЛС до тех пор, пока задним фронтом импульса $\tau \approx 200$ мс с одновибратора 2 Форм. 4 не переведет Инт. 1 в исходное состояние. По окончании импульса с одновибратора 2 открывается клапан I_3 и импульсы генератора сброса (ГС) переводят всю схему в исходное состояние.

Вышеописанная схема позволяет осуществить вывод на экран индикатора только одной метки дальности, от самого нижнего слоя облачности. Для осуществления вывода отметок дальностей слоя многослойных структур необходимо использовать регистр дальности. Сущность идеи заключается в следующем. Импульсы эхосигнала, квантованные по уровню 0 и 1, записываются в регистр, после этого считываются на экраны индикатора дальности или кругового обзора число раз, необходимое для получения точек, яркость которых превышает яркость от видеосигналов радиоканала МРЛС. Считывание проводится в моменты следования зондирующих импульсов МРЛС.

В виду масштаба развертки индикаторов МРЛС эффективность вывода отметок дальности сигналов от лидара мала. Для увеличения последней необходимо увеличить скорость развертки электронно-лучевых трубок, но последнее связано с определенными трудностями. Использование же регистра дальности позволит изменять масштаб экрана ЭЛТ в любых пределах. Для этого считывание регистра дальности информации, записанной в реальном масштабе времени, необходимо проводить с требуемой скоростью, в то время как скорость развертки будет постоянна.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зуев В. Е. Лазерное зондирование атмосферы. — «Успехи физ. наук». 1972, 107. № 3.
2. Росс М. Лазерные приемники. М., «Мир», 1969.
3. Самохвалов И. В., Шапарев В. Я. Лидарный облакомер. Тезисы докладов 3-го Всесоюзного симпозиума по лазерному зондированию атмосферы. Томск, 1974.

В. С. Жупахин, К. С. Жупахин

К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ЗАВИСИМОСТИ КОЭФФИЦИЕНТА ДИФФУЗНОСТИ ЭХО-СИГНАЛОВ ОТ ДЛИНЫ ВОЛНЫ И ХАРАКТЕРА ГИДРОМЕТЕОРОВ

Искомую зависимость можно получить, используя результаты полученные в [1]. Действительно, полагая, что при малых углах возвышения антенны среднееквадратическое значение отклонения фазы эхо-сигнала (σ_θ) связано со среднееквадратическим значением отклонения падающих гидрометеоров от прямолинейных (отвесных) траекторий (σ_r) простым соотношением:

$$\sigma_\theta = \frac{2\pi}{\lambda} \sigma_r \quad (1)$$

и несколько иначе, переписывая полученные в [1] результаты имеем

$$[\sigma_\theta]^{-1} = \frac{\lambda}{2\pi\sigma_r} = \left[\frac{\pi^2}{3} + 4\pi \sum_{l=1}^{\infty} (-1)^l \frac{C_l}{l^2} \right]^{-1/2}, \quad (2)$$

где

$$C_l = \frac{\Gamma(l/2 + 1) \varphi_g^{l/2}}{\pi l!} {}_1F_1 \left(\frac{l}{2}; l + 1; \varphi_g \right);$$

Γ — гамма функция; λ — длина волны; ${}_1F_1$ — вырожденная гипергеометрическая функция [2]; $\varphi_g = m_{1s}^2 / M_{2s}$ — коэффициент диффузности эхо-сигнала; m_{1s} и M_{2s} — соответственно первый и второй центральный моменты огибающей эхо-сигнала.

На рис. 1 представлен график теоретической зависимости φ_g от $(\sigma_\theta)^{-1}$, построенный на основании выражения (2).

Ввиду того что величина σ_r определяется характером падения гидрометеоров, который в свою очередь в значительной степени зависит от их размеров и формы, то можно сделать вывод, что комплексный параметр $(\sigma_\theta)^{-1}$ отражает зависимость от длины волны и характера гидрометеоров. Таким образом, рис. 1 отражает искомую зависимость коэффициента диффузности φ_g эхо-сигнала от длины волны λ и характера гидрометеоров σ_r .

В табл. 1 сведены полученные авторами при исследовании различных осадков экспериментальные значения φ_g и рассчитанные по ним характерные значения σ_θ и σ_r . Здесь следует отметить, что экспериментальные значения φ_g должны быть больше теоретических (рассчитанных для случая равновеликих частиц — гидрометеоров) в силу большего вклада в радиолокационную отражаемость наиболее крупных гидрометеоров. Вследствие этого рассчитанные по ним значения σ_θ и σ_r получаются соответственно меньше теоретических значений.

Теперь, имея эти результаты в виде теоретической зависимости коэффициента диффузности φ_g от длины волны λ и характера гидрометеоров σ_r (рис. 1), а также таблицы с экспериментальными значениями φ_g и рассчитанными по ним значениями σ_θ и σ_r , можно сделать некоторые самые общие выводы.

1. Теоретические значения коэффициента диффузности эхосигнала должны возрастать с увеличением длины волны метеорологического радиолокатора и падать с ростом среднеквадратического значения отклонения гидрометеоров от их прямолинейных (отвесных) траекторий;

2. Экспериментальные значения коэффициента диффузности эхосигнала определяются характером гидрометеоров и растут с ростом размеров частиц (интенсивности) осадков. Наибольшие значения

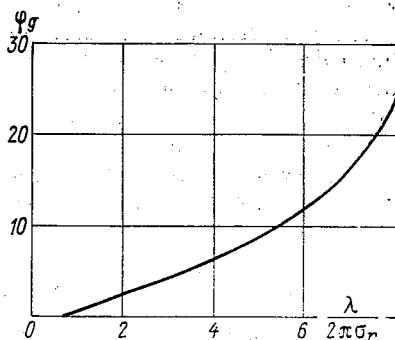


Рис. 1. Зависимость коэффициента диффузности эхосигнала от длины волны и характера гидрометеоров.

Таблица 1

Характеристика	Вид осадков				
	Снег	Обложные	Ливень	Ливень с грозой	Град
φ_g [—], $\lambda=3$ см	0	0—7	2—13	13—25	20—28
σ_θ рад.	2	0,2—2	0,17—0,67	0,13—0,17	0,12—0,15
σ_r ом	1	0,1—1	0,09—0,33	0,07—0,09	0,06—0,075

коэффициента диффузности эхосигнала получены для ливней с грозой и града. Рассчитанные по этим значениям коэффициента диффузности значения σ_θ и σ_r также зависят от характера гидрометеоров и падают с ростом размеров частиц (интенсивности) осадков, что в первом приближении согласуется с теорией.

Более глубокий теоретический анализ и получение расчетных значений σ_r для различных по виду гидрометеоров представляют

большой практический интерес. Большое практическое значение имеет также и экспериментальное исследование зависимости коэффициента диффузности эхо-сигнала от длины волны метеорологического радиолокатора $\varphi_g(\lambda)$. В этой связи сошлемся на очень интересный результат, полученный в работе [3], где при работе с радиолокатором метрового диапазона волн отмечена общая закономерность изменений амплитудных значений радиозоо метеоцелей, состоящая в их относительном постоянстве. Так как относительно постоянство амплитудных значений эхо-сигнала достигается именно при больших значениях его коэффициента диффузности, то обнаруженную в [3] закономерность, видимо, можно объяснить описанным нами явлением отклонения эхо-сигналов от модели Релея для ансамбля частиц [4, 5]. В этом случае это является в какой-то мере подтверждением верности хода полученной здесь теоретической зависимости $\varphi_g(\lambda)$.

Полученные результаты могут быть распространены и на другие объемно- и поверхностно-распределенные цели, характеристики которых подвержены влиянию поля турбулентности (водная поверхность, лес).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жупахин К. С., Жупахин В. С. К вопросу оценки коэффициента диффузности квазистационарных эхо-сигналов. — «Тр. ГГО», 1971, вып. 262, с. 134—138.
2. Градштейн И. С., Рыжик И. М. Таблица интегралов, рядов и произведений. М., Физматгиз, 1962.
3. Гальперин С. М. и др. Обнаружение грозовых облаков с помощью РЛС метрового диапазона. — «Тр. ГГО», 1975, вып. 328, с. 56—63.
4. Жупахин К. С. К явлению отклонения эхо-сигналов от модели Релея. — «Тр. ГГО», 1975, вып. 328, с. 129—140.
5. Жупахин К. С. К определению когерентности эхо-сигналов. — «Тр. ГГО», 1975, вып. 328, с. 141—146.

В. С. Жупахин, К. С. Жупахин

ОБ ОДНОЙ СХЕМЕ ФОРМИРОВАТЕЛЯ ИМПУЛЬСОВ РЕГУЛИРУЕМОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ

Введение

Известны формирователи импульсов регулируемой длительности, выполненные на транзисторном блокинг-генераторе с регулируемым сопротивлением в эмиттерной (или базовой) цепи и сопротивлением в коллекторной цепи, в базовую и коллекторную цепи транзистора которого включены соответствующие обмотки трансформатора; с диодом в цепи положительной обратной связи, включенным последовательно с базовой обмоткой, зашунтированной диодом, имеющие также обмотку подмагничивания сердечника импульсного трансформатора, подключенную к источнику управляющего напряжения [1, 2, 6, 7].

Однако известные формирователи импульсов на блокинг-генераторе не позволяют расширить пределы регулирования длительности формируемых импульсов как в сторону их удлинения, так и в сторону укорочения; требуют относительно больших величин импульсных сигналов для своего запуска; имеют недостаточную величину крутизны фронтов импульсов при их больших длительностях и значительных величинах хранирующих емкостей.

Ниже описывается схема формирователя импульсов с регулируемой длительностью [3], построенная на разработанной авторами схеме блокинг-генератора с малым запускаящим напряжением [4], в основе которой лежит описанный авторами способ обрыва цепи обратной связи с помощью коммутирующего диода [5].

Описание схемы

Схема формирователя импульсов с регулируемой длительностью изображена на рис. 1.

Формирователь импульсов содержит импульсный трансформатор Tr с тремя обмотками (возбуждения W_b , связи W_c , подмагничивания W_n , транзистор $T1$, элемент регулируемого сопротивления R_z , коммутирующий диод $D1$, постоянные сопротивления $R1$ и $R2$,

коммутатор полярности $KП$ и источник управляющего напряжения E_y . На схеме указаны: E'_y — источник управляющего напряжения к элементу регулируемого сопротивления R_3 , u_1 — входной импульсный сигнал; I_n — ток подмагничивания.

В исходном состоянии транзистор $T1$ открыт, а коммутирующий диод $D1$ закрыт. Это обеспечивает усиление потока коротких и малых по величине импульсов, подлежащих формированию по длительности, вследствие чего чувствительность формирователя резко

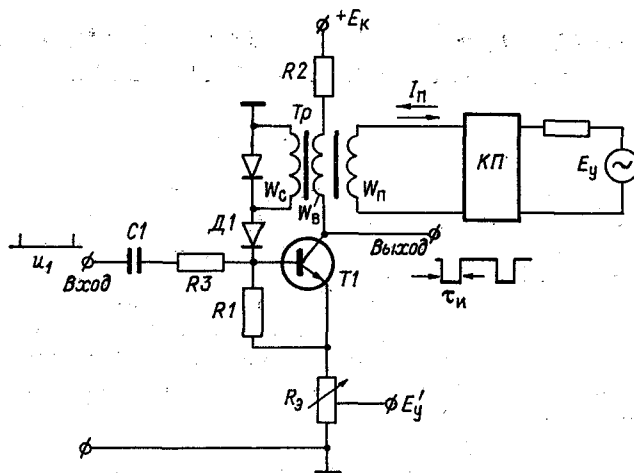


Рис. 1. Схема формирователя импульсов.

(в сотни — тысячи раз) возрастает, повышается и крутизна фронтов формируемых импульсов [4, 5]. С поступлением на вход формирователя импульса запуска в схеме развивается блокинг-процесс, что и обеспечивает формирование выходного прямоугольного импульса.

Основные характеристики схемы

Длительность формируемого схемой импульса τ_n определяется сопротивлением $R_3(E_y)$ элемента регулируемого сопротивления R_3 (например, коллекторно-эмиттерного перехода дополнительного транзистора), величиной и направлением тока подмагничивания $I_n(E_y)$ через обмотку подмагничивания импульсного трансформатора Tr и числом ее витков W_n :

$$\tau_n = f_1(E'_y, I_n, W_n). \quad (1)$$

Ввиду того, что величина I_{Π} является функцией от E_y , т. е. $I_{\Pi}(E_y)$, то при условии $W_{\Pi} = \text{const}$, имеем

$$\tau_{\Pi} = f_2(E_y', E_y). \quad (2)$$

Изменение величины сопротивления элемента регулируемого сопротивления R_a совместно с изменением направления и величины тока подмагничивания I_{Π} через обмотку подмагничивания W_{Π} им-

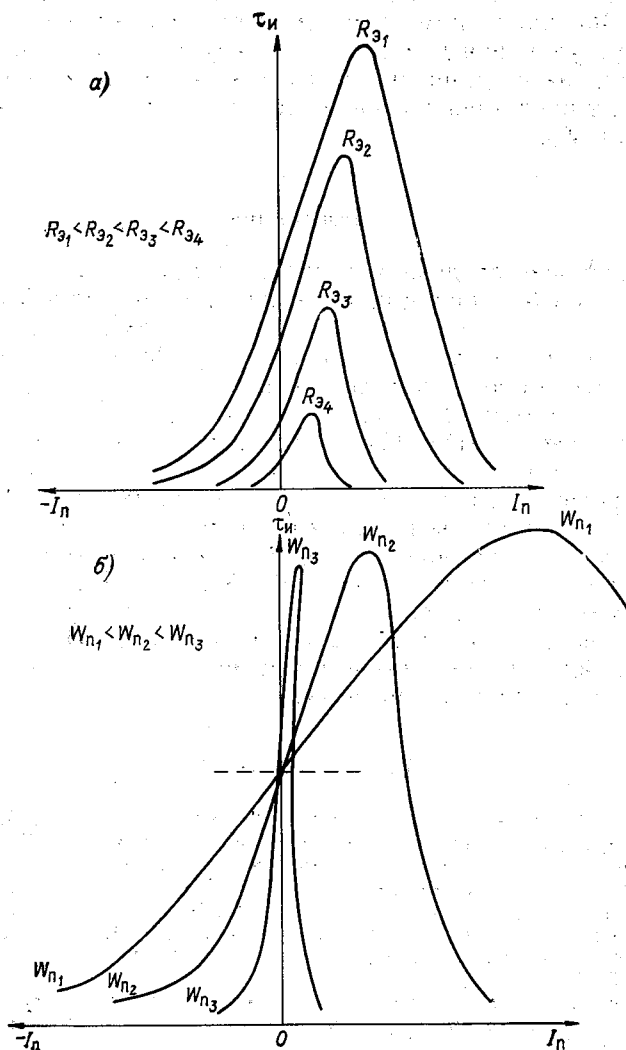


Рис. 2. Семейство характеристик $\tau_{\Pi}(I_{\Pi})$ в зависимости от W_{Π} и R_a .

а) $W_{\Pi} = \text{const}$, $R_a = \text{var}$; б) $W_{\Pi} = \text{var}$, $R_a = \text{const}$

пульсного трансформатора Tr от источника управляющего напряжения E_y позволяет плавно регулировать длительность генерируемых формирователем импульсов в более широких пределах: от нескольких наносекунд до сотен миллисекунд. Такие значительные пределы регулировки длительности генерируемых формирователем импульсов получаются как за счет изменения степени насыщения транзистора $T1$, так и за счет изменения магнитной проницаемости сердечника и индуктивностей обмоток импульсного трансформатора Tr . При найденном схемном решении возможно расширение пределов регулировки длительности импульсов t_n как в сторону их укорочения, так и удлинения через изменение соотношения L/R .

На рис. 2 представлено семейство характеристик $t_n(I_n)$ при различных R_a и W_n .

Заключение

Имея широкие пределы регулирования длительности формируемых импульсов (от единиц наносекунд до сотен миллисекунд) и высокую чувствительность к запускающим импульсам (единицы милливольт), а также высокую крутизну фронтов формируемых импульсов (сотни вольт в микросекунду), описываемый формирователь импульсов регулируемой длительности, как видно из функциональных выражений (1), (2) и рис. 2, может быть весьма универсальным по применению.

Формирователь может найти широкое применение в импульсной технике и использоваться в схемах временной (широотно-импульсной) модуляции, в устройствах задержки импульсных сигналов для согласования с исполнительными устройствами, в качестве преобразователя, умножителя, усилителя постоянного или медленно меняющегося напряжения и т. п. Можно надеяться, что описанный формирователь найдет применение и для целей обработки и регистрации радиометеорологических сигналов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Г л е б о в Б. А. Блокинг-генератор. Авторское свидетельство № 294237. — «Бюлл. открытий, изобр., промышл. образцов и товарных знаков», 1971, № 6.
2. Г о л у б е в В. И. Электронное регулируемое устройство задержки электрических импульсов. Авторское свидетельство № 209536. — Бюлл. открытий, изобр., промышл. образцов и товарных знаков, 1968, № 5.
3. Ж у п а х и н В. С. Формирователь импульсов. Авторское свидетельство № 472445. — «Бюлл. открытий, изобр., промышл. образцов и товарных знаков», 1975, № 20.
4. Ж у п а х и н В. С., Ж у п а х и н К. С. Блокинг-генератор в ждущем режиме с малым запускающим напряжением. — «Вопросы радиоэлектроники», 1961, сер. 10, вып. 4.
5. Ж у п а х и н В. С., Ж у п а х и н К. С. Об одном способе разрыва цепи обратной связи в некоторых автоматических электронных устройствах. — «Радиотехника», 1963, т. 18, № 8.
6. Патент США, № 2810080, кл. 307-88.5.
7. Патент ГДР, № 71134, кл. 21a¹, 36/02, 1970.

В. С. Жупахин, К. С. Жупахин

ОБ ОДНОЙ СХЕМЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ИМПУЛЬСНОГО РЕЛЕ С РЕГУЛИРУЕМЫМ ПОРОГОМ

1. Введение

В практике обработки и регистрации радиометеорологических сигналов и во многих других областях импульсной техники часто приходится решать задачу регистрации и фиксации импульсных электрических или неэлектрических сигналов, малых по длительности и мощности (например, импульсов напряжения, длительность которых составляет доли микросекунды, а значение — единицы милливольт).

Обычно для этого используются преобразующие приборы, усилительные и формирующие блоки, служащие для согласования входного воздействия по виду, форме и мощности с регистратором, т. е. с электромагнитным и электромеханическим счетчиком, реле, шаговым искателем или другим подобным устройством. Такие решения достаточно сложны и их применение иногда нежелательно.

Известно техническое решение, повышающее чувствительность импульсных электронных реле, основанное на использовании положительной обратной связи, образованной с помощью дополнительной обмотки связи [5]. Существенной особенностью этого решения, в отличие от других известных импульсных реле, является использование переходных процессов в самом электромагнитном реле для создания положительной обратной связи в усилителе. Это решение позволяет повысить чувствительность электронного реле к кратковременным импульсным сигналам.

Однако импульсные реле, построенные по данному решению, могут работать от импульсных сигналов, значение которых не менее нескольких вольт, а длительность не менее нескольких микросекунд [6]. Эти реле не позволяют производить управление в широких пределах величиной пороговой чувствительности, требуют для своего осуществления специальных реле или регистраторов с дополнительной обмоткой связи, имеют недостаточную нагрузочную способность. Функциональные возможности их весьма ограничены.

Указанные недостатки или ограничивают возможности применения данных импульсных реле, или требуют применения дополнительных усилителей и формирующих устройств, разработки и изготовления реле или регистраторов с дополнительными обмотками обратной связи.

Ниже описывается импульсное реле [3], свободное от указанных недостатков, построенное на основе блокинг-генератора с использованием разработанного авторами способа разрыва цепи положительной обратной связи в автоматических устройствах [1, 2, 4].

2. Описание схемы и ее работа

На рис. 1 представлена схема импульсного реле, обладающего повышенной чувствительностью к кратковременным импульсным сигналам, возможностью управления в широких пределах величины его пороговой чувствительности, повышенной нагрузочной спо-

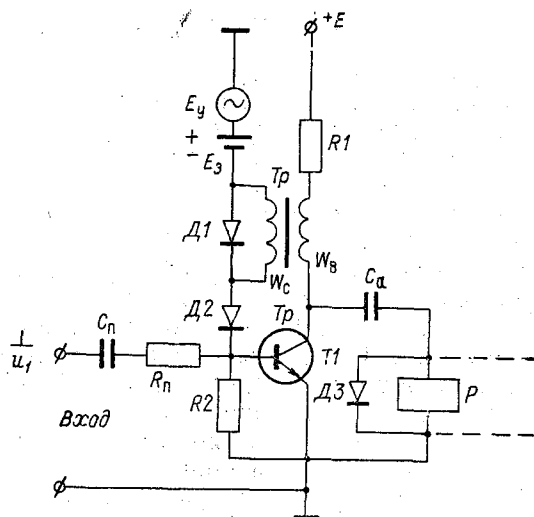


Рис. 1. Схема чувствительного импульсного реле с регулируемым порогом.

собностью и возможностью использования практически любых типов реле и регистраторов.

Это импульсное реле (см. рис. 1) состоит из активного элемента, например транзистора $T1$, импульсного трансформатора Tp с двумя обмотками (возбуждения — W_b , связи — W_c), коммутирующего диода $D2$, двух постоянных резисторов $R1$, $R2$, источника управляющего напряжения E_y , источника смещения (E_3), шунтирующих диодов $D1$, $D3$, электромагнитного реле (или резистора) P и аккумуляторного конденсатора C_a .

Работа схемы описываемого импульсного реле происходит следующим образом. В исходном состоянии активный элемент (например, транзистор) схемы приоткрыт, коммутирующий диод заперт напряжением ($E_a + E_y$); аккумулирующий конденсатор заряжен до напряжения, несколько меньшего напряжения источника питания E . С приходом на вход импульсного реле малого по величине и длительности импульсного сигнала u_1 он усиливается транзистором $T1$ и через обмотку связи W_c импульсного трансформатора Tr представляется к запертому коммутирующему диоду $D2$. Если величина напряжения u_{W_c} окажется больше запускаящего диод напряжения ($E_a + E_y$), то диод $D2$ оказывается в проводящем состоянии и цепь обратной связи замыкается. При этом возникает регенеративный процесс, вызывающий резкое нарастание тока в цепи обмотки возбуждения W_b до полного открытия активного элемента $T1$ (транзистора). После этого ток I_{W_b} держится постоянным в течение времени установления магнитного потока в сердечнике (τ_y), которое зависит от величины индуктивности обмотки возбуждения (L_{W_b}) и активного сопротивления цепи возбуждения (R_b).

Глубина обратной связи выбирается практически в пределах отношения $W_b/W_c = 1 \div 3$. Аккумулирующий конденсатор C_a разряжается через проводящий активный элемент $T1$ и обмотку электромагнитного реле (или резистора) P , вызывая его срабатывание.

3. Основные особенности и характеристики схемы

Использование запертого диода $D2$ для обрыва цепи положительной обратной связи (см., например, [2]) дает то преимущество, что могут быть использованы усилительные свойства активного элемента, а для обеспечения нормальной (устойчивой) работы устройства требуется незначительное запирающее напряжение смещения E_a , которое может составлять всего несколько десятых долей вольта, вследствие чего чувствительность импульсного реле резко возрастает и может быть оценена соотношением

$$U_{\text{вх. зап}} = \frac{E_a + E_y}{kn}, \quad (1)$$

где k — коэффициент усиления (транзисторной) схемы, $n = W_c/W_b$ — коэффициент передачи импульсного трансформатора.

Величина этого порогового импульсного напряжения, как это следует из выражения (1), может изменяться в широких пределах путем изменения величины E_y источника управляющего напряжения.

Максимальный динамический диапазон регулировки величины пороговой чувствительности описываемого импульсного реле, как легко показать, может быть определен соотношением:

$$D_{\text{макс}} \approx 20 \lg \frac{E}{E_a} \quad (2)$$

и достигать 60 дБ и более. При этом легко выполняется и необходимое условие для срабатывания практически любого электромагнитного исполнительного устройства

$$\tau_p > t_{cp} < \tau_y, \quad (3)$$

где t_{cp} — время срабатывания исполнительного устройства; $\tau_p = C_a(r_{кз} + r_{эму})$ — время разрядки аккумулирующего конденсатора; $\tau_y \approx L_B/R_B$ — время установления магнитного потока; $r_{кз}$ — сопротивление, например коллекторно-эмиттерного перехода транзистора; $r_{эму}$ — сопротивление обмотки электромагнитного устройства; L_B — индуктивность обмотки возбуждения импульсного трансформатора; R_B — сопротивление цепи возбуждения.

Достаточно большой оказывается и нагрузочная способность импульсного реле, так как при выборе, например, транзистора с малой величиной $r_{кз}$, ток разряда может быть весьма большим

$$I_p \approx \frac{E}{r_{кз} + r_{эму}}. \quad (4)$$

Заключение

Было собрано и испытано несколько действующих макетов описанного импульсного реле. Эти реле обладали высокой чувствительностью к запускающим импульсным сигналам ($u_{вх. зап} \approx 1 \div 5$ мВ), широкими пределами регулировки величины порогового напряжения (50—60 дБ), высокой нагрузочной способностью (обеспечивалась возможность подключения практически любого электромагнитного исполнительного устройства), хорошей стабильностью указанных характеристик с изменением температуры, времени и питающего напряжения.

Можно надеяться, что описанная схема чувствительного импульсного реле с регулируемым порогом найдет применение при обработке и регистрации радиометеорологических сигналов и в других областях импульсной техники.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жупахин К. С., Жупахин В. С. Блокинг-генератор в ждущем режиме с малым запускающим напряжением. — «Вопросы радиоэлектроники», 1964, сер. X, вып. 4.
2. Жупахин К. С., Жупахин В. С. Об одном способе разрыва цепи обратной связи в некоторых автоматических электронных устройствах. — «Радиотехника», 1963, т. 18, № 8.
3. Жупахин В. С. Импульсное реле. Авторское свидетельство № 488323. — «Бюлл. открытий, изобр., промышл. образцов и товарных знаков», 1975, № 38.
4. Жупахин В. С., Жупахин К. С. Об одной схеме формирователя импульсов регулируемой длительности. — См. наст. сборник.
5. Каплан М. И., Федоров В. Г. Электронное реле. Авторское свидетельство № 117973. «Бюлл. открытий, изобр., промышл. образцов и товарных знаков», 1959, № 3.
6. Каплан М. И., Любровский И. А., Федоров В. Г. Импульсные электронные регистраторы. — «Приборостроение», 1965, № 8.

СОДЕРЖАНИЕ

С. Б. Гашина, Т. В. Иванова, А. Г. Линева, В. А. Петрушевский. Результаты испытаний аппаратуры, автоматизирующей процесс получения радиолокационной информации ААОМ, в БССР	3
С. Б. Гашина, Б. Ш. Дивинская, А. Г. Линева. О связи радиолокационных характеристик, полученных комплексом МРЛ—ААОМ, с некоторыми метеорологическими параметрами	6
Г. Б. Брылёв, Н. С. Дорожкин, А. Е. Рыбакова, А. А. Федоров. Сравнение данных миллиметрового канала метеорологической радиолокационной станции (МРЛС) и данных самолетного зондирования в границах облачности в радиусе 20 км	12
Г. Б. Брылёв, В. Е. Зуев, И. В. Самохвалов, В. Д. Степаненко, А. А. Федоров, В. Я. Шапарев. Об измерении параметров облаков комплексом МРЛС-лидар	22
В. А. Ковалёв, Е. Е. Рыбаков, Г. Г. Щукин. Некоторые характеристики лидарных сигналов при низкой облачности	32
В. К. Завируха, В. А. Сарычев, В. Д. Степаненко, Ю. Н. Щепкин. Исследование характеристик рассеяния метеорологических и орнитологических объектов в безэховых камерах	40
Л. П. Бобылёв, А. О. Изюмов, Г. Г. Щукин. Флуктуации оптической толщины и радиояркой температуры атмосферы в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах волн	47
Л. П. Бобылёв, М. А. Васищева, Г. Г. Щукин. Определение интегральных параметров влагосодержания облачной атмосферы непосредственно по значениям радиояркой температуры	59
Н. Д. Попова, Г. Г. Щукин. К методике определения профиля водности в облаках методом пассивно-активной радиолокации	68
Б. М. Воробьев, Г. Я. Наровлянский, В. Д. Степаненко. К расчету вероятности затухания сантиметровых радиоволн в дождях для отдельных районов ЕТС	72
В. В. Березкин, М. Р. Ватьян, Е. Д. Либровский. Исследование некоторых радиолокационных параметров ливневых и градовых облаков на Северном Кавказе	80
М. Бадарч (МНР). Радиолокационные характеристики грозных облаков для условий МНР	86
М. Бадарч (МНР). Радиолокационный способ распознавания гроз	89
Г. Б. Брылёв, Г. Л. Низдойминова. О повышении заблаговременности прогноза перемещения небольших зон радиозо с учетом данных аэрологического зондирования	92
Б. Ш. Дивинская. Обоснование численных алгоритмов распознавания облачных систем и их трансформации	95
Б. Ш. Дивинская, Т. В. Иванова. Особенности совместного использования данных метеорологических радиолокаторов (МРЛ) и гидрометеорологических станций (ГМС)	100
Г. Б. Брылёв, Г. И. Куликова. О критическом контроле данных сетевых МРЛ по статистическим характеристикам радиозо опасных явлений	106
Н. Д. Попова. О параметризации вертикального распределения водности	

облаков с помощью естественных составляющих	113
А. А. Федоров. Об оптимальном приеме сигналов от метеоцелей	118
Ф. Д. Бруссер, А. А. Федоров. Передача радиолокационной метеорологической информации	121
Я. К. Ильин, Г. Г. Шукин. К точности радиотеплолокационных измерений излучения атмосферы	128
А. А. Федоров, В. И. Фролов, В. Я. Щапарев. Регистрация эхосигналов на комплексе МРЛС-лидар	134
В. С. Жупахин, К. С. Жупахин. К определению зависимости коэффициента диффузности эхосигналов от длины волны и характера гидрометеоров	140
В. С. Жупахин, К. С. Жупахин. Об одной схеме формирователя импульсов регулируемой длительности	143
В. С. Жупахин, К. С. Жупахин. Об одной схеме чувствительного импульсного реле с регулируемым порогом	147

Труды ГГО, вып. 395

МЕТОДЫ АКТИВНОЙ И ПАССИВНОЙ РАДИОЛОКАЦИИ В МЕТЕОРОЛОГИИ

Редактор Л. И. Штанникова
Технический редактор Н. Ф. Грачева
Корректор Г. Н. Римант

ИБ № 658

Сдано в набор 10/1 1977 г. Подписано к печати 12/VII 1977 г. М-20240. Формат 60×90^{1/16}, бум. тип. № 1. Печ. л. 10. Уч.-изд. л. 10,09. Тираж 550 экз. Индекс МЛ-183. Заказ № 149. Цена 76 коп. Гидрометеониздат. 199053. Ленинград, 2-я линия, д. 23.

Сортавальская книжная типография Управления по делам издательств, полиграфии и книжной торговли Совета Министров Карельской АССР, Сортавала, Карельская, 42.